



Forsuaret

Bacheloroppgave

OPG3301

Predefinert informasjon

Startdato:	26-11-2021 09:00	Termin:	2021 HØST
Sluttdato:	10-12-2021 20:00	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Oppgave		
Flowkode:	1627 OPG3301 1 O 2021 HØST		

Deltaker

Naun:	Bendik Andersen
Kandidatnr.:	
FHS-id:	bandersen@mil.no, beandersen@mil.no

Gruppe

Gruppenavn:	Enmannsgruppe
Gruppenummer:	12
Andre medlemmer i gruppen:	Deltakeren har innlevert i en enkeltmannsgruppe



Sjøkrigsskolen

Syngene propell

– Studie av anti-syngekantsegenskaper –

av

Bendik Andersen

Lvert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Antall ord: 7383

Innlevert: Desember 2021

Godkjent or offentlig publisering

Ugradert – internt. Skal ikke videreformidles utenfor forsvarssektoren.

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.

Opgaver 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: 10 – 12- 2021

Bendik Andersen

Bendik Andersen

Forord

Denne bacheloroppgaven, som inngår i studiet militære studier med fordypning i maskinfag ved Sjøkrigsskolen er skrevet av Bendik Andersen.

Det forventes at leseren har relevant kompetanse og utdanning på bachelornivå eller høyere.

Oppgaven studerer hvorvidt en anti-syngkant kan eliminere propellsyning, redusere styrken til virvelavrivningene som oppstår på propellens følgende kant, og om en anti-syngkant påvirker propellens ytelse.

Stor takk til Marlene Nikolaysen og Irmelin Moen for korrekturlesning.

Stor takk til Lars Olav Tveita for introduksjon og oppkobling av hydrofonen.

Stor takk til Henrik Johannessen som presenterte problemstilling og har bistått med veiledning gjennom oppgaven.

Og til slutt en stor takk til Gisle Strand som har gitt meg opplæring i kavitasjonstunellen, oppfølging og konstruktive innspill.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 10-12-2021

Bendik Andersen

Sammendrag (med konklusjoner)

Denne oppgaven tar for seg å studere fenomenet «syngende propell». Målet er å fastslå hvilken effekt anti-syngekanter har for å potensialet for å fjerne uønsket støy fra propellene under drift, og om en anti-syngekant påvirker propellens ytelse.

For å finne ut av det har det blitt designet og 3D-Printet to stk propeller. En vanlig propell og en propell med en 60° avfaset anti-syngekant på propellbladets sugeside.

Det har vist seg at skolens 3D-printere kan levere propeller av god kvalitet som klarte å gjennomføre alle testene. Propellenes egenskaper har blitt kartlagt og sammenlignet mot hverandre. Det kan tyde på at propellen uten anti-syngekant har høyere virkningsgrad, men siden begge propellene vise seg å være i stigende trend på virkningsgraden kan det ikke konkluderes med. Hadde propellene blitt testet på deres best mulige fremgangstill ville kanskje tallene vært andredelens. Videre kan anti-syngekanten vise til reduksjon i styrken til virvelavrivningene i samsvar med teori. Det ble nevnt at propellen uten anti-syngekant har en trykkere følgende kant som skal gi større avrivninger og lavere avrivningsfrekvens, men resultatene hadde så stor forskjell at jeg velger å konkludere at en anti-syngekant reduserer avrivningene på propellens følgende kant. Til slutt med det forsøk å måle propellsynging med hydrofon. Ingen av propellene viste tegn til at propellsynging var til stede og målingene var diskuterbare. Målingene ble derfor ikke vektlagt i stor grad og kadetten anbefaler ikke den metoden for å vurdere om en propell synger eller ikke.

Anbefaling til videre forskning er å finne ut en måte til å måle vibrasjonene som oppstår i propellen. Da kan det studeres om propellen opplever «lock in» fenomenet. Det oppstår kun om propellen synger, og reduksjoner i introduserte vibrasjoner her vil kunne bekrefte eller å avkrefte om en anti-syngekant kan redusere propellsynging.

Innholdsfortegnelse

Forside	Side. i
Publiseringsavtale	Side. ii
Forord	Side. iii
Sammendrag	Side. iv
Innholdsfortegnelse	Side. 1
Figurer	Side. 3
Tabeller	Side. 4
Formler	Side. 6
Nomenklatur/Forkortelser/Symboler	Side. 7
1 Introduksjon	Side. 8
1.1 Bakgrunn	Side. 8
1.2 Problemstilling	Side. 9
1.2 Mål	Side. 9
1.3 Begrensinger	Side.9
1.4 Metode	Side. 10
1.5 Stuktur	Side. 11
2 Litteratur studie	Side. 12
2.1 Syngende propell	Side. 12
2.2 Anti-syngekant	Side. 17
2.3 Propell støy	Side. 18
2.3.1: Uten kavitasjon	Side. 18
2.3.2: Med kavitasjon	Side. 19
3 Kavitasjonstunellen, Propelldesign, produksjon, måleutstyr og datainnsamling	Side. 20
3.1 Kavitasjonstunellen	Side. 20
3.2 Propellen	Side. 20
3.2.1 Propellens designpremisser	Side. 20
3.2.2 Propellen tegnet i SolidWorks	Side. 25
3.2.3 Anti-syngekant	Side. 29
2.3.4: Kontrollmålinger av propellene	Side. 30
3.2.5 Propellens karaktereistikk	Side. 30
3.3 3D Printer	Side. 33
3.3.1 Valg av 3D printer	Side. 33
3.3.2: Etterarbeid	Side. 33
3.4 Måleutstyr	Side. 34
3.4.1: Høyhastighetskamera	Side. 34
3.4.2: Hydrofon	Side. 34
3.4.3: Kavitasjonstunnel	Side. 35
3.5 Førtester	Side. 36

3.5.1:	Propellslipp	Side. 36
3.5.2:	Hydrofon	Side. 27
4	Resultater	Side. 38
4.1	Hydrofon	Side. 38
4.1.1:	Virvelavrivning	Side. 38
4.1.2:	Propellenes egenskaper	Side. 41
4.1.3:	Hydrofonen	Side. 43
4.2	Drøfting	Side. 46
4.2.1	Reduksjon i virveavrivninger	Side. 46
4.2.2:	Propellenes egenskaper	Side. 46
4.2.3:	Eliminering av propellsynging	Side. 48
5	Konklusjon	Side. 49
6	Bibliografi (APA)	Side. 50

Figurer

Figur 2.1:	Kármánsk virvelgate	Side. 13
Figur 2.2:	Virvelavrivningsfrekvensen mot vannhastigheten og reynoldstall	Side. 14
Figur 2.3:	Avrivningsfrekvensen påvirkning av tykkelsen til den følgende kanten	Side. 15
Figur 2.4:	Illustrasjon av propellblad flere egenfrekvenser	Side. 16
Figur 2.5:	Design for en anti-synge kant	Side. 17
Figur 2.6:	Illustrasjon av NACA 0009 hydrofoiler	Side. 18
Figur 2.7:	Lyder som kan oppstå på en propell med tilhørende frekvenser.	Side. 19
Figur 3.1:	Skisse av propellens stigning	Side. 22
Figur 3.2:	Skisse av propellen angrepsvinkel	Side. 24
Figur 3.3:	Tegning av propellens hub	Side. 25
Figur 3.4:	Vinkelen til propellen i SolidWorks	Side. 26
Figur 3.5:	Skisse av profilutsnitt i SolidWorks	Side. 27
Figur 3.6:	Tegning av propellen i SolidWorks (1)	Side. 28
Figur 3.7:	Tegning av propellen i SolidWorks (2)	Side. 28
Figur 3.8:	Utklipp av anti-synge kanten	Side. 29
Figur 3.9:	Avbildning av propel. med og uten anti-syngekant	Side. 30
Figur 3.10:	Diagram av propel uten anti-syngekant	Side. 32
Figur 3.11:	Diagram av propell med anti-syngekant	Side. 32
Figur 3.12:	Bilde av 3D-printet propeller	Side. 34
Figur 3.13:	Oppsettet til hydrofonen	Side. 35
Figur 3.14:	Illustrasjon av kavitasjon tunellens dynamo (1)	Side. 35
Figur 3.15:	Illustrasjon av kavitasjon tunellens dynamo (2)	Side. 36
Figur 3.16:	Lyddiagrammet kavitasjonstunellens med synging	Side. 37
Figur 4.1:	Test 1	Side. 38
Figur 4.2:	Test 2	Side. 39
Figur 4.3:	Test 4	Side. 40
Figur 4.5:	Test 5	Side. 40
Figur 4.6:	Propellkurve med anti-syngekant	Side. 41
Figur 4.7:	Propellkurve uten anti-syngekant	Side. 41
Figur 4.8:	Punktdiagrammet av virkningsgradene til begge propellene	Side. 42
Figur 4.9:	Impellerturtall, propellerturtall, Pabs til Test 1	Side. 43
Figur 4.10:	Impellerturtall, propellerturtall, Pabs til Test 2	Side. 43

Figur 4.11:	Impellerturtall, propellerturtall, Pabs til Test 3	Side. 44
Figur 4.12:	Impellerturtall, propellerturtall, Pabs til Test 4	Side. 44
Figur 4.13:	Impellerturtall, propellerturtall, Pabs til Test 5	Side. 45
Figur 4.14:	Illustrasjon av unøyaktigheten til hydrofonen	Side. 45

Tabeller

Tabell 3.1:	Kavitasjonstunellens spesifikasjoner under testforholdene	Side. 20
Tabell 3.2:	Reynoldstall i fra tidligere forsøk på hydrofoiler	Side. 21
Tabell 3.3:	Reynoldstallene til en propell	Side. 24
Tabell: 3.4:	Vinkelen propellbladet vil ha som en funksjon av radiusen	Side. 26
Tabell 3.5:	Kontrollmåling av propellbladene med skyelær	Side. 30

Formler

Formel 2.1:	Side. 14
Formel 2.2:	Side. 14
Formel 2.3:	Side. 15
Formel 3.1	Side. 21
Formel 3.2	Side. 22
Formel 3.3	Side. 22
Formel 3.4	Side. 23
Formel 3.5	Side. 23
Formel 3.6	Side. 23
Formel 3.7	Side. 25
Formel 3.8	Side. 31
Formel 3.9	Side. 31
Formel 3.10	Side. 31
Formel 3.11	Side. 31

Nomenklatur / Forkortelser / Symboler

Symbol	Benevning	Beskrivelse
St		Strouhal tallet
St*		Strouhal tallet etter Gongwer
δ_v	[m]	Virtuelt grenselag
Re		Reynoldstall
f	[Hz]	Frekvens
c	[m]	Kordelengde
$c_{0.7R}$	[m]	Kordelengde v/0.7 radius
ν	[m ² /s]	Kinematisk viskositet vann
V _x	[m/s]	Propellens rotasjonshastighet
V _x '	[m/s]	Propellens rotasjonshastighet med angrepsvinkel
V _a	[m/s]	Tunellens vannhastighet
V _b	[m/s]	Vannhastighet over propellbladet
V _b '	[m/s]	Vannhastighet over propellbladet med angrepsvinkel
P	[m]	Stigning
P/d		Stigning/diameter
d	[m]	Diameter
Z	[m]	Avstanden propellen flytter seg med en gitt radius
J		Fremgangstallet
P _v	[Pa]	Vannets kokepunkt
K _T		Thrustkoeffisienten
K _Q		Dreimomentkoeffisienten
T	[N]	Trust
Q	[Nm]	Dreimoment
ρ	[Kg/m ³]	Vannets massetetthet
η_o		Propellens virkingsgrad

1 Introduksjon

Syngene propeller er et kjent og trøblende fenomen som skaper negative konsekvenser for propelldesign. For ubåter er det kritisk å kunne operere skjult. For cruise skip, shipping eller andre fartøystyper kan det føre til en ubehagelig opplevelse for både passasjerer og besetning. Synging er ikke bare en uønsket lyd, men også skadelig for propellen. Vibrasjonene som skaper syngingen, kan føre til tidlig utmatting og sprekkdannelse.

Årsaken til at propellen synger er en kármánsk virvelgate som dannes idet vannet forlater propellbladets følgende kant. Når frekvensen til virvelgaten blir lik egenfrekvensen til propellbladet, begynner propellen å vibrere og lager en metallisk lyd. Virvelavrivning er et kjent fenomen innenfor mange industrielle applikasjoner og det er et av de mest prominente fenomenet når det kommer til fluidbevegelser rundt runde og firkantede legemer. Virvelavrivninger har en oscillerende kraft som virker vinkelrett av strømningsretningen til fluidet og kan føre til vibrasjoner i legemet. Virvelavringing fra runde og firkantede legemer er forsket mye på, og det finnes mye litteratur som adresserer problemet. Det har derimot ikke blitt studert i like stor grad for avlange objekter, til tross dets direkte relevans til pumper, turbiner eller maritime propeller. (Lee et al., 2015).

Denne oppgaven vil utforske den relevante litteraturen som er skrevet om Von Kármán virvler på hydrofoiler, herunder studere hvor stor effekt en anti-syngkant kan ha på en propell for å motvirke virvlene som oppstår, Samtidig skal propellens karakteristikk kartlegges for å undersøke om en anti-syngkant kan påvirke ytelsen.

1.1 Bakgrunn

Under oppholdet på Sjøkrigsskolen får maskinskadettene teoretisk og praktisk undervisning i maskinfag. I emne 'Marinefartøy, flyteevne og konstruksjon' er propellens egenskaper, virkemåte, propulsjonsvirkningsgrad, kavitasjonsproblematikk og særlig støy fra propellen i fokus. Maskinkadettene får introduksjon til kavitasjonstunellen i maskinlabben hvor de utførte tester og regnet ut koeffisienter og karakteristikk til en propell under forskjellige forhold.

Som en del av emnet 'Maskinkonstruksjon og materiallære' blir det gitt innføring i 3D modelleringsprogrammet SolidWorks. Det er med denne bakgrunnen og kunnskapen kandidaten har

designet en propell for å studere hvordan en anti-syngkant kan redusere vibrasjoner og om en³ anti-syng kant påvirker propellens ytelse.

1.2 Problemstilling

Sjøforsvaret ønsker å øke kompetansen på fenomenet «syngende propeller» ved å studere bruken av anti-syng kanter på fartøyenes propellere. Målet er å fastslå hvilken effekt anti-syng kanter har på potensialet for å fjerne uønsket støy fra propellene under drift. Og vil en anti-syngkant påvirke propellens ytelse?

1.3 Mål

Denne oppgaven satt som mål om å oppnå dypere forståelse av anti-syngkantens egenskaper på en propell. Hvordan kan den eliminere/reducere propellsyning, gi reduksjon i virvelavrivninger og om en anti-syngkant påvirker propellens ytelse. For å utføre dette har kandidaten satt opp følgende mål:

1. Designe to propellere i SolidWorks som skal oppnå reynoldstall brukt i tidligere studier.
2. 3D-printe to propeller som er tilpasset kavitasjonstunellen.
3. Kartlegge propellenes karakteristikk
4. Finne ut om en anti-syngkant kan eliminere redusere propellsyning som oppstår på propellens følgende kant.
5. Undersøke om en anti-syngkant påvirker propellens ytelse.

1.4 Begrensninger

Opgaven tar kun for seg studie av propellens kant, og hvorvidt den kan redusere «synging», og om en anti-syngkant påvirker propellens ytelse. Oppgavens omfang er begrenset til tre måneder og 10 000 kr. Det fører til at det kun ble produsert to propeller, hvor den ene har en

avfaset anti-syngekant og den andre ikke. Antall forsøk per propell blir avgrenset til fem testforsøk. Propellen er designet etter E.779A, men på grunn av kavitasjonstunellens parameter, skolens 3D-printere og opparbeidet ferdighetsnivå i SolidWorks, er det foretatt endringer på propellens hub, diameter og propell geometri.

1.5 Metode

Oppgaven kommer til å bestå av fire faser.

Fase 1 - Kartlegging av oppgaven og lesing av relevant litteratur.

Første fase blir litteraturstudie av karmanske virvelgater og hva som er gjort for å motvirke propellsyning. Det finnes litteratur og tidligere forsøk over hydrofoiler som gir gode inngangsverdier til oppgaven. Det skal undersøkes hvilket oppsett andre studier har brukt og hvilke kriterier som må oppfylles for at forsøkene skal være presentable og sammenlignbare med andre studier.

Fase 2 - Designstudie, 3D-printing og testing av produktet.

Under fase 2 skal propellene designes i SolidWorks. Designpremissene bestemmes av tidligere forsøk og kavitasjonstunellens begrensinger. Når designet er finspikket skal propellene 3D-Printes på sjøkrigsskolen i forskjellige materialer for å finne ut hva som er best egnet. Propellene skal også monteres og testes i kavitasjonstunellen for å finne ut om det må gjøres noen endringer.

Fase 3 – 3D-printing av propellene, konstruere testmetode og datainnsamling via kavitasjonstunellen.

To stykk propeller skal 3D-printes og bearbeides etter erfaringene fra fase 2. Begge propellene skal gjennomgå samme testprosedyre for å kartlegge propellkarakteristikken som plottes i propellkurver. En testprosedyre utvikles, propellkarakteristikken kartlegges og anti-syngekantens effekt studeres og sammenligning med andre studier.

Fase 4 – Drøfting av resultatene

Resultatene skal vurderes. Entydig resultater drøftes opp mot teori og predikasjoner. Dersom resultatene er utydelige, skal det argumenteres hvorfor. Det skal også det komme anbefaling for videre forskning.

Ugradert – internt. Skal ikke videreformidles utenfor forsvarssektoren.

1.6 Struktur

Oppgavens struktur følger fasene til metoden. Først blir leseren introdusert til fenomenet syngende propeller og hvilke løsninger som er implementert av industrien for å motvirke dette. Og hvilke hensyn oppgaven må ta for å kunne få tilsvarende resultater som tidligere studier. Videre blir leseren introdusert til hvordan propellen ble designet og hvilke faktorer som ble tatt hensyn til under designfasen og valg av anti-syngekant.

Til slutt blir resultatene presentert, drøftet og leseren sitter igjen med en konklusjon og anbefaling til videre forskning.

2 Litteratur studie

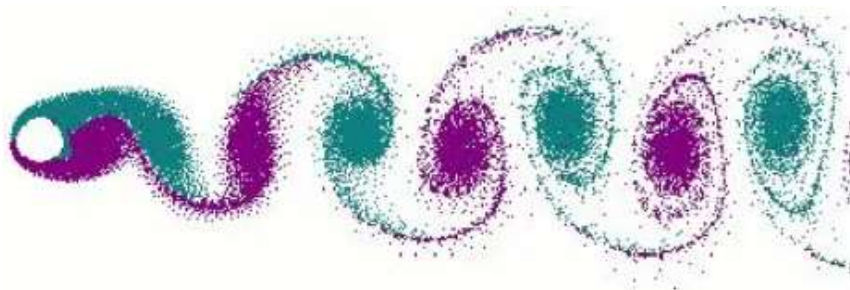
2.1 Syngene propell

Propellsyning er et produkt av Kármánsk virvelgate. Kármánsk virvelgate oppstår når et fluid strømmer forbi et legeme, for eksempel en sylinder eller en propell. Det skaper en oscillerende effekt med overtrykk og undertrykk bak legeme. Dersom oscilleringsfrekvensen (også kalt virvelavrivningsfrekvens) blir lik propellens egenfrekvens begynner den å vibrere og kan skape en metallisk lyd, kjent som propellsyning. Vibrasjoner i propeller er uønsket av flere grunner. Det lager ikke bare lyd, men kan også føre til utmatting og tidlig sprekkdannelse i materialet dersom det foregår over lengre tid. (Helseth, 2021; Ausoni, 2007)

Tidligere var det ikke klart hvorfor propellsynging oppstod. Selv om de fleste propeller blir serieprodusert og er tilsynelatende like, kan noen ende opp med å synge og andre ikke. Det er viktig å fremheve at propeller ikke synger hele tiden, kun ved visse turtall (Carlton, 2007, s 433). I 1937-38 gjorde H. Hunter flere forsøk med fokus på den ledende kanten og kunne vise til at endringer i propellens ledende kant førte til at syngingen ble eliminert. (Hunter 1937, i Blake 2007. s. 990).

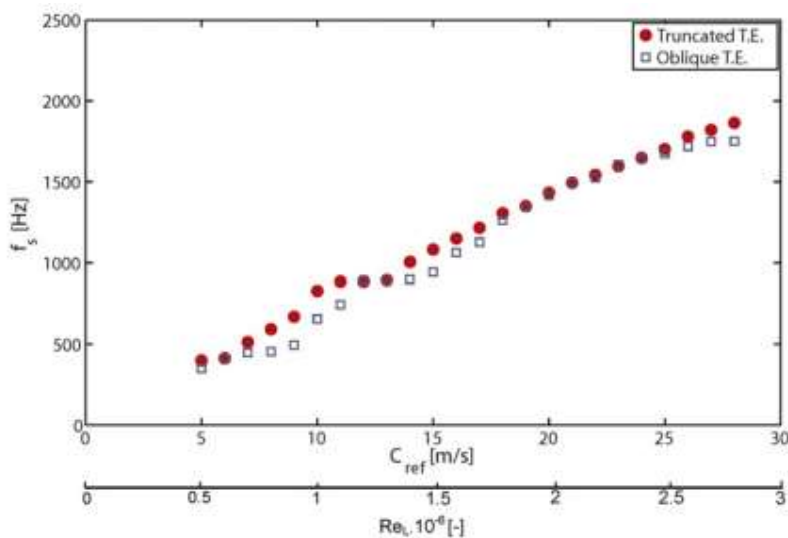
Dette ble en etablert sannhet frem til 1952, da Gongwer gjennomførte nye forsøk. Han kunne vise til at propellsynging var forårsaket av Kármánske virvelgaser.

Dette ble en etablert sannhet frem til 1952, da Gongwer gjennomførte nye forsøk. Han kunne vise til at propellsynging var forårsaket kármánsk virvelgater som oppstår på propellens følgende kant, og at tykkelsen på den følgende kanten bestemte frekvensen til avrivingen. Gongwer observerte at amplitudemodulasjon av tonesignal mens bladene passerte gjennom skipets kjølevann, og han presenterte at produksjonsvarianter i overflate-finishen og kantdetaljer var årsaken til at noen propeller syner, og andre ikke.



Figur 2.1 Et fluid strømmer forbi en sylinder og skaper en oscillernde virvelavrivning, en kármánsk virvelgate. (Karmansk Virvelgate , 2021)

Senere rapporter har studert virvelavrivninger opptrer på hydrofoiler. Blackburn og Henderson (1996), Ausoni (2007) og Zobeiri et al. (2012) har observert at virvelavrivningen har tildenes til å låse seg rundt propellens egenfrekvens, også kalt «*lock in condition*». Ausoni (2007) og Zobeiri et al. (2012) undersøkte karmanske virvelgater på en symmetrisk NACA hydrofoil og fant ut at virvelavrivningsfrekvensen øker linjert med vannhastigheten. Sett bort i fra når den nærmer seg egenfrekvensen til hydrofoilen, da oppstår det «*lock in*». Virvelavrivningsfrekvensen vil være låst til propellens egenfrekvens og holde seg her i en lengre tid, helt til vannhastigheten øker og vi kommer ut av «*lock in*» og inn i «*lock off*», hvor virvelavrivningsfrekvensen er ulik egenfrekvensen til propellen. Det er under «*lock in*» propellsyngingsfenomenet oppstår.



Figur 2.2 Virvelavrivningsfrekvensen mot vannhastigheten og reynoldstall. Vi kan se virvelfrekvensen går i «lock in condition» mellom 11-14 m/s og tilbake til «lock off» fra 15 m/s videre til 20 m/s. (Zobeiri et al, 2012).

For å beskrive virvelavrivning på sylindre eller propeller er Strouhal tall (St) den brukte metoden for å kvantifisere virvelavrivning. Vincenc Strouhal utviklet i 1878 en formel som kan beskrive den oscillerende frekvensen av virvelavløsinger:

$$St = f \frac{D}{U} \quad \text{Formel 2.1}$$

St angir det dimensjonsløse Strouhal-tallet, f er frekvensen til virvelavrivningen, U er strømningshastigheten til fluidet og D er det projiserte tverrsnittet.

Selv om Strouhal formel viser seg å være korrekt for sirkulære eller kvadratiske objekter, er det ikke direkte overførbart til avlange geometrier som for eksempel en propell. Gongwer (1952) videreutviklet formelen til Strouhal og kom frem til en formel som passer geometrien til en propell:

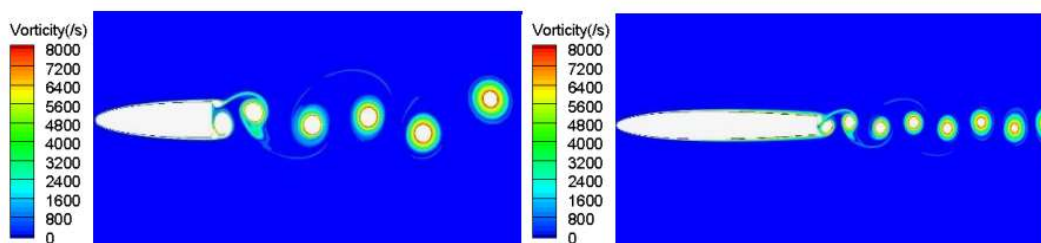
$$St^* = f \frac{d + \delta_v}{U} \quad \text{Formel 2.2}$$

Hvor d er tykkelsen på den følgende kan og δ_v beregner det virtuelle grenselaget.

$$\delta_v = \frac{0.029c}{Re^{1/5}} \quad \text{Formel 2.3}$$

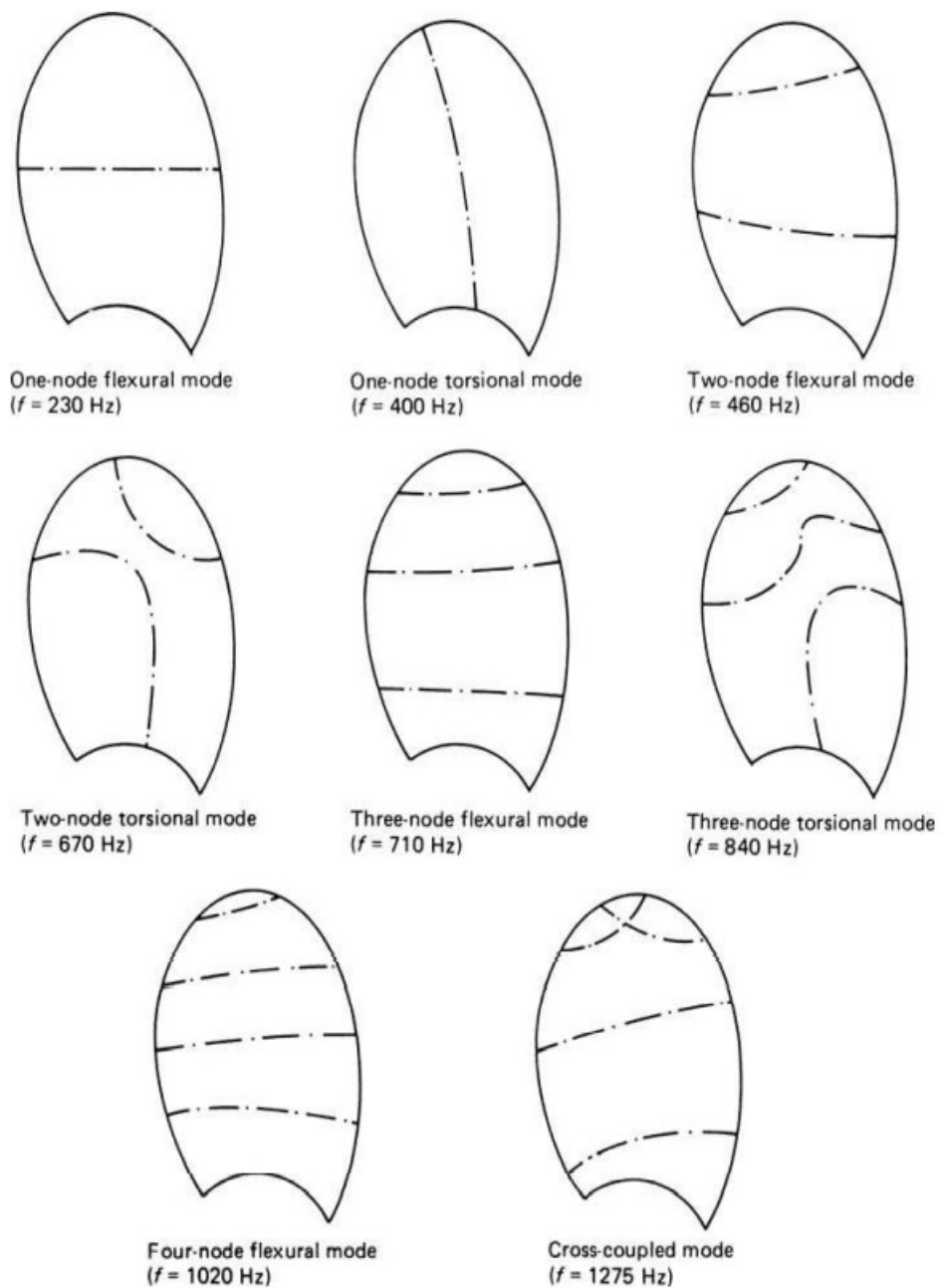
c er kordelengden til propellbladet ved 0.7 radius og Re er Reynoldstallet.

Videre konkluderte Gongwer med at en St^* verdi på 0.18 var et greit estimat for å finne ut frekvensen til virvelavrivningen, mens andre rapporter (som Ausoni, 2007; og Kamalaraja, 2021) estimerer en St^* verdi på 0.20-0.22. Med en konstant diameter på den følgende kanten og et virtuelt grenselag som ikke endrer seg mye for mye i verdi, blir hastigheten U den variabelen som endrer på frekvensen til virvelavrivningen. Høyere hastighet gir høyere frekvens. Formelen til Gongwer (1952) (Gongwer, 1952) viser også at en tykkere følgende kant gir lavere frekvens, noe som Hu et al. (2020) også bekrefter i sine forsøk.



Figur 2.3 Figuren hvordan avrivningsfrekvensen blir påvirket av tykkelsen til den følgende kanten. (Hu, et al., 2020).

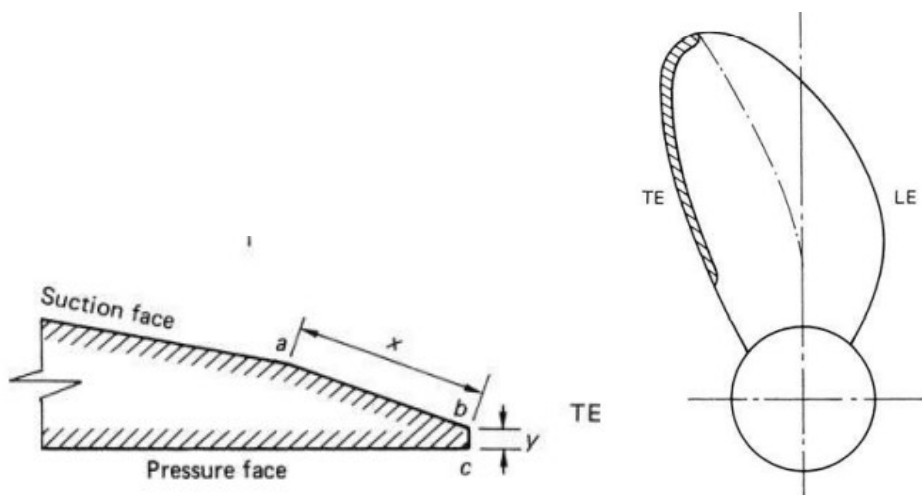
Carlton (2007, s. 433-434) nevner at noen propeller synger mens andre ikke, selv om de er serieprodusert. I tillegg kan en propell synge på flere turtall. Det forteller oss at propelldesign er et veldig komplekst tema som gjør det vanskelig å predikere om et propelldesign vil synge, eller ikke. Figur 2.4 illustrerer at en propell kan ha flere egenfrekvenser. Dette er også en utfordring en må ta hensyn til.



Figur 2.4 Bildet viser hvordan et propellblad kan ha flere egenfrekvenser. (Carlton, 2007, s.428)

2.2 Anti-synge kant

Gongwer (1952) gjorde signifikante bidrag med å klassifisere propellsyning som et problem som oppstår langs propellens følgende kant. Løsningen for å kurere propellsyning er å introdusere en «anti-synge kant» på den følgende kanten til propellen. Det har vært forsket på forskjellige profiler hvor flere kan vise til reduksjon i vibrasjoner, men videre er det slik at modifikasjoner på propellens følgende kant ikke skal endre karakteristikken til propellytelsen (Carlton, 2007, s. 434). Et design som flere har valgt å bruke er en avfastning av den følgende kanten. Hensikten med denne kantformen er å bevisst forstyrre grensesjiktveksten fra den følgende kanten og dermed lindre effektene av virvelavrivningen.

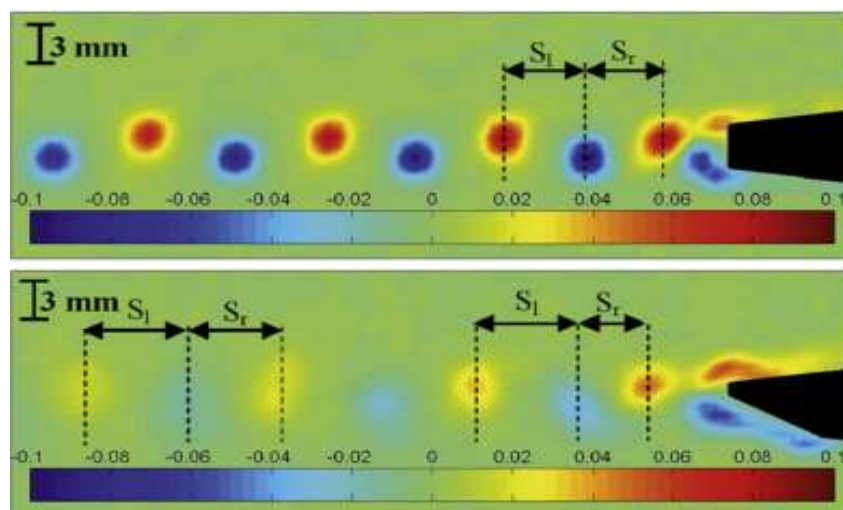


Figur 2.5 Figuren viser et mye brukt design for en anti-synge kant. Det skraverte området på propellbladet viser hvordan den følgende kanten blir avfaset fra 0.4 av radien av propellen og helt ut til tuppen. Hentet fra Carlton (2007) s. 434

Zobeiri et al. (2012), S.-J. Lee (2015) og Johannessen (2020) har alle brukt en avfaset følgende kant i sine eksperimenter. Zobeiri et al. (2012) brukte i sine tester to NACA 0009 profiler. En med rett følgende kant og en med en 60° avfaset kant. Zobeiri et al. (2012) kunne i sine tester vise til betydelig reduksjon i vibrasjoner på hydrofoilens 60° . Figur 2.6 er hentet fra rapporten. Strømningsvisualisering viser at grensesjiktet på trykk- og sug sidene av foilene forblir festet til veggen og at de vekslende virvlene løsner fra øvre og nedre hjørnene på den følgende kanten.

Videre kan man se på foilen med en anti synge kant at den nedre virvelavrivningen er forskjøvet oppstrøms. Som et resultat kolliderer den øvre og nedre virvelavrivningen som fører

til reduksjon i vibrasjoner.



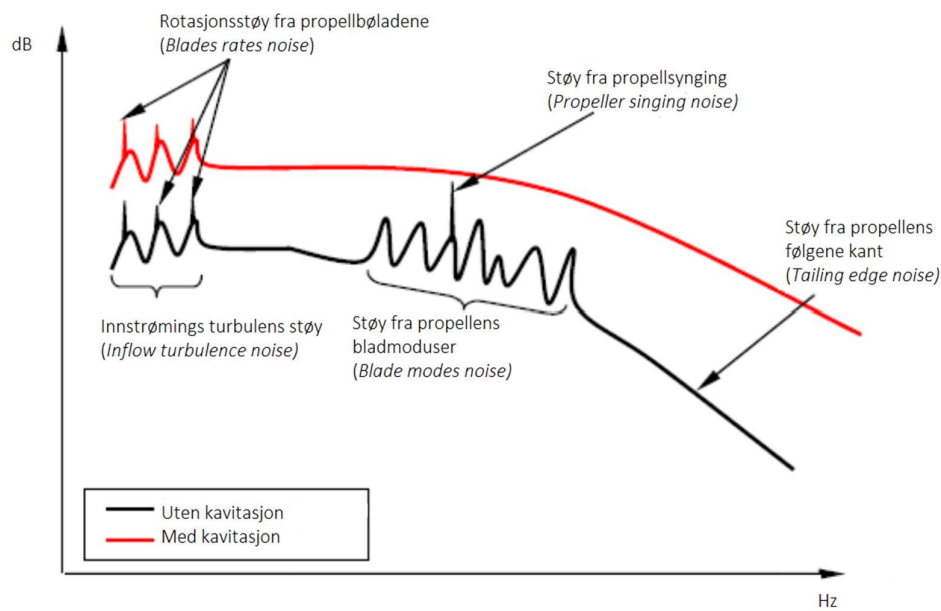
Figur 2.6 To NACA 0009 hydrofoiler med tilstedeværelse av virvelavriving. Den nederste hydrofoilen er utstyrt med en 60° anti-syngkant. Hentet fra (Zobeiri et al, 2012)

2.3 Propell støy

Denne oppgaven skal fokusere på propellsynging, men dette er ikke den eneste lyden vi kan forvente å høre fra en propell. Generelt kan propellstøy deles inn i to kategorier, med og uten kavitasjon på propellen.

2.3.1 Uten kavitasjon

Lydspekteret uten kavitasjon leverer lyder i et vidt spekter av frekvenser. De laveste frekvensene stammer fra propellens rotasjonsfrekvens og er vanskelig å høre. De laveste frekvensene et menneske kan høre er fra 20 Hz til 20 000 Hz. Andre lyder som er av høyere frekvens er turbulent innstrømming til propellen og virvelavrivninger på propellens følgende kant, her under synging. Figur 2.7 viser at propell synging skjer på høyere frekvenser. (Carlton, 2012, s 253-255).



Figur 2.7 Bildet viser typisk hvilke lyder som kan oppstå på en propell med tilhørende frekvenser. Legg merke til at propellen ikke viser tegn til synging med kavitasjon. Hentet fra forelesningsnotat

2.3.2 Med kavitasjon

Dersom propellen opererer med kavitasjon, vil det skape betydelig mer lyd. Kollaps av kavitasjonsbobler skaper sjokkbølger og lyd. I denne oppgaven skal det ikke tas lydprøver av propellen mens den kaviterer, det vil derfor ikke bli utredet videre her.

3 Kavitasjonstunellen, propelldesign, produksjon, måleutstyr og datainnsamling.

3.1 Kavitasjonstunellen

Kavitasjonstunellen på Sjøkrigsskolen er av typen K23 fra Cussons Technology Ltd. Det er en mellomstor kavitasjonstunell med utskiftbare moduler for å oppnå forskjellige strømningshastigheter. Tidligere tester har rapportert at kavitasjonstunellens propellaksele kan starte og vibrere når propellen kjører med et turtall fra 17-25 o/s, en bør derfor unngå dette turtallet.

Tabell 3.1 Kavitasjonstunellens spesifikasjoner under testforholdene.	
Effekt impeller	15 kW
Vannhastighet (Va)	0 – 4,65 m/s
Effekt dynamo	9,2 kW
Propell omdreiningstall	0 – 50 o/s
Målseksjon	426 mm x 426 mm
Strømningsretning	Medstrøms

3.2 Propellen

3.2.1 Propellensdesignpremisser

Propellen i denne oppgaven er designet i SolidWorks. Propellen har fast stigning og ingen rake. For at det skal bli lettest mulig å se hva som skjer på bladet med et høyhastighetskamera ble det bestemt at propellen skal ha to blader. Som tidligere nevnt er propelldesign et veldig kompakt tema, og det er ikke en del av problemstillingen å lage en god propell. Likevel skal propellen designes slik at den kommer til å oppleve et reynoldstall som er i samsvar med andre rapporter. Det krever riktig stigning og turtall slik at propellen opplever det samme reynoldstallet.

Tabell 3.2: Reynoldstall i fra tidligere forsøk på hydrofoiler	
Austoni (2007)	$Re = 0.5 * 10^6 - 2.9 * 10^6$
Zobeiri et al. (2012)	$Re = 0.25 * 10^5 - 0.65 * 10^5$
Johannessen (2020)	$Re = 8.8 * 10^5 - 1.9 * 10^6$
Lee et al. (2015)	$Re = 1 * 10^6 - 5 * 10^7$
Kamalaraja (2021)	$Re = 3 * 10^5$
Hu et al. (2020)	$Re = 1.94 * 10^5$

Tabellen viser at det er brukt mye forskjellige reynoldtall i andre forsøk, men den laveste verdi er på $0.25 * 10^5$ og høyeste er $2.9 * 10^6$.

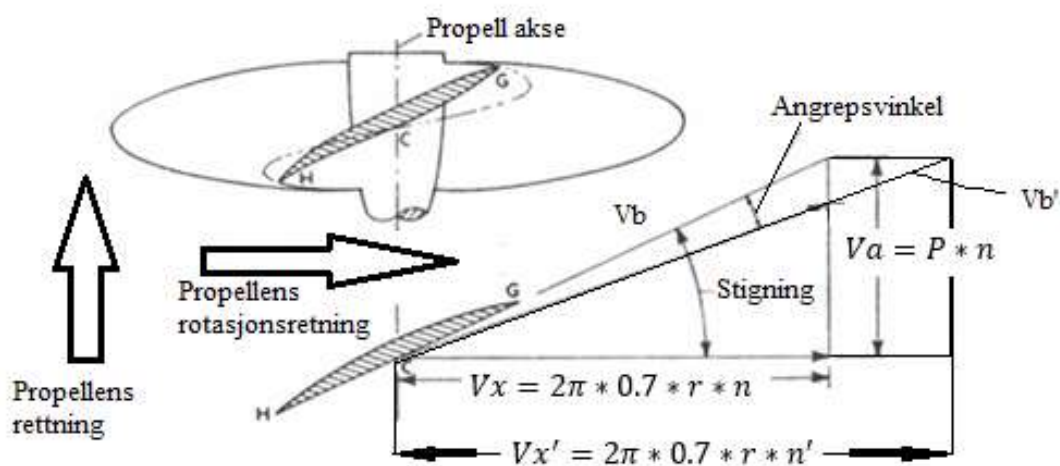
$$Re = \frac{Vb * C_{0.7r}}{\nu}$$

Formel 3.1

Re gir det dimensjonsløse reynoldstallet. Vb er hastigheten til vannet over propellbladet, $C_{0.7r}$ er kordelengen til propellbladet ved 0.7 radius målt fra senter. Kordelengden ble satt til 59 mm. ν er vannets kinetiske viskositet. Den er temperaturbestemt og gitt i vedlegg D.

Etter en samtale med faglærer og veileder ble det bestemt at propellens turtall burde operere over 25 o/s grunnet vibrasjoner som oppstår i propellakslingen mellom 17-25 o/s. Videre ble

V_a satt til 4.5 m/s. Kavitasjonstunellen setter en begrensing på propellens diameter som ikke kan være større enn 0.2 meter.



Figur 3.1 Skisse av hvordan propellens stigning påvirker den geometriske avstanden propellen vil vandre gjennom vannet. Laget av Bendik Andersen.

$$V_x = 2\pi * 0.7 * r * n$$

Formel 3.2

V_x er hvor langt propellen vil gå gjennom vannet på en omdreining dersom det ikke var null slipp.

$$V_{x'} = 2\pi * 0.7 * r * n'$$

Formel 3.3

$V_{x'}$ er hvor lang propellen går gjennom vannet på en omdreining med en bestemt angrepsvinkel.

$$Va = P * n$$

Formel 3.4

Va er hastigheten vannet i kavitasjonstunellen må ha for å opprettholde en angrepvinkel på 0° . P er propellens stigning og n er turtallet til propellen.

$$Vb = \sqrt{Va^2 + Vx^2}$$

Formel 3.5

Vb viser hastighet til vannet over propellbladet.

$$Vb' = \sqrt{Va^2 + Vx'^2}$$

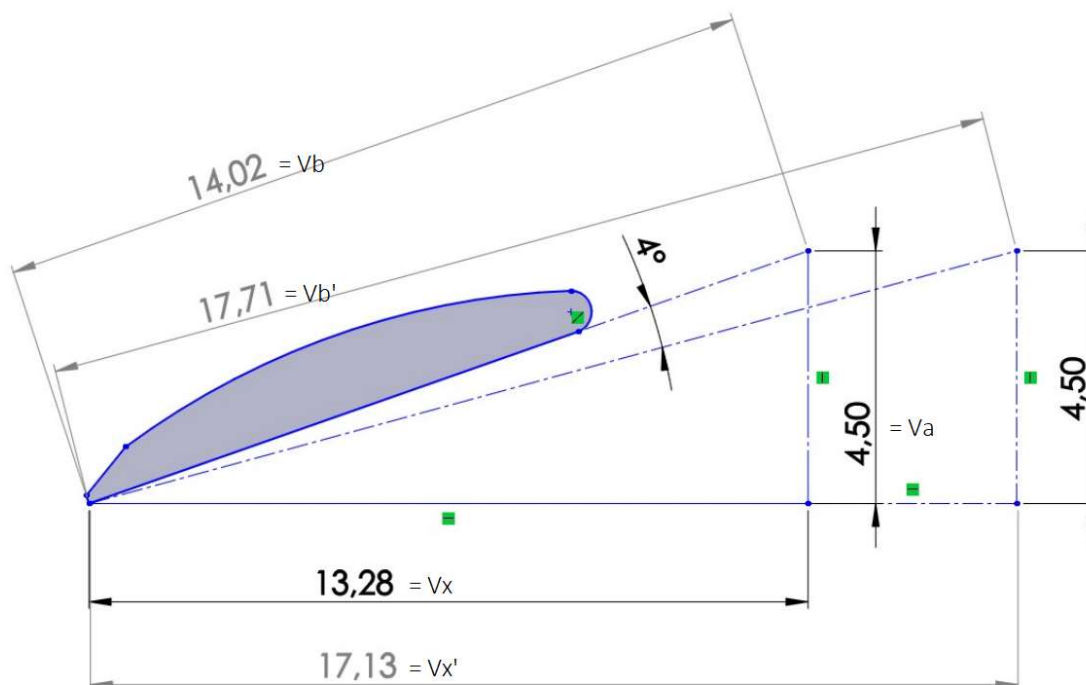
Formel 3.6

Vb' viser hastigheten til vannet over propellbladet med en bestemt angrepvinkel.

Ettersom propellens stigning er geometrisk betinget ble det besluttet å gjøre mye av utregningene i SolidWorks. Det ble tegnet flere propeller med forskjellig stigning for å finne ut hvilken stigning som var best egnet.

Av utregningene kom det frem at en $P/D = 0.745$. Diameteren D er satt til 0.2 meter og det gir en stigning på 0.149 og ved hjelp av *formel 3.3* gir det et turall på 30.2 o/s. Sett dette tallet inn i *formel 3.2* det gir oss Vx på 13.283 m/s. Va er allerede bestemt til å være 4.5 m/s.

Når dette tegnes inn i SolidWorks er enkelt å finne hastigheten propellen må kjøre med dersom propellen skal jobbe med 4° arbeidsvinkel.



Figur 3.2 Skisse av propellen propellen med 4° angrepsvinkel med tilhørende hastigheter. Tegnet i SolidWorks

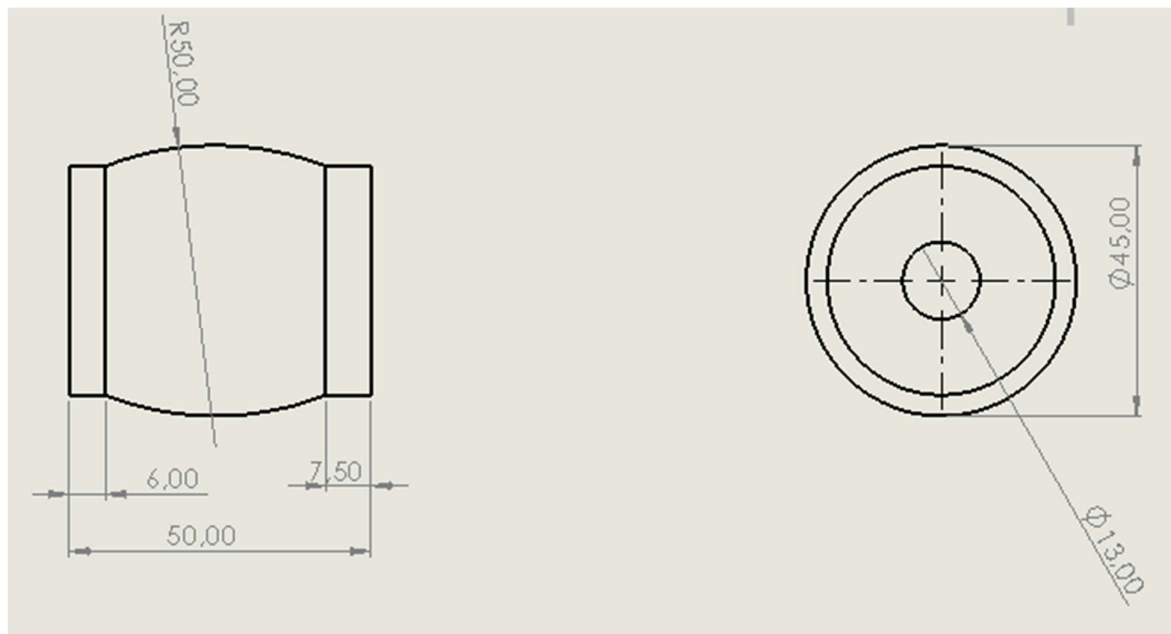
Med hastighetene V_b og $V_{b'}$ kan vi finne reynoldstallet i de to situasjonene ved å bruke formel 3.1. Reynoldstallene i de to situasjonene samsvarer med tidligere studier og dermed ble en P/D på 0.745 valgt som et utgangspunkt å jobbe videre med.

Tabell 3.3: Reynoldstallene til en propell med P/D på 0.745 og $V_a = 4.5$ m/s og fire graders angrepsvinkel.

$V_b = 14,02$	$Re = \frac{V_b * C_{0.7r}}{v_{22}}$	$Re = \frac{14,02 * 0,058}{9,565E - 07}$	$Re = 0.850 * 10^6$
$V_{b'} = 17,71$	$Re = \frac{V_{b'} * C_{0.7r}}{v_{22}}$	$Re = \frac{17,71 * 0,058}{9,565E - 07}$	$Re = 1.07 * 10^6$

3.2.2 Propellen tegnet i SolidWorks

For at propellen skal passe på akslingen til dynamoen ble propellhuben designet etter original propellen som hører til kavitasjonstunellen. Mål ble tatt med skyvelære.



Figur 3.3 Tegning av propellens hub. Tegnet i SolidWorks

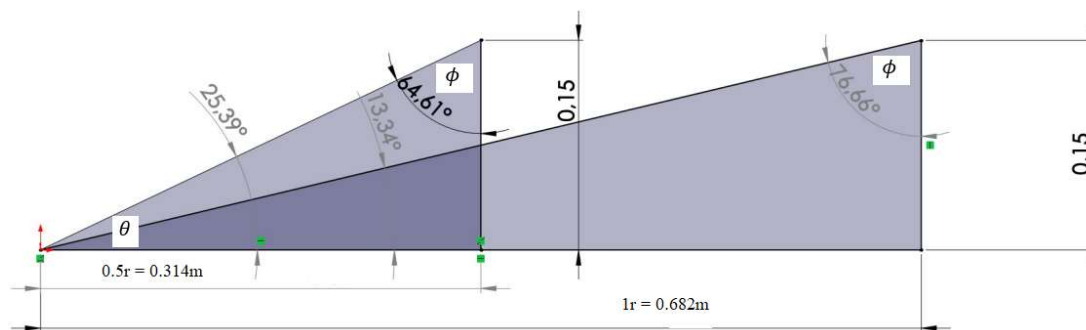
Neste er å finne ut vinkelen til propellbladet med en gitt vinkel.

$$2\pi * x * r = Z$$

Formel 3.7

x er avstanden fra senter, r er radius.

Formel 3.7 forteller oss avstanden Z som gir oss vinkelen til propellbladet gitt ved en bestemt radius. Ved å bruke formel 3.7 og lage en tabell er det lett å finne vinkelen til propellbladet ved den aktuelle radiusen. Det er viktig at stigningen (0.149) er konstant på alle radiuser, derfor blir vinkelen til propellbladet en funksjon av radiusen som figur 3.4 illustrerer.

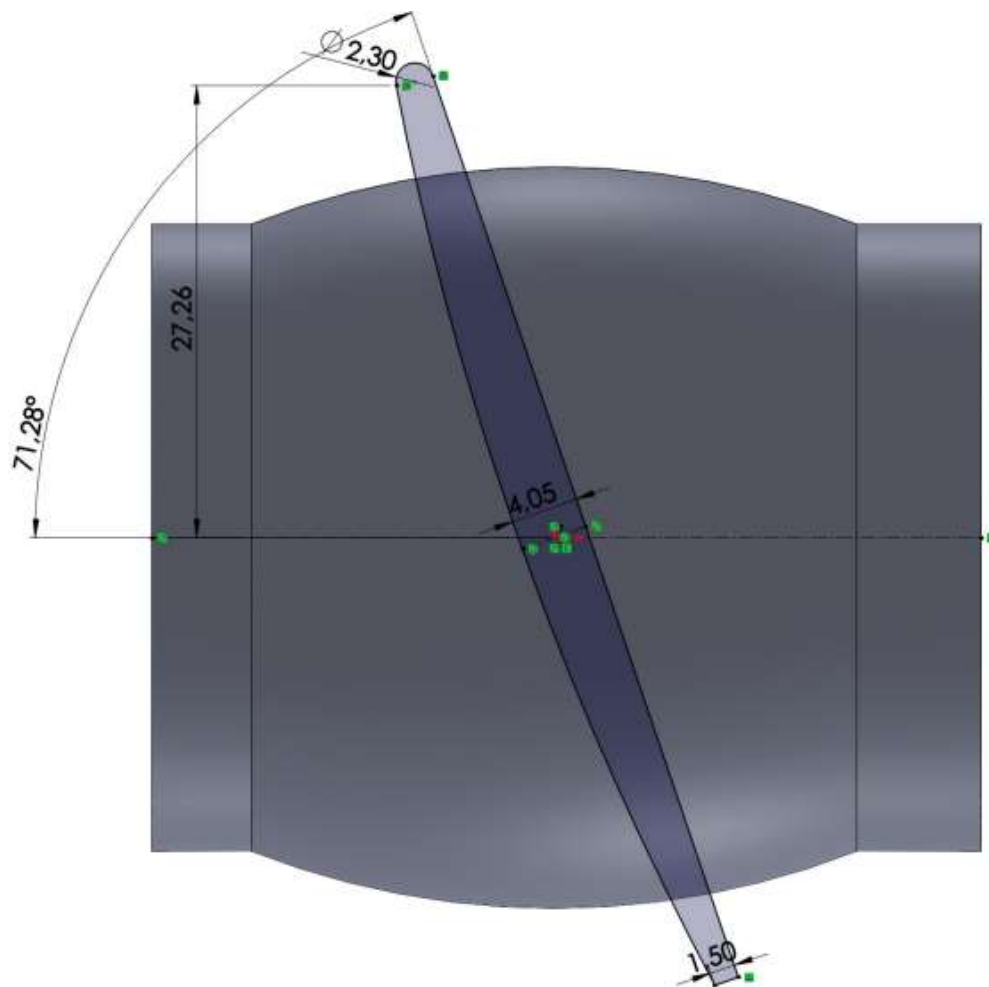


Figur 3.4 Vinkelen til propellen regnet ut i SolidWorks ved radius 0.5r og 1r.

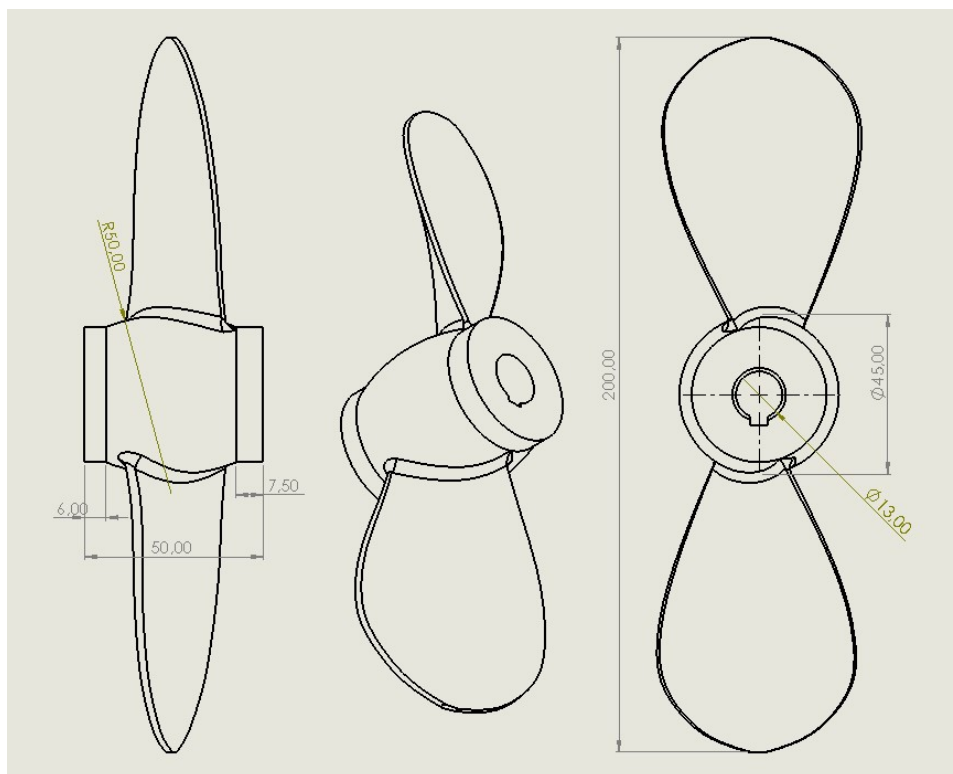
Tabell 3.4: Vinkelen propellbladet vil ha som en funksjon av radiusen				
Stigning	Radius	$2\pi * x * r = Z$	θ	ϕ
0.149 m	0.3r	$2\pi * 0.3 * 0.1 = 0.188 \text{ m}$	38,4°	51,6°
0.149 m	0.5r	$2\pi * 0.5 * 0.1 = 0.314 \text{ m}$	25,39°	64,61°
0.149 m	0.7r	$2\pi * 0.7 * 0.1 = 0.439 \text{ m}$	18,75°	71,25°
0.149 m	0.8r	$2\pi * 0.8 * 0.1 = 0.503 \text{ m}$	16,5°	73,5°
0.149 m	0.9r	$2\pi * 0.9 * 0.1 = 0.565 \text{ m}$	14,77°	75,23°
0.149 m	0.95r	$2\pi * 0.95 * 0.1 = 0.597 \text{ m}$	14,01°	75,99°
0.149 m	1r	$2\pi * 1 * 0.1 = 0.628 \text{ m}$	13,15°	76,65°

Når alle vinklene med tilhørende radius er regnet ut er det mulig å begynne å designe propellen. Propellbladets profil ble tegnet inn i flere plan og det ble brukt en loft funksjon for å

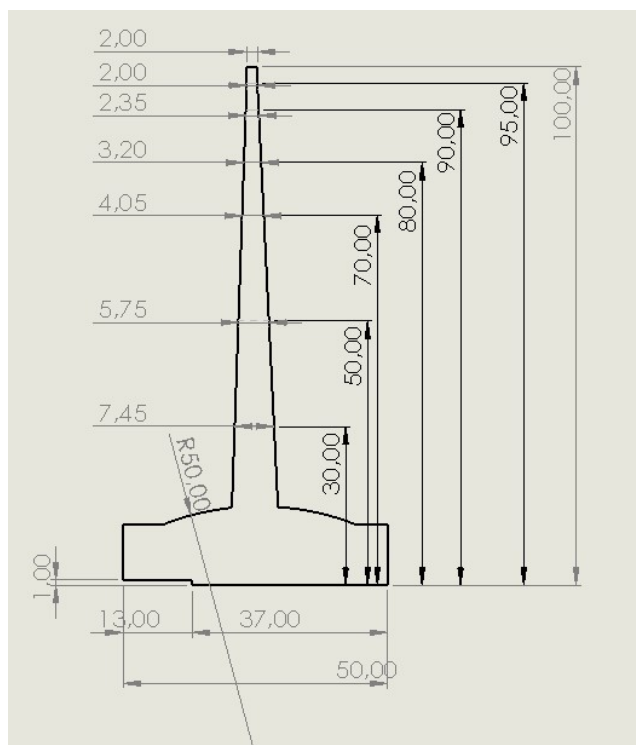
skape propellen. Propellbladenes profil ble designet etter Insean E779a profilen, men er ikke identisk.



Figur 3.5 Skisse av profilutsnitt ved 0.7r tegnet i SolidWorks



Figur 3.6 Tegning av propellen. Tegnet i SolidWorks.



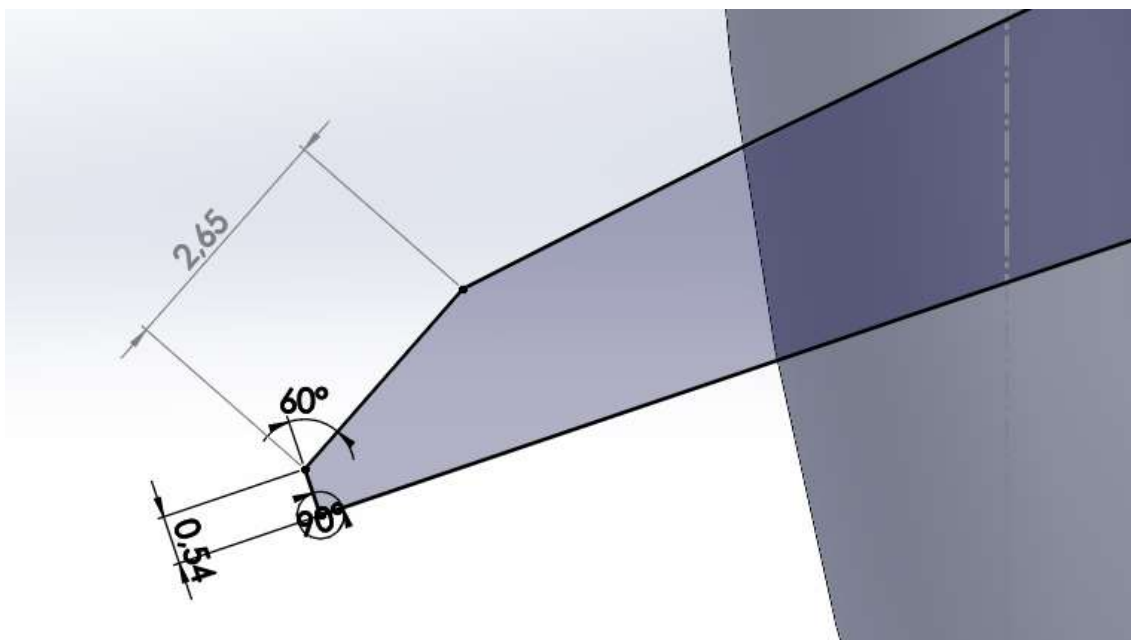
Figur 3.7 Tegning av propellen. Tegnet i SolidWorks.

Ugradert – internt. Skal ikke videreformidles utenfor forsvarssektoren.

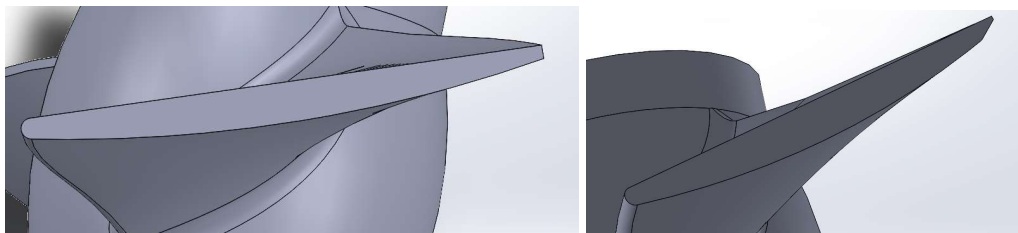
3.2.3 Anti-synge kanten

Figur 2.5 illustrerer konseptet for en antisyngekant ble basert på Carlton (2007), men grunnet propellen er 3D printet og er i plast gir det en del begrensinger.

For at propellen skulle opprettholde styrke og profil ble det satt en minimumtykkelse på den følgende kanten til 0.54 mm. Det er også samme tykkelse som er brukt i andre forsøk fra Johannessen (2020) og Lee et al. (2015). Videre visere testforsøk fra Johannessen (2020) og Zobeiri (2012) at 60 graders vinkel på anti-synge kanten har gitt gode resultater når det gjelder reduksjon i vibrasjon og virveldannelse på propellens følgende kant. Dermed ble den ene propellen designet med en 60 graders vinkel.



Figur 3.8 Utklipp av hvordan anti-synge kanten ser ut på 0.7 radius.



Figur 3.9 Propellen til venstre viser propell uten kant. Kanten til høyre viser en propell med 60° avfaset kant.

3.2.4 Kontrollmålinger av propellen

Propellene skal i teorien være identiske bortsett fra den ene propellen har en avfaset anti-syngkant, men for å sjekke at dimensjonene var like ble det tatt kontrollmåling av begge propellene.

	Kordelengde ved $C_{0.7r}$	Diameter
Propell uten kant	57,2 mm	200 mm
Propell med kant	57,4 mm	200 mm

3.2.5 Propellens karakteristikk

For å kunne sammenligne propellens egenskaper mot hverandre finnes det flere dimensjonsløse koeffisienter som beskriver propellens ytelse. For å kartlegge disse har det blitt gjennomført tester på propellen som gir grunnlag til å danne propellkurver for propellene. Testene gir også grunnlag for å finne ut hvilket fremgangstall som bør velges for at propellen skal operere med høyest mulig virkningsgrad og for at propellen ikke skal operere i det området hvor den vil kavitere.

Testprosedyre for kartlegging av propellkurven er så finne som «vedlegg B – Prosedyre for

propellkurve» og resultatene er plottet i Excel, vedlagt som «vedlegg C – Utregninger»

$$J = \frac{Va}{nd} \quad \text{Formel 3.8}$$

Fremgangstallet

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 d^5} \quad \text{Formel 3.9}$$

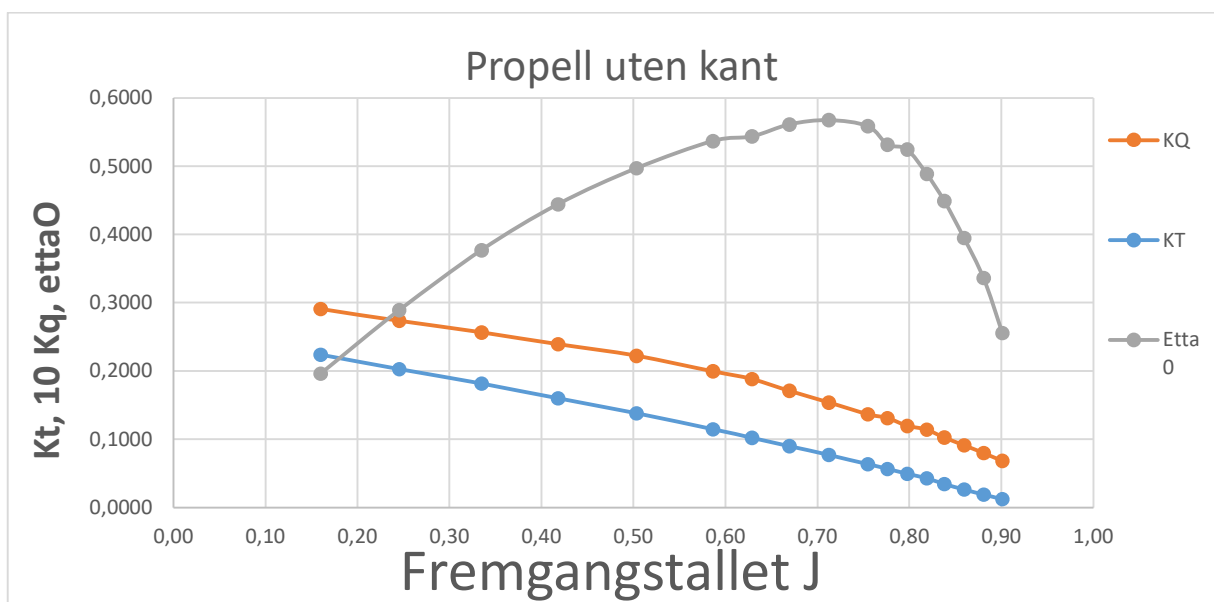
Dreimomentkoeffisient, Q er dreiemomentet til propellen og ρ er vannets egenvekt.

$$K_t = \frac{T}{\rho n^2 d^4} \quad \text{Formel 3.10}$$

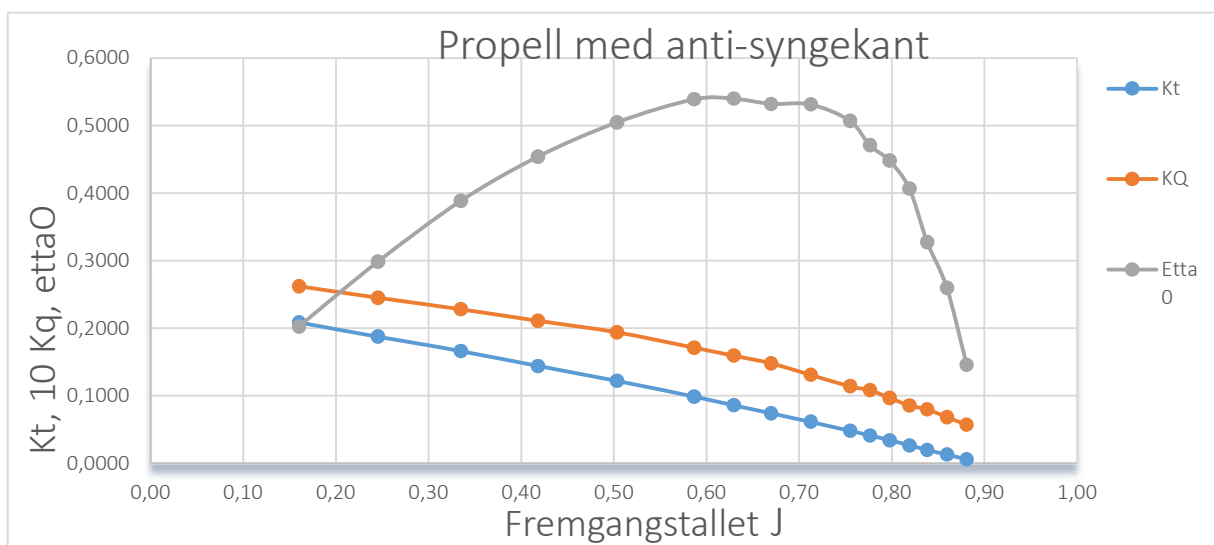
Thrustkoeffisienten, T er trusten til propellen.

$$\eta_o = \frac{K_T}{K_Q} * \frac{J}{2\pi} \quad \text{Formel 3.11}$$

Virkningsgraden til propellen



Figur 3.10 Propellkurven til propell uten anti-syngkant. Propellkurven viser fremgangstallet J, Virkningsgraden η_0 , Thrustkoeffisienten K_T , Dreimomentkoeffisient K_Q .



Figur 3.11 Propellkurven viser fremgangstallet J, Virkningsgraden η_0 , Thrustkoeffisienten K_T , Dreimomentkoeffisient K_Q .

3.3 3D Printer

3.3.1 Valg av 3D printer

Sjøkrigsskolen har to 3D printere. Den første heter *Markforged Mark Two Professional 3D-Printer* og har mulighet til å 3D-printe i nylon med eller uten fiberforsterkning. Den gir ingen reguleringsmuligheter i dysediameter eller finhetsgrad i 3d-print.

Den andre 3d-printeren heter *Ultimaker 3 Extended* og 3d-printer i slagfast polystyren. Denne printeren gir reguleringsmuligheter i dysediameter og finhetsgrad på 3d-printeren.

For å se hvilken 3d-printer som var best egnet ble propellen printet i fiberforsterket nylon og i HIPS. Propellene ble satt mot hverandre og evaluert. Faktorene som ble vurdert var nøyaktighet i print, overflate finhet og styrke. Fiberforsterket nylon hadde finest overflate, stivere propellblader og nøyaktigheten var bedre. Propellens akselhull med utfrest kilspor skulle måle 13 mm. HIPS propellen målte 12 mm og Fiberforsterket nylon målte 13.2 mm.

Fiberforsterket nylon var propellen med størst potensialet og ble valgt til å jobbe videre med, men grunnet at alle målene var 0.2 mm for store ble alle målene på tegningen i SolidWorks justert tilsvarende.

Når propelldesignet var spriket i stein ble det 3d-printet to propeller i fiberforsterket nylon, en propell uten anti-syngkant og en med 60° anti-syngkant.

3.3.2 Etterarbeid

For at propellen skal gi representative resultater må overflaten til propellen være fin. En 3d-printer bygger opp printen lagvis og det syntes på overflaten. For å få en finere overflate ble propellene børstet med 3 lag XTC-3D. Det er en selvutjevne to komponent epoxy. Når epoxyen var herdet ble den pusset ned med sandpapir fra 320, 600, 800 og avsluttet med 1000. Resultatet var en jevn og fin overflate, men propellen ble også betraktelig stivere!



Figur 3.12 Bildet viser propeller som ble 3d-printet. Den øverste propellen er i fiberforsterket nylon, den midterste propellen er i HIPS, og den nederste er fiberforsterket nylon som er belagt med epoxy.

3.4 Måleutstyr

3.4.1 Høyhastighetskamera

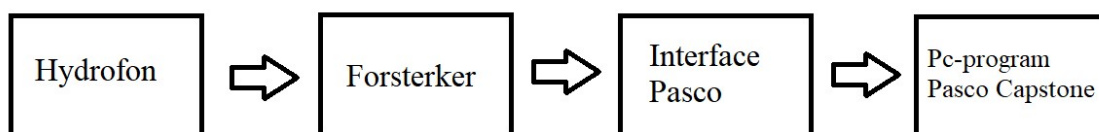
Sjøkrigsskolens høyhastighetskamera er av typen Photron SA1.1.

Det har mulighet for å ta 650 000 bilder per sekund, men for denne oppgaven ble kameraet stilt inntil å ta 10 000 bilder pr sekund med en oppløsning på 768 x 768.

3.4.2 Hydrofon

Sjøkrigsskolens hydrofon er en piezoelektrisk krystall. Den kan plukke opp signaler fra 1 Hz til 100 kHz. Hydrofonen er montert aktenfor propellen i kavitasjonstunellen så propellens

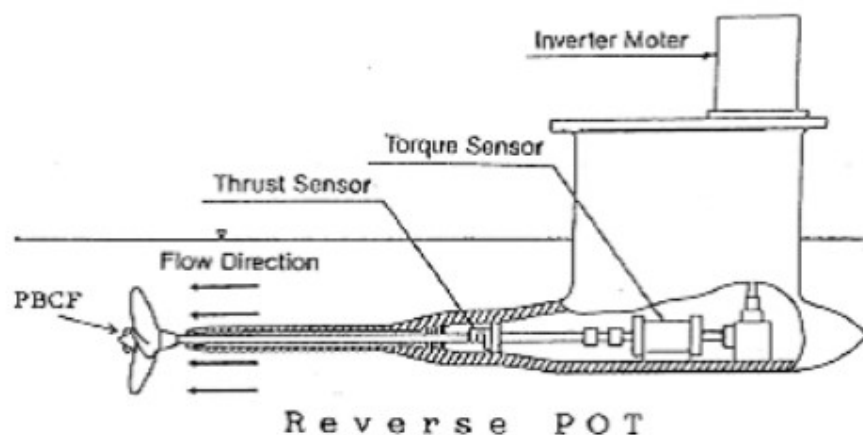
trykkbølger skulle treffe hydrofonen. Signalet går fra hydrofonen inn i en forsterker og videre inn i Interface Pasco. Interface Pasco er en omformer som gjør analoge signaler om til digitale. Interface Pasco sender digitale signaler via en USB-kabel som er koblet til en pc. På pc-en er det et program som heter Pasco Capstone som grafisk framstiller frekvensspekteret.



Figur 3.13 Bildet viser oppsettet til hydrofonen. Hvordan signalet fra hydrofonen til pc-en.

3.4.3 Kavitasjonstunellen

Kavitasjonstunellen har sensorer som registrerer trust og dreiemoment som figur 3.9 illustrere. Disse sensorene må nullstilles for hver gang kavitasjonstunellen skal brukes.



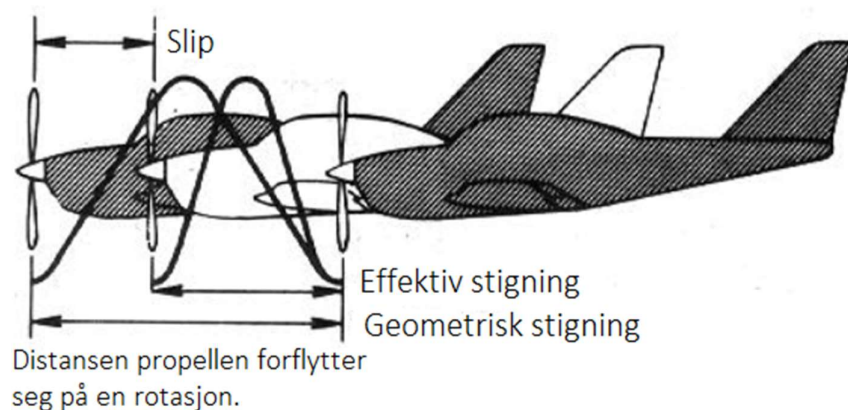
Figur 3.14 Illustrasjon av kavitasjon tunellens dynamo med plassering av trust og dreiemoment sensor.

3.5 Førtester

Før datainnsamling starter er det noen førtester som må gjennomføres så innstillingene er riktige.

3.5.1 Propellslipp

Propellen ble originalt designet for å arbeide med 4° arbeidsvinkel, men dette var gitt at propellens geometriske stigning er lik den effektive stigningen. Den geometriske stigningen forteller hvor lang fremover propellen ville flyttet seg fremover på en omdreining. En bolt som skrues inn i et emne med gjenger vil ha en effektiv stigning og geometrisk stigning som er helt lik. En propell som roterer og skyver et skip gjennom vannet vil derimot ikke ha en geometrisk stigning lik den effektive stigningen. Propellen vil oppleve slipp og bevege seg en distanse som er mindre enn den geometriske som figuren nedenfor illustrerer.



Figur 3.15 Illustrasjon av kavitasjon tunnelens dynamo med plassering av trust og dreiemoment sensor.

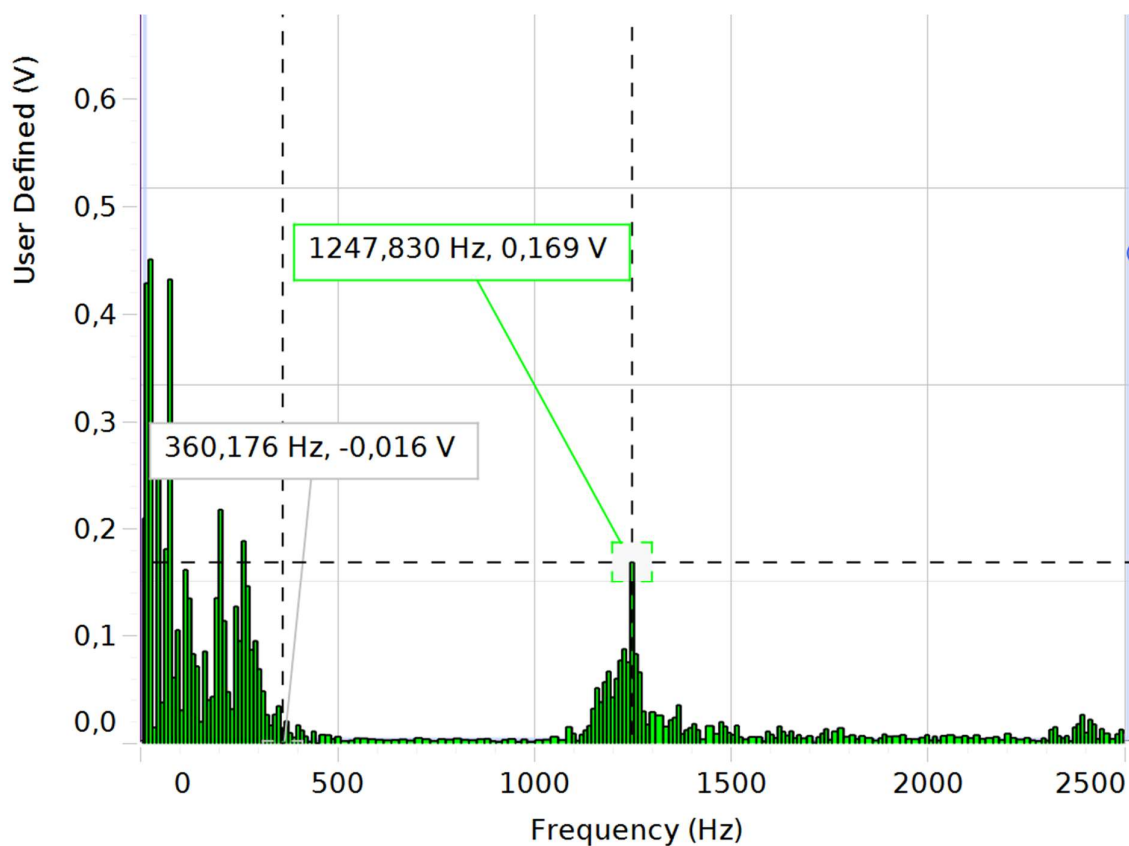
For å finne ut at hvor mye slipp propellen opplever må propellen testes. Testprosedyren for dette er gitt i vedlegg E. Videre brukes denne dataen til å beregne ut hvilke hastigheter som propellen opplever med 0° og 4° arbeidsvinkel.

Grunnet stor slipp i propellen vil den ikke oppnå ønskelige reynoldstall med 4° arbeidsvinkel og som et resultat av dette ble arbeidsvinkelen økt til 6° . Utregninger på reynoldtall (Re) og stroudetall (St) finnes i vedlegg C.

3.5.2 Hydrofon

For å sjekke ut om hydrofonen virker og hvilken data som er mulig å hente ut ved denne ble kavitasjonstunellens originale propell testet. Den ble kjørt ved forskjellige turtall helt til propellsyningen oppstå og et opptak ble tatt.

Propellen viste et klart utslag på 1248 Hz, men er fremdeles mye svakere enn signalene i det nedre sekretet.



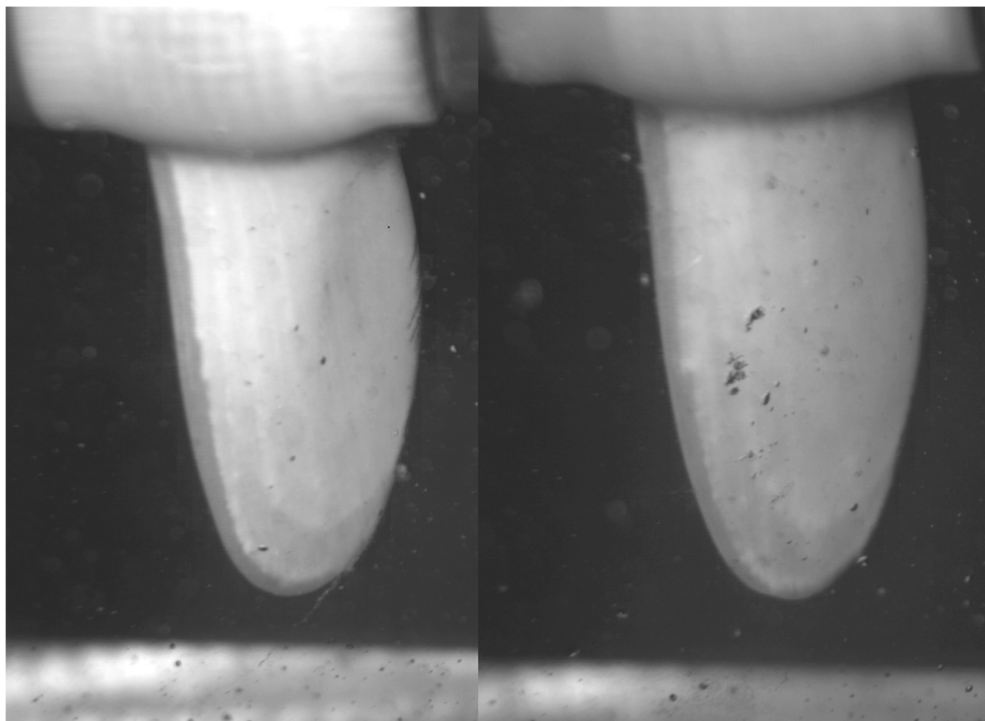
Figur 3.16 Lydopptaket viser kavitasjonstunellens fire-blads propell oppleve propellsyning.

4 Resultater og drøfting

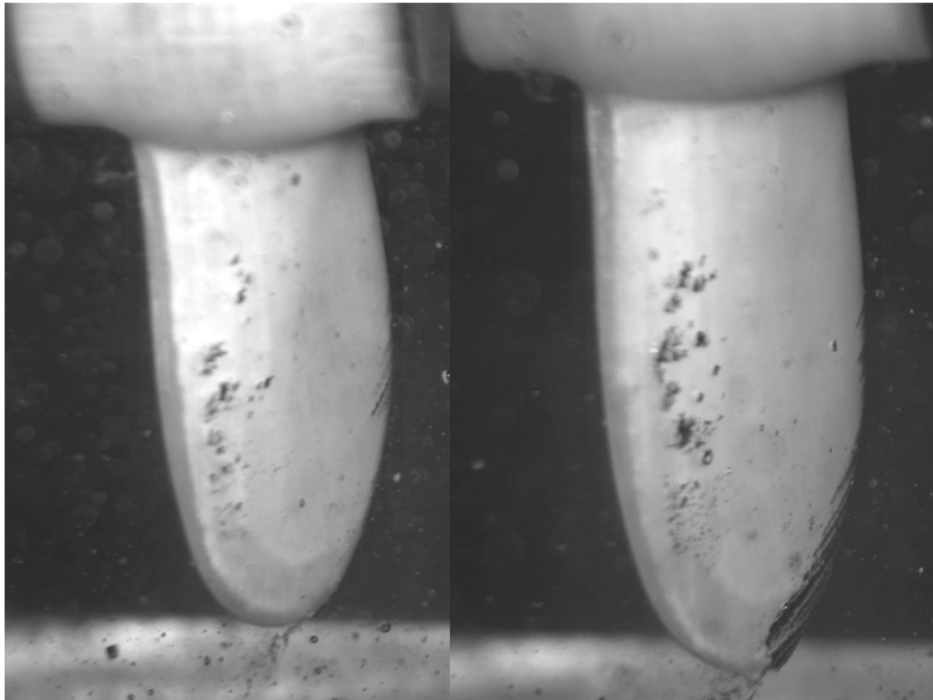
Følgene kapittel består av presentasjon av resultater og videre drøfting av mål og metode. Dersom leseren ønsker en dypere forståelse av testene som ble utført kan «Vedlegg A – Prosedyre for tunelltester» leses.

4.1 Resultater

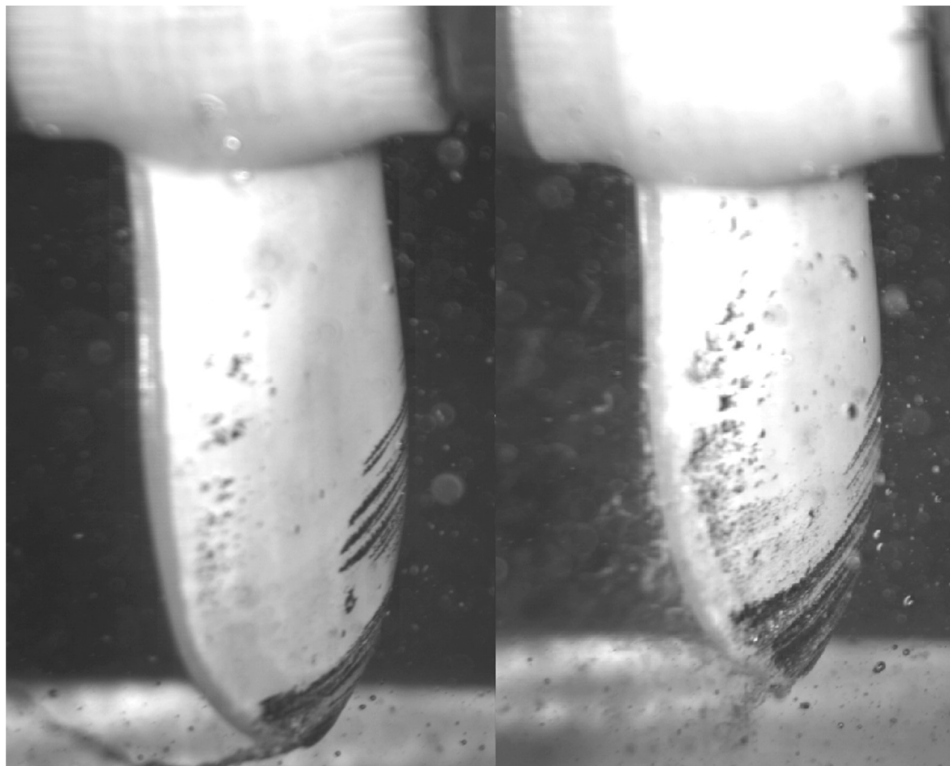
4.1.1 Virvelavringinger



Figur 4.1 Test 1 – Impellerturtall 10 o/s, propellerturtall 30,35 o/s, Pabs 49kPa

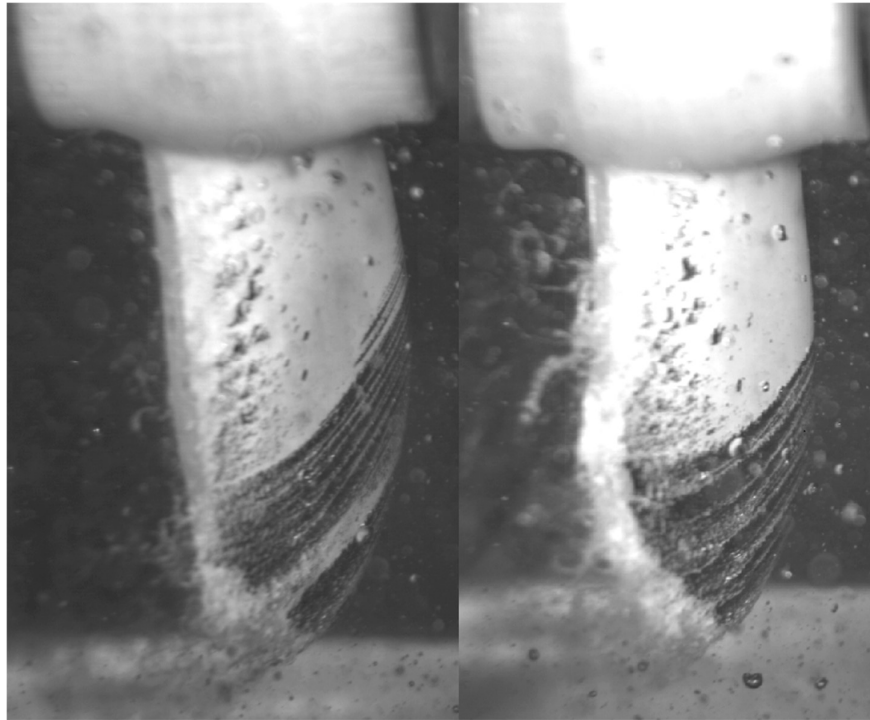


Figur 4.2 Test 2 – Impellerturtall 10.5 o/s, propellerturtall 32,04 o/s, Pabs 49kPa

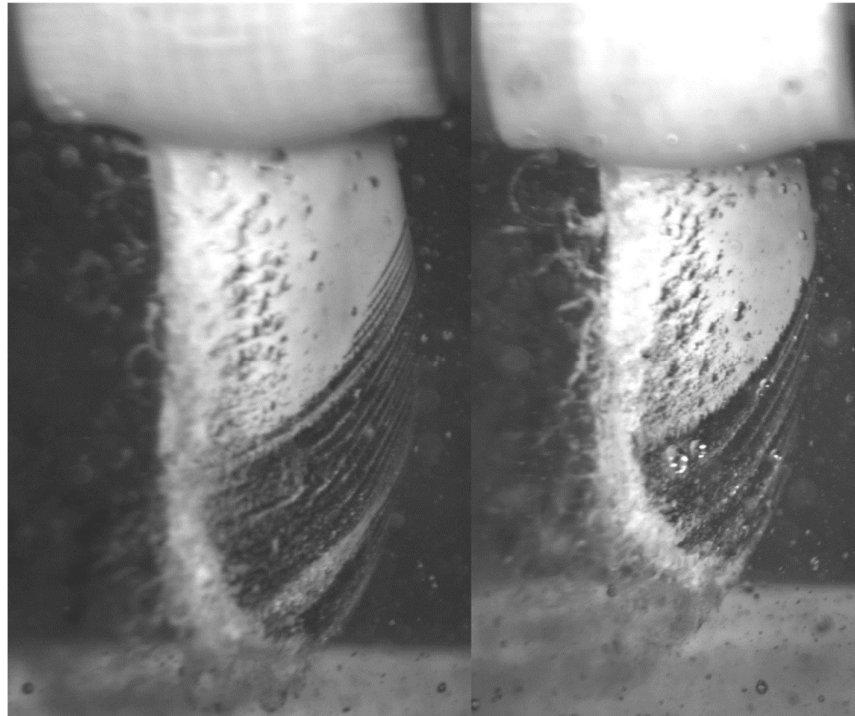


Figur 4.3 Test 3 – Impellerturtall 11 o/s, propellerturtall 33,92 o/s, Pabs 49kPa

Ugradert – internt. Skal ikke videreformidles utenfor forsvarssektoren.



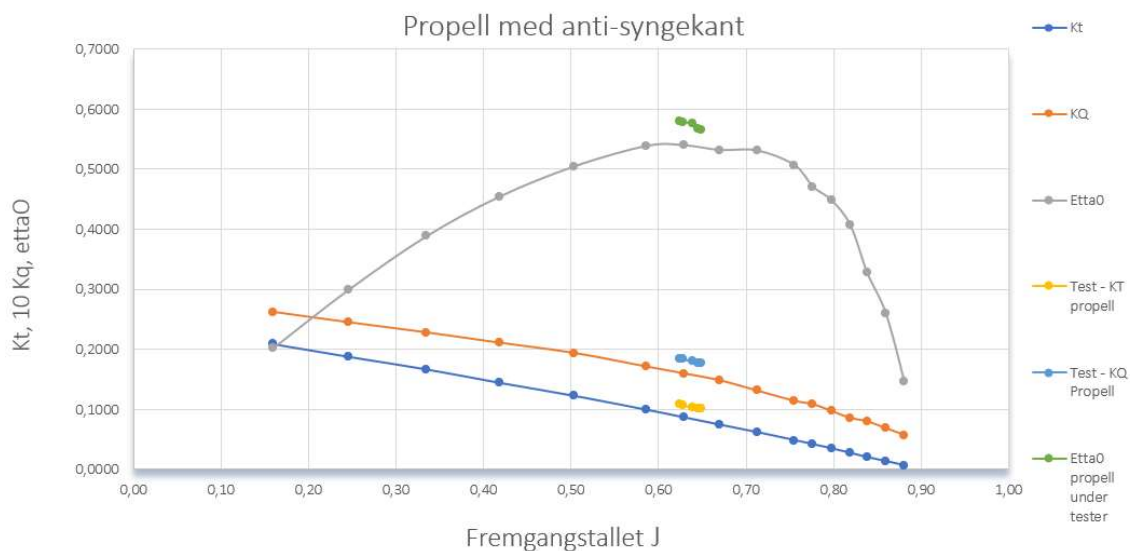
Figur 4.4 Test 4 – Impellerturtall 11.5 o/s, propellerturtall 35,81 o/s, Pabs 49kPa



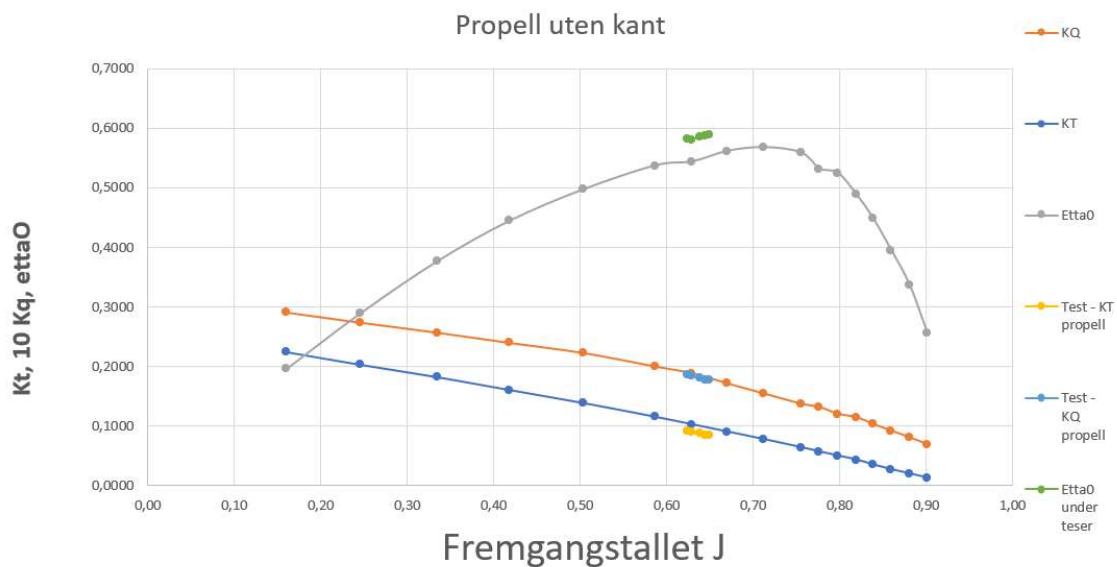
Figur 4.5 Test 5 – Impellerturtall 11.92 o/s, propellerturtall 37,29 o/s, Pabs 49kPa

Ugradert – internt. Skal ikke videreformidles utenfor forsvarssektoren.

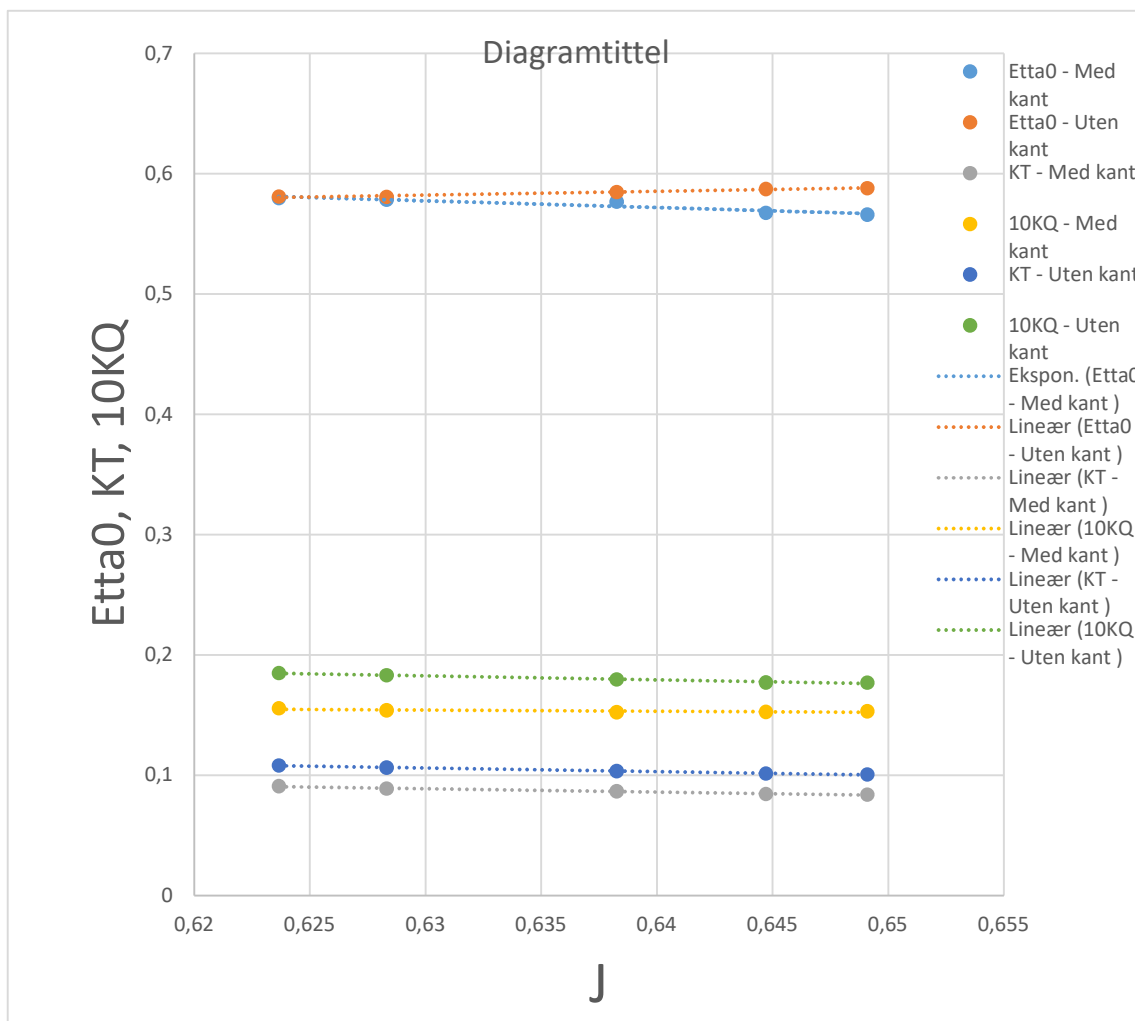
4.1.2 Propellens egenskaper



Figur 4.6 Propellkurve av propell med anti-syngekant

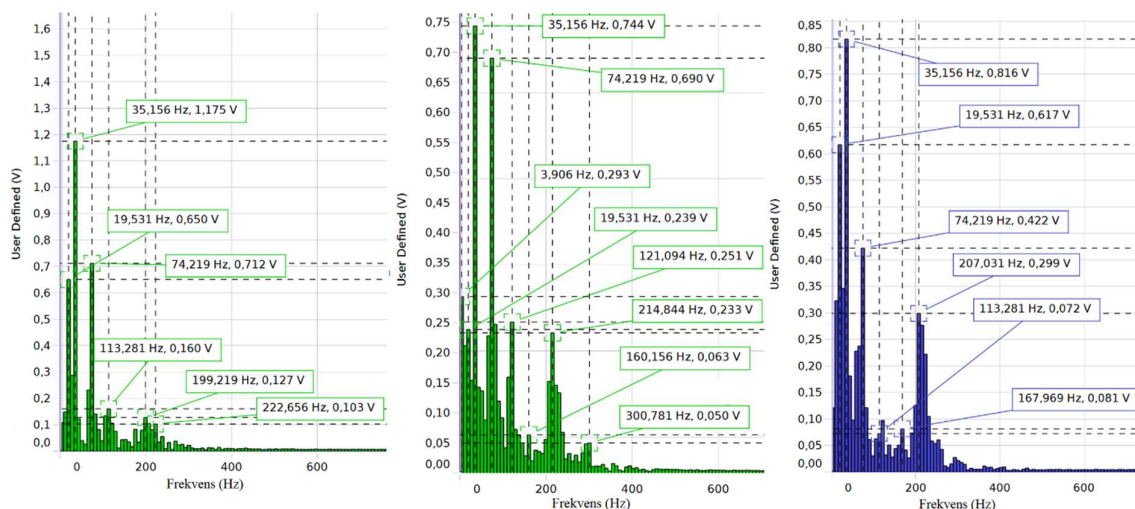


Figur 4.7 Propellkurve av propell med uten anti-syngekant

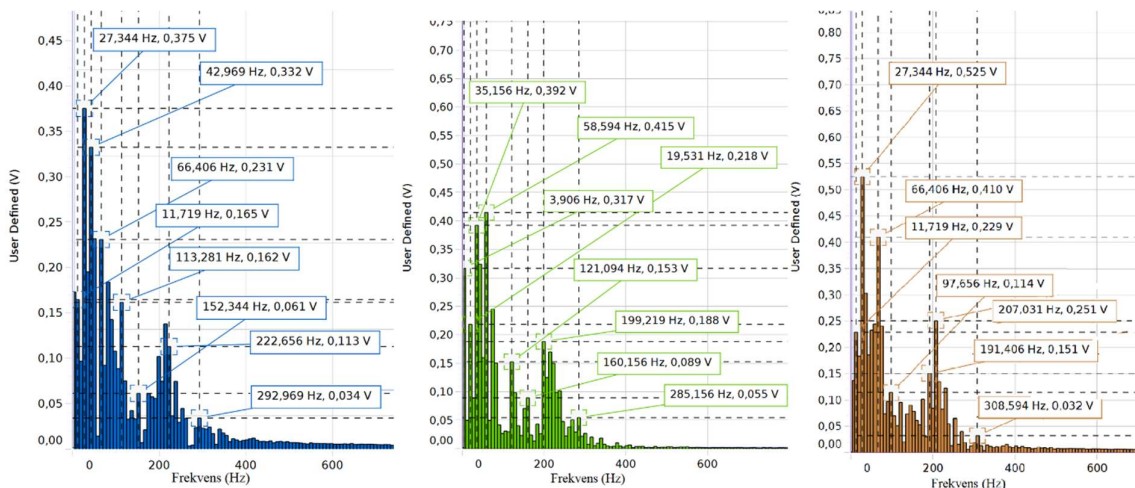


Figur 4.8 Punktdiagrammet viser virkningsgradene til begge propellene under testene, samt deres KT og KQ verdier.

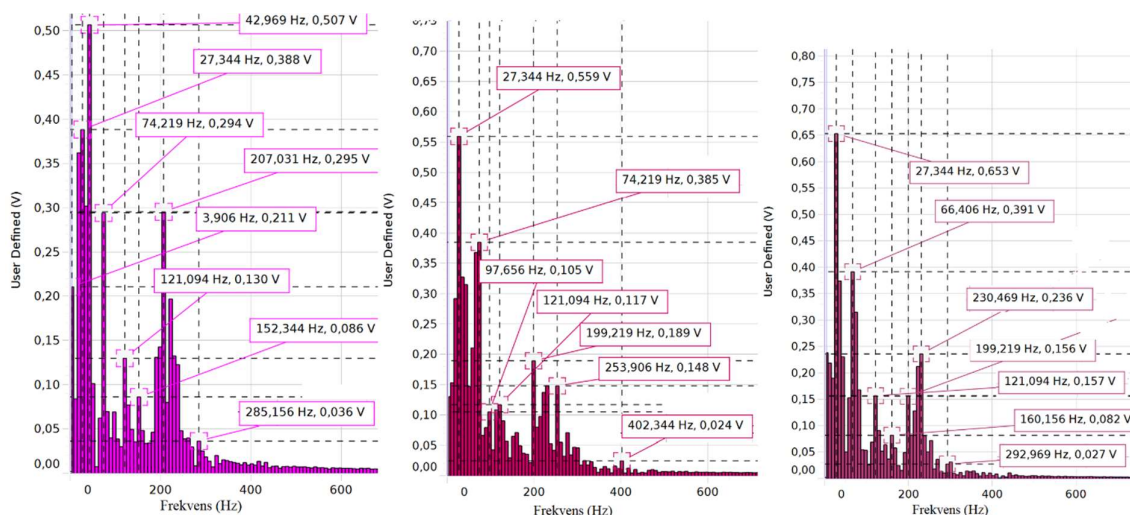
4.1.3 Hydrofonen



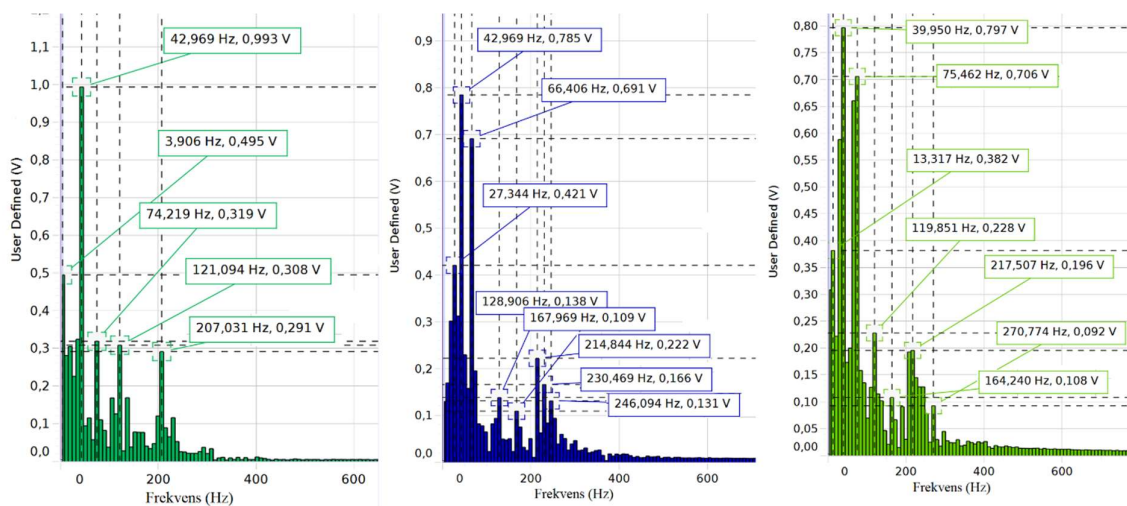
Figur 4.9 Test 1 – Impellerturtall 10 o/s, propellerturtall 30,35 o/s, Pabs 117 kPa
 Diagrammet til venstre er kjørt uten propell, midten er med anti syngkant og høyre er uten anti-syngkant.



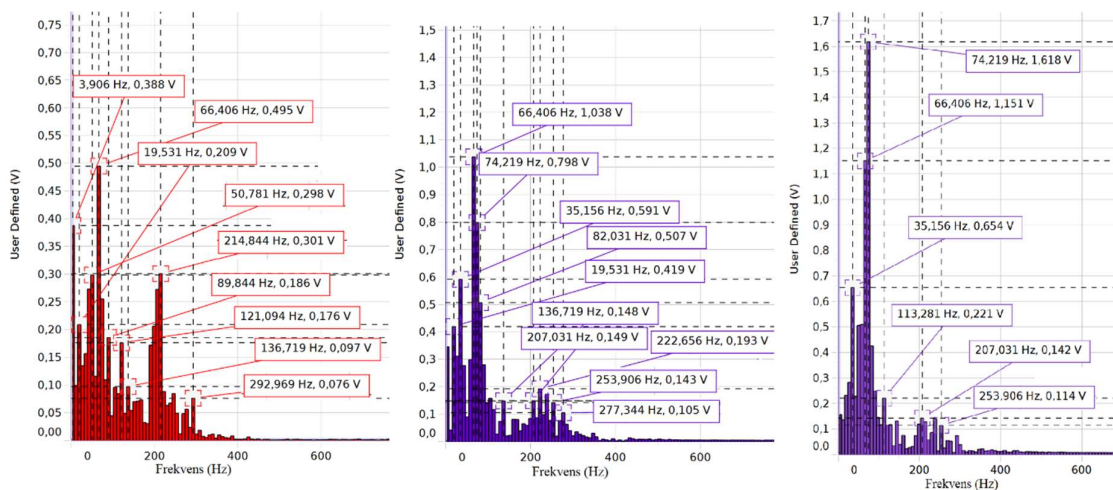
Figur 4.10 Test 2 – Impellerturtall 10.5 o/s, propellerturtall 32,04 o/s, Pabs 117 kPa
 Diagrammet til venstre er kjørt uten propell, midten er med anti syngkant og høyre er uten anti-syngkant.



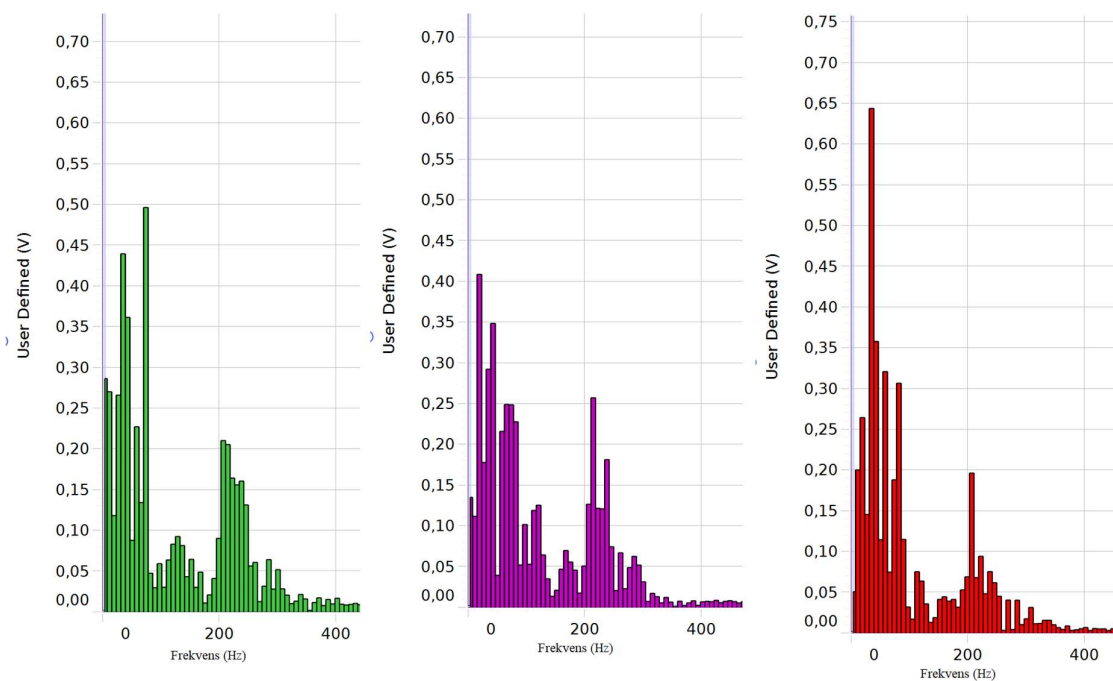
Figur 4.11 Test 3 – Impellerturtall 11 o/s, propellerturtall 33,92 o/s, Pabs 117 kPa
 Diagrammet til venstre er kjørt uten propell, midten er med anti syngkant og høyre er uten anti-syngkant.



Figur 4.12 Test 4 – Impellerturtall 11.5 o/s, propellerturtall 35,81 o/s, Pabs 117 kPa
 Diagrammet til venstre er kjørt uten propell, midten er med anti syngkant og høyre er uten anti-syngkant.



Figur 4.13 Test 5 – Impellerturtall 11.92 o/s, propellerturtall 37,29 o/s, Pabs 117 kPa
 Diagrammet til venstre er kjørt uten propell, midten er med anti syngkant og høyre er uten anti-syngkant.



Figur 4.14 Diagrammet illustrerer unøyaktigheten til hydrofonen. Alle tre optakene er gjort innenfor en tidsperiode på en minutt med identisk oppsett. Likevel viser de store variasjoner.

4.2 Drøfting

4.2.1 Reduksjon i virvelavrivninger

Før oppgavens resolusjon, vil oppgavens problemstilling påminnes:

- Kan en anti-syngekant redusere virvelavrivninger på propellens følgende kant?

Rapporter som Zobeiri (2012) og Johannessen (2020) kunne vise til at en anti-syngekant kunne redusere introduserte vibrasjoner og omfanget til virvlene som oppstår på propellens følgende kant ved å introdusere en anti-syngekant. Kanten skal lede avrivningene som oppstår på sugesiden oppstrøms som derav kolliderer med avrivningene som kommer fra propellens trykkside.

Figur 4.1 og 4.2 er det ingen tegn til virvelavrivninger, men det er indikasjon på kavitasjon på propellbladet og bladtuppene.

Figur 4.3 viser tegn til kavitasjon på begge propeller, men kun tegn til virvelavrivninger på propellbladet uten anti-syngekant.

Figur 4.4 til 4.5 viser virvelavrivninger på begge propellene, men avrivningene på propellen uten anti-synge kant ser ut til å være større.

Det kan tyde på at en anti-syngekant reduserer styrken til virvlene som oppstår som teorien og rapportene tilsier at den skal, men det er også en annen faktor som må tas hensyn til. Det er at den fysiske størrelsen og frekvensen til virvelavrivningene er en funksjon av tykkelsen til den følgende kanten som Gongwer (1952) og Hu et al. (2020) viser til i sine rapporter. Propellen uten anti-syngekant har en tykkere følgende kant som skal gi større avrivninger, men ved en lavere frekvens. Det kan tyde på at avrivningene er større, men frekvensen var umulig å tyde.

Om anti-synge kanten reduserer vibrasjoner kan ikke drøftes på grunn av manglene data. Det er ikke mulig å se frekvensen til avrivningene og da er det heller ikke mulig å se om propellen opplever «lock in» fenomenet.

4.2.2 Propellene egenskaper

I denne drøftingen skal følgende spørsmål prøve å besvares

- Kan en anti-syngekant påvirke propellens ytelse?

Det har ikke blitt gjort et dypdykk i den relevant teorien som sier noe om en anti-syngekant reduserer propellens ytelse, men det har blitt nevnt at det ikke ønsket.

Det finnes flere design på anti-synge kanter, men den mest brukte ser ut til å være den avfasete anti-syngekanten. Grunnen til dette er at trykksiden er uendret. Anti-synge kanten er på propellens sugeside, så det prosjektet arealet som produserer skyv skal være uendret. (Carlton, 2007, s. 434).

Figur 4.6 til 4.7 viser kartleggingen av propellkurvene. Propellen ble kjørt under helt like forhold for at reynoldstallet skal være likt. Disse testene var ment for å kartlegge karakteristikken av propellene for å se hvilket fremgangstall de opererte best med, men viser også hvilken propell som har best virkningsgrad. Utrengninger finnes i «Vedlegg C – Utrengninger»

Figur 4.6 viser propellen med en anti-syngekant som oppnår en maks virkningsgrad på 53,99% med et fremgangstall på 0.63.

Figur 4.7 viser propellen uten anti-syngekant som oppnår en virkningsgrad på 56,76% med et fremgangstall på 0.71.

Ser vi videre på dataen som ble samlet inn under testene som er beskrevet i «Vedlegg A – Prosedyre for propelltester» oppnådde propellen uten en anti-syngekant høyest virkningsgrad på 58,8% med et fremgangstall på 0.649. Propellen med anti-syngekant oppnådde en virkningsgrad på 57,99% med et fremgangstall på 0.623. I den første testen var det et betydelig større gap i virkningsgrad. Det kan også virke som at propellene ikke jobbet på sitt mest effektive fremgangstall ettersom begge propellene var i en stigende trend på virkningsgrad.

Det er også verdt å merke seg at propellen uten anti-syngekant produserer betydelig mer thrust, samtidig som den også krever mer dreiemoment. Det gjelder begge testene.

Det kan jo tenkes at det er ulikheter i propellene. En 3D-printer er ikke det mest nøyaktige verktøyet for å produsere propeller, og det kan ha blitt lagt ulik tykkelse med epoxy på propellene. Kontrollmåling viser også at propellen med anti-syngekant er 0.2 millimeter lengre i korden på 0.7r, likevel produserer propellen uten anti-syngekant mer thrust.

En tredje ting som kan kommenteres er at K_T og K_Q kurvene til propellen uten anti-syngekant ligger omtrent «spot on» på trendlinjen for begge forsøkene, mens K_T og K_Q verdiene til propellen med anti-synge kant ligger betydelig høyere på de fem testene som ble gjort under «Vedlegg A – Prosedyre for propelltester».

4.2.3 Eliminering av propellsynging

I denne drøftingen skal følgende spørsmål prøve å besvares

- Kan en anti-syngkant eliminere eller redusere propellsynging?

For å finne ut om en anti-syngkant kan eliminere eller redusere propellsynging ble det tenkt at en hydrofon enkelt kunne løse dette ved å sammenligne volum og frekvenser. Figur 3.16 viser at hydrofonen er vel egnet til å skille ut frekvensen som en propell synger på.

Figur 4.9 til 4.13 viser opptakene som ble gjort for en propell med anti-syng kant, uten anti-syngkant og uten propell. Det viser seg at ingen av propellene viser noen tegn til synging av høyfrekvente lyder som i figur 3.16. Det kan være flere grunner til at propellene ikke støy. Propellene er 3D-Printet i fiberforsterket nylon som muligens har en annen dempeegenskap enn tradisjonelle propeller. Dette er ikke noe kadetten har utforsket og dette er dermed bare en hypotese. Dette bekrefter derimot at propelldesign er et vanskelig fag, og det er vanskelig å si om en propell vil synge eller ikke før den er testet.

Det var også vanskelig å tolke opptakene mot hverandre. For hvert et opptak som ble tatt viste hydrofonen gjennr hvilke frekvenser som pleide å være til stede, men størrelsesordenen til disse endret seg stadig. Figur 4.14 viser tre forskjellige opptak. Alle tre opptakene ble tatt i en tidsperiode på mindre enn et minutt hvor oppsettet og omstendigheten var identiske, likevel var det stor variasjon i resultatet på alle målingene. Av den grunn ble det ikke hydrofonen studert noe mer.

5 Konklusjon med anbefaling

Denne oppgaven har hatt som mål å designe og 3D-printe to propellere som skal testes i Sjøkrigsskolens kavitasjonstunell. Det har vist seg at skolens 3D-printere kan levere propeller av god kvalitet som klarte å gjennomføre alle testene. Propellenes egenskaper har blitt kartlagt og sammenlignet mot hverandre. Det kan tyde på at propellen uten anti-syngkant har høyere virkningsgrad, men siden begge propellene viste seg å være i stigende trend på virkningsgraden kan det ikke konkluderes med. Hadde propellene blitt testet på deres best mulige fremgangstall ville kanskje tallene vært andredelens. Videre kan anti-syngkanten vise til reduksjon i styrken til virvelavrivningene i samsvar med teori. Det ble nevnt at propellen uten anti-syngkant har en trykkere følgene kant som skal gi større avrivninger og lavere frekvens, men resultatene hadde så stor forskjell at jeg velger å konkludere at en anti-syngkant reduserer avrivningene på propellens følgene kant. Til slutt med det forsøk å måle propellsynging med hydrofon. Ingen av propellene viste tegn til at propellsynging var til stede og målingene var diskuterbare. Målingene ble derfor ikke vektlagt i stor grad og kadetten anbefaler ikke den metoden for å vurdere om en propell synger eller ikke.

Anbefaling til videre forskning er å finne ut en måte til å måle vibrasjonene som oppstår i propellen. Da kan det studeres om propellen opplever «*lock in*» fenomenet. Det oppstår kun om propellen synger, og reduksjoner i introduserte vibrasjoner her vil kunne bekrefte eller å avkrefte om en anti-syngkant kan redusere propellsynging.

6 Bibliografi

- Ausoni, P. (2007). *Cavitation Influence on von Kármán Vortex Shedding and Induced Hydrofoil Vibrations*. Journal of Fluids Engineering.
- Blackburn, H., & Henderson, R. (1996). *Lock-In Behavior in Simulated Vortex-Induced Vibration*. New York : Elsevier Science.
- Blake, W. K. (2017). *Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Volume 2, s. 505-658*. Academic Press Inc.
- Carlton, J. (2007). *Marine Propellers and Propulsion (2.. utg.)*. Elsevier Ltd.
- Gongwer, C. (1952). *A study of vanes singing in water* . Journal of Applied Mecanic .
- Helseth, L. E. (2021). *Store Norske Leksikon* . Hentet 11 14, 2021 fra https://snl.no/k%C3%A1rm%C3%A1nsk_virvelgate
- Hu, J., Wang, Z., Zhao, W., Sun, S., Sun, C., & Guo, C. (2020). *Numerical Simulation on Vortex Shedding from a Hydrofoil in Steady Flow*. Journal of Marine Science and Engineering.
- Hu, J., Wang, Z., Zhao, W., Sun, S., Sun, C., & Guo, C. (2020). *Numerical Simulation on Vortex Shedding from a Hydrofoil in Steady Flow*. Journal of Marine Science and Engineering.
- Johannessen, H. H. (2020). *Numerical study of vortex shedding behind a NACA 0009 hydrofoil with an anti-singing edge*. London: Master's thesis in Mechanical Engineering, University College London.
- Kamalaraja, A. (2021). *Investigation of corner vortex in radial cascade and interaction with the trailing edge vortex*. Master's thesis in Mechanical Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- Karmansk Virvelgate* . (2021, Desember 10). Hentet fra Wikipeda: https://no.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1nsk_virvelgate#/media/Fil:Vortex-street-animation.gif
- Lee et al., S.-J. (2015). *Numerical Investigation on Vortex Shedding from a Hydrofoil with a Beveled Trailing Edge*. Hindawi Publishing Corporation.

Zobeiri et al, A. (2012). *How oblique trailing edge of a hydrofoil reduces the vortex-induced.*
Journal of Fluids and Structures.

Vedlegg (hvis slike finnes)

Vedlegg A – Prosedyre for propellslipp

Vedlegg B – Prosedyre for propellkurve

Vedlegg C – Utrekninger

Vedlegg D – Fysiske egenskaper til vann

Vedlegg E – Testprosedyre for propellslipp

Vedlegg F - Propell med tilpasset hub P-D 0-745