



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

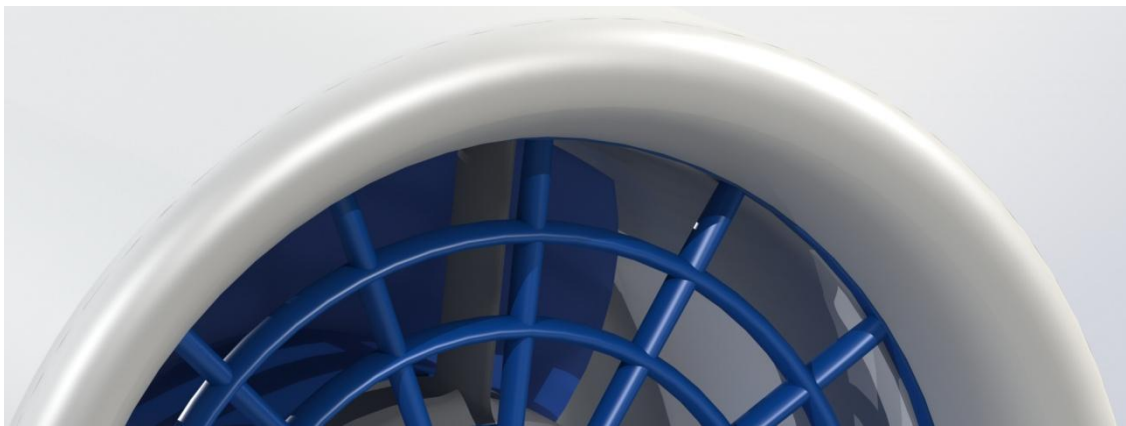
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi
Masteroppgave 2016
30 stp

Utvikling av thrusterløsning for en mikro-ROV

Development of a thruster solution for a micro ROV

Helge Lødemel
Maskin, prosess og produktutvikling

Utvikling av thrusterløsning for en mikro-ROV



av
Helge Lødemel



Mastergradsoppgave ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Institutt for matematiske realfag og teknologi

Høsten 2016

FORORD

Dette er et masterarbeid som markerer slutten på en sivilingeniørgrad i maskin- prosess- og produktutvikling ved Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Prosjektet ble gjennomført høsten 2016.

Denne høsten har vært lærerik med tilegning av kunnskap i hydrodynamikk og propellteori, fagområder jeg hadde lite kjennskap til fra før. Det har gjort at jeg har erfart å bruke ingeniørkunnskap i et annet miljø med andre krav til design og mekanikk. Det å få tilgang til produksjonsutstyr og testfasiliteter har økt min forståelse av veien fra ide til produkt, og er en erfaring jeg ser på som svært verdifull å ta med seg videre.

Vil rette en stor takk til førsteamanuensis Jan Kåre Bøe (IMT, NMBU) for oppfølging og veiledning underveis i mastergradsarbeidet. Vil også takke Professor Martin Ludvigsen (Blueye Robotics) og MARINTEK) for veiledning og tilrettelegging for testing av prototype, senioringeniør Tom Ringstad (IMT, NMBU) for diskusjoner rundt konsepttestingen, maskindesigningeniør Rune Hansen (Blueye Robotics) for hjelp med produksjon av prototypen, elektro- og hardwareingeniør Borja Serra (Blueye Robotics) og elektroingeniør Bo Peng (Blueye Robotics) for hjelp med konsepttestingen, overingeniør Torgeir Wahl (MARINTEK) for tilrettelegging og opplæring for bruk av testutstyr i MCLaben i Norsk Marinteknisk Forskningsinstitutt, avdelingsingeniør Oddvar Paulsen (MARINTEK, verksted) for tillaging av deler til testoppsettet, og overingeniør Tore Ensby (IMT, NMBU) for diskusjoner rundt tekniske tegninger. Til slutt vil jeg takke Blueye Robotics for en oppgave som bød på spennende utfordringer.

Ås, 15/12-2016

Helge Lødemel

SAMMENDRAG

Blueye Robotics er et firma som lager undervannsdroner for forbrukermarkedet. Dagens løsning for dronenes framdrift- og manøvreringsmekanisme kjøpes i dag fra en tredjepart. Tredjepartens motor, propell og festedeksel brukes i et eget dysedesign integrert i ROV-skroget. Jeg fikk dermed i oppgave å utvikle en ny thrusterløsning ut i fra ønskede ytelsesspesifikasjoner og metrisk grovspefisering.

Målet med masterarbeidet var å spesifisere, bygge og teste en prototype av en ny thrusterløsning ment for kommende versjon av Blueye Robotics sin undervannsdrone, Explorer P2. Arbeidet er ment som et grunnlag for Blueye Robotics i arbeidet med å utvikle en egenprodusert thruster.

Utformingen thrusterløsningen tok utgangspunkt i metriske spesifikasjoner til dagens løsning i Explorer P1 og Blue Robotics sin T200 thruster. Lesing av støttelitteratur og forskningsartikler rundt propeller og thrustere var essensielt for å tilegne kunnskap for utføring av masteroppgaven. I tillegg til dette ble det studert en tidligere masteroppgave for å kartlegge ulike faktorer i thrusterdesign.

Det ble deretter utarbeidet konsepter ved bruk av ulike retningslinjer for produktutvikling, blant annet med tanke på produksjons- og monterings effektivisering, både for prototype og for integrering av designet i Explorers skrog. Ulike forutsatte bruksscenarioer la fundamentet for dimensjoneringsberegningene, sammen med spesifikasjonene til valgt motor. Konseptene for prototypen ble deretter tatt videre til 3D-modeller og analysert med elementmetoden (FEM) og strømningsanalyser (CFD) i Solidworks. Flere av komponentene har interaksjon enten direkte eller indirekte med hverandre og måtte derfor tilpasses i fellesskap etter hvert som endringer i designet ble gjort. Etter kontinuerlig produktoptimering gjennom analyser og beregninger ble 3D-modellen ferdigstilt og gjort klar til 3D-printing og testing.

Det ble gjort utført forankringstest av thrusteren i et basseng i MCLaben på MARINTEK for å teste konstruksjonens funksjon. Det ble testet tre propeller med forskjellige stigninger for å teste hvilken propellform som passet motoren best. Det ble kartlagt effekt, turtall, kraft, strøm og spenning. Ytelsesdataene ble brukt til å finne forskjellige karakteristikker til thrusteren med de tre propellene og sammenlignet med oppgitte ytelsesdata fra eksisterende løsning og tidligere foreslått løsning fra en masteroppgave.

Den nye løsningen genererte en skyvekraft på 48,7 N ved effekt 678W og turtall lik 4100 rpm. Konstruksjonens totale vekt (m/motor) ble 851 gram, med følgende utvendige mål: lengde 120mm, diameter front 120 mm og diameter bak 108,5 mm. Enhetskostnaden ble 3600,2 NOK.

ABSTRACT

Blueye Robotics is a company that makes underwater drones for the consumer market. Today, the thruster solution is bought from a third party supplier. This thrusters' propeller and motor are used in a self-designed thruster housing integrated in the ROV hull. My task was to develop a new thruster solution with respect to requested performance and metric specifications.

The thesis' objective was to specify, build and test a prototype thruster-solution for Explorer P2, the new version of Blueye Robotics underwater drone. The report was meant as a foundation for Blueye Robotics' goal to build their own thruster solution.

The development of the design was initiated with looking at metric specifications of the existing thruster housing solution in the Explorer P1 and the T200 thruster from Blue Robotics. Reading supporting literature and research articles about propellers and thrusters was essential to get the needed knowledge to execute the thesis work. In addition to this, an earlier master thesis on the subject was then taken into consideration to map out different factors around thruster design.

It was then carried out concepts with the use of different product developing techniques with regard to assembly and production efficiency, both for the prototype and for the design to be integrated in the Explorers' ROV hull. Different foreseen user scenarios were used to create a foundation for the dimensioning calculations, together with the specifications of the chosen electrical motor. The concepts for prototyping were then taken further by making 3D-models in Solidworks and analysing them with finite element analysis (FEA) and flow simulation (CFD). Several of the components interact either direct or indirect with each other, and had to be concurrently adjusted when the design was altered. After a continuously product optimization process the result was a 3D-model ready to be 3D-printed and tested.

A bollard pull testing of the thruster was executed in the testing facilities in MCLab (MARINTEK) to test its function and performance, together with revealing strong and weak sides of the design. Three propellers with different pitch was tested to find one that best suited the motor. The power usage, rotation speed, force, current and voltage was mapped. The performance data was used to find different characteristics of the thruster with the three propellers and the significance of the proposed thruster protection on the performance.

The new solution generated a thrust of 48,7 N at 678W, 4100 rpm and current 45.5 A. The total weight of the thruster (included the motor) was 851 grams, of the following outside dimensions: length 120mm, front diameter 120mm, rear diameter 108,5 mm. Unit price was 3600,2 NOK.

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Dagens løsning	2
1.3 Konkurrerende løsninger	2
1.4 Markedsbehov og potensiale	4
1.5 Oppdragsbeskrivelse	5
1.6 Problemstillinger og teknologiske flaskehalsar.....	5
2. Prosjektplan	6
2.1 Prosjekt målsetninger	6
2.1.1 Hovedmål	6
2.1.2 Delmål	6
2.2 Arbeidsplan med milepæler	6
2.3 Begrensninger for arbeidet	7
3. Metodebeskrivelse	8
3.1 Viktige begreper	8
3.2 Symboler og enheter	9
3.3 Formler	11
3.4 Metode og løsningsverktøy.....	13
3.4.1 Integrert produktutvikling (IPD)	13
3.4.2 Pughs metode.....	13
3.4.3 VDI2221 (Verein Deutscher Ingenieure)	13
3.4.4 Design for produksjon og montering	16
3.4.5 Programvare.....	16
3.4.6 Rapport.....	17
3.4.7 Produkt.....	17
3.4.8 Kvalitetssikring	17
3.5 Prosesstrinn.....	18
4. Teori og Teknologitredning	19
4.1 ROV.....	19

	Side
4.2	Elektromotorer 19
4.2.1	DC-motor..... 19
4.2.2	Børsteløs DC-motor..... 20
4.3	Aktuell hydrodynamikk 24
4.3.1	Krefter på objekter i vann 24
4.3.2	Momentprinsippet anvendt på propeller 25
4.3.3	Laminær og turbulent strømning 27
4.3.4	Kavitasjon 28
4.3.5	Reynolds-tallet 28
4.4	Thrusterløsninger 29
4.4.1	Akseldrevet..... 29
4.4.2	Periferidrevet 29
4.5	Propellteori..... 30
4.5.1	Propellbegreper..... 30
4.5.2	Skyvekraft..... 34
4.5.3	Propell i dyse 35
4.5.4	Karakteristikker 35
4.6	Degradering av polymerer, hydrofobi og vanntetting 36
5.	Produktspesifisering 37
5.1	Produktmålsetting..... 37
5.2	Problemanalyse med vektning av ønskede egenskaper og ytelser 37
5.3	Metrisk grovspefisering 38
6.	Konseptgenerering..... 41
6.1	Tidligere arbeid 41
6.2	Funksjonsanalyse 42
6.3	Komponentutforming og seleksjon..... 43
6.3.1	Dyse (Tverrsnitt)..... 44
6.3.2	Dysegitter 46
6.3.3	Propell 48
6.3.4	Støttestag 50
6.3.5	Tverrsnitt for støttestag og dysegitter 51
6.3.6	Motorvalg..... 52
6.3.7	Deksel (foran og bak propell) 54

	Side
6.3.8 Dyselepper.....	54
6.4 Øvrige komponenter	54
6.4.1 Skruer og blindmuttere	54
6.4.2 Lager	55
6.4.3 Motorkontroller (ESC)	55
6.5 Moduldesign.....	56
6.5.1 Interaksjoner	56
6.5.2 Dyse og støttestag.....	57
6.5.3 Propell og motor	57
6.5.4 Propell og dyse	57
6.6 Valgt løsning for prototype	58
6.6.1 Valgte former	58
6.6.2 Propellens stigning	59
6.7 Løsningsforslag til serieproduksjon.....	60
7. Grunnlagsberegninger.....	61
7.1 Brukspåkjenninger og materialer.....	61
7.2 Dimensjonering	61
7.2.1 Støttestag	62
7.2.2 Skrueforbindelser	63
7.3 Dynamiske belastninger og sikkerhet mot utmatting.....	66
8. FEM- og CFD analyser	67
8.1 Oppsett for simulering	67
8.2 Simuleringsresultater	68
8.2.1 Statisk analyse og egenfrekvens (FEM)	68
8.2.2 Strømningsanalyse (CFD)	71
9. Ekstern konsepttesting.....	76
9.1 Målsettinger for testingen	76
9.2 Ekspertgruppe	76
9.3 Bygging av prototype	77
9.4 Testing.....	79
9.5 Testresultater og resultattolkning.....	82
9.6 Sammenligning.....	85
9.7 Feilkilder	87

	Side
9.7.1 Generelt.....	87
9.7.2 Kraftmåling.....	87
9.7.3 Data fra kilde	88
10. Produktarkitektur og konseptdesign.....	89
10.1 Sammenstilling og spesifisering	89
10.2 Komponenter	90
10.3 Standardkomponenter.....	92
11. Framstilling og produksjonskostnader	93
11.1 Produksjonsbeskrivelse.....	93
11.2 Kostnads kalkyle for prototypen.....	94
11.3 Kostnads kalkyle for serieproduksjon	95
12. Robusthet og vedlikehold.....	97
12.1 Strukturoptimering med FEM og CFD	97
12.2 Overflatebehandling og vedlikehold	101
13. Markedspresentasjon	102
13.1 Rendringer	102
13.2 Tekniske beskrivelser	104
13.2.1 Eksplosjonstegning.....	104
13.2.2 Monteringsanvisning.....	105
14. Prosessevaluering og diskusjon	107
14.1 Konseptutviklingsarbeidet	107
14.2 Designrevisjon, produksjon, kostnadsreduksjon	107
15. Konklusjon.....	110
15.1 Resultater og anbefalinger	110
15.2 Anbefalinger	110
15.3 Videre arbeid.....	111
16. Referanser	112
Vedlegg.....	115

1. INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

ROV'ene på markedet i dag gjør det mulig å utføre visuelle og fysiske oppdrag under vann. De aller minste, mikro-ROV'ene, er primært brukt til visuell inspeksjon. Utstyrt med kamera som har opptaksfunksjon og nåtidsstrømning av video til overflaten er det lett å dokumentere observasjonene. De kan derfor fungere som et viktig ledd i overvåkningssystem i offshore industri, men også for nysgjerrige og eventyrlystne forbrukere.

BlueEye Robotics er et firma med opphav i AMOS (Autonomous Marine Operations and Systems) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim. AMOS er et forskningssenter med fokus på utvikling innen marin teknologi ved interdisiplinært arbeid inkludert hydrodynamikk, mekanikk, navigasjon og kontroll [1].

Tredje generasjons ROV fra dette firmaet skal nå utvikles, og dens framdrift og manøvreringsmekanisme står sentralt. For denne undervannsdronen som primært er tenkt for massemarkedet er det essensielt å finne en gylden middelvei mellom kvalitet og pris. Samtidig stiller sjøens akvatiske forhold krav til ROV'ens oppbygging og materialer.



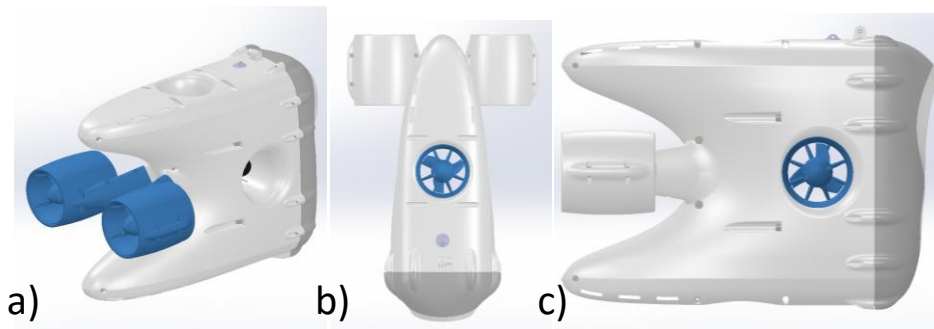
Figur 1: Blueeye Explorer P1 i bruk (Foto: Jonas Follesø [2])

1.2 Dagens løsning

I dag brukes det komponenter fra en thruster fra firmaet Blue Robotics. Det brukes samme motor, motorfeste, motorfestedeksel og propell. Komponentene er montert i en egendesignet dysekonstruksjon integrert i ROV's kroget (Figur 3).



Figur 2: a) Blue Robotics T200 [3].



Figur 3: 3D-modell av P1 Explorer med thrusterne markert i blått, a) to horisontale b) én vertikal c) én lateral [81].

1.3 Konkurrerende løsninger

Her skal sees på spesifikasjonene til lignende produkter på markedet i dag. Hver ROV har sine særtrekk og har derfor sine egne krav til thrusterne de bruker, men det er likevel nyttig å se hvor stor skyvekraft de har i forhold til ytre dimensjoner, vekt, batteri m.m. Et annet punkt å se på når man sammenligner ROV'er er hvor stabile de er i vannet. Dette henger sammen med hvor mye energi den må bruke for å holde fokus på objekter, som igjen avhenger av effektive thrustere.

Spesifikasjonene har noen mangler hos enkelte, da det ikke er opplyst om i katalog eller hjemmeside. Det vil ikke bli gjort noen grundig analyse av fordeler og ulemper med de ulike ROV'ene, da det i dette prosjektet kun skal handle om thrusterløsningen.

Tabell 1: Oversikt over noen konkurrerende løsninger.

Konkurrent	Beskrivelse
	<p>Deep Trekker Denne har fire vektoriserte thrustere plassert i hvert sitt hjørne, og manøvrerer vertikalt og lateralt ved å flytte tyngdepunktet med innvendige vekter. [5]</p>
<p>Figur 4: Deep Trekker DTX2 [4].</p>  <p>Figur 5: Seabotix LBV150-4 a) ROV [6], b) thruster [7].</p>	<p>Seabotix Et firma fra USA som har bakgrunn i flere års forskning i det marine miljøet, og ut i fra sin ekspertise lager de robuste undervannsdroner med masse funksjonalitet. Den har fire thruster: to horisontale, en vertikal og en lateral. [8]</p>
 <p>Figur 6: VideoRay Pro 4, a) ROV [9], b) thruster [10].</p>	<p>VideoRay En stor aktør fra USA som har vært på markedet siden 1999. Denne brukes over hele verden til alle mulige oppdrag. Har to thrustere som kan leveres i forskjellige diametre ut i fra kundens behov. [11]</p>
 <p>Figur 7: AC-ROV [12].</p>	<p>Ac-Rov Et firma fra Skottland som leverer små ROV'er til det globale subsea-markedet. Den har kubisk form og totalt 6 små thrustere som er periferidrevne: 4 vektoriserte horisontale thrustere og 2 vertikale. [13]</p>

Tabell 2: Sammenligning av fire konkurrerende ROV'er.

Spesifikasjon	Deep Trekker DTX2 [14]	Seabotix LBV150-4 [15]	VideoRay Standard Pro 4 [16]	AC-ROV [17]
Lengde	279	530	375	203
Bredde	325	245	289	152
Høyde	258	254	223	146
Vekt (kg)				
▪ ROV	8,5	11	6,1	3
▪ Konsoll	-	2	16	
▪ Totalt	26	58,5	38,5	18
Dybde (m)	305	150	305	100
Tether-kabel				
▪ Lengde (m)	150/300	150	152	120
▪ Tykkelse (mm)	5	8	11,7	
Batterikapasitet (timer)	4-8	-	-	-
Antall thrustere	4	4	3	6
Kraft (N)	107	68,7	98,1	-
Strøm (A)	-	-	33	
Toppfart (m/s)	4,6	3,7	7,8	-
Systemeffekt (W)	-	1200	800	300

1.4 Markedsbehov og potensiale

Det allerede flere aktører på markedet i dag som varierer seg i mellom med forskjellig funksjonalitet, utseende og pris. Slike kompakte ROV'er er veldig allsidig når det kommer til bruksområde. De blir derfor brukt til inspeksjon i offshoreindustrien, forskning og åstedsgrensning, i tillegg til å tilfredsstille forbrukerens generelle nysgjerrighet angående akvakultur, vrakrester m.m. Den kan også bli brukt til å dokumentere akvatiske aktiviteter som snorkling og dykking.

Felles ønsket konkurransefortrinn for disse er å tilby kunden best brukeropplevelse for pengene og nøkkelen til suksess er å produsere et produkt som kunden blir fornøyd med. Thrusteren er viktig for ROV'ens kvalitetsfølelse, og er en funksjon som forventes at er til stede. Det er en funksjon som kanskje ikke tenkes over i like stor grad som spesialfunksjonene (Kamera, sensorer, VR m.m.). men kan og begeistre ved å yte utover forventning . Alt tatt i betraktning er det essensielt å levere en bedre brukeropplevelse og samtidig sikre pålitelighet for å skille seg fra konkurrentene.

1.5 Oppdragsbeskrivelse

Ønskede spesifikasjoner er diskutert med oppdragsgiver Martin Ludvigsen [18]

- Fremdriftshastighet mellom 0,5 og 1 m/s
- Arbeidsdybde: 120 m
- Maks vekt på 2 kg pr. thruster
- Minimum trekraft på 50 N
- Lavspennings DC strømforsyning
- Tilnærmet vedlikeholdsfritt
- Høy pålitelighet og levetid
- Lav kostnad

1.6 Problemstillinger og teknologiske flaskehals

Generelt

- Korrosjonsresistans og vanntetting.
- Dimensjonering i forhold til belastninger.
- Kompromisser mellom ytelse og batterikapasitet.
- Kostnad
- Montering, produksjon og vedlikehold.
- Langvarig bruk.
- Material

Spesifikke

- Sentrering av propell, minimere avstand til dysevegg.
- Ytre mål og ønskede ytelsesspesifikasjoner.
- Plassering av motorkontrolleren.
- Hydrodynamisk utforming av komponenter.

2. PROSJEKTPLAN

2.1 Prosjekt målsetninger

2.1.1 Hovedmål

Spesifisere, bygge og teste en funksjonell prototype for en ny thrusterløsning for neste generasjons mikro undervannsdrone fra Blueye Robotics.

2.1.2 Delmål

- Spesifisere ønskede produktspesifikasjoner og grovt innhold i oppgaven.
- Velge hovedløsning med grunnlag i økonomi, hydrodynamikk og gjennomførbarhet.
- Ferdigstille 3D-modell til produksjon med tekniske tegninger og anvisninger, samt simuleringer i Solidworks.
- Fullføre testing av bygd prototype.
- Ferdigstille og levere rapport
- Presentere resultatene muntlig.

2.2 Arbeidsplan med milepæler

Milepælsplan

Tabell 3: Delmål.

Delmål nr.	Dato	Milepæl
1	15.08.16	Produkt og oppgavespesifisering
2	12.09.16	Valg av hovedløsning
3	2.11.16	Ferdigstilling av 3D-modell
4	19.11.16	Testing av prototype ferdig
5	15.12.16	Levering av rapport
6	20.01.17	Muntlig presentasjon

Tabell 4: Utdrag fra arbeidsplan med markerte milepæler.

Aktivitet	August	September	Oktober	November	Desember	Januar
Valg av oppgave	1					
Litteraturstudie						
Teoriutredning						
Konseptutvikling				2		
Beregninger						
3D-modellering				3		
Simuleringer						
Bygging av prototype						
Testing av prototype					4	
Rapportskriving					5	
Forberedelse av disputas						6

2.3 Begrensninger for arbeidet

- Numerisk optimering av former blir ikke utført.
- Prototypen blir ikke testet under trykk.
- Det blir ikke utarbeidet forslag til dyseløsning til vertikal thruster.
- Antall deler som testes begrenses på grunn av tidsbegrensninger.
- Overflatefriksjon blir ikke tatt med i simuleringene.
- Det vil ikke bli gjort testing over lenger tid for å sjekke hvordan jevn bruk påvirker konstruksjonen og motoren.
- Glidelager og korrosjonsresistente kulelager blir ikke inkludert i testing av prototype. Alternativer blir i stedet foreslått.
- Kostnadskalkylen er et grovt estimat.
- Konkurrentkostnadsanalyse vil ikke bli gjennomført.
- Testing av prototype og simuleringer blir kun utført i framover-retning.
- 3D-modell vil kun spesifiseres for prototypeproduksjon.

3. METODEBESKRIVELSE

Her vil det gis en oversikt over ulike forkortelser, begreper, symboler, enheter og formler som er brukt i rapporten. Det vil også greies ut om anvendte produktutviklingsmetoder og prinsipper som dannet grunnlaget for konseptgenereringsprosessen og utvikling av løsningene.

3.1 Viktige begreper

Tabell 5: Forkortelser brukt i rapporten.

Forkortelser	Forklaring
NMBU	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
IMT	Institutt for matematiske realfag og teknologi
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
MARINTEK	Norsk marinteknisk forskningsinstitutt
ROV	Remotely Operated Vehicle
Thruster	Manøvrerings- og framsdriftsmekanisme
FEM	Finite element analysis (elementmetoden)
CFD	Computational fluid dynamics (strømningsanalyse)
CAD	Computer Aided Design
IPD	Integrert produktutvikling
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
DFA	Design for Assembly (montering)
DFM	Design for Manufacture (produksjon)
DC	Direct current (likestrøm)
BLDC	Brushless direct current (børsteløs likestrømsmotor)
ESC	Electronic Speed Controller (motorkontroller)
Tether	Norsk: Navlestreng (kabel til å overføre datasignaler)
RPM	Rotasjoner per minutt
ems	Elektromotorisk spenning

3.2 Symboler og enheter

Tabell 6: Symboler med tilhørende enheter brukt i rapporten.

Navn	Symbol	Verdi og enhet
Rotasjonshastighetskontant	K_v	rpm/V
Momentkonstant	K_t	Nm/A
Motspenningskonstant	K_e	$V/(rad/s)$
Kraft	F	N
Skyvekraft	T	N
Masse	m	kg
Massetetthet	ρ	kg/m^3
Hastighet	V	m/s
Volumstrøm	Q	m^3/s
Massestrøm	\dot{m}	kg/s
Viskositet	ν	mm^2/s
Vinkel	$\theta, \alpha, \phi, \gamma$	$^\circ$
Lengde	L, l	m
Lengde (nedbøying)	x, z	mm
Treghetsradius	i	mm
Bredde	B, b	mm
Høyde	H	mm
Høyde	h	mm
Tykkelse	t	mm
Diameter	D	mm
Diameter	d	mm
Radius	R	mm
Radius	r	mm
Side (trekant)	C	mm
Areal	A	mm^2
Stigningsforhold	Z	–
Omdreiningstall	n	o/min
Moment	M	Nm
Effekt	P	W

Tabell 6: Symboler med tilhørende enheter brukt i rapporten.

Navn	Symbol	Verdi og enhet
Strøm	I	A
Spenning (elektrisk)	U	V
Tverrsnittsmodul	W	mm^3
Annet arealmoment	I	mm^4
Spenning	σ	N/mm^2
Magnetisk fluks	ϕ	Vs
Induktans	L	
Spesifikk vekt	γ	N/m^3
Kinetisk energi	K	J
Potensiell energi	E	J
Strømningshastighet	U	m/s
Effektivitet	η	-
Kinetisk energi pr. masseenhet	h	m
EMS	ϵ	V
Sum	Σ	-
Skjærspenning	τ	N/mm^2
Sikkerhetsfaktor	n	—
Elastitetsmodul	E	N/mm^2
Skjærspenning	τ	N/mm^2
Tid	T	$s, sekunder$
Hastighet (generell)	v	m/s
Hastighet (vinkel)	ω	rad/s
Tyngdeakselerasjon	g	$9,81 \frac{m}{s^2}$
Viskositet (dynamisk)	μ	—
Differanse	Δ	—

3.3 Formler

Her gis det en oversikt over formlene i fra aktuell hydrodynamisk teori og formler brukt til dimensjoneringsberegninger.

Tabell 7: Hovedformler brukt i rapporten.

Forklaring	Formel	Nummerering
Forhold mellom induisert motspennings- og momentkonstant	$K_v = \frac{1}{K_t}$	4.1
Moment	$M = K_t I$	4.2
Vinkelhastighet	$\omega = \frac{2\pi n}{60}$	4.3
Effekt (mekanisk)	$P = M\omega = K_t I\omega$	4.4
Magnetfelt	$\phi_m = LI$	4.5
Indusert spenning (ems)	$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$	4.6
Spenning over spole	$\Delta V = \varepsilon - Ir$	4.7
Effekt (tap)	$P = I^2 R$	4.8
Effekt (elektrisk)	$P = UI$	4.9
Drag kraft	$F_d = \frac{1}{2}\rho C_D AV^2$	4.10
Generert løftekraft fra vingeprofil	$F_L = F_0 + F_{Di}$	4.11
Krefter på overflate	$F = \Sigma(\vec{P}\Delta A)$	4.12
Energi (potensiell)	$E = mgh$	4.13
Energi (kinetisk)	$K = \frac{1}{2}mv^2$	4.14
Bernoullis ligning	$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$	4.15
Kontinuitetsligningen	$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \dot{m}$	4.16a
	$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q$	4.16b
Kraft utført av propell	$F_T = \rho Q \Delta V$	4.17
Newtons tredje lov	$F_{ab} = -F_{ba}$	4.18
Effekt (propell)	$P = F_T V = \gamma Q h$	4.19

Tabell7: Hovedformler brukt i rapporten.

Forklaring	Formel	Nummerering
Kinetisk energi pr. masseenhet	$h = \frac{V^2}{2g}$	4.20
Effektivitet	$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{inn}}$	4.21
Reynoldstall	$R = \frac{LV\rho}{\mu}$	4.22
Vinkelhastighet	$v = r\omega$	4.23
Side i trekant	$c = R\sqrt{2 - 2\cos\theta}$	4.24
Stigningsforhold (propell)	$Z(\phi) = \frac{\tan\phi \times O_{propell}}{D_{propell}}$	4.25
Expanded blade area ratio	$EAR = \frac{\text{Propellbladenes areal}}{\text{Propelldiameter areal}}$	4.26
Thrust-koeffisient	$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$	4.27
Momentkoeffisient	$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$	4.28
Avanseringsforhold	$J_A = \frac{V}{nD}$	4.29
Statisk effektivitet	$\eta_d = \frac{\left(\frac{K_T}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}}}{K_Q}$	4.30
Dynamisk effektivitet	$\eta_{propell} = \frac{K_T J_A}{2\pi K_Q}$	4.31
Moment	$M = F \times lengde$	7.1
Nedbøying (den elastiske linjens ligning)	$y(x) = -\frac{1}{EI} \iint M(x) dx$	7.2a
	$\theta = y'(x)$	7.2b
Annet arealmoment (ellipse, y)	$I_y = \frac{\pi}{64} a^3 b$	7.3
Annet arealmoment (ellipse, z)	$I_z = \frac{\pi}{64} a b^3$	7.4
Kraft fordelt på skruehull	$F_n = \frac{F}{n}$	7.5
Areal	$A = l \times b$	7.6
Skjærfasthet	$\tau_u = 0,7 \times R_m$	7.7

Tabell 7: Hovedformler brukt i rapporten.

Forklaring	Formel	Nummerering
Tillatt skjærspenning	$\tau_{u,tillatt} = \frac{\tau_u}{n}$	7.8
Trykk/Strekkspenning	$\sigma = \frac{F}{A}$	7.9
Krav (forankringslengde)	$l_{eff} < l_{avstand}$	7.10
Krav (tillatt spenning)	$\sigma < \tau_{tillatt}$	7.11
Tverrsnittsmodul (ellipse, y)	$W_y = \frac{\pi}{32} a^2 b$	7.12
Bøyespenning	$\sigma_b = \frac{M}{W}$	7.13
Tverrsnittsmodul (ellipse, z)	$W_z = \frac{\pi}{32} a b^2$	7.14
Turtall (synkronmotor)	$n = \frac{120f}{p}$	9.1
Kraft (dekomponert)	$F = F_{avlest} \times \cos\theta$	9.2

3.4 Metode og løsningsverktøy

Her skal det gjøres greie for ulike produktutviklingsmetoder og løsningsverktøy som er brukt i rapporten.

3.4.1 Integriert produktutvikling (IPD)

Dette er en metode brukt i produktutvikling som blander inn forskjellige disipliner i utviklingen av et produkt mens det utvikles. På denne måten vil man sikre at blant annet designet og funksjonene til produktet lages med hensyn til produksjon og kostnader samtidig, noe som vil bidra med til å spare tid og ressurser. Hovedpunkter i denne metodikken er: funksjon (Design og materialer), prosess (tilvirkning og sammenstilling), økonomi (kostnader og marked) og miljø (LCA). [19]

3.4.2 Pughs metode

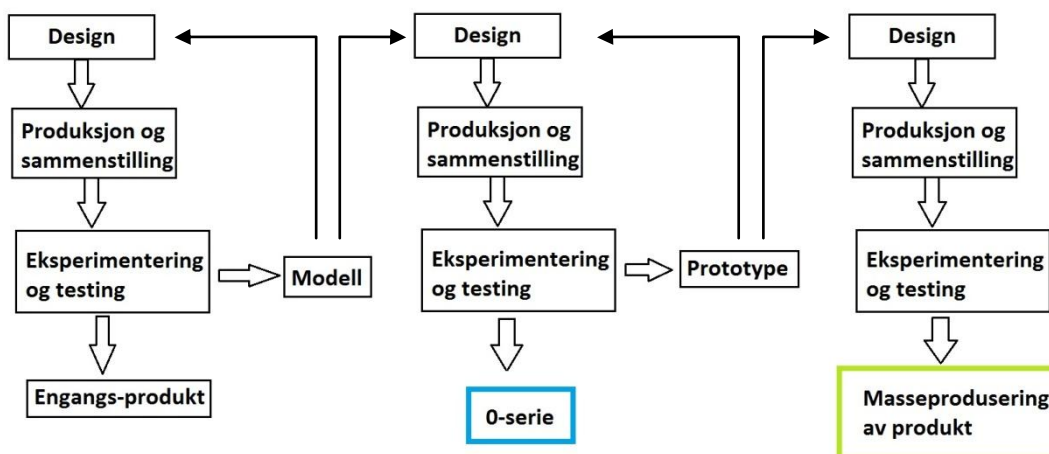
En seleksjonsmetode som vekter ulike sentrale kriterier for produktet, for deretter å gi løsningene poeng ut i fra en definert poengskala. Til slutt summeres poengene og det gjøres et endelig valg. [20]

3.4.3 VDI2221 (Verein Deutscher Ingenieure)

En metode [21] basert på Pahl & Beitz Design som er en metode som bruker systematisk tilnærming til komplekse problem. Metoden består av trinnvis planlegging og utføring av designprosessen. Den ble først publisert i 1977 og har siden fått anerkjennelse blant ingeniører både i arbeidslivet og i utdanningsinstitusjoner, mye på grunn av at det er en generell produktutviklingsmetode uavhengig av type industri som tar for seg det essensielle i systematisk tilnærming til komplekse problem.

Prosesen i problemløsning representerer et permanent forhold mellom målsetting, planlegging, utførelse og kontroll, knyttet sammen med avgjørelser.

- Problemanalyse: problem som dukker opp kan være i ukjente fagfelt for problemløseren og det her aktuelt å skaffe seg ny kunnskap for å løse problemet. Dette vil føre til bedre forståelse av problemet, og dermed finne flere krav til oppgaven, begrensingsdetaljer og mulige løsningsmuligheter.
- Problemdefinisjon: formulering av problemet på et detaljert nivå og begynne søket etter en løsning.
- Systemsyntese: ideer og løsninger blir utarbeidet.
- Systemanalyse: de foreslåtte løsningene blir analysert for å danne grunnlag for utvelgelsen av endelig løsning.
- Evaluering: analysering av valgt løsning opp mot kravspesifikasjoner for å avgjøre om den nye løsningen skal utvikles eller forkastes.



Figur 8: Forbedringsprosess av produkt gjennom designing, produksjon og testing.

Følgende er en oversikt over VDI2221 med de ulike trinnene i prosessen nummerert, og resultatet av trinnene uthevet til høyre:

1. Klargjøring av oppgave. Spesifisere tekniske krav.
 - **Spesifikasjoner**
2. Bestemme funksjoner og funksjonsstruktur
 - **Konseptgenerering og funksjonsdiagram**
3. Søke etter og identifisere løsningsforslag og kombinasjoner
 - **Konseptdesign og løsninger**

4. Etabler realiserbare sub-systemer og modulstruktur
 - **Produktarkitektur**
5. Design sub-systemenes layout og moduler
 - **Moduldesign og foreløpig layout**
6. Design og integrer moduler til høyere produktnivå.
 - **Systemdesign og endelig layout**
7. Klargjøre produksjon og operasjonsinstruksjoner.
 - **Dokumentasjon, tekniske tegninger og anvisninger.**

Her vil det bli gitt en skildring av hvordan de sju trinnene i VDI2221 kobles mot de planlagte aktivitetene for produktutviklingsprosessen i samarbeid med Blueye Robotics og veiledere (trinnene i parentes):

Innledende fase vil bestå av samtaler med Blueye Robotics og studere tidligere masterarbeid for å komme fram til ønskede spesifikasjoner og ytelser til produktet. Samling av all nødvendig informasjon og evt. legge til viktige punkt står også sentralt i strukturering av oppgaven (1). Deretter skal funksjonsstrukturen til produktet settes opp (2) som danner grunnlaget for neste trinn der det skal arbeides fram løsningsforslag. Her skal det settes sammen til den beste løsningen med tanke på fysiske trekk best egnet for de aktuelle påkjenninger og funksjoner (3). Denne løsningen skal så deles opp i realiserbare sub-systemer for å lage en modulstruktur (4). Designet tas deretter videre til foreløpige produktlayouter, til et slikt detaljnivå at det er mulig å velge det optimale designet (5). Etter dette skal endelig løsning velges og moduler blir integrert til et høyere og mer detaljert produktnivå (6). Til slutt lages tekniske anvisninger som omhandler produksjon og montering (7).

Ideen her er å dele opp produktutviklingsprosessen systematisk i fire faser: planlegging (1-2), konseptuelt design (2-4), formgivningsdesign (3-6) og detaljert design (6-7). Det åpnes for iterering mellom trinnene i den systematiske prosessen. Det skal designes for å møte ønskede kravspesifikasjoner, og for å gjøre dette beskrives foreslåtte løsninger funksjonelt og uttrykkes ved å gi de form. Det skal drøftes form og mål på hver enkelt komponent opp mot funksjon for å sikre ønsket ytelse på helhetsdesignet.

I produktutvikling støter man hovedsaklig på tre sentrale utfordringer som må tas stilling til. Den kanskje mest kritiske er hvor lang tid det tar fra produktets initierende fase ved idé og sketsj, til det kommer ut på markedet (TTM). Det andre er kostnad, med tanke på tilvirkning og funksjonalitet i kombinasjon med analyser av marked og markedsposisjonering. Det tredje er ytelse og pålitelighet, som blant annet er avhengige av løsningens kompleksitet og henger sammen med robustheten og sikkerheten til produktet. Tempoet på den teknologiske utviklingen på området spiller og en sentral rolle for markedsposisjon og planlegging av TTM.

3.4.4 Design for produksjon og montering

For å oppnå et best mulig design med hensyn til kvalitet, funksjonalitet og pris kan man bruke følgende to metoder [22] som retningslinjer i produktutviklingsprosessen.

Design for montering er en strategi for å minimere monteringskostnad og maksimere monteringskvalitet gjennom redusering av antall deler og håndteringen av disse delene. Dette gjøres for eksempel ved å designe delene slik at det er lett å se hvordan de skal orienteres i forhold til hverandre under montering, bruke standardiserte og evt. selvlokaliserende festepunkt, bruke symmetri osv. Dette vil redusere tidsbruk og frigir ressurser. Med andre ord går strategien ut på å forenkle montørens jobb ved å tilrettelegge designet til en mest mulig produktiv monteringsprosess.

Design for produksjon er å optimere designet ved å minimere tilvirkningskost i form av å velge de mest effektive materialene, prosessene og redusere antall tilvirkningssteg. Dette skal gjøres uten at det går utover funksjonaliteten til produktet.

3.4.5 Programvare

➤ **Microsoft Word 2007**

Rapportskriving

➤ **Microsoft Excel 2007**

Behandling av og visuell framstilling av testdata.

➤ **Dassault Systemes, Solidworks 2015**

3D-modellering , FEM-analyse, strømningssimulering og rendreringer.

➤ **Cura (Versjon 15.04.6)**

Program som konverterer .STL-filer (fra Solidworks) til .gcode-filer som er programfiler til 3D-printing. Analyseverktøy for material- og tidsbruk av printingen.

➤ **Matlab (versjon R2016b)**

Behandling av testdata.

➤ **Arduino (versjon 1.7.11)**

Styring av input til motorkontrolleren under testing.

➤ **Granta Design Limited: CES EduPack 2016 Versjon 16.1.22**

Materialdata

3.4.6 Rapport

For å sikre god kvalitet på rapporten ble det lest korrektur, sjekket referanser, gjennomgått nummerering av figurer og tabeller samt kontrollering av sidetall.

3.4.7 Produkt

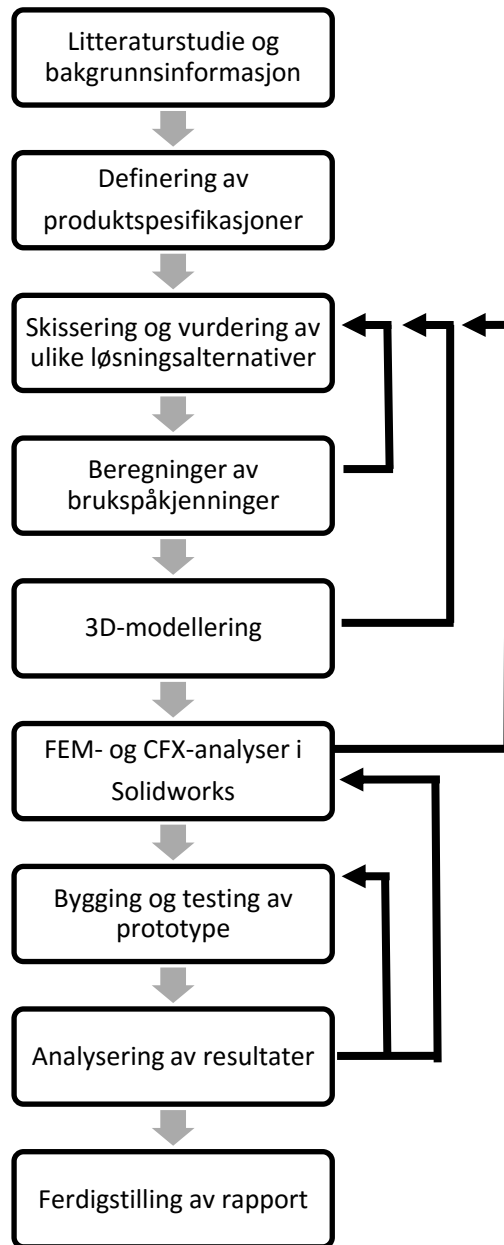
Kvaliteten på produktet ble sikret ved å diskutere ønskede spesifikasjoner og ytelser med oppdragsgiver. I forkant av bygging og testing ble det gjort dimensjoneringsberegninger, samt FEM- og CFD-analyser for å optimere konstruksjonen med tanke på belastninger og strømning. I tillegg måtte det tas hensyn til at prototypen skulle produseres ved 3D-printing.

3.4.8 Kvalitetssikring

I prosjektets innledende fase ble det brukt tid på å tilegne seg ny kunnskap vha. selvstudium innen ROV-systemer og hydrodynamikk. Elektroteknisk, hydrodynamisk og beregningsteknisk teori er hentet fra litteratur brukt i kurs ved NMBU. For å trekke ut viktige faktorer rundt propelldesign ble det blant annet brukt retningslinjer fra DNV. Det ble utført fysisk testing av prototype for å verifisere designets funksjon og ytelse.

3.5 Prosesstrinn

Prosesen er slik utformet at det er mulig å gå tilbake til tidligere trinn for å sikre kontinuerlig forbedringsarbeid.



Figur 9: Trinn i utviklingsprosessen.

4. TEORI OG TEKNOLOGIUTREDNING

Dette kapittelet vil ta for seg relevant teori for thruster-utformingen. Først vil det gjennomgås aktuell elektroteknikk rundt motorvalget og kartlegge ulike fenomener som påvirker motorytelsen. Hydrodynamiske fenomener og sammenhenger vil bli gjennomgått for å danne det teoretiske grunnlaget. Deretter vil det sees på hvordan disse prinsippene anvendes i propellteorien og hvordan de kan anvendes til å oppnå et best mulig thruster-design.

4.1 ROV

ROV'er er fjernstyrte undervannsdroner som i dag brukes til en rekke aktiviteter. De kommer i flere størrelser og utstyrvarianter, fra små observasjonsfarkoster til store arbeidsfarkoster som brukes til å utføre fysiske oppdrag i offshoreindustrien. Blueye sin Explorer tilhører, i følge NORSOK Standard for ROV'er (U-102), klasse 1 som er betegnelsen for rene observasjons-ROV'er. [23]

4.2 Elektromotorer

4.2.1 DC-motor

Grunnen til at DC-motorene er mye brukt er på grunn av den kompakte størrelsen og hvordan ytelsen kan bevares over et stort turtallsintervall med høy effektivitet.

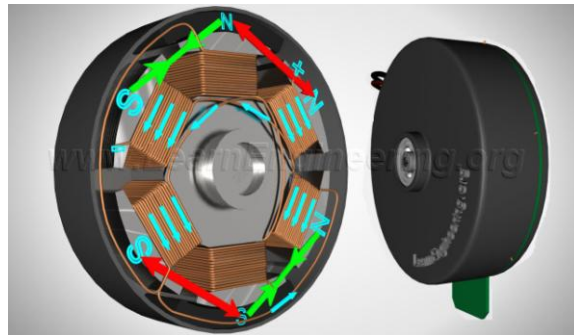
En DC-motor fungerer på følgende vis: Med en gang bryteren slås på går en stor strøm gjennom armaturet på grunn av lav resistans. Det utøves en kraft på lederene i armaturet da de er i et magnetfelt skapt av permanente magneter. Disse kreftene danner et moment som får armaturet til å rotere og det blir induert en spenning i armaturet.

Armaturet ligger mellom nord og sørpol i en permanent magnet. Når det settes strøm (DC) på armaturet gjennom kommutatorringer blir det induert et spenningspotensial (emf) som skaper et moment og får den til å rotere (Lawrences lov). Kommutatorringene roterer forbi positiv og negativ pol fra strømforsyningen. Når det roteres forbi en pol skifter strømmen gjennom armaturet retning slik at strømmen ved hver av polene i den permanente magneten alltid går i samme retning, noe som sikrer at det skapes rotasjon i samme retning.

Denne type motor bærer med seg noen ulemper. Magnetfelt-funksjonen tar mye plass, krever mye energi og avgir mye varme. Børstene slites også ut over tid og er ikke anbefalt å bruke i applikasjoner som krever lang levetid og pålitelighet. [24]

4.2.2 Børsteløs DC-motor

Børsteløse DC-motorer er lettere og mer kompakte, ved samme ytelse som børstemotorer. I slike motorer er rotoren en permanent magnet og statoren består av spoler, der DC-strøm settes på spolene og det dannes elektromagneter. Rotasjon skapes ved interaksjon mellom dette magnetfeltet og den permanente magneten. Den aktiverte polen i stator tiltrekker seg motsatt pol i rotor, når disse står ovenfor hverandre aktiveres neste pol i stator, som får den motsatte polen i rotor til å trekke seg videre rundt. I tillegg til å trekke polene rundt aktiveres polene i bakkant, slik at vi får supplert bevegelsen med en "dytting" [24]. Dette er illustrert i Figur 10 der grønne piler er tiltrekning og røde piler er fraskyving.



Figur 10: Skjermdump fra Youtube som viser tiltrekningskrefter i grønt og skyvekrefter i rødt [25].

På grunn av alle dens fordeler er det naturlig å velge den børsteløse.

Videre i valg av motor er det flere faktorer som spiller inn.

Motorkonstanten K_v er definert som antall omdreininger i minuttet per tilført volt ved null belastning. Denne henger sammen med motorens momentkonstant $K_t \left[\frac{Nm}{A} \right]$, som sier noe om forholdet mellom motorens moment og strøm, som kan uttrykkes ved følgende formel:

$$K_v = \frac{1}{K_t} \quad (4.1)$$

Dette viser at en lavere K_v -verdi vil gi en større K_t , og dermed mer moment pr. strømenhet (A). Disse to konstantene har ekvivalente enheter, dette vises ved:

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \times \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{A} \times \text{s}^3} = \frac{\text{Nm}}{\text{As}}$$

For BLDC motorer kan K_t kobles mot motorens moment ved formelen:

$$M = K_t I \quad (4.2)$$

Vinkelhastigheten ω uttrykkes med formelen:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (4.3)$$

Som gir mekanisk effekt P_{mek} lik:

$$P_{mek} = K_t I \omega \quad (4.4)$$

EMS er forkortelse for elektromotorisk spenning, og er betegnelsen på spenningspotensialet til en kilde i en strømkrets. Indusert motspenning er et fenomen som best forklares med Lenz' lov. Når strømmen i en spole endrer seg vil fluksen i spolen endre seg. Denne fluksendringen vil motvirke årsaken til induseringen, derfor danne et magnetfelt motsatt rettet av magnetfeltet som driver motorens rotasjon, og dermed en spenning som motvirker rotasjonen. Denne gir opphavet til det negative fortegnet i Faraday's lov som omhandler hvordan et magnetisk felt interagerer med en elektrisk krets for å danne en indusert spenning. [26]

Motspenningskonstanten $K_e \left[\frac{\text{V}}{\frac{\text{rad}}{\text{s}}} \right]$ er et mål på hvor mye motspenning som induseres i forhold til rotasjonshastighet. Estimert verdi på denne finnes ut fra rotasjonshastighetskonstanten K_v . En K_v -verdi på 500 rpm/V tilsier at det induseres 1V back-emf pr. 500 rpm. [27]

Indusert motspenning virker motarbeidende på spenningen fra strømforsyningen, sammen med I^2R tap og induktans i motoren. Strømmen reduseres som resultat av redusert spenning, og siden momentet er proporsjonal med strømmen, vil momentet synke. Dette forklarer at motoren vil jobbe ineffektivt om den jobber ved for høye turtall.

En annen faktor som begrenser børsteløse DC-motorer er induktansen i spolene. Den magnetiske fluksen ϕ_m varierer fra punkt til punkt i spolen, men er alltid proporsjonal med strømmen I og kan skrives som:

$$\phi_m = LI \quad (4.5),$$

der L er proporsjonalitetskonstanten til en spole. Den induserte spenningen ε kan dermed skrives som proporsjonalitetskonstanten ganget med variasjon i strøm pr. tidsenhet:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt} \quad (4.6)$$

Motorens induktans virker som en resistans som konsumerer spenning og vil dermed redusere maks rotasjonshastighet og motorstrømmen: Spenningen over spolen uttrykkes ved differansen mellom den induserte spenningen og spenningstapet ΔV over spolen ved følgende formel, der r er resistansen i spolen:

$$\Delta V = \varepsilon - Ir \quad (4.7)$$

I optimale spoler er den indre resistansen null. Det vil i tillegg oppstå induktans mellom fasene i motoren, men denne er så liten at den kan sees bort i fra. [28]

Effekttap på grunn av motorens indre resistans uttrykkes:

$$P = I^2 R \quad (4.8),$$

og den tilførte elektriske effekten uttrykkes:

$$P = UI, \quad (4.9)$$

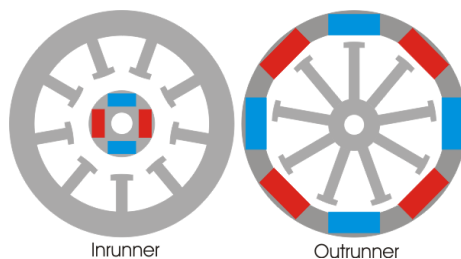
der U er spenningen.

Oppsummert vil tapet i motoren bestå av friksjonstap, tap i resistans, tap på grunn av induktans og tap ved indusert motspenning.

Disse sammenhengene er avgjørende i valget av motor. Større moment vil muliggjøre bruk av større propell og gi bedre manøvreringsevne og effektivitet ved lave turtall. En annen fordel med å ha stort moment ved lave turtall er å slippe å bruke gir, noe som forenkler det mekaniske oppsettet, reduserer kostnad og sparer plass. Det maksimale momentet en børsteløs DC-motor kan levere kan for eksempel testes ved å belaste motoren med en hysteresebremse. [29]

Outrunner og innrunner

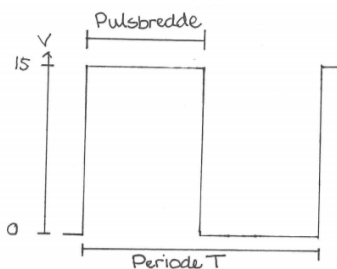
I dag er det mest vanlig med motorer med bevegelse i ytterskallet, såkalte outrunners, som betyr at magnetene sitter i et sylinderskall på utsiden av spolene i motoren. I motsetning til såkalte innrunners, som har magnetene på innsiden og spolene ytterst. Disse oppnår høyere omdreiningstall, men trenger en planetgirkasse for å øke momentet.



Figur 11: DC-motorer, outrunner, innrunner [30].

Motorkontroller (ESC)

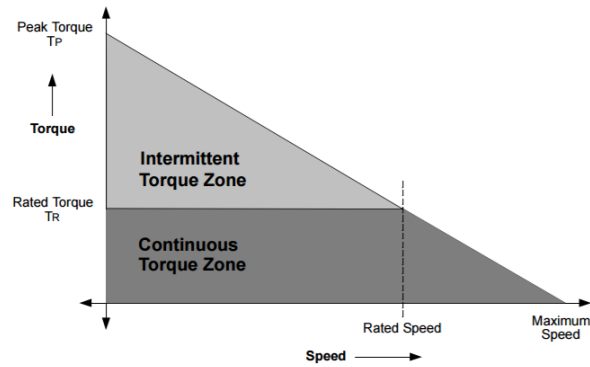
Motorens hastighet reguleres ved å sende digitale signaler til motorkontrolleren som oversetter signalet til hastighet. Signalet varieres ved å justere pulsbredden i forhold til grunnfrekvensens periode. Halvparten av maksimal hastighet oppnås ved å justere pulsbredden til 50% av perioden (T), med andre ord vil den gi full gass halvparten av tiden.



Figur 12: Justering av PWM-signaler til motoren.

Økes dette forholdet vil det oftere gis full gass og motorhastigheten øker. Hvor raskt hastighetssignalet skrus av og på avhenger av oppdateringsfrekvensen, som varierer fra motor til motor.

Børsteløse DC-motorer er ofte oppgitt med en merkehastighet og en maksimal hastighet. Den maksimale hastigheten oppnås ved null belastning. Siden ROV'ens thruster skal gjøre raske korrigeringer av posisjon må motorensom skal velges ha gode ytelser ved lave turtall og høyt moment (Intermittent Torque Zone i Figur 13).



Figur 13: Rotasjonshastighets- og momentgraf for børsteløse DC-motorer. [31]

4.3 Aktuell hydrodynamikk

Her skal det gjøres greie for hvilke hydrodynamiske fenomener som er utslagsgivende for utformingen av designet. Alle formler og informasjon i dette delkapittelet er hentet fra [32], med unntak av figurer der annet er oppgitt.

4.3.1 Krefter på objekter i vann

På et legeme i bevegelse virker det en kraft normalt på legemets profil i retning relativ til fluidets strømming. Denne kraften er avhengig av tettheten til det aktuelle fluidet ρ , profilets areal i strømningsretning A og profilets hastighet relativt til fluidet U . Dette uttrykkes ved følgende formel:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A U^2 \quad (4.10)$$

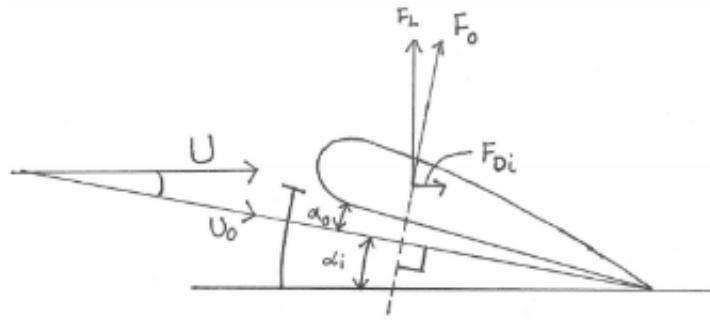
Der C_D er dragkoeffisienten, A er legemets maksimale tverrsnittsareal normalt på strømmingen, og U er legemets hastighet relativt til væsken. $\frac{\rho U^2}{2}$ er det dynamiske trykket mot en flate.

Denne kraften oversatt til ROV'ens applikasjon består av to deler, ROV'ens og navlestrangskabelens drag. Totalt drag på ROV'en, inkludert tether kabel uttrykkes ved:

$$F_{D,total} = \frac{1}{2} \rho C_{D,v} A_v U^2 + \frac{1}{2} \rho C_{D,u} A_u U^2 \quad (4.10)$$

Innstrømning U_0 med en angrepsvinkel α_0 genererer løftekraft F_0 normalt på innstrømningen U_0 . På grunn av denne angrepsvinkelen vil løftekraften dekomponeres til faktisk løftekraft F_L og industert løftekraft F_{Di} . Generert løftekraft F_L fra en propell kan uttrykkes som summen av profilets drag F_{Di} og industert løftekraft F_0 :

$$F_L = F_0 + F_{Di} \quad (11)$$



Figur 14: Krefter på et vingeprofil som resultat av strømning.

Kraften som dannes av en vingeprofil i hastighet relativ til et fluid finnes ved å dele overflatearealet til profilet opp i mange små areal og se på det lokale trykket som virker normalt på hvert delareal. Deretter summerer man disse, det kan uttrykkes:

$$F = \Sigma(\vec{P}\Delta A) \quad (12)$$

4.3.2 Momentprinsippet anvendt på propeller

Det kan anvendes Bernoulli's ligning på fluidet rett før og rett etter propellen. I gjennom og på selve propellen kommer den mekaniske arbeidet fra motoren i veien for å bruke ligningen. I Bernoullis ligning viser sammenhengen mellom trykk og hastighet når et fluid beveger . Den viser dette ved å anta energibevaring, og består av trykk og energiformlene for potensiell og kinetisk energi:

$$E = mgh \quad (4.13)$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.14)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (4.15)$$

Kontinuitetsligningen viser at fluidstrømmen vil være den samme selv om arealet A endres.

Reduseres arealet vil derfor fluidets massestrøm \dot{m} øke:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \dot{m} \quad (4.16a)$$

Forkortes massetettheten ρ på begge sider i ligningen fås et uttrykk for volumstrømmen Q :

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (4.16b)$$

Thrustkraften F_T generert av propellen kan dermed regnes ut ved å se på fluidets hastighetsendring gjennom propellen ved følgende ligning:

$$F_T = \rho Q \Delta V = \rho A V (V_4 - V_1) \quad (4.17),$$

der V er gjennomsnittsfarten gjennom propellen, V_1 og V_4 er hastigheten gjennom henholdsvis seksjon 1 og 4 (se Figur 15) og Q er volumstrømmen. Kraften som utøves av propellen på væsken rundt er da lik kraften F_T henhold til Newtons tredje lov som sier at en kraft utført på et legeme resulterer i en like stor kraft motsatt rettet:

$$F_{ab} = -F_{ba} \quad (4.18)$$

Effekten avgitt av propellen kan skrives:

$$P_{ut} = F_T V_1 = (\rho Q \Delta V) V_1 \quad (4.19)$$

Fluidets kinetiske energi per masseenhet kan representeres med:

$$h = \frac{V^2}{2g} \quad (4.20)$$

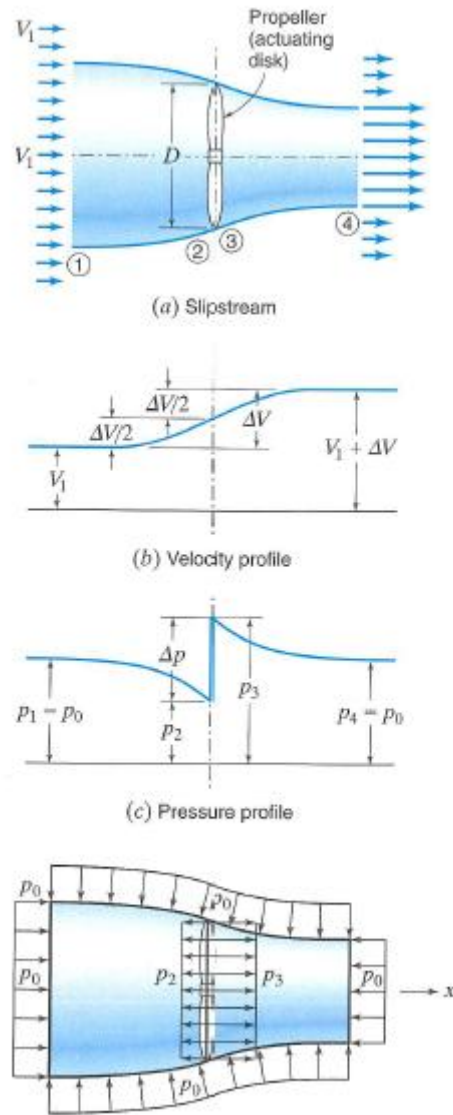
Effekten P_{inn} som trengs for å akselerere vannet ΔV kan da skrives:

$$P_{inn} = \gamma Q h = \gamma Q \left(\frac{V_4^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) = \frac{1}{2} \rho Q (V_4^2 - V_1^2) = \frac{\rho Q (V_4 + V_1)(V_4 - V_1)}{2} = (\rho Q V) (\Delta V) = F_T V \quad (4.19),$$

der $\gamma [N/m^3]$ er spesifikk vekt til fluidet.

Effektiviteten η kan da uttrykkes ved følgende formel:

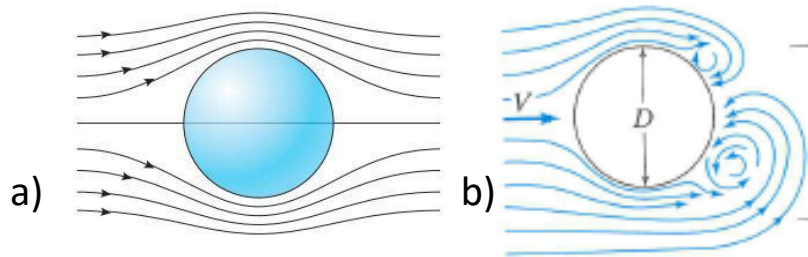
$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{inn}} = \frac{(\rho Q \Delta V) V_1}{(\rho Q \Delta V) \Delta V} = \frac{V_1}{V} = \frac{V_1}{V_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V}{V_1} \right)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V}{V_1} \right)} \quad (4.21)$$



Figur 15: Momentprinsippet anvendt på propell.

4.3.3 Laminær og turbulent strømning

Når hastigheten til en væske overgår en viss grenseverdi, vil strømmens karakter endres. Grenseverdien er avhengig av omgivelser og overflatekarakteristikker til profiler i direkte interaksjon med væsken. Den vil gå fra å ha jevne strømningslinjer (laminær) til å få mer uregelmessig struktur (turbulent).



Figur 16: a) Laminær strømning [33], b) Turbulent strømning med virvelstrømmer.

På grunn av trykkforskjell når et objekt beveger seg i et fluid vil det strømme fra høytrykkssiden til lavtrykkssiden. Dette kan føre til energitap i form av virvelstrømmer og evt. skadelige vibrasjoner på profilet som omsluttet av væsken.

4.3.4 Kavitasjon

Framprovoserte hastighetsøkninger i en væske vil danne lavtrykkssoner. Dette reduserte trykket kan føre til at væsken fordampes og danner bobler. Når disse boblene senere entrer en sone med høyere trykk vil de kondensere og dermed kollapse. Dette resulterer i trykkbølger som genererer vibrasjoner som potensielt kan gjøre skade på mekanikken i en thruster. Dette er dog et fenomen som gjerne oppstår i større applikasjoner der hastighetene er langt større enn hos ROV'er.

4.3.5 Reynolds-tallet

Med Reynoldstallet kan strømningens oppførsel under ulike scenarier forutses, da det kan estimeres en grenseverdi mellom laminær og turbulent strømning. Dette tallet viser forholdet mellom treghetskrefter og viskøse krefter som virker på et legeme i fluidstrøm og uttrykkes med følgende formel:

$$R = \frac{F_{treghet}}{F_{viskositet}} = \frac{L^2 V^2 \rho}{LV\mu} = \frac{LV\rho}{\mu} \quad (4.22)$$

der L [m] er lengden tilhørende strømningen (diameter for rør), V er fluidets hastighet [m/s] og ν er fluidets dynamiske viskositet. Når treghetskreftene til fluidet dominerer de viskøse kreftene vil Reynoldstallet stige, og etterhvert tallet nå en kritisk verdi. Strømningen rundt objektet vil da separeres fra objektet og danne virvelstrømmer. Kritisk verdi for Reynoldstallet er for eksempel $R_k = 2000$ for et rett rør med konstant diameter og vanlig overflateruhet, men vil variere i verdi ved forskjellige verdier for disse parametrene.

4.4 Thrusterløsninger

Det vil her blir gjort greie for to typer hovedløsninger som er aktuelle og som har vidt forskjellige måter å generere framdrift på. Fordeler og ulemper ved dem vil videre danne grunnlag for seleksjon av hovedkonsept.

4.4.1 Akseldrevet

Dette er den tradisjonelle måten med akseldrevet propell og motor i midten av dysen med propellbladene pekende utover fra senter. Propellbladene er her festet til en roterende base i senter av dysen og motoren er montert co-aksielt med denne. Dette er den vanligste løsningen for thrustere i dag, uansett bruksområde.

4.4.2 Periferidrevet

Propellbladene er her festet i en roterende ring, noe som muliggjør å ikke ha opplagring i midten av dysen. I noen tilfeller vanlig å likevel ha opplagring i senter. Propellen vil ha mindre massetregghet enn en akseldrevet, og vil i teorien skifte rotasjonsretning raskere. Dette er gunstig for raske korrigeringer av ROV'ens posisjon. Løsningen vil redusere vibrasjon og støy grunnet lavere hastighet på propellens ende, samt sørge for mindre kavitasjon. Den vil også være mer motstadsdyktig enn tradisjonelle propeller for skader i forbindelse med forviklinger i propell.

Tabell 8: Spesifikasjoner til akseldrevet thruster fra TSL Technology. [34]

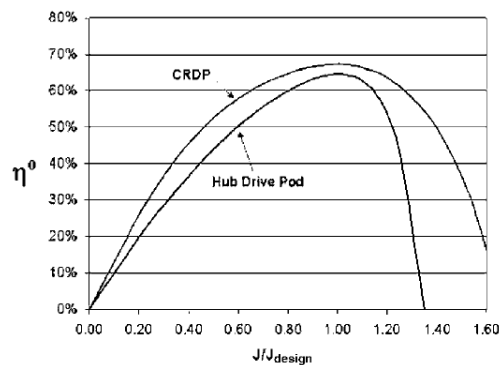
Spesifikasjoner	Verdi og enhet
Maks kraft	
- Framover	30 N
- Bakover	30 N
Maks effekt	220 W
Mål	
- Diameter (dyse)	108 mm
- Diameter (propell)	70 mm
- Lengde (dyse)	94,1 mm
Vekt	1,15 kg
Spenning	28 VDC
Pris	-



Figur 17: Periferidrevet thruster fra TSL Technology Ltd [34].

Ved Pennsylvania State University ble disse to løsningene ble sammenlignet. Resultatet viste at den periferidrevne thrusteren oppnådde bedre ytelse i forhold til akseldrevet med hensyn til kraft, kavitasjon og trykksvingninger.

Effektivitetstest ble utført med en modell i skala 1:25, der den periferidrevne oppnådde 67,2 %, mens den akseldrevne klarte 64,3 %. Dette er et viktig punkt da framdriftskraften man får ut i forhold til tilført effekt er essensielt med tanke på utnyttelse av tilgjengelig batterikapasitet. [35]



Figur 18: Sammenligning av effektivitet mellom akseldrevet og periferidrevet thruster ved ulike avanseringsforhold J [35].

Siden den periferidrevne har motoren integrert inne i dyseveggen, dette kan føre til økt strømningsmotstand.

Kompleksiteten til løsningene er en kritisk faktor for gjennomførbarheten til prosjektet. Periferidrevet teknologi er mer kompleks og vanskeligere å få tak i deler til, noe som er en stor ulempe når det skal bygges en prototype på kort tid. Det er derfor hensiktsmessig lurt å velge akseldrevet.

4.5 Propellteori

Det vil her bli gjennomgått noen sentrale begreper i propellteorien som er utslagsgivende for designet og som må tilpasses propellens bruksområde og påkjenninger.

4.5.1 Propellbegreper

Propellbladets stigning er definert som avstanden propellen avanserer på én omdreining ved null slipp. Kan også beskrives som helningen på propellbladet (i grader) i forhold til innstrømningsretningen. Stigningen til propellen er sentral for motstandsmomentet fra vannet på

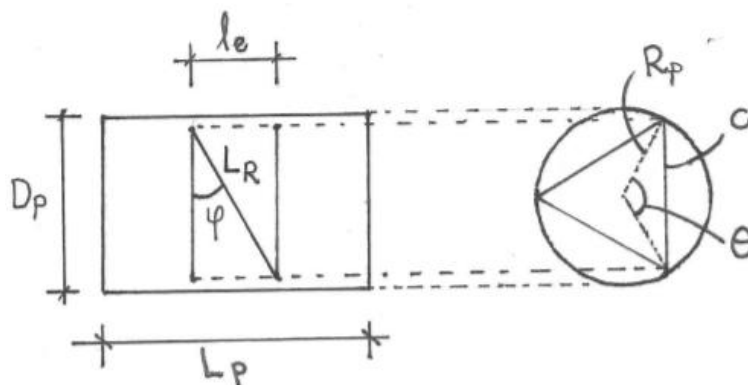
propellen under rotasjon og har derfor påvirkning på turtallet. En passende stigning må derfor tilpasses motoren slik at det oppnås best mulig effektivitet. For liten stigning gir høye turtall og dårlig utnyttelse av motoren, som forklart i Kap 4.2.

Det skilles mellom konstant og progressiv stigning. Den konstante har som navnet tilsier samme stigning fra ledende til følgende kant på propellbladet. Den progressive varianten har lav stigning ved ledende kant og økes mot følgende kant. Sistnevnte er mest brukt i applikasjoner med høye hastigheter og er ikke nødvendig for småskala ROV'er. På større thrustere kan stigningen på propellbladet justeres mekanisk. [36] For å generere framdrift må propellbladet vinkles i forhold til bevegelsesretningen. Denne angrepsvinkelen α_0 (Figur 14)endrer seg med rotasjonshastigheten til propellen. Dette gjør at angrepsvinkelen også vil variere langs propellbladet fra sentrum og utover mot spissen i følge formelen for rotasjonshastighet:

$$v = r\omega \quad (4.23)$$

Det velges derfor ofte å redusere stigningsvinkelen ut mot propellens tupp da dette reduserer rotasjonsmotstanden.

En måte å spesifisere stigningen til propellen på er å bruke følgende fremgangsmåte: Propellsylinderens lengde L_p og diameter D_p tilpasses rotorens diameter og lengde. Dette gir en klaring mellom rotor og propellsylinderens vegg til 2,5 mm. Tre propellblader er valgt og det tas dermed utgangspunkt i at propellbladenes rot spenner seg over en lengde L_R som vist i Figur 19.



Figur 19: Propellgeometri.

Ut i fra hvor mange propellblad det velges, deles sylindreromkretsen opp i like deler utspent av en vinkel θ . Man finner lengden av en side ved halvinkel-formelen:

$$c = R\sqrt{2 - 2\cos\theta} \quad (4.24)$$

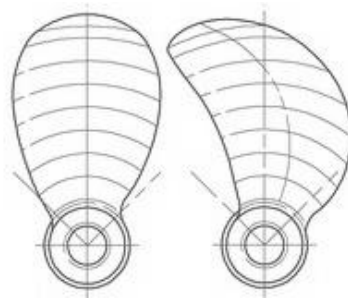
Etter dette velges en stigning i grader og man får en lengde l_e som da sentreres i lengderetning på propellsylinderens lengde L_p .

Ved å velge forskjellige stigningsvinkler kan man regne ut ulike stigningsforhold og teste disse opp mot valgt motor. Stigningsforholdet til en propell er definert som stigningen delt på propelldiameteren.

$$Z(\phi) = \frac{\tan \phi \times O_{propell}}{D_{propell}} \quad (4.25)$$

Antall propellblader er avgjørende for propellens effektivitet, størrelse, vibrasjon og kostnad. Ett blad er mest effektivt men vil føre til vibrasjoner grunnet skjev belastning om rotasjonsaksen. Ved å legge til blad vil effektiviteten reduseres, men vibrasjonen blir mindre. Det velges ofte tre blader da det er et godt kompromiss mellom de nevnte faktorer. [36]

Skew er propellbladarealets symmetri om dets senterakse. Formålet med å forme propellen slik er å redusere kavitasjon ved å redusere lokale trykksvingninger. [37]

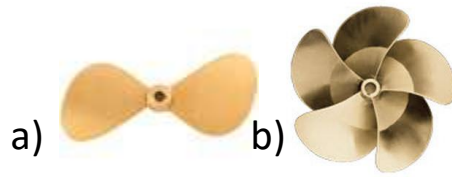


Figur 20: Propell med og uten symmetrisk areal [38].

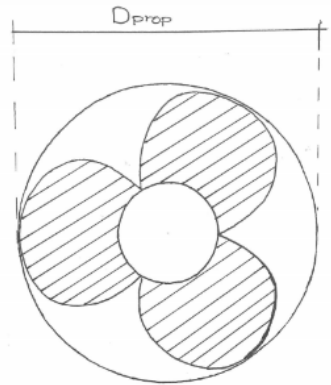
Propelldiameteren er definert som diameteren av sirkelen som dannes av de ytterste punktene på hvert propellblad. Forholdet mellom propellbladens areal og arealet som spennes over propelldiameteren (EAR) varierer mellom ulike applikasjoner med tanke på ønskede ytelsesegenskaper og motor. For eksempel kan dette forholdet være alt fra 0,36 (Figur 21a) til 1,06 (Figur 21b). Mer propellareal krever mer moment for å dras rundt, men gir bedre akselerasjon og kontroll ved lave hastigheter.

Forholdet uttrykkes da med følgende formel:

$$EAR = \frac{\text{Propellbladens areal}}{\text{Propelldiameter areal}} \quad (4.26)$$



Figur 21: Eksempel på to forskjellige propeller med ulike propellareal a) To blader [39], b) Fem blader [40].

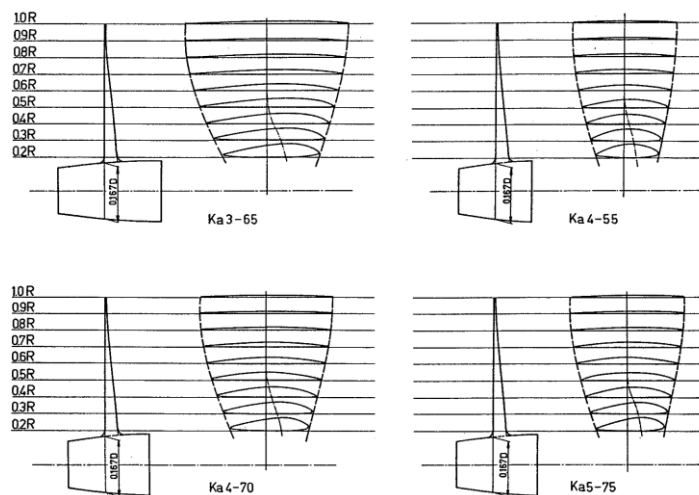


Figur 22: Propellbladarealet skravert og propelldiameter.

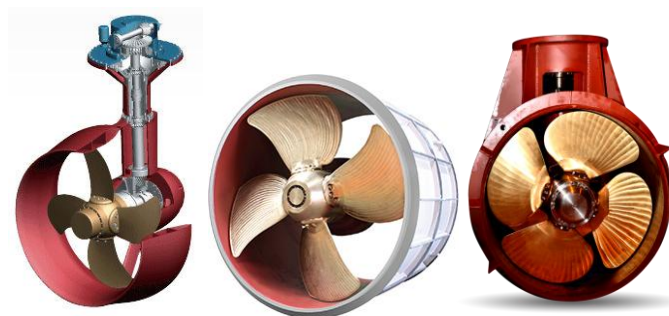
Slipp er et mål på hvor mye propellen faktisk avanserer i forhold til antall omdreininger og stigning. Fluidet må flyttes for å generere framdrift, og under akselerasjon vil propellen rotere lenger i forhold til tilbakelagt strekning. En parallell kan trekkes til reimdrift der for mye slakk i drivreim og eventuelt for lav friksjonskoeffisient kan føre til at drivhjulet roterer raskere enn reimen forflytter seg. Å optimalisere for slipp gjøres ved å justere propellens egenskaper opp mot motorens spesifikasjoner og arbeidsområde. For mye diameter og eller bladareal vil redusere slipp, men en konsekvens er lavere effektivitet og ytelse.

Tverrsnitt

Gunstig å være tynnest i rotasjonsretning slik at rotasjonsmotstanden minimeres. Størst tykkelse ved propellbladets festepunkt til propellsylinder sikrer en sterk forbindelse siden det her oppstår mest spenning under belastning.



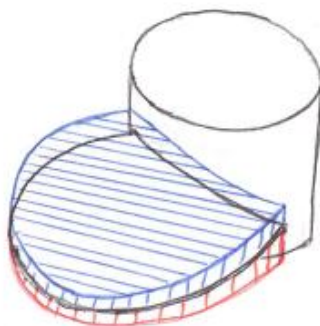
Figur 23: Viser tverrsnittet til ulike propeller i Ka-serien til MARIN ved ulike distanser fra rotasjonsaksen [41].



Figur 24: Ulike propellformer brukt i store skip. a) Rolls Royce Azimut [42], b) KTE [43], c) Scana Propulsion [44].

4.5.2 Skyvekraft

Basisen rundt skyvekraften til en propell har sitt grunnlag i Bernoullis ligning (4.15) og Newtons tredje lov (4.18). Når en propell begynner å rotere utføres det en kraft på fluidet rundt og det dannes høytrykk på ene siden av propellbladet og lavtrykk på den andre.



Figur 25: Viser høytrykksone i rødt og lavtrykksone i blått når propellen roterer (med klokken).

Denne trykkforskjellen vil generere en kraft, noe som samsvarer med newtons tredje lov som sier at en utført kraft vil resultere i en like stor kraft motsatt rettet. Dette gir da en tilsvarende kraft rettet mot propellen. Det vil også genereres sentrifugalkraft av kraften fra motoren på propellen. Skyvekraften avhenger av propellens turtall, diameter, areal, tverrsnittsform og stigningsvinkel, samt tettheten til det aktuelle fluidet.

4.5.3 Propell i dyse

Når propellen roterer vil høy- og lavtryksområdene bli forskjøvet fra propellens senter og utfor propellens ende. Her vil områdene møtes og lage virvelstrømmer. Disse virvelstrømmene er effekt som går til spille i form av støy og varme, noe som ikke er ønsket. Effekten av dette fenomenet kan reduseres ved å montere en kanal rundt propellen som sperrer for veien mellom høy- og lavtrykkssidene. Det vil alltid være en viss strømning mellom områdene, men slik kan man begrense dets virkning. Dette vil føre til høyere utnyttelse av tilført effekt, med andre ord et mer effektivt system.

Kanalen rundt propellen bidrar og til framdrift. Ved å la kanalens innstrømningsareal være større enn utstrømningsareal vil det internt passerende fluidet akselereres på grunn av kontinuitetsprinsippet. Dette gjør at propellen jobber lettere ved samme rotasjonshastighet og dermed mer effektivt.

Når et fluid beveger seg ved en kurvet overflate vil den holde seg nær og følge dens form.. Når fluidet følger formen nærme et profil vil den få en høyere fart i forhold til fluidet som er lenger i fra denne overflaten, og det dannes et lavtrykk. Dette lavtrykket resulterer i et høytrykk på andre siden av profilet som vil generere kraft. Dette kalles Coanda-effekten, og spiller, sammen med Bernoullis ligning, hovedrollene generering av løftekraft rundt profiler. [45]

4.5.4 Karakteristikker

For et gitt avanseringsforhold J_A kan uttrykke ulike karakteristikker ved koeffisienter av thrust og moment avhengig av turtall (n/s) og propellens diameter (m) [46]

Thrust-koeffisienten er en karakteristikk som sier noe om thrustkraften en propell kan generere i forhold til turtall og propelldiameter:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (4.27)$$

Moment-koeffisienten er en karakteristikk som sier noe om momentet en propell kan utøve i forhold til turtall og propelldiameter:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (4.28)$$

Avanseringsforholdet er definert som hastigheten til thrusteren relativt til fluidet i forhold til turtall og propelldiameteren:

$$J_A = \frac{V}{nD} \quad (4.29)$$

Fra tidligere masterarbeid [49] hentes formel for effektivitet ved null avanseringshastighet:

$$\eta_d = \frac{\left(\frac{K_T}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}}}{K_Q} \quad (4.30)$$

4.6 Degradering av polymerer, hydrofobi og vanntetting

ROV'en brukes i et korrosivt miljø og lages derfor i plast (ABS). En tommelfingerregel er at nedbrytingen av et materiale er avhengig av molekylær likhet med mediet det løses opp i. Dermed er plast meget holdbart i sjøvann og generelt i naturen.

De fleste typer av metallisk korrosjon er elektrokjemiske. Nedbryting av plast på en annen side, er såkalt fysiokjemisk, som innebærer både en fysisk og kjemisk prosess. Det skjer en nedbryting av kovalente bindinger som kan skje ved stråling, varme eller kjemisk. Graden av kjemisk nedbryting avhenger av konsentrasjonen av forurensende stoffer, for eksempel smog og ozon. Elektron-, røntgen-, UV-, alfa- og beta stråling består av nok energi til å bryte seg inn i polymer-bindingene og reagere med de utgjørende atomene. Energien løsriver elektron som ligger ytterst i atomene, som gjør at atomene blir positivt ladde (oksidering). Slik brytes kovalente bånd som over tid kan resultere i sprekke dannelse og sprøtt materiale.

Hydrofobi er et begrep som omhandler vannmolekylers tiltrekningsevne til overflater. En måte å måle grad av hydrofobi er kontaktvinkelen mellom vandrdåpe og overflate. Større vinkel impliserer større vannresistens. Slik behandling av overflatene vil bidra til økt effektivitet og stabilitet ved å minste overflatefriksjon. [47]

5. PRODUKTSPEISIFISERING

Her skal det settes et helhetlig mål for produktet. Det skal og spesifiseres ønskede egenskaper og ytelser og viktigheten av disse i forhold til hverandre. Dette danner grunnlaget for når det senere skal velges løsninger for det endelige produktet.

5.1 Produktmålsetting

Produktets mål er å danne et grunnlag for utviklingen av et thrusterdesign laget av Blueye Robotics. Det skal lages en prototype der det foreslås ulike løsninger som kan implementeres i en serieprodusert thruster, men det legges primært vekt på å utvikle en funksjonell prototype ut i fra tilgjengelige produksjonsmetoder og testoppsett.

5.2 Problemanalyse med vektning av ønskede egenskaper og ytelser

Under er en oversikt over viktige egenskaper som vektet i valget av endelig løsning. Det fokuseres i hovedsak på valg av prototypeløsning, da denne skal bygges og testes. Som nevnt i prosjektets begrensninger i kapittel 2, blir ikke produktet testet opp mot enkelte ønskede egenskaper for serieproduksjon. Hvordan dette dekkes blir foreslått senere i kapittel 16.3 Videre arbeid.

Ytelse

Den nye løsningen skal gjøres sterkere og mer effektiv enn dagens løsning. Yte nok kraft til å operere tilfredsstillende i ulike omgivelser, for eksempel i strøm eller ved stor dybde.

Effektivitet

Utnytte tilført effekt på en effektiv måte med tanke på tilgjengelig batterikapasitet.

Produksjon

Løsningen må være lett å produsere med tanke på antall deler, men også med tanke på produksjon av prototypen.

Kvalitet og robusthet

Følelsen av kvalitet er viktig, og produktet må være solid. Må tåle interne (motor) og til en viss grad eksterne (sammenstøt) påkjenninger uten å deformeres permanent.

Driftsikkerhet

Driftsikkerhet utmerker seg som det viktigste punktet siden ROV'en er helt avhengig av at thrusterne fungerer til enhver tid. Om en eller flere slutter å fungere er det en potensielt stor utfordring å få ROV'en tilbake til land. Den kan da bli påført skader under sleping og i verste fall mistes. Thrusterene må kunne brukes i utvidede perioder uten å få svikt i funksjon eller stanse.

Vedlikehold

Vedlikeholdet skal være enkelt å gjennomføre, samtidig som at behovet for vedlikehold holdes til et minimum. Behov for ekstensivt vedlikehold vil være til bryr for kunden. Designet på prototypen må legges til rette slik at det er lett å bytte ut deler under testing.

Kostnad

Lønnsomhet for bedriften og kundens betalingsvillighet i kombinasjon med markedsposisjon. Lavere kostnad enn dagens løsning

En viktig faktor for ROV'en er tether-kabelen den må dra med seg for å overføre video og datasignaler til overflaten. Ytelsen til den nye thrusterløsningen må tilpasses strømningsmotstanden generert av denne tether-kabelen, samt av ROV'ens skrog. Siden ROV'en ikke er ment som en racer, men heller som et observasjonsmiddel, trenger den raske korrigeringer av orientering om sin akse. God akselerasjon er derfor viktig.



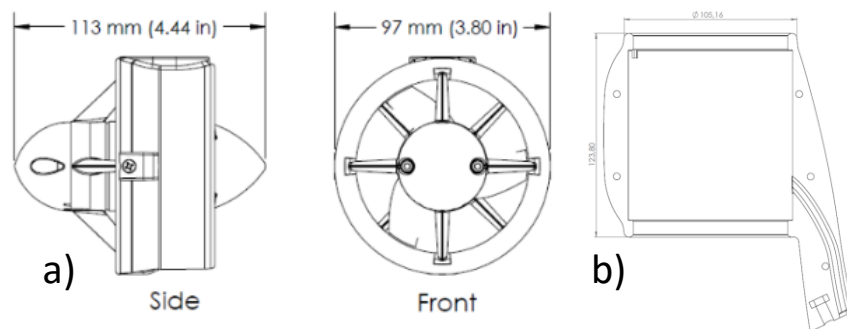
Figur 26: Explorer P1 med grønn tether-kabel (Eget foto).

5.3 Metrisk grovspesifisering

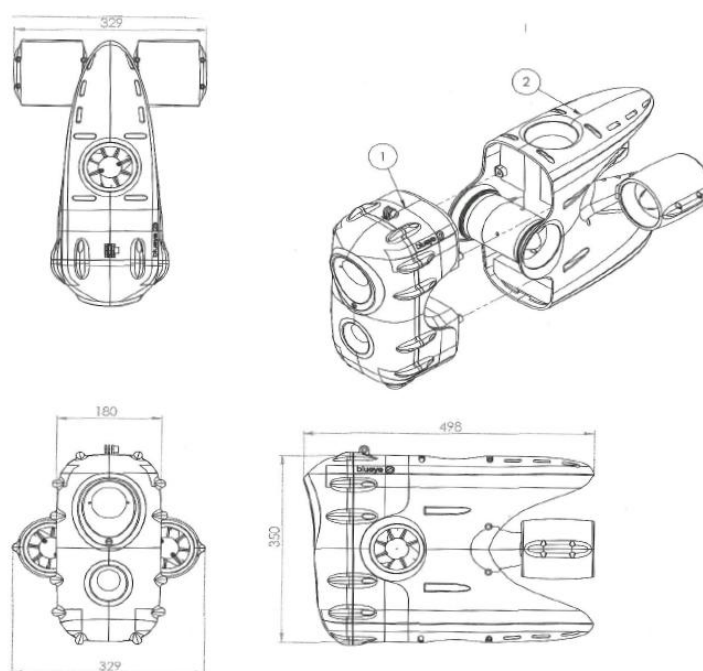
Det vil bli tatt utgangspunkt i eksisterende løsning for å grovspesifisere thrusterens mål.

Tabell 9: Spesifikasjoner til Blue Robotics T200 thruster [48].

Spesifikasjon	Verdi og enhet
Maks skyvekraft	
• Framover	50 N
• Bakover	40 N
Turtall	300-3800 rpm
Maks effekt	350 W
Mål	
• Diameter	100 mm
• Diameter (propell)	76 mm
Vekt	344 gram
Pris	1394,3 NOK



Figur 27: a) Blue Robotics T200 mål [48], b) Seksjonsvisning av dyse-konstruksjonen i Explorer P1 (Blueye Robotics [81]).



Figur 28: 3D-modell av Explorer P1 (Blueye Robotics [81])

Figur 27a viser ytre dimensjoner til T200 thrusteren slik den er originalt. Den integreres i dyse-dekselet vist i Figur 27b som festes til ROV'en. Figur 28 viser utvendige hoveddimensjoner til Explorer P1.

Tabell 10: Ytre dimensjoner til P1 Explorer.

Ytre mål	Verdi	Enhet
Høyde	350	mm
Lengde	498	mm
Bredde	180	mm

Grovspefiseringen settes til et spenn av verdier for ytre mål, tverrsnitt og propell. Ut i fra dette settes thrusterens grove spesifikasjoner til følgende.

Tabell 11: Metrisk grovspefisering av ny thrusterløsning.

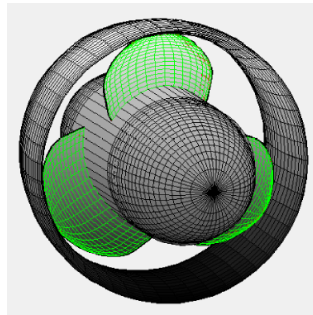
Mål	Verdi og enhet
Diameter (innstrømning)	90-130 mm
Diameter (utstrømning)	70-120 mm
Lengde	100-150 mm
Tykkelse (Tverrsnitt)	5-15 mm
Propell (diameter)	80-110 mm
Maks vekt	2 kg

6. KONSEPTGENERERING

Det skal her først gjøres greie for noen sentrale resultater fra tidligere masterarbeid. Deretter skal det presenteres en oversikt over produktets hovedkomponenter med tilhørende funksjoner, for deretter å identifisere løsningsforslag og kombinasjoner i utvikling av konsepter og foreløpig layout med noen sentrale metriske spesifiseringer. Det skal og drøftes ulike faktorer som er utslagsgivende for komponentenes funksjon og design. Pughs metode anvendes for å komme fram til et best mulig løsningsforslag for dysekonstruksjonen. Komponentene vektet i hovedsak med tanke på konstruksjonstekniske, produksjonstekniske og hydrodynamiske prinsipper.

6.1 Tidligere arbeid

Våren 2016 skrev Johnny Quang Tuan Huynh en masteroppgave [49] som omhandlet et forslag til et thruster-design med grunnlag i hydrodynamisk teori og optimeringsprogrammer.



Figur 29: Tidligere forslag til utforming av propell.

Foreslått motor: Turnigy Aerodrive SK3 4250

Thrustkoeffisient $K_T = 0,20567$ (4.27)

Momentkoeffisient $K_Q = 0,032941$ (4.28)

Avanseringsforhold $J = 0,56277$ (4.29)

Dynamisk effektivitet $\eta_{propell} = 0,559$ (4.31)

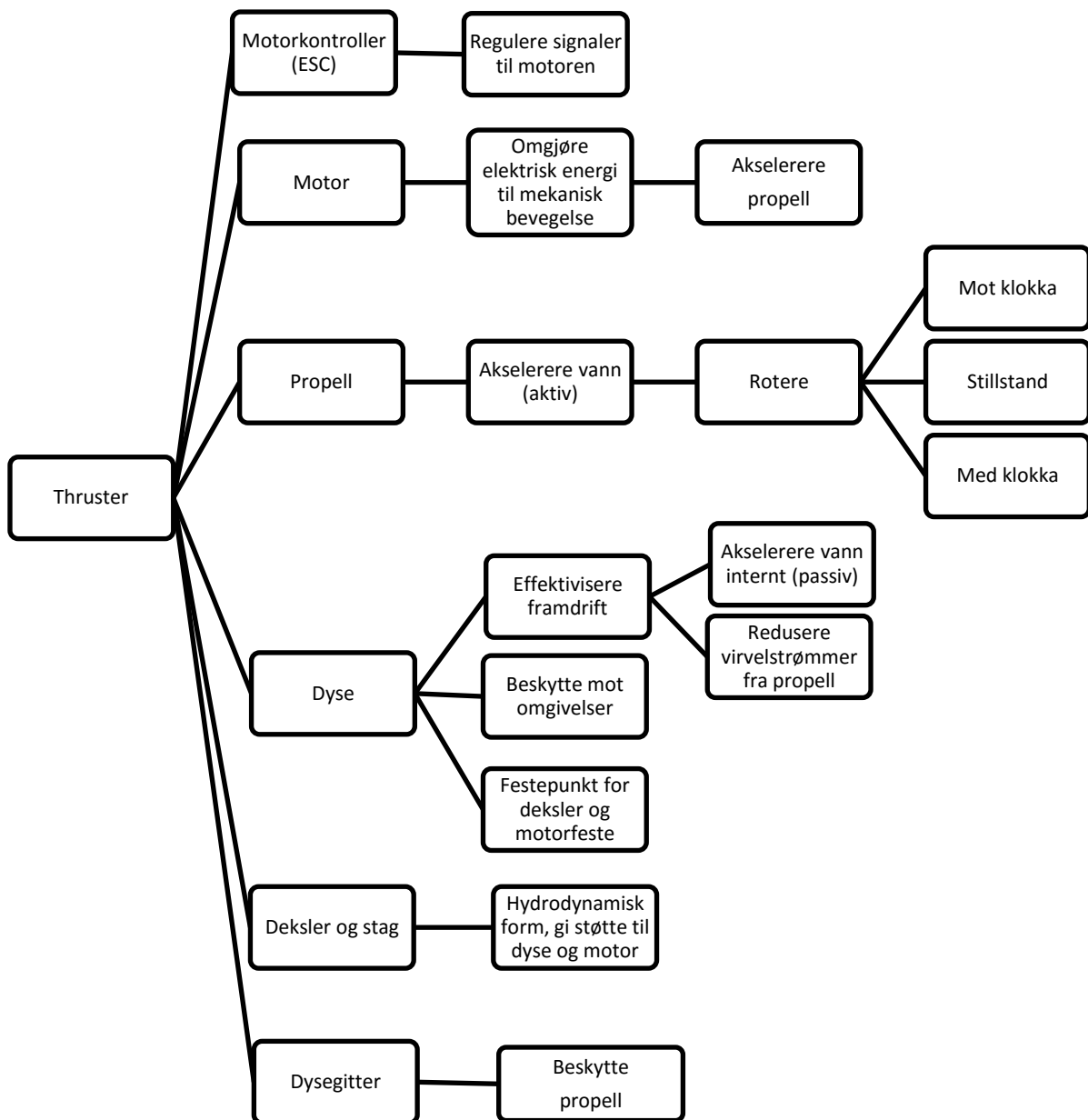
Tabell 12: Resultater fra tidligere masterarbeid.

Spesifikasjon	Verdi og enhet
Hastighet (ROV)	5,2 m/s
Turtall	6600 RPM
Diameter HUB	48 mm
Diameter Propell	84 mm
Skyvekraft	127 N
Moment (Q)	1,71 Nm
Effekt (P)	1180,89 W

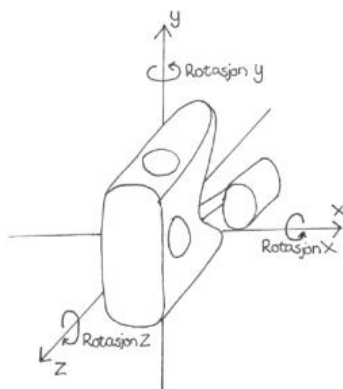
Propellens EAR ble lik 0,8 med tre propellblad. Den ble simulert til en effektivitet på 65%. Av det videre arbeidet ble det blant annet nevnt testing av motor og at motorkontroller må finnes. Tetherkabelen vil sørge for mellom 88-97% av den totale motstandskraften fra vannet når ROV'en beveger seg. I rapporten foreslås det at dagens thrustere (T200) ikke yter nok skyvekraft til å operere tilfredsstillende på 100m fordi den ikke klarer å overgå drag fra navlestrengen.

6.2 Funksjonsanalyse

I analysen i Figur 30 skilles det mellom aktiv og passiv funksjon i thrusteren. Med dette menes funksjonalitet med og uten bevegelse.

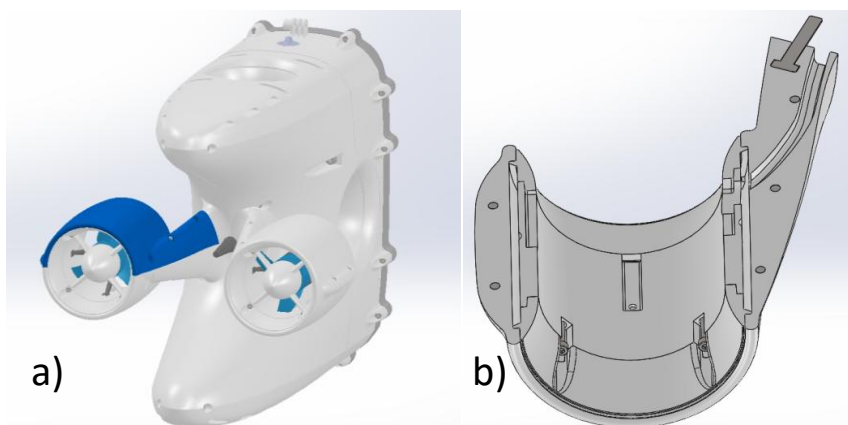


Figur 30: Funksjonsanalyse av thrusteren.



Figur 31: Manøvreringsakser for ROV'en og definerer koordinatsystemet referert til i rapporten.

Thrusterne på ROV'en har i oppgave å manøvrere og akselerere ROV'en i akser vist i Figur 31. Manøvreringsevnen avhenger av thrusterens orientering og plassering i forhold til ROV'ens tyngdepunkt. Som nevnt tidligere velger noen konkurrenter å vektorisere thrusterne sine for å øke manøvrerbarheten. Dagens ROV-skrog har vidt forskjellige profiler om de forskjellige aksene.



Figur 32: a) 3D-modell av P1-thrusterens ytterdeksel merket i blått, b) Seksjonsvisning av horisontal-thrusterens dyse.

Vedlikeholdet av thrusteren er et viktig punkt som er med på å påvirke brukervennligheten til ROV'en. Det må legges til rette for vedlikehold av motor, propell, dysegitter, samt rutinesjekker og feilsøking. I dag skjer vedlikeholdet i to akser. Figur 32 Y-akset vedlikehold for å på tilgang til tilkoblede ledninger, dysesyndler og dyselepper. Langs z-aksen gis det tilgang til motorfestet, samt dysegitter og deksler og dyselepper foran og bak propellen.

6.3 Komponentutforming og seleksjon

Det skal her greies ut om de ulike komponentenes funksjoner koblet mot form, funksjonalitet og hydrodynamiske egenskaper.

De ulike kriteriene vil bli tildelt vektning med en sum lik 1, deretter får de score fra en til fem der en er dårligst og fem er best. Antall poeng vil så bli summert for hver delt og det vil bli valgt en løsning. Seleksjonen blir grunnlagt under hver seleksjonstabell.

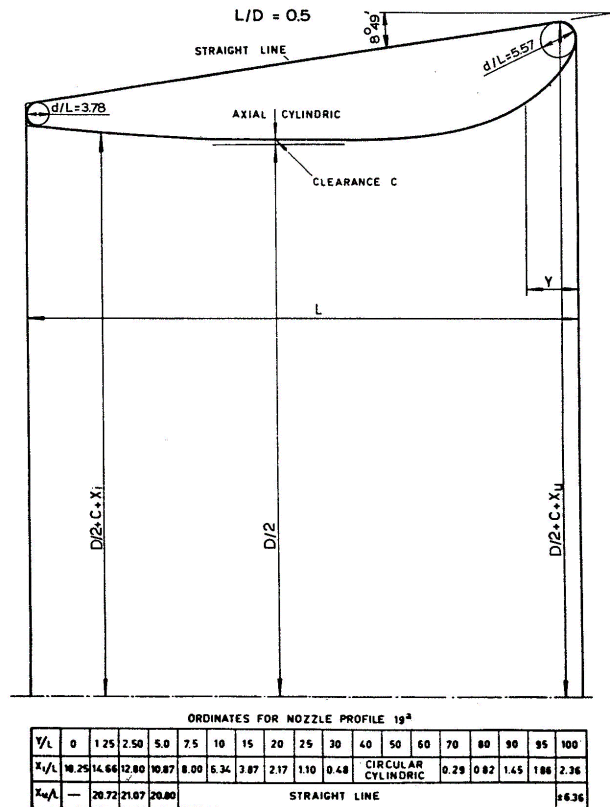
6.3.1 Dyse (Tverrsnitt)

ROV'en skal hovedsaklig akselerere i positiv og negativ z-retning, med hovedvekt på positiv z-retning. Dysen må da formes slik at den er akselererende fremover men likevel formet slik at akselerering bakover er gjørbart. Det gjøres ved å la innstrømningsarealet være større enn utstrømningsarealet i henhold til Bernoullis ligning (4.15). Dysen må ha en jevn innvendig overflate, derfor må det minimeres antall skruehull og andre urenheter som forstyrrer gjennomstrømningen. Optimalt sett er dysens tverrsnitt i utstrømningsretning så tynn som mulig for å unngå drag, men dette må tilpasses andre komponenter, slik som dysegitterne og dyseleppene.

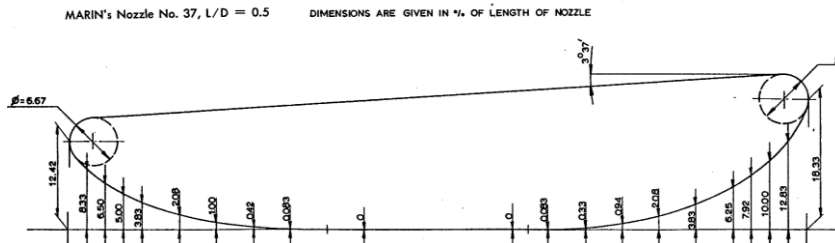
Det er tatt utgangspunkt i to typer dyser fra MARIN (Maritime Research Institute Netherlands), et forskningsinstitutt i Nederland som har forsket på propelldyser siden 1932. MARIN 19A (Figur 33) er best egnet til akselerering framover med sin markante forskjell i inn- og utstrømningsareal og spisst tverrsnitt bak. MARIN 37 (Figur 34) er også designet akselererende, men har bedre forutsetninger for akselerering i negativ z-retning enn MARIN 19A. [50]

De to tverrsnittsformene er brukt veiledende, og den av de to som får best score vil avgjøre hovedtrekkene til dysens tverrsnitt. Det gjøres slik fordi serienes dimensjoner i denne konteksten overskrider metrisk grovspesifikasjon og/eller gjør konstruksjonen inkompatibel med andre funksjoner thrusteren skal ha. For eksempel vil vinkelen på dysens yttervegg beskrevet i Marin 19A gjøre innstrømningsarealet for stort. Da det er ønskelig med en så kompakt konstruksjon som mulig vil formen vil bli tilpasset etter behov.

MARIN 19A
MARIN's Nozzle No. 19A



Figur 33: Spesifikasjoner til MARIN 19A dysetverrsnitt [].



Figur 34: Spesifikasjoner til MARIN 37A dysetverrsnitt [].

Tabell 13: Seleksjonsmatrise for hovedform på dysens tverrsnitt.

	Vekting	Marin 19A	Marin 37
Hydrodynamikk	0,6	5	4
Funksjonalitet	0,4	3	4
Sum	1	4,2	4
Rangering		1	2

Det er mest fokus på akselerasjon fremover, derfor er MARIN 19A et passende utgangspunkt for den nye tverrsnittsformen. Dette tverrsnittet genererer også mindre drag ved akselerasjon framover grunnet spissere form på utstrømningsenden.

Når kriteriet for funksjonalitet er vektet er det med tanke på i hvor stor grad formen tilrettelegger for thrusterens funksjoner. Tykkelsen på tverrsnittet er avgjørende for feste av motor, samt montering av dyselepper og dysegitter.

Valgt løsning:
MARIN 19A

6.3.2 Dysegitter

Dysegitteret skal beskytte propell og samtidig ha minimal påvirkning på gjennomstrømningen. Gitteret må derfor ha en hydrodynamisk form og være sterke nok til å tåle eventuelle sammenstøt. Gitteret må ha tett nok mønster slik at den effektivt beskytter propellen mot tang, sjøgress, småstein etc., men et for tett mønster vil hemme gjennomstrømningen unødige. Men tanke på konstruksjonens fleksibilitet er det aktuelt å muliggjøre bytte til tettere dysegitter eller evt. fjerne gitteret helt, om behovet er tilstede. Gitterets tverrsnitt må være hydrodynamisk.

Det er aktuelt å velge mellom to løsninger: å ha gitteret som en separat del, eller ha gitteret integrert i frontdekselet. Fordeler og ulemper med disse er drøftet under i Tabell 14.

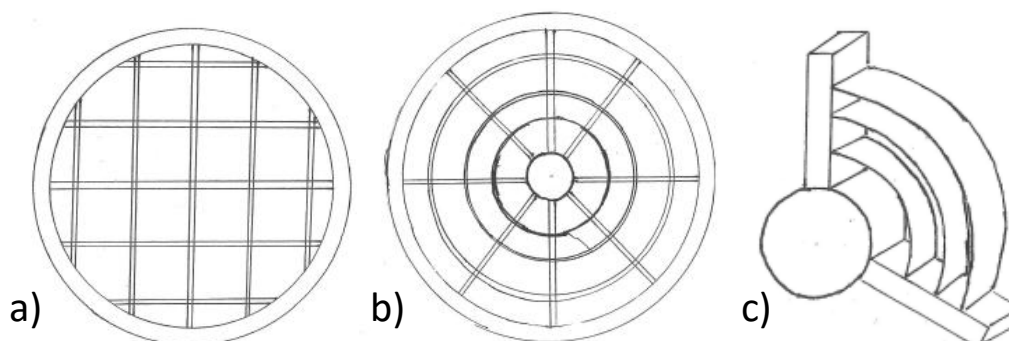
Tabell 14: Oversikt over fordeler og ulemper med integrert eller separat dysegitter.

	Integrert i frontdekselet	Separat
Plassering	I samme plan som støttestagene som vil øke avstanden fra dyseleppen.	Nærmere dyseleppen.
Montering/bytting	3 skruer (y-retning)	Vrir av dyseleppe
Fordeler	Mindre antall deler Sparer plass Muliggjør å bruke større profiltverrsnitt i gitteret	Bytter kun beskyttelsen Lettvint for testing av prototype
Ulemper	Tar lenger tid å bytte Må bytte større del	Flere deler å produsere



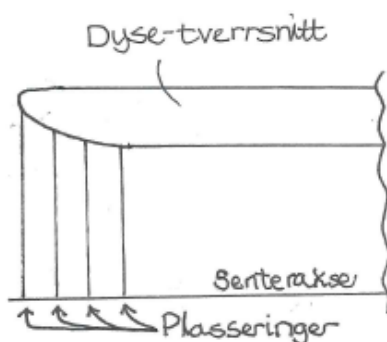
Figur 35: Dagens løsning på dysebeskyttelse (Eget foto).

Dagens løsning er å feste en netting helt ut mot endene av dysen (Figur 35). Å ha dysegitteret integrert i HUB-dekselet gjør at det må lages og byttes større deler. Å ha disse to delene separat gjør det enklere å bytte og/eller fjerne gitteret under testing av thrusteren.



Figur 36: Alternativer til dysegitter, a) rutet mønster, b) radielt mønster, c) integrert i deksel.

Figur 36 viser to forslag til dysegitter som kan være aktuelle for thrusteren. To former ment til å være separate deler og én måte å integrere beskyttelsen i frontdekslet på. For å utnytte dyseinngangens hydrodynamiske profil kan det tenkes at det er gunstig å flytte beskyttelsen innover i dysen for å bedre gjennomstrømningens initierende fase internt. På en annen side vil det å plassere beskyttelsen lenger inn i dysen skape et større rom mellom beskyttelsen og enden på dysen, noe som kan gjøre det lettere for thrusteren å hekte i gjenstander eller gjøre at gjenstander lettere kan samle seg opp og blokkere innstrømningen. Ulike plasseringer er vist i Figur 37.



Figur 37: Plassering av dysegitter.

Tabell 15: Seleksjonsmatrise for dysegitterets oppbygning.

	Vekting	Integrert i deksel	Separat
Plassering	0,3	4	5
Montering og bytte	0,7	3	5
Sum	1	2,7	5
Rangering		2	1

Det velges å ha dysegitteret som en egen del siden det gjør det enkelt å bytte ut eller fjerne under testing av prototype. Det er også enklere og mer tidsbesparende å evt. produsere flere typer gitter til testing.

Tabell 16: Seleksjonsmatrise for dysegitterets mønster.

	Vekting	Rutet	Spindellev
Hydrodynamikk	0,7	4	5
Robusthet	0,3	4	5
Sum	1	4	5
Rangering		2	1

Spindellevmønsteret fordeler belastningen mest effektivt gir en sirkulær forstyrrelse av gjennomstrømningen og er lettest å tilpasse dysen

Valgt løsning:

Separat gitter med radielt mønster.

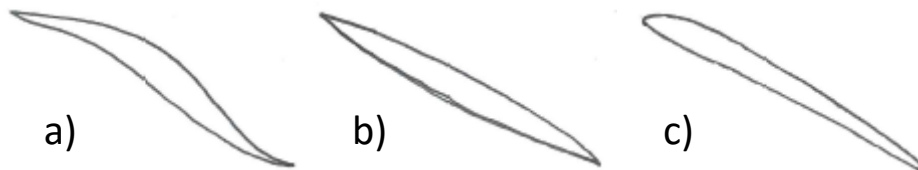
6.3.3 Propell

Det finnes mange måter å designe en propell på, derfor velges det å la designet inspireres av Kaserien til Marin, en eksisterende propell-serie som støttes av en rekke forskningsekspirer. Disse har tilnærmet lik konstant pitch, men ulik form og tverrsnitt ut i fra avstand fra propellens senter. Tverrsnittet ved ulike radier er viktig med tanke på propellbladets styrkeegenskaper og den hydrodynamiske effektiviteten i ulike avstander fra senter. Tverrsnittet må også tilpasses produksjonen av prototypen ved 3D-printing med tanke på hvor nøyaktig printer er. I tillegg må

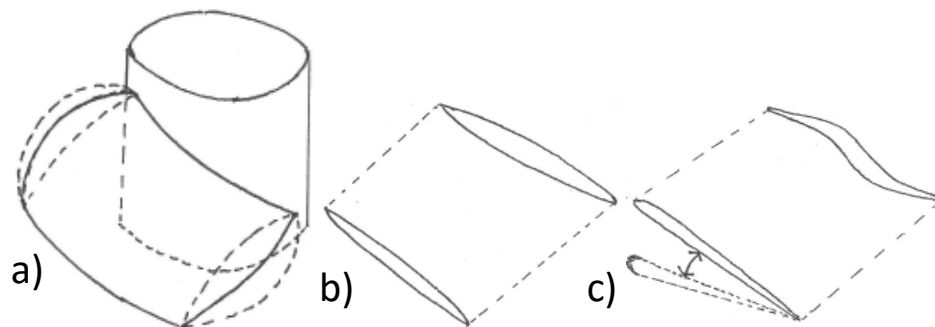
propellbladene tåle fjerningen av støttestrukturen laget av 3D-printeren. En for liten tykkelse kan og føre til svingninger som belaster konstruksjonen unødig i drift.

I utformingen av propellen vil legges vekt på

- Manøvrerbarhet ved lave rotasjonshastigheter.
- Robusthet og motstandsdyktighet mot skader ved sammenstøt.
- Produksjon.
- Tverrsnitt (Figur 38)



Figur 38: Forslag til tverrsnittsformer for propell, a) S-form, b) buet, c) flyvinge.



Figur 39: Ulike former å variere i forhold til avstand fra propellsylinder, a) Varianter av bue, b) Variasjon tverrsnitt (tykkelse og lengde), c) variasjon i vinkel.

Figur 39 viser hvordan buen fra propellsylinder til propellens tupp kan varieres for å øke eller redusere propellarealet, samt forhold mellom størrelse på rot- og tupptverrsnitt. Tykkelse, lengde, form kan også varieres.

Tabell 17: Seleksjonsmatrise for propellbladets hovedform på tverrsnitt.

	Vekting	Buet	S-form	Vingeprofil
Hydrodynamikk	0,6	4	3	5
Kraftfordeling	0,4	4	3	4
Sum	1	4	3	4,6
Rangering		2	3	1

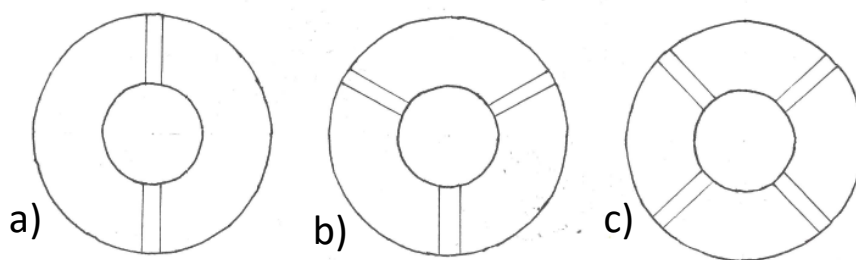
Valg av total propellform er en optimeringsprosess som krever en rekke forsøk ved aktuelle forhold og påkjenninger. Som nevnt tidligere er det en rekke variabler i propelldesign, og det vil derfor her (i likhet med valg av dysetverrsnitt) bli valgt uten hovedform som utgangspunkt, for deretter å legge resten av variablene til optimeringsdelen.

Valgt løsning:

Vingeprofil

6.3.4 Støttestag

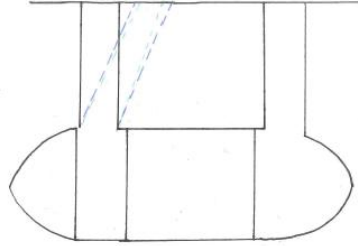
Disse sammenkobler dysen med motorfestet og dekselet foran propellen. Støttestagene i motorfestet må gi stabilitet til motor og propell, være sterke nok til å ta opp motorens moment. Hvor mange støttestag som velges har innvirkning på monteringstiden da hvert stag i utgangspunktet festes med en skrue hver. Antall skruer som trengs kan eventuelt reduseres ved å bruke andre typer festepunkt, som taper eller hakk i dyseveggen.



Figur 40: Antall støttestag.

Reduseres antall støttestag må tverrsnittet økes for å beholde de samme styrkeegenskapene. Dette gjør at uansett antall støttestag må det totale nødvendige tverrsnittet bevares. Det som er avgjørende er montering og hvordan gjennomstrømningen påvirkes av å bli forstyrret på få steder med større tverrsnitt, eller flere steder med mindre tverrsnitt. Tverrsnittet kan varieres langs stagets lengde eller være konstant. Dette må vurderes med tanke på styrkeegenskaper til materialet og hastigheten på fluidet i ulike lengder radielt fra dysens senterakse (z-akse).

En vinkling på støttestagene vil dekomponerer kreftene som virker på staget. Angrepspunktene fra trykket, forårsaket av innstrømningen, på tverrsnittet normalt på innstrømningsretningen fordeles langs z-aksen som resulterer i en skråstilt strømningsmotstand som får trykkreftene fra strømningen til å dekomponeres og dermed belaste støttestagene mindre.



Figur 41: Vinkel på støttestag.

Å variere vinkelen på støttestagene muliggjør tilpasning av motorsammenstillingens plassering i dysen, eller kan være en nødvendighet om dysen er kortere enn motorsammenstillingen, slik som i T200.

Tabell 18: Seleksjonsmatrise for antall støttestag.

	Vekting	2 stag	3 stag	4 stag
Montering	0,6	4	3	2
Stabilitet	0,4	3	5	5
Sum	1	3,6	3,8	3,2
Rangering		2	1	3

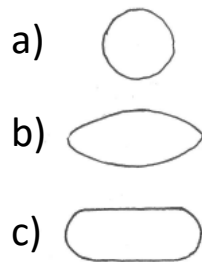
To støttestag blir for lite med tanke på krefter fra motor og støtte av dysen, da de kun vil stabilisere i to akser. Fire stag gir god støtte og stabilisering, men krever flere festepunkt enn nødvendig.

Valgt løsning:

Tre støttestag, uten vinkel

6.3.5 Tverrsnitt for støttestag og dysegitter

Det er vurdert tre former til tverrsnittet for støttestagene og dysegitterne (Figur 42). Det må velges et tverrsnitt som er hydrodynamisk og samtidig kan dimensjoneres opp uten å forringe gjennomstrømningen internt i thrusteren (Formel 4.10).



Figur 42: Tverrsnittformer for støttestag og dysegitter, a) sirkel, b) ellipse, c) avlang sirkulær.

Tabell 19: Felles seleksjonsmatriske for tverrsnittform for dysegitter og støttestag.

	Vekting	Sirkulær	Avlang sirkulær	Ellipse
Hydrodynamikk	0,5	3	4	5
Tilpasning	0,5	3	5	5
Sum	1	3	4,5	5
Rangering		3	2	1

Elliptisk form er tilpasningsdyktig i forhold til kravet til tverrsnitt i x- og y-aksen med tanke på hvilke krefter stagene skal utsettes for, og i hvilken retning. De skal primært ta opp moment fra motoren og ta opp krefter fra skyvekraften generert av motor og propell. Formen kan da justeres langs x- og z-aksen etter behov uten at det går utover gjennomstrømningen.

Valgt løsning:
Ellipse

6.3.6 Motorvalg

I følge oppdragsbeskrivelsen er det ønsket med en motor som har høyere moment enn dagens løsning, samtidig som å ha lavest mulig diameter på rotor og ikke ha for mye effekt og turtall. Valuta for Euro [53] og USD [54] er fra 30.10.2016. Det skal i Tabell 20 foreslås tre alternative motorer og sammenligne spesifikasjonene med eksisterende løsning.

Tabell 20: Spesifikasjoner til motoralternativer.

Spesifikasjon	Turnigy G10 [55]	Turnigy G25 [56]	Powerpro 2826 [57]	M200 (Nåværende) [58]
K_v [rpm/V]	810	710	750	490
Maks effekt [W]	375	600	700	350
Turtall [o/min]	12150	10650	11250	9800

Moment [Nm] ()	0,29	0,54	0,59	0,34
Vekt [g]	140	185	166	-
Max strøm [A]	42	44	45	22
Maks spenning [V]	15	15	15	20
Akseldiameter [mm]	5	5	5	5
Diameter [mm]	35	35	35	36
Sylinder lengde [mm]	25	36	45	
Total lengde [mm]	67	78	67	62
Pris [NOK]	231,8	229,9	290	784

Relevant lengde er sylinderens lengde, da den totale lengden er medregnet lengden på akslingen og har ikke noe å si på lengden på motorsammenstillingen. Alle motorene har omtrent samme diameter.

For å sammenligne motorenes moment er det her regnet ut i fra motorens turtall ut i fra konstanten K_v og påtrykt spenning lik 15V ved 700W. Dette gir ikke et nøyaktig estimat av motorens maksimale moment, som må kartlegges med praktiske forsøk eller simuleringer under belastning.

Motoren fra Blue Robotics (M200) ligger en god del høyere i pris, men er til gjengjeld bygd spesifikt for undervannsapplikasjoner.

Tabell 21: Seleksjonsmatrise for valg av motor.

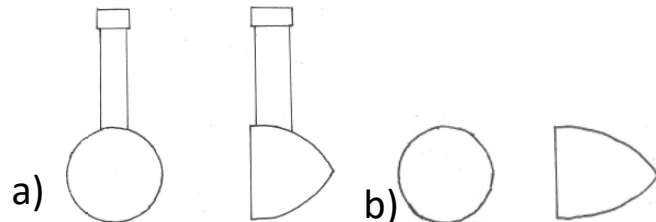
	Vekting	Turnigy G10	Turnigy G25	Power Pro 2826
Ytelse	0,7	2	4	5
Dimensjoner	0,3	5	4	3
Sum	1	2,9	4	4,4
Rangering		3	2	1

De tre foreslåtte motorene ligger på omtrent det samme i pris og veier rundt det samme, derfor er ikke det tatt med i seleksjonen. Power Pro 2826 har et høyere moment enn konkurrentene, og sees derfor på som det beste alternativet.

Valgt løsning:
Power Pro 2826

6.3.7 Deksel (foran og bak propell)

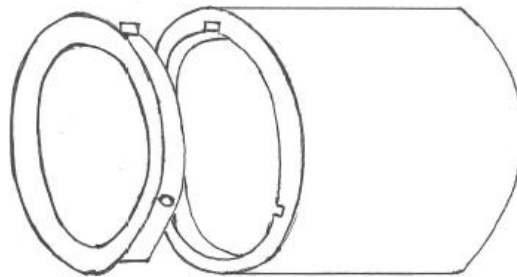
Disse dekslene er helt fremst og helt bakerst, og avgjør innstrømningens form til propell, og dragsuget bak thrusteren. Formen på disse må være så spisse som mulig for å gjøre konstruksjonen hydrodynamisk effektiv, men er samtidig begrenset av dysens lengde, og av interaksjon med dysegitterene. Formen vil da velges som buet konisk.



Figur 43: Form på a) deksel i front, b) deksel bak.

6.3.8 Dyselepper

Formen på dyseleppene påvirker innstrømningens initierende fase i dysen. De må være avrundede og følge formen til dyseveggen videre innover i dysen. Montering av disse kan gjøres for eksempel med skruer eller ved selvlokaliserende, låsende spor.

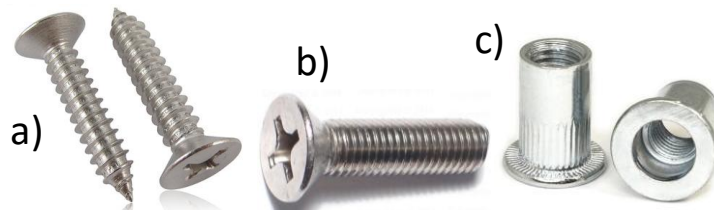


Figur 44: Selvlokaliserende montering av dyseleppe.

6.4 Øvrige komponenter

6.4.1 Skruer og blindmuttere

Skruene skal være standardiserte og være felles for så mange festepunkt som mulig. Det skal brukes maskinskruer fester av motor, propell og ende-deksel. Skruing i plast kan gjøres med treskruer. Tidligere er det brukt M3-skruer, som er en passende størrelse og brukes derfor videre.



Figur 45: Skruer til konstruksjonen, a) Treskrue [59], b) Maskinskrue [60], c) blindmutter [61].

6.4.2 Lager

For å sikre pålitelig drift over lenger tid i vann må lagrene i motoren byttes ut. Originalt leveres motoren med kulelager i metall som er avhengig av tilstrekkelig smøring, og er ikke optimalt for bruk i vann. Det er derfor gunstig å bytte ut disse med glidelager. Faktorer for valg av lager er blant annet aktuell rotasjonshastighet og bruk av korrosjonsresistente materialer.

Foreslått løsning her er et lager fra GGB med en innside laget av teflon og polymer-fibre, utside av rustfritt stål og et mellomlag av bronse som sikrer en sterk binding mellom lagene. Lageret kan bestilles i ønskede dimensjoner. [62]



Figur 46: Glidelager fra GGB [62].

6.4.3 Motorkontroller (ESC)

Motorkontrolleren må velges ut i fra motorens strømkrav. De tre foreslåtte motorene krever en 50A ESC, mens eksisterende motor krever rundt halvparten, f.eks. en på 25A. Det er tidligere blitt brukt to løsninger, integrert i thrusteren (Figur 47) og eksternt i ROV-skroget.



Figur 47: Blue ESC, integrert motorkontroller (Eget foto).

Utfordringen med å ha motorkontrolleren integrert i thrusteren er vanntettingen av den. Det vanntette beskyttelseslaget har ført til en dårligere varmeledningsevne, som har gjort at kontrolleren har blitt overopphetet. Det velges ekstern motorkontrollere til prototypen i dette prosjektet (Figur 48).

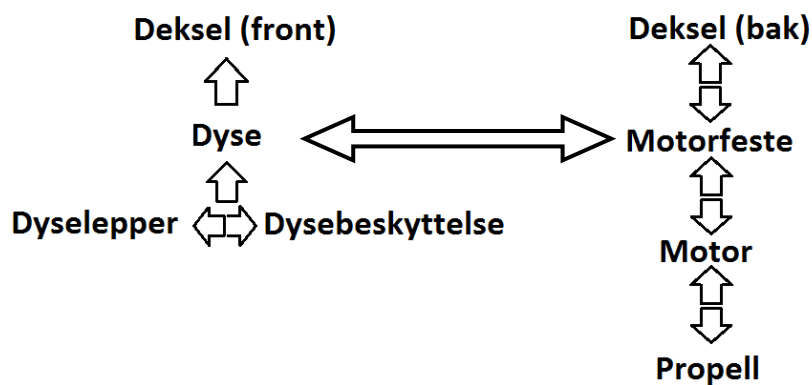


Figur 48: Motorkontroller fra Power Pro [1].

6.5 Moduldesign

6.5.1 Interaksjoner

For å lettere se hvilke komponenter som må tilpasses hverandre gis det oversikt i Figur 49 over hvilke komponenter som interagerer med hverandre direkte ved bruk av piler.



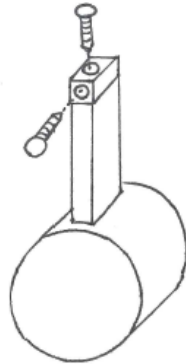
Figur 49: Interaksjonskart mellom komponentene

Det skilles mellom direkte og indirekte interaksjon mellom komponenter. Det er også interaksjonsgrupper og par i thrusteren som må tilpasses, uten at det er fysisk kontakt til stede.

Frontdekselet , propellsylinder og motorfeste er et slikt eksempel. For å sørge for en hydrodynamisk effektiv form må alle delene ha lik diameter. Propelldiameter må tilpasses diameter på innvendig dysevegg for å begrense virvelstrømmer mellom de.

6.5.2 Dyse og støttestag

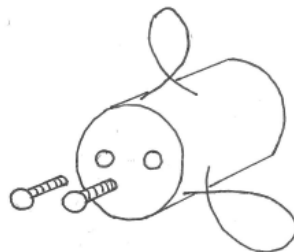
Det er ønskelig å lage sporene til støttestagenes festepunkt i dyseveggen så korte som mulig, for å unngå unødvendig mye hulrom som forstyrrer strømmingen. Dette kan gjøres ved å redusere vinkelen på stagene. Måten stagene kan festes til dysen kan være med skruer i eller vinkelrett på innstrømningsretningen.



Figur 50: Feste av støttestag med skruer i to retninger.

6.5.3 Propell og motor

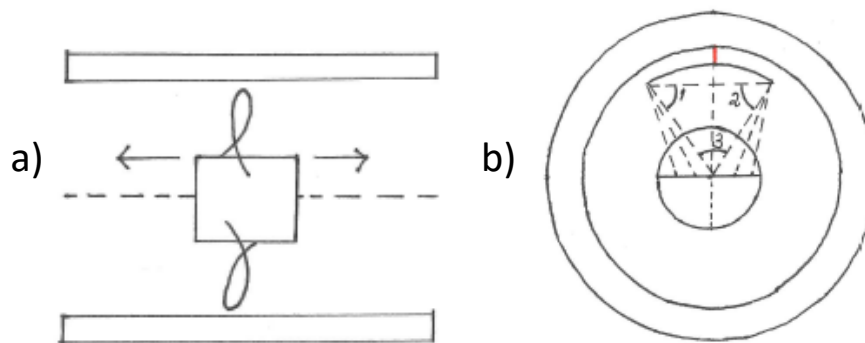
Diameteren og lengden til propellsylinderen må tilpasses motoren. Her er det gunstig å lage propellen slik at det er mellomrom mellom propellsylinderen og motoren grunnet varme fra motoren. Propellens diameter, samt propellbladenes areal og stigning må tilpasses momentet motoren klarer å levere. Antall skruer og plasseringer må tilpasses mulighetene for feste i rotoren, men det er i utgangspunktet tilstrekkelig med to stk. symmetrisk plassert om rotasjonsaksen.



Figur 51: Propellfeste med skruer

6.5.4 Propell og dyse

Propellens plassering i dysens lengderetning (Figur 52: a) Plassering av propell i dyse, b) Propellens form i forhold til propellsylinder og avstand til dysevegg i rødt ved forhold mellom vinkler og avstand fra rotasjonscenter. Figur 52a) er viktig for konstruksjonens stabilitet, og bør optimalt sett være rundt tyngdepunktet til thrusteren. Avstanden mellom propellbladets tupp og dyseveggen (Figur 42b) må og optimaliseres slik at det ikke oppstår unødig virvelstrømmer mellom dem under rotasjon.



Figur 52: a) Plassering av propell i dyse, b) Propellens form i forhold til propellsylinder og avstand til dysevegg i rødt ved forhold mellom vinkler og avstand fra rotasjonscenter.

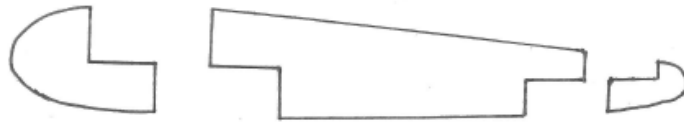
6.6 Valgt løsning for prototype

Hovedformene er nå valgt og kan sees i oversikten i Tabell 22. Videre må de ulike komponentene optimaliseres mot belastninger, ytelsesspesifikasjoner til motor og gjennomstrømning i dysen. Det må også gjøres en metrisk spesifisering av 3D-modellen ut i fra valgt løsning.

6.6.1 Valgte former

Tabell 22: Oversikt over valgte komponenter og former med tilhørende variabler til optimering.

Komponent	Valgt form	Variere
Dyse	Marin 19A	Tykkelse Lengde Forskjell mellom inn og utstrømningsareal
Dysegitter	Sirkulær, ellipse	Tetthet på mønster Størrelse på tverrsnitt
Støttestag	Ellipse Antall: 3	Størrelse tverrsnitt i x- og z-retning.
Propell	Vingeprofil Antall propellblad: 3	Stigning Tykkelse Vinkel mellom tverrsnitt Areal (EAR)

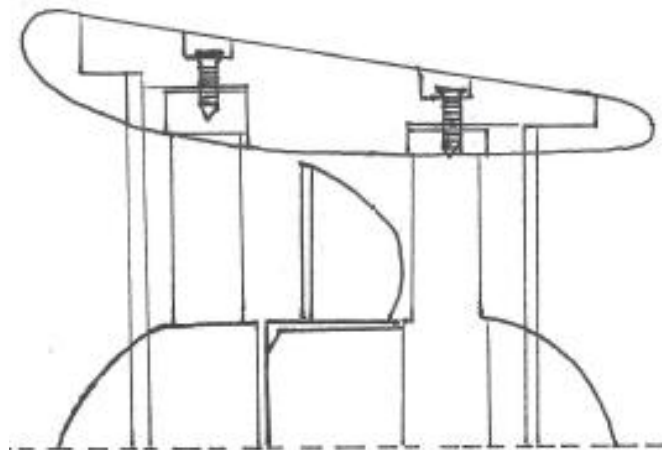


Figur 53: Løsningsforslag til dysens tverrsnitt med dyselepper på endene.

Figur 53 viser et forslag til hvordan dysen kan deles opp med tanke på avtakbare dyselepper.

Form på festekloss på enden av hvert stag velges til prisme grunnet enklere tilpassing og etterarbeiding til festepunkt i en 3D-printet prototype.

Dysegitteret velges til å ha sirkulært mønster med ellipseformet tverrsnitt. Gitternes innerste ring velges vinklet for at den skal tilpasses front- og bakdekselet, som igjen muliggjør bruk av kortere dyse. Figur 54 viser foreløpig produktlayout der det vises hvordan de mest sentrale komponentene tenkes montert i forhold til hverandre.



Figur 54: Foreløpig layout for thruster-konstruksjonen.

6.6.2 Propellens stigning

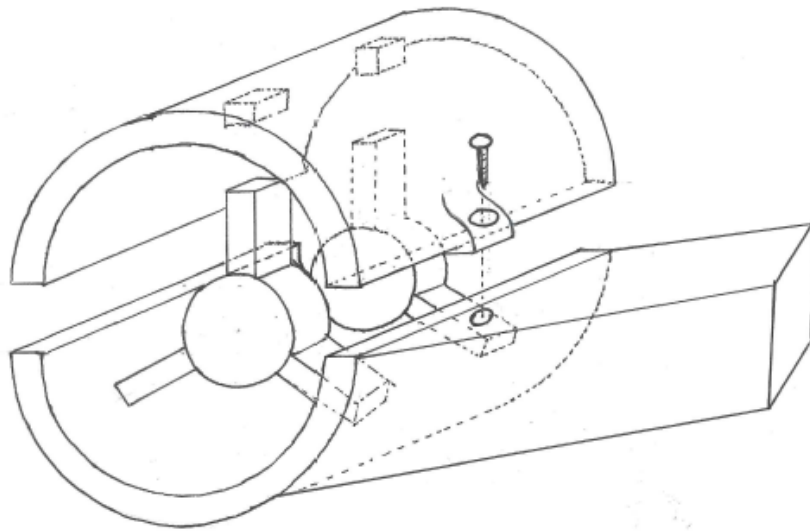
Propellbladenes stigning må tilpasses den valgte motoren for å oppnå best mulig effektivitet. Det vil derfor bli foreslått tre forskjellige stigninger som skal testes ut. Propellene vil heretter nevnes som "Propell" etterfulgt av stigningsvinkel, feks "20".

For å bestemme stigningsvinkel ble det brukt retningslinjer fra båtpropellprodusenten Victoria Propeller Ltd. som utgangspunkt. De foreslår ulike stigningsforhold oppgitt i intervaller til forskjellige bruksområder. "0,5-0,8 for trålere, 0,8-1,2 for middels til raske cruisere, og 0,9-1,5 for eksepsjonelt raske cruisere". [40] Derav velges stigningene med tilhørende stigningsforhold:

$$Z(15) = 0,84, Z(20) = 1,14, Z(25) = 1,46 \text{ (4.25)}$$

6.7 Løsningsforslag til serieproduksjon

Ved design av prototype må det tenkes på enkelthet i forhold til produksjon ved 3D-printing og uskiftning av ulike deler når den skal testes. Det gjør at designet vil tilpasses rundt produksjon av prototype og ikke hvordan thrusteren kan integreres i det nye skrog-designet. Det vil derfor her bli foreslått hvordan elementer ved prototypespesifiseringen kan tas videre og sees på i en større sammenheng med tanke på brukervennlighet og vedlikehold.



Figur 55: Løsningsforslag til thruster-konstruksjon for serieproduksjon.

Figur 55 viser hvordan dysen kan deles i to for å gjøre thrusteren tilgjengelig for inspeksjon og vedlikehold. I halvdelen som tas av er det tenkt å gjøre plass til festepunkt støttestag i form av to hull. Slik kan antall skruefester av støttestagene reduseres til totalt fire, og samtidig sørge for en indre dysevegg med jevnere overflate.

7. GRUNNLAGSBEREGNINGER

Det vil her bli gjort dimensjoneringsberegninger med grunnlag i ulike relevante scenarier. Det vil bli sjekket nedbøying av støttestag, påvirkningen fra det hydrostatiske trykket på komponentene og spenninger i motorens og propellen festepunkt.

7.1 Brukspåkjenninger og materialer

Det er tatt utgangspunkt i maksimal akselerasjon framover ved aktuell dybde. Momentet konstruksjonen faktisk blir belastet med blir funnet ved testing av motoren med propell. Utgangspunktet for grunnlagsberegningene tas fra momentet funnet ut i fra K_v konstanten til motoren. Beregningene og tverrsnittene tilpasses med tanke på at det ventes et mye større moment.

Det er tilgjengelig to typer termoplast til bygging av prototypen, ABS [80] og PLA [65]. Oljebaserte ABS er mer fleksibel enn plantebaserte PLA, som kan virke sprøere i strukturen. ABS er har høyere smeltetemperatur (rundt 225°C) enn PLA (180-220°C). I styrkeegenskaper er de omtrent like og de opplevde materialegenskapene er mer avhengig av 3D-printerens innstillinger i følge kilde. [64].

PLA ble valgt som materiale for prototypen, da forekomsten av denne plasttypen var størst i Blueye Robotics sitt verksted. Dimensjoneringsberegningene vil dermed ta utgangspunkt i egenskapene til PLA.

$$E_{PLA} = 3450 \text{ MPa} [65]$$

7.2 Dimensjonering

Når et fartøy senkes ned i vann vil den bli utsatt for eksternt hydrostatisk trykk. Fartøyet vil bli utsatt for aksielle og radielle krefter ved ulike dybder, som vil danne trykk- og strekk spenninger i konstruksjonen. I thrusteren vil det være samme trykk på inn og utside, med en liten forskjell når propellen roterer, da det vil oppstå en trykkreduksjon på grunn av det dynamiske trykket.

Konstruksjonen vil også bli utsatt for spenninger når den akselereres. Her skal det gjøres statiske dimensjoneringsberegninger for komponenter i thrusteren ut i fra momentet fra motoren og skyvekraft fra propellen. Skyvekraften fra propellen settes til 70N for å sette et konservativt utgangspunkt. Det skal også sjekkes om de opptredende spenningene er så store at det må gjøres dynamiske dimensjoneringsberegninger.

Verdiene for materialets elastitetsmodul og styrkeegenskaper hentet fra kilde er oppgitt i et spenn av verdier. Her er middelveien mellom minimum og maksimumsverdi valgt. Det er viktig å merke seg at det er brukt generelle egenskaper til PLA, da slike polymerer kan ha ulik grad av styrke avhengig av

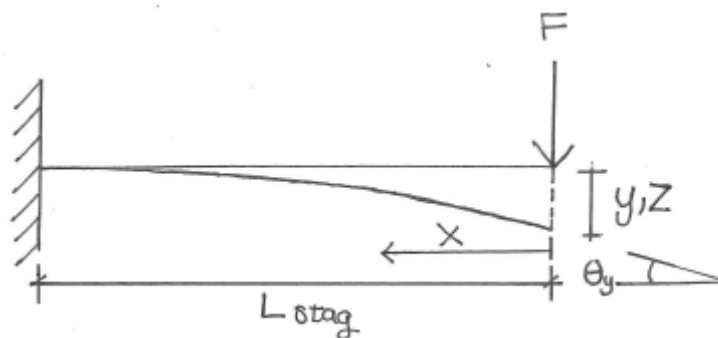
legering med andre polymerer. Strukturen til 3D-printede objekter kan ha formfeil og egenspenninger noe som kan forringe egenskapene. Dette er tatt i betraktning og det velges derfor høy sikkerhetsfaktor. For utrivning av grunnmateriale velges $n_u = 4$.

7.2.1 Støttestag

For å finne ut hvilke komponenter som det skal dimensjoneres for, og hvilken type dimensjonering som må benyttes, skal det her undersøkes hvilke krefter som oppstår under noen scenarier og hvilke komponenter som påvirkes.

Nedbøying

Til nedbøyingberegningene skal den elastiske linjens ligning brukes om stag-tverrsnittets sterke og svake akse [66]. Det sees på ett stag med 1/3 av kraften som overføres fra motoren. Det regnes da maks m . For å forenkle beregningen sees staget på som en bjelke som er fast innspent i ene enden, med en kraft som virker i andre enden.



Figur 56: Beregningsfigur, nedbøying.

Nedbøying i y-retning (svak akse):

Lengden på staget er $L_{stag} = 30\text{mm}$

Derav regnes kraften F_y :

$$M_m = F_y \times L_y \rightarrow F_y = \frac{M_m}{L_{stag}} = \frac{0,594 \text{ Nm}}{0,030\text{m}} = 19,8 \text{ N} \quad (7.1)$$

$$I_y = \frac{\pi}{64} \times (5\text{mm})^3 \times 12\text{mm} = 73,63 \text{ mm}^4 \quad (7.3)$$

Momentet som virker i staven kan uttrykkes som:

$$M(x) = -Fx \quad (7.1)$$

Integrerer Formel 8.2 to ganger og så følgende uttrykk for maks nedbøying for hvert stag:

$$y_{maks} = \frac{F_y L_{stag}^3}{3E_{PLA}I_y} = \frac{\frac{19,8}{3} N \times (30 \text{ mm})^3}{3 \times 3450 \frac{N}{\text{mm}^2} \times 73,63 \text{ mm}^4} = 0,23 \text{ mm} \quad (7.2a)$$

Det vil si en total vridning av motorfestet på 0,69 mm, om konkluderes som en tilfredsstillende liten nedbøying av støttestagene.

Nedbøying i z-retning (sterk akse):

Finner annet arealmoment om sterk akse (z):

$$I_z = \frac{\pi}{64} \times 5 \text{ mm} \times (12 \text{ mm})^3 = 424,11 \text{ mm}^4 \quad (7.4)$$

Kreftene som virker i z-retning kommer hovedsaklig fra skyvekraften avgitt av motoren. Det virker også en kraft fra fluidstrømmen som treffer stagenes tverrsnitt, men grunnet stagenes hydrodynamiske form vil denne ikke være kritisk gjeldene, og velges derfor bort under dimensjoneringsberegningene. Skyvekraften F_z fra propellen settes til 70N, og det blir følgende nedbøying for hvert stag:

$$z_{maks} = \frac{F_z L_{stag}^3}{3E_{PLA}I_z} = \frac{\frac{70N}{3} \times (30 \text{ mm})^3}{3 \times 3450 \frac{N}{\text{mm}^2} \times 424,11 \text{ mm}^4} = 0,14 \text{ mm} \quad (7.2a)$$

Det vil si en total deformasjon av motorfestet på 0,43 mm, som også konkluderes som tilfredsstillende.

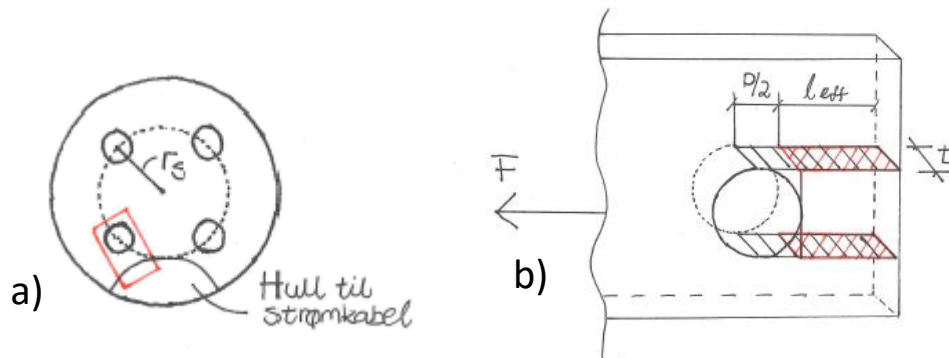
7.2.2 Skruerforbindelser

Det sees på spenninger i hullkantene i skruerhullene i motorfestet og propellen. Samt sjekkes for fare for utriving av grunnmaterialet i motorfestet [67].

7.2.2.1 Motorfestet

og om tykkelsen til motorfestet er tilstrekkelig. Det skal sjekkes for utriving av grunnmaterialet. Lengden l_{eff} , effektiv forankringslengde, regnes som den minste avstanden fra skruerhullets kant til hullet til strømforsyningen. Faktisk lengde mellom de to hullene er $l_{avstand}$ som sjekkes i 3D-

modellen i Solidworks. Spenninger fra strammingen av skruene blir ikke tatt med i beregningene, det velges i stedet en høy sikkerhetsfaktor mot utrivning.



Figur 57: a) Avstand ut til skruerhull (motorfeste), b) Effektiv forankringslengde.

Finner kraften som virker ved skruerhullene ved å dele på hullenes avstand fra senter

$$F_s = \frac{M_m}{r_s} = \frac{0,594 \times 10^3 \text{ Nmm}}{9,25 \text{ mm}} = 64,2 \text{ (7.1)}$$

Kraft som virker på hver skrue bli da:

$$F_{skrue} = \frac{F}{n_{skruer}} = \frac{64,2 \text{ N}}{4} = 16,1 \text{ N (7.5)}$$

Arealet som dannes av effektiv forankringslengde og veggtykkelsen.

$$A_{utrivning} = 2 \times l_{eff} \times t \text{ (7.6)}$$

Finner skjærfastheten til materialet, som settes til 70% av strekkfastheten.

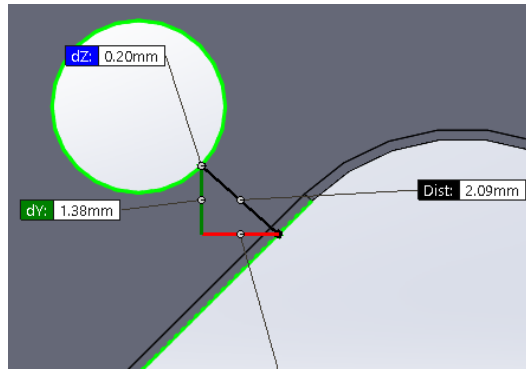
$$\tau_u = 0,7 \times R_m = 0,7 \times 58,5 \text{ MPa} = 40,95 \text{ MPa (7.7)}$$

Dette gir tillatt skjærspenning med en sikkerhetsfaktor for utrivning n_u :

$$\tau_{u,tillatt} = \frac{\tau_u}{n_u} = \frac{40,9 \text{ MPa}}{4} = 10,2 \text{ MPa (7.8)}$$

Effektiv forankringslengde blir da:

$$l_{eff} = \frac{F_{skrue}}{2t \times \tau_u} = \frac{16,1 \text{ N}}{2 \times 1 \text{ mm} \times 10,2 \text{ MPa}} = 0,8 \text{ mm (7.9)}$$

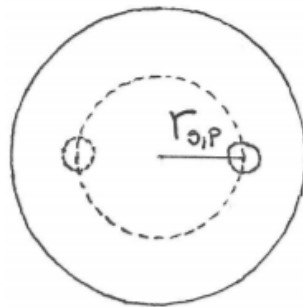


Figur 58: Avstand mellom skrueshull og hull til strøm kabel (Solidworks)

$$0,8 \text{ mm} < 2,09 \text{ mm} \rightarrow \text{Ingen fare for utrivning (7.10)}$$

7.2.2.2 Propellfeste

Skruefestene i propellen uteses for samme moment men er festet med kun to skruer og har en annen lengde fra senter $r_{s,p}$ som vist i Figur 59.



Figur 59: Hullavstand fra senter for feste av propell.

Sjekker derfor spenningen i hullkanten ved å finne kraften som virker:

$$F_s = \frac{M_m}{r_{s,p}} = \frac{0,594 \times 10^3 \text{ Nmm}}{8,5 \text{ mm}} = 69,9 \text{ N (7.1)}$$

Bruker deretter arealet som spenner seg over hull diameteren ganget med veggtykkelsen til propellen:

$$\sigma_h = \frac{F}{A} = \frac{F}{d_h \times t} = \frac{34,95 \text{ N}}{3,5 \text{ mm} \times 1,25 \text{ mm}} = 7,9 \text{ MPa (7.9)}$$

$$7,9 \text{ MPa} < 10,2 \text{ MPa (7.11)}$$

Spenningen som oppstår i hvert hull er under tillatt skjærspenning og konkluderes som tilfredsstillende.

7.3 Dynamiske belastninger og sikkerhet mot utmatting

Maks spenninger skal sjekkes i sårbare punkt. I egenskapene til materialet (PLA) er det oppgitt utmattingsgrense på mellom 22,2-27,7. MPa ved 10^7 sykluser [65]. Områder hvor det oppstår spenninger lavere enn dette vil ikke bli sjekket.

Motorens moment genererer følgende motorfestets støttestag :

$$W_y = \frac{\pi}{32} \times (5mm)^2 \times 12mm = 29,5 mm^3 \quad (7.12)$$

$$\sigma_{b,maks,y} = \frac{M_m}{3W_y} = + \frac{0,594 \times 10^3 Nmm}{3 \times 29,5 mm^3} = 6,7 MPa \quad (7.13)$$

Skyvekraften fra propell (satt til 70N) fører til et moment i z-retning som gir følgende spenning i motorfestet:

$$W_z = \frac{\pi}{32} \times 5mm \times (12mm)^2 = 70,7 mm^3 \quad (7.14)$$

$$\sigma_{b,maks,z} = \frac{M_T}{3W_z} = + \frac{70N \times (0,03m) \times 10^{-3}}{3 \times 70,7 mm^3} = 9,9 MPa \quad (7.13)$$

Opptredende spenninger i gitte scenarioer er under utmattingsgrensen til PLA.

Andre spenninger som kan være utslagsgivende blir undersøkt i FEM-analysen i neste kapittel.

8. FEM- OG CFD ANALYSER

Her skal designet analyseres ved FEM-analyse for å verifisere håndberegninger i Kap. 7, og for å få en bedre oversikt over konstruksjonens nedbøyinger, spenningskonsentrasjoner og egenfrekvenser. Det skal også gjøres strømningsanalyse med CFD for å se hvordan designet oppfører seg når propellen roterer og hvordan dysen oppfører seg i fluidstrøm i forhold til dagens dyse i Explorer P1. Først vil det gis en oversikt over simuleringene som skal gjøres. Deretter vil resultater fra analysen presenteres med tilhørende kommentarer.

8.1 Oppsett for simulering

Under er det laget en simuleringsoversikt som viser hvilken type simulering, hvilke deler som er involvert, påkjenninger og resultatet.

Tabell 23: Oversikt over simuleringsoppsettet for statisk FEM-analysen.

Simulering nr.	Komponent	Type simulering	Påkjenninger	Mål
1	Propell 20	Fast innspent, kraftpåvirket	70 N skyvekraft	Nedbøying Spenning (von Mises)
2	Propell 20	Frekvens	Skyvekraft: 70 N	Egenfrekvens
3	Motorfeste	Fast innspent, kraftpåvirket	Totalt 19,8 N i samme retning som momentet fra motoren.	Nedbøying Spenning (von Mises)
4	Dyse, frontdeksel, motorfeste	Fast innspent, kraftpåvirket	Moment: 0,594 Nm Skyvekraft fra propell: 70N	Spenning (von Mises)

Tabell 24: Oversikt over simuleringsoppsettet for CFD-analysen.

Simulering nr.	Komponenter	Type simulering	Påkjenninger	Mål
5	Ny dyse Explorer P1 dyse	Strømning	Fluidhastighet i z-retning.	Fluidets gjennomsnittlige utgangshastighet Drag
6	Alle (Propell 25)	Strømning ved rotasjon	Turtall: 3800 rpm.	Inn og utgangshastighet av dysen.
7	Propell (15,20,25)	Rotasjon	Turtall: 250-3800 rpm.	Generert kraft Moment Fluidhastighet

Tabell 25: Materialegenskaper til PLA.

Egenskap	Verdi	Enhet
Elastitetsmodul	3450	N/mm ²
Poisson's Ratio	0,394	-
Skjærmodul	1245	N/mm ²
Massetetthet	1020	kg/m ³
Strekfasthet	58,5	N/mm ²
Trykkfasthet	76,2	N/mm ²
Flytspenning	63,5	N/mm ²

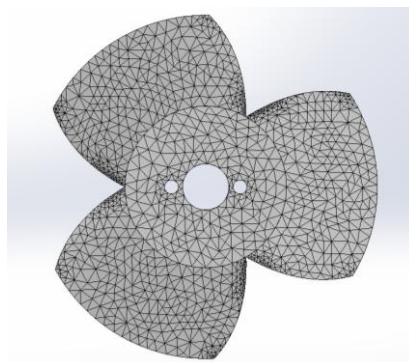
Mesh

For å få best mulig resultat må meshet justeres. Det brukes kurvebasert mesh med lokal mesh-kontroll i sårbare punkt. Elementstørrelsen justeres etter behov for å bli kvitt singulariteter. Felles elementforhold i overgangene mellom fin og grovere mesh er 1,5. Det vil si at for hver rad med elementer bort fra det fineste meshet, øker elementstørrelsen med 1,5, helt til opp til største elementstørrelse.

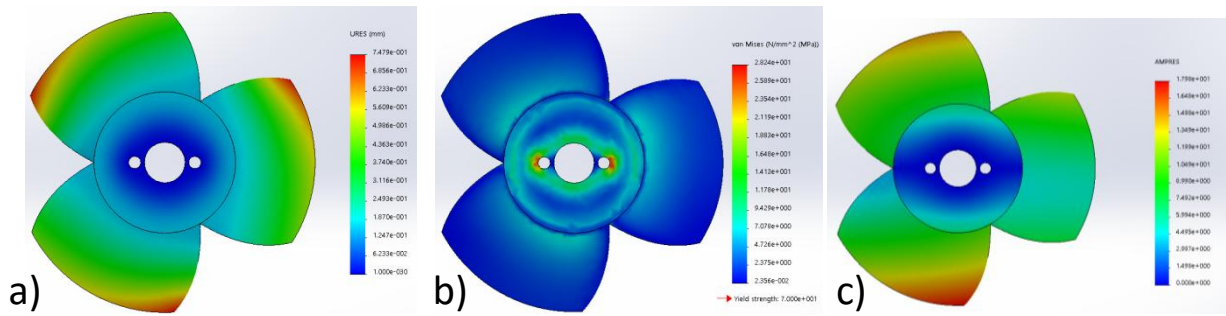
8.2 Simuleringsresultater

8.2.1 Statisk analyse og egenfrekvens (FEM)

Simulering 1 og 2 - Propell 20



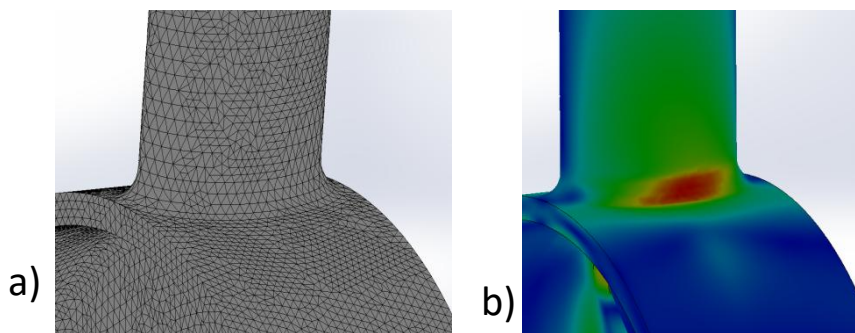
Figur 60: Mesh, propell.



Figur 61: Simuleringsplot av Propell 20. a) Nedbøying, b) Spenning (von Mises) og c) Egenfrekvens (min 327,2 Hz).

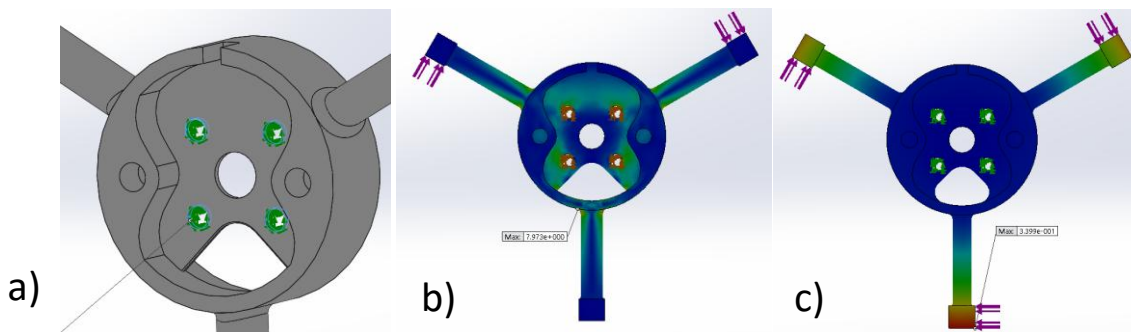
Det observeres størst nedbøying (0,75 mm) ved følgende kant på propellbladet der det er tynneste tverrsnitt, som er godkjent. Største spenning er i skruehull (28,2 MPa) som er godt under flytegrensen til materialet, og minste egenfrekvens lik 274,9 Hz (tilsvarende 16494 rpm) som er langt høyere enn den valgte motorens maksimale turtall og utgjør derfor ingen fare.

Simulering 3 - Motorfeste



Figur 62: Motorfeste a) Mesh b) Spenning (von Mises)

Setter krefter med en samlet verdi på 19,8N fordelt ytterst på hvert stag i samme retning, med opplagring ved skruene.

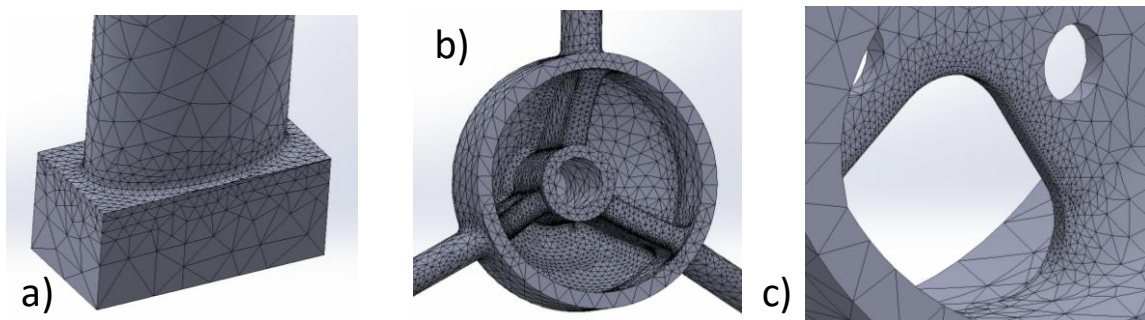


Figur 63: Simuleringsoppsett for motorfestet, a) Opplagringer, b) Spenning (von Mises) c) Nedbøying.

Maks spenning er 9,02 MPa i overgangen mellom støttestag og motorfestet, og maks nedbøying er 0,34 mm som stemmer greit med håndberegningene i Kap 7.2 og 7.3.

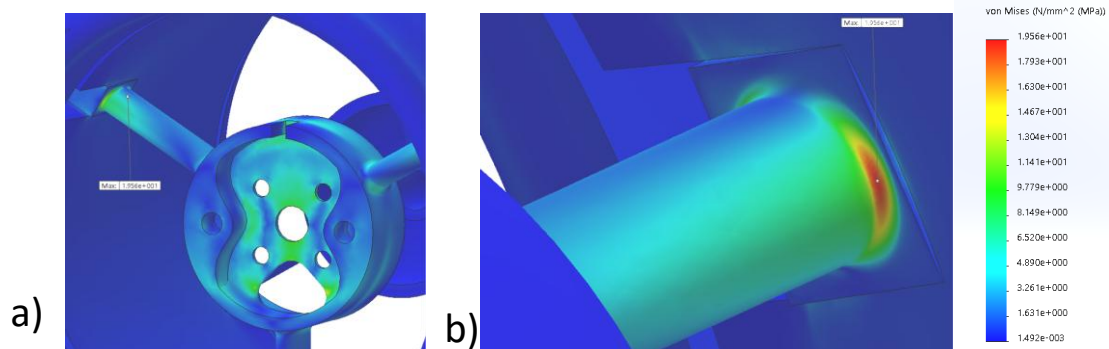
Simulering 4 - Dyse, motorfeste og frontdeksel

Velger å meshe lokalt i sårbare punkt i konstruksjonen for å luke ut singulariteter som påvirker resultatet.



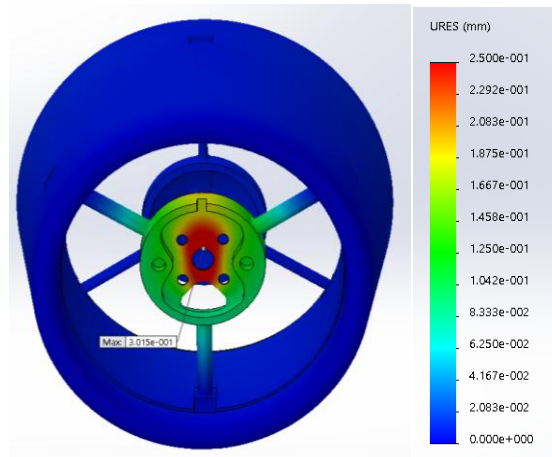
Figur 64: Oversikt over lokal mesh-kontroll i a) Mellom festekloss og støttestag, b) Frontdeksel og c) Hull til strømkabel.

Elementstørrelsen som er bruk er henholdsvis 1 mm, 0,5 mm og 0,1 mm, med et elementforhold i overgangene mellom fin og grovere mesh lik 1,5. Det skal her simuleres med alle forutsatte krefter og momenter på konstruksjonen samtidig for å se hvordan den oppfører seg i større sammenheng.



Figur 65: Spenninger i motorfestet a) Oversiktsbilde b) Støttestag og festekloss, maks spenning Spenning (von Mises) med tilhørendeskala.

Maks spenning (19,6 MPa) oppstod i overgangen fra stagprofil til festekloss, som er godt innenfor flytegrensen til materialet.

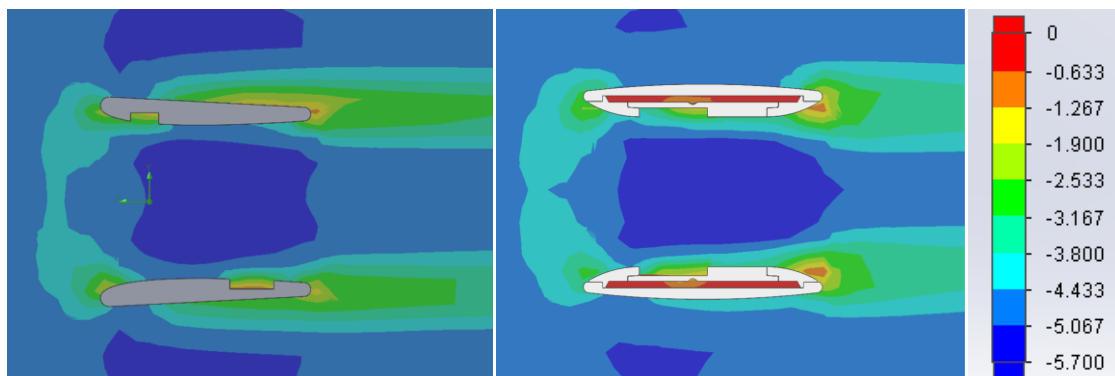


Figur 66: Deformasjon av motorfeste med tilhørende skala.

Maks deformasjon av motorfeste med en belastning på 70N er 0,3 mm i z-retning.

8.2.2 Strømningsanalyse (CFD)

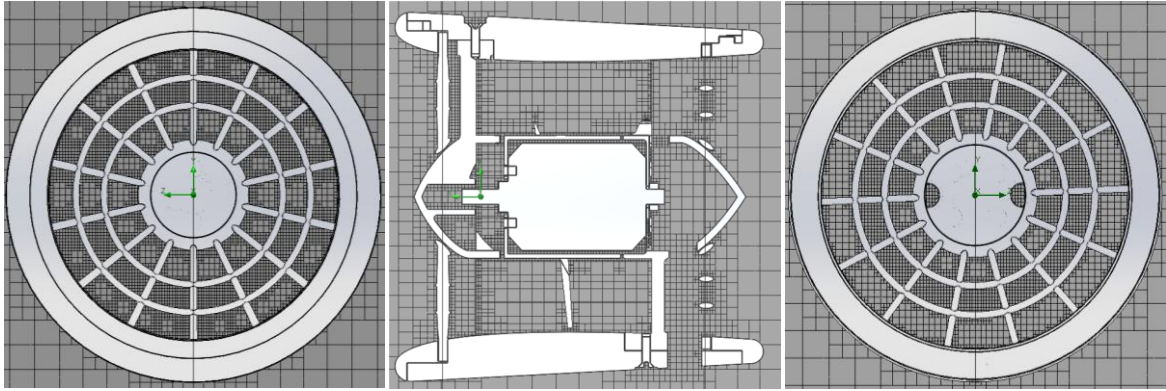
Følgende simulering er gjort for å sjekke effekten av dysen alene. Begge dysene er satt i en strøm av vann med verdi lik -5 m/s i z-retning (negativt fortegn for å få vannstrømmen mot fronten av dysene).



Figur 67: Sammenligning mellom ny dysen (t.v.) og dagens dysen i Explorer P1 (t.h.) med skala i meter pr. sekund.

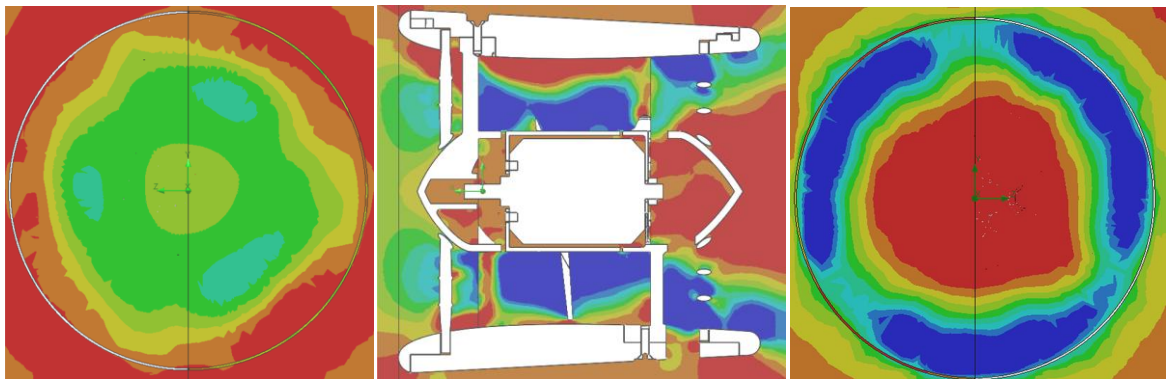
Det observeres at den nye dysen akselererer vannet helt til bakenden av dysen. P1-dysen, pga. dens nøytrale form, vil bremse vannet ved utgangen. Samtidig observeres det et større dragsug på enden av P1-dysen. Maksimal volumstrøm er omtrent lik blant de to, men det skal merkes at et større volum holder denne hastigheten i enden av den nye dysen.

Simulering nr 6



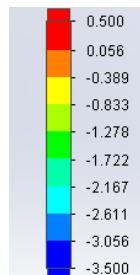
Figur 68: Meshplot av dysen med gitter fra venstre: front, seksjonsvisning side, bak.

Figur 68 viser meshet rundt dysegitterne for å undersøke hvordan strømmingen oppfører seg rundt. Det er også meshet finere rundt propell, langs støttestag og nærme dyseveggen.

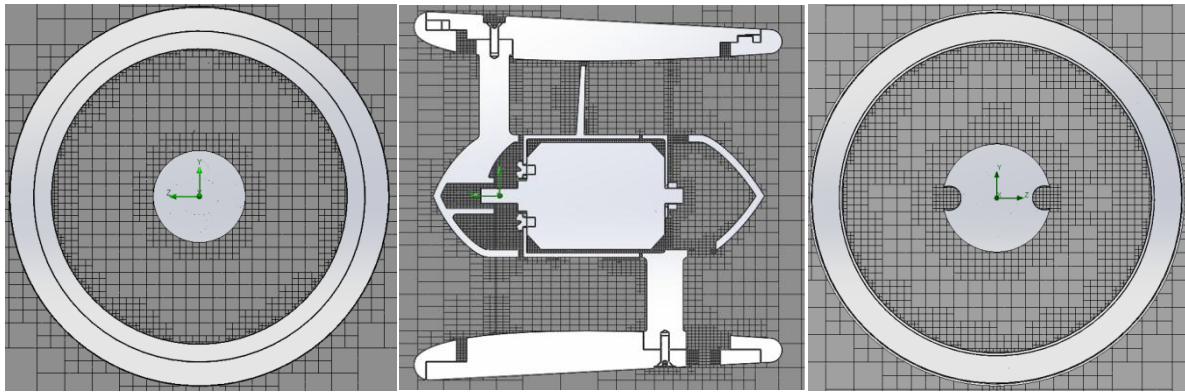


Figur 69: Hastighetsplot av CFD-analyse med gitter, fra venstre: front, seksjonsvisning side, bak.

Hastighetsplotet i Figur 69 viser en tredeling av inn og utstrømning dannet av strømningsmotstanden fra støttestagene. Det er også lavest ut-hastighet i sentrum grunnet dragsug. Plotet fra siden viser at det oppstår større fluidhastighet nærmest propellsylindere. Påvirkningen av dysegitterene kan og observeres og viser at de har mest strømningsmotstand ved de radielle stavene og innerste ring i gitteret. Fargeskalaen er gitt i Figur 70.

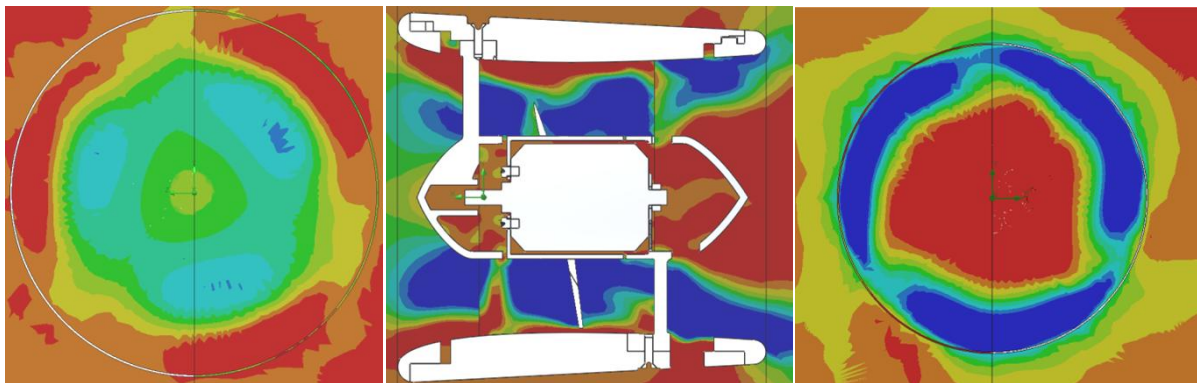


Figur 70: Fargeskala for cut-plot i meter pr. sekund (strømning).



Figur 71: Meshplot av thruster uten dysegitter, fra venstre: front, seksjonsvisning side, bak.

Figur 71 viser meshet rundt dysens inn- og utstrømning, samt rundt propell og støttestag.



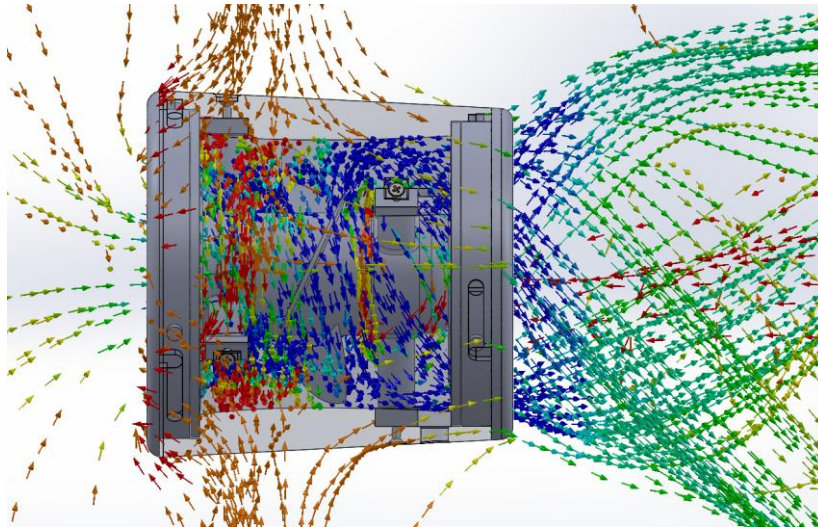
Figur 72: Hastighetsplot av thruster uten dysegitter, fra venstre: front, seksjonsvisning side, bak.

Strømningsanalysen uten gitter viser en jevnere strømming i inn- og utstrømningen til dysen (Figur 72). Forskjellen i strømningshastighet med og uten gitter er nærmere forklart i Tabell 26.

Tabell 26: Resultat av simulering, hastighet i inn- og utstrømning.

	Front		Bak	
	Maks	Min	Maks	Min
Med gitter (m/s)	0,72	-1,99	0,91	-5,12
Uten gitter (m/s)	1,55	-2,72	1,29	-5,83
Differanse Δ	0,83	0,73	0,38	0,71

Dette viser at dysegitternes påvirkning på fluidstrømmen er til stede. Ut i fra dataene påvirkes maks hastighet mest, med en differanse på utgangshastigheten bak på 0,71 m/s. Maks gjennomstrømningshastighet ved 3800 rpm er -5,83 m/s uten dysegitter. En annen visning av hastighetsplottet kan sees i Figur 73 (samme fargeskala).



Figur 73: Hastighetsplot av fluidstrøm gjennom thruster illustrert med fargede piler.

Simulering nr. 7

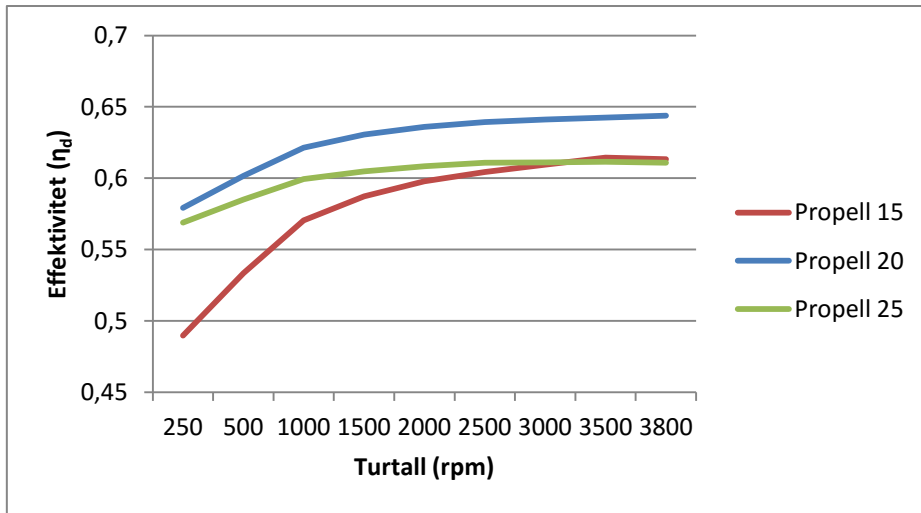
Propellen simuleres akselererende fra stillstand. Resultatet som ble observert under simuleringen var at kraftkurven har en initierende høy verdi og får etter hvert en avtagende form. Dette er fordi kraften utføres på et stillestående fluid. Når fluidet rundt propellen akselereres trengs det mindre og mindre kraft fra propellen ved samme turtall. Kraften konvergerer derfor til en verdi der volumstrømmen gjennom propellen er tilnærmet konstant.

For å sammenligne de tre propellene settes simuleringsresultatene opp mot hverandre med utøvd kraft, moment, koeffisienter og effektivitet i Tabell 27, etterfulgt av grafisk visualisering av effektiviteten til hver propell ved ulike turtall i Figur 74.

Tabell 27: Simuleringsresultat for propellene som skal testes.

	Propell 15	Propell 20	Propell 25
Kraft	32,7	56,5	77,5
Moment (Nm)	0,32	0,69	1,17
K_T	0,13	0,24	0,32
K_Q	0,02	0,03	0,06
η_d	0,61	0,64	0,61

Sammenhengen mellom stigning, kraft og moment observeres. Propell 25 genererer mest kraft og moment, og har dermed størst verdi på moment- og thrustkonstanten. Resultatene viser og at Propell 20 har høyest effektivitet av de tre propellene



Figur 74: Propellenes effektivitet ved ulike turtall.

9. EKSTERN KONSEPTTESTING

Her skal en prototype av løsningen testes for å kartlegge ytelse og effektivitet til de valgte komponentene. Det vil bli fastsatt konkrete mål for testingen og hvordan testingen skal utføres. Det vil bli gjort greie for byggingen av prototypen og de ulike delene i testoppsettet. Til slutt vil resultatene visualiseres og konklusjoner trekkes.

9.1 Målsettinger for testingen

Hovedmål for konsepttesting:

- Sjekke hvor stor skyvekraft thrusteren kan generere ved ulike turtall og sjekke mot effekt, strøm og spenning.

Delmål for konsepttesting:

- Finne en propell best tilpasset motoren.
- Finne ut hvordan stigningsvinkelen på propellbladet påvirker momentet.
- Sjekke påvirkningen av dysegitteret.

Begrensninger

- Testingen vil kun bli gjort statisk (thruster fast innspent).
- Testingen inkluderer ikke volumstrøm, som kan brukes til å finne den mekaniske effekten og derav effektiviteten til thrusteren.
-

9.2 Ekspertgruppe

Ekspertgruppen som ble involvert i testingen består av ansatte i Blueye Robotics og NTNU (Tabell 28). Hardware-designingeniøren Borja Serra og elektroingeniøren Bo Peng koblet sammen testapparatene, kodet Arduino-brettet og kodet fram frekvensene i MatLab. Overingeniør Torgeir Wahl skaffet skjærkraftsensor, lærte meg kraftloggingsprogrammet og fikk satt verkstedet i sving med å lage innfestning til thrusteren. Professor ved NTNU, CTO i Blueye Robotics og min bi-veileder Martin Ludvigsen ordnet tilgang til MCLab'en. Alle i ekspertgruppen bidro med faglig veiledning underveis og i etterkant av testingen.

Tabell 28: Ekspertgruppe ved testing av prototypen.

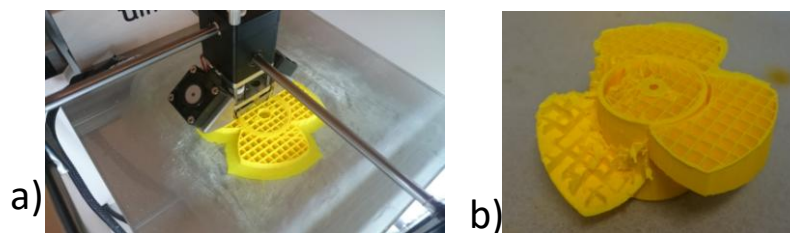
Fornavn	Etternavn	Tittel	Bedrift/institusjon
Martin	Ludvigsen	CTO Professor	Blueye Robotics NTNU
Torgeir	Wahl	Overingeniør	NTNU
Borja	Serra	Hardware Design Ingeniør	Blueye Robotics
Bo	Peng	Elektroingeniør	Blueye Robotics

9.3 Bygging av prototype

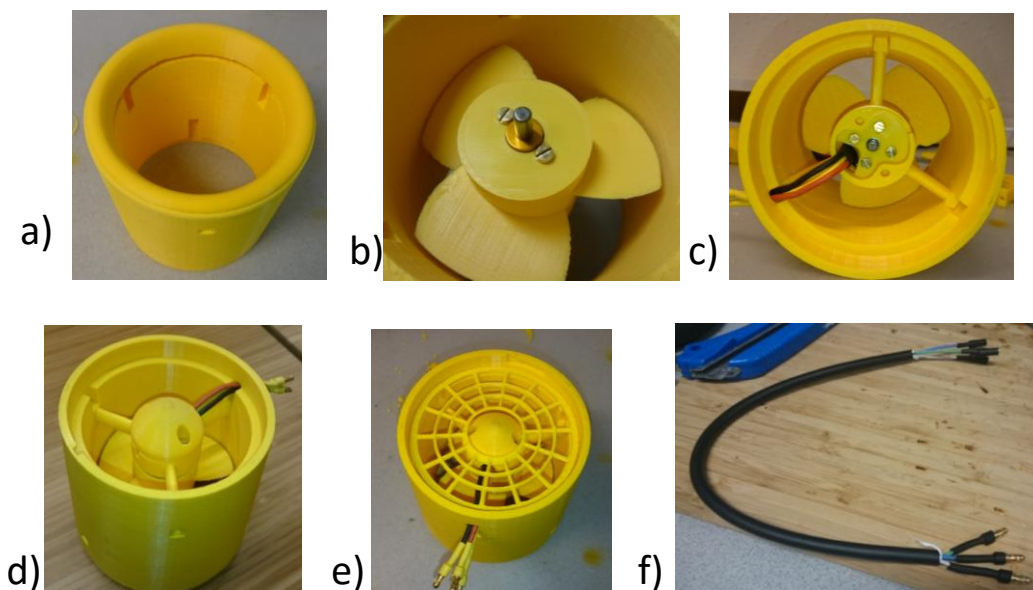
Videre følger noen bilder (Figur 76) av de 3D-printede delene til prototypen og byggeprosessen.

Typiske justeringer som ble gjort var:

- Hulldiameter
- Veggtykkelse
- Avstand mellom roterende og stasjonære deler.
- Tilpassing av festepunkter

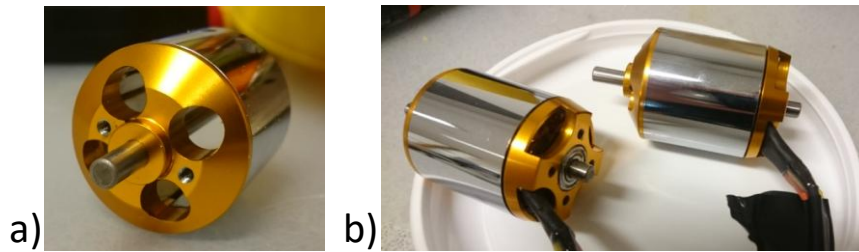


Figur 75: a) 3D-printing av propell, b) Propell med støttestruktur fra 3D-printing.

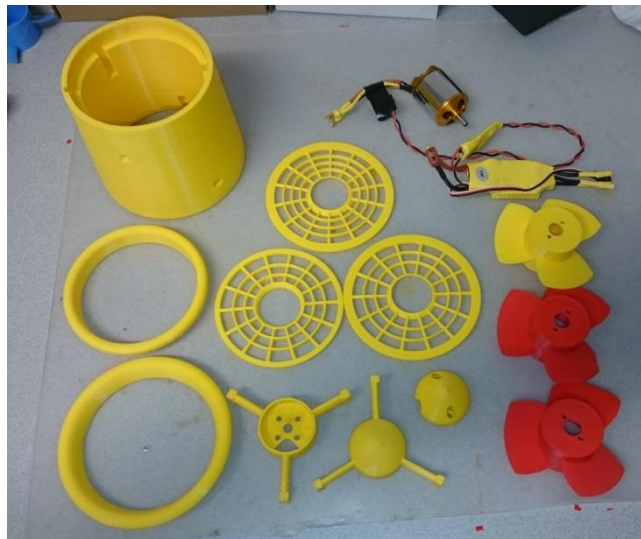


Figur 76: a) Dyse med dyselepper, b) Propell, c) Motorfeste, d) Bakre deksel montert, e) Dysegitter montert, f) loddet forlengkabel til strømforsyningen.

Rotoren måtte modifiseres med å borre og gjenge hull til å feste propellen i . Strømkoblingene ble vanntettet med epoxylim.



Figur 77: a) Borret og gjenget hull til propellens festepunkt i rotoren, b) Vanntetting av strømkabel.



Figur 78: Oversikt over alle delene til prototypen.

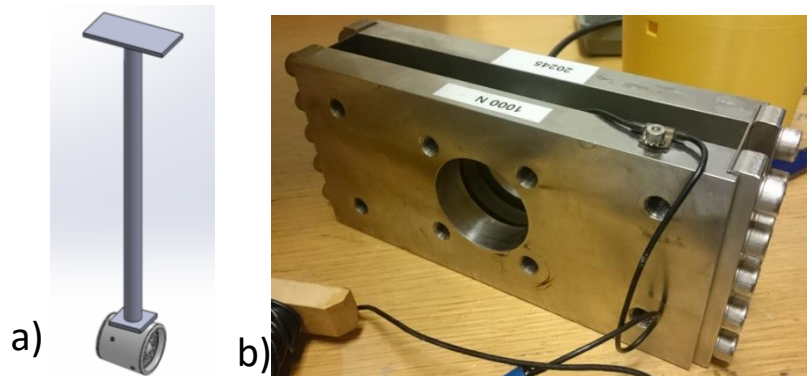
Som en del av forberedelsene ble motoren testet i vann uten propell i en plastkasse (Figur 79). Det ble brukt et forenklet oppsett med en 30A motorkontroller, strømforsyning (10A) og et arduino-brett som skrudde av og på strømmen. Prototypen ble festet med en lastestropp til en kloss.



Figur 79: Vanntesting i en plastkasse.

9.4 Testing

Testingen av komplett prototype fant sted i MCLab'en på Maintek. Testen som ble utført er en forankringstest der testobjektet er fast innspenst (Figur 80a). Siden thrusteren da ikke er i bevegelse er det lett å koble til testutstyr og logge testdata. Thrusteren ble festet til platen med to slangeklemmer. Thrusterens tyngdepunkt ble sentrert med rørets senterakse i retning parallelt med festeplatene for å sikre en så nøyaktig avlesning som mulig. Topplaten ble festet i en skjærkraftsensor koblet til en bærbar PC med et loggeprogram.



Figur 80: a) Oversikt over thrusterens innspenning, b) skjærkraftmåler.

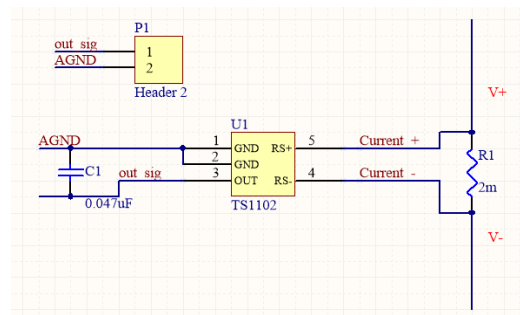
Skjærkraftsensoren ble festet til en bro over bassenget med en tvinge, sammen med stålrøret og thrusteren.



Figur 81: Testoppsettet i bassenget.

Turtallet ble kontrollert ved å sende forskjellige pulsviddesignaler til motorkontrolleren fra en bærbar PC til et Arduino-brett som sender signalet videre til motorkontrolleren. For å måle strømmen ble det koblet en strømsensor inn i kretsen. Dette er en shunt-resistor, og har veldig liten resistans ($2\mu\Omega$) for å minimere dens påvirkning på kretsen. Strømmen til motoren ble funnet ved å bruke spenningsfallet over denne restoren.

Det ble brukt tre kanaler på oscilloskopet. Den ene ble koblet til en av fasene til motoren for å lese av frekvens, den andre ble koblet til kableen mellom Arduinoen og motorkontrolleren for å sjekke pulsviddesignalet og den tredje ble koblet over strømsensoren for å lese av spenningsfallet. For å kunne lese av spenningen over strømsensoren måtte signalet forsterkes, i dette tilfellet 100 ganger, med en forsterker (TS1102, Figur 82).



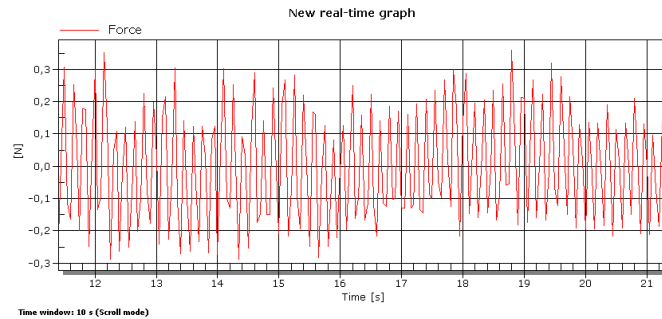
Figur 82: Skjematisk framstilling av shunt-resistoren (Hardware design ingeniør i Blueye, Borja Serra [68]).

Systemet ble koblet til en strømforsyning som leverte 15 volt. Loggefrekvensen ble stilt til 20 Hz, med et filter på 5Hz for å luke ut vibrasjonsmålinger. PWM-signalet ble justert fra $1150\mu s$ og oppover med trinn på $50\mu s$, helt til maks strøm ble nådd og motorkontrollerens sikkerhetsfunksjon slo inn.

Testprosedyse:

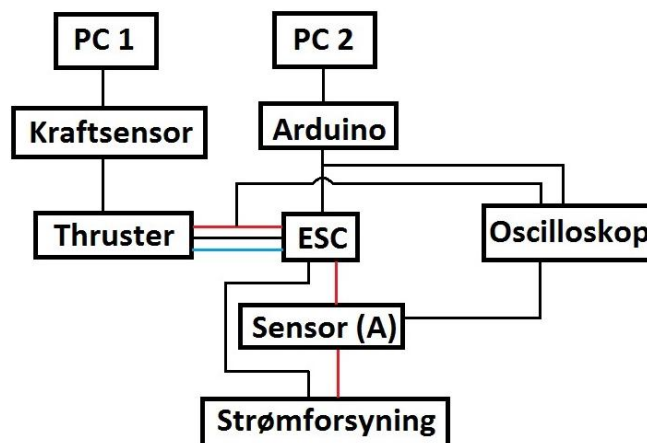
1. Spesifisere PWM-signalet i Arduino-programvaren og oppdatere Arduino-brettet.
2. Starte kraftloggeren.
3. Slå på strømforsyningen og la programmet kjøre ferdig.
4. Skru av strømforsyning når kjøringen er ferdig.
5. Stoppe kraftloggingen og lagre til fil.
6. Lese av og notere spenning over strømsensoren
7. Lagre frekvenslogging og notere filnummer under rett PWM input i tabell.

Dette repeteres for hver PWM-signal. Kraftmåleren måtte nullstilles etter hver gang thrusteren ble tatt ut av bassenget for å sentrere variasjonen rundt null. Det ble målt Denne variasjonen har en amplitude lik rundt $\pm 0,3 N$ som vist i Figur 83.



Figur 83: Svingninger i dataloggingen til skjærkraftsensoren.

I Figur 84 under vises koblingsoppsettet til testingen med alle instrumenter og sammenkoblingen mellom dem.



Figur 84: Forenklet oversikt over koblingene i testoppsettet.

Prototypen ble testet med tre ulike propeller med forskjellig stigning på propellbladene, samt ett forsøk med dysegitter med én av propellene. Grunnet tidsbegrensninger ble det kun testet med dysegitter med Propell 25. Følgende forsøksmatrise Tabell 29 ble da etablert med forsøkene som ikke ble planlagt, men ikke utført, skravert.

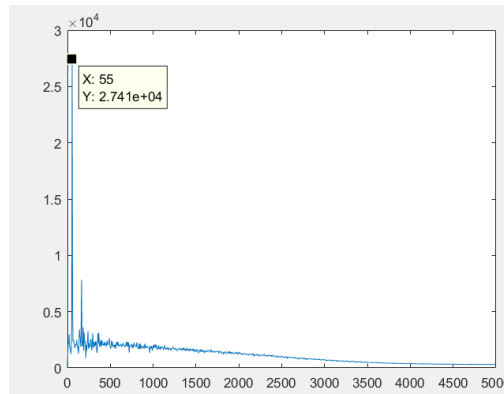
Tabell 29: Oversikt over forsøkene og kombinasjon av deler.

	Propell 15	Propell 20	Propell 25
Uten dysegitter			
Med dysegitter			

9.5 Testresultater og resultattolkning

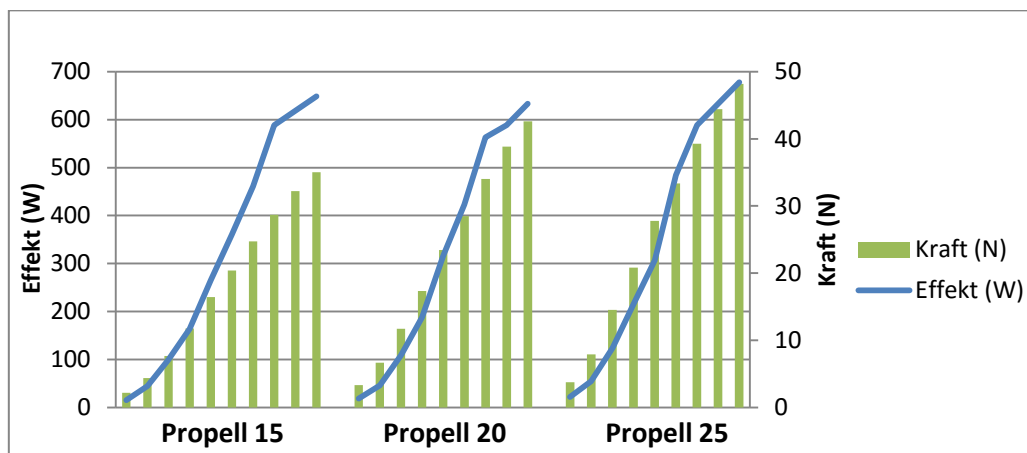
Frekvensen ble hentet ut fra loggfiler fra oscilloskopet (Grafisk visning i Figur 85). Dataene ble behandlet i MatLab med en kode skrevet av elektroingeniør Bo Peng [69]. Koden hentet ut maks frekvens for hver måling. Siden en BLDC motor er en synkronmotor kan omdreiningstallet finnes ved hjelp av frekvensen og antall poler (12) i motoren:

$$n = \frac{120f}{p} \quad (9.1)$$



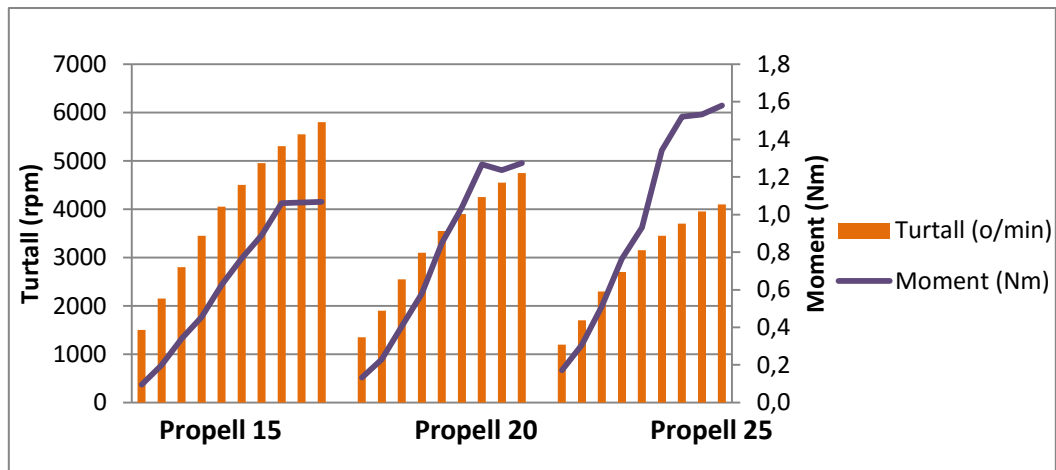
Figur 85: Plot av frekvens til en måling i MatLab, i dette tilfellet 55 Hz.

For å se hvilken propell som egnet seg best til thrusteren ble det plottet effekt mot kraft for å se på propellenes utnyttelse av effekten (Figur 86).



Figur 86: Oversikt over kraften de tre propellene gir ved forskjellige effekter.

Videre er det interessant å se hvilket moment propellene har ved ulike turtall (Figur 87), og da se sammenhengen mellom stigningsvinkel på propellbladet og momentet.



Figur 87: Propellenes moment ved ulike turtall.

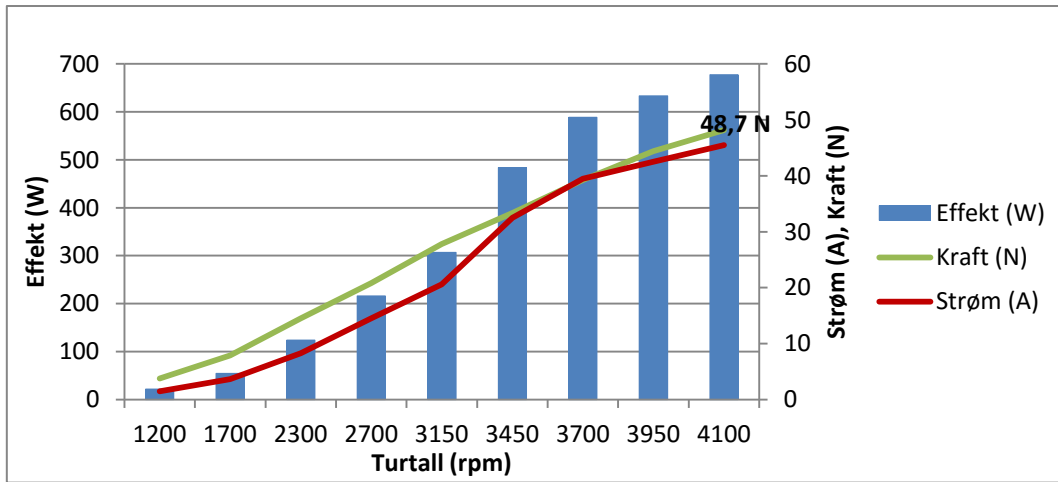
Det observeres her at Propell 25 utnytter tilført effekt best av de tre i forhold til generert skyvekraft. Propell 25 er dermed best egnet av de tre propellene til bruk i thrusteren. Oversikt over testresultatene til de tre propellene er gitt under i Tabell 30.

Tabell 30: Testresultater for hver propell.

	Propell 15	Propell 20	Propell 25
PWM (μs)	1600	1550	1550
Strømforsyning (V)	14,9 ($\pm 0,1$)	14,9 ($\pm 0,1$)	14,9 ($\pm 0,1$)
Turtall (o/min)	5800	4750	4100
Strøm	43,3	42,5	45,5
Effekt (W)	648,2	633,3	678
Kraft (N)	35,0 ($\pm 0,59$)	42,6 ($\pm 0,41$)	48,2 ($\pm 0,35$)
Moment (Nm)	1,07	1,27	1,58
K_T	0,07 ($\pm 0,002$)	0,13 ($\pm 0,002$)	0,19 ($\pm 0,005$)
K_Q	0,03 ($\pm 0,002$)	0,04 ($\pm 0,004$)	0,07 ($\pm 0,007$)
η_d	0,13	0,18	0,20

Propell 15 har minst stigning på propellbladet av de tre, og vil da være lettere for motoren å dra rundt. Den fører til minst moment og kraft, og oppnår derfor høyest turtall. Propell 25 er tyngst å dra rundt, genererer mest skyvekraft og fører til størst effektbruk.

Kraft, K_t , K_q og spenning er gjennomsnittlige verdier og er derfor oppgitt med tilhørende standardavvik.



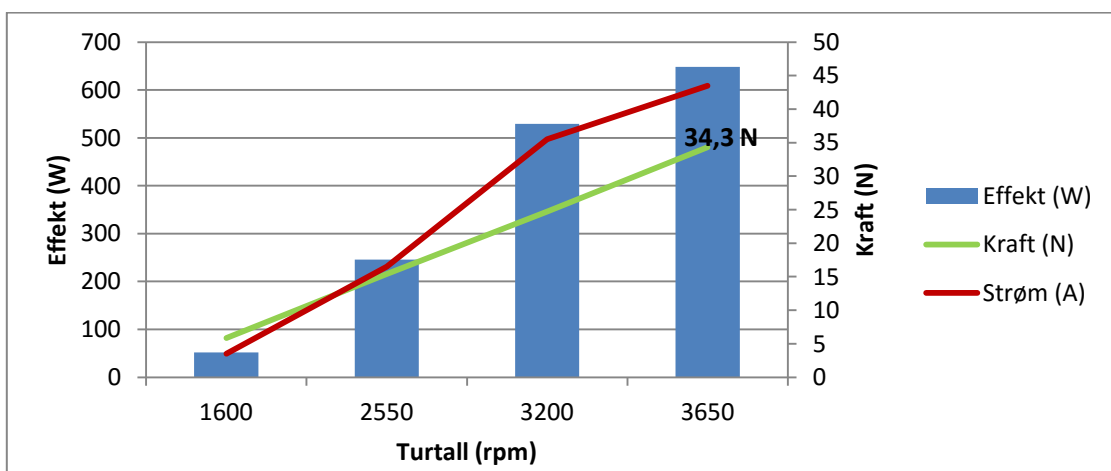
Figur 88: Plotting av testresultat av thrusteren med Propell 25.

I Figur 88 fremgår sammenhengen mellom effektbruk, strøm, kraft ved ulike turtall med den best egnede propellen (Propell 25).

Tabell 31: Kraft logget under akselerasjon med Propell 25.

	Verdier										Δ
Tid (s)	12,00	12,05	12,10	12,15	12,20	12,25	12,30	12,35	12,40	12,45	0,45
Kraft (N)	1,52	8,08	14,20	22,01	29,90	34,95	41,33	47,32	50,47	51,03	49,51

Tabell 31 viser kraft per tidsenhet under akselerasjon. Thrusteren oppnår en forandring i kraft på 49,5N på 0,45 sekunder.



Figur 89: Ytelsesdata for thrusteren med dysegitter montert.

Figur 89ed en effekt på 648,2W, strømbruk på 43,5A og turtall lik 3650 rpm ble det generert en skyvekraft på 34,3N. Bruk av dysegitteret fører til en reduksjon i maks skyvekraft med 13,9 N (28%) med Propell 25.

9.6 Sammenligning

Testresultatene gir grunnlag til å sammenligne den nye løsningen med eksisterende løsning og resultater fra tidligere masterarbeid. Det er mest hensiktsmessig å sammenligne T200 og ny løsning da disse er fysisk testede.

Tabell 32: Sammenligning av testresultat av ny thruster med Propell 25 og oppgitte testdata for T200 [70].

	Kraft (N)	Moment (Nm)	Strøm (A)	Effekt (W)	Turtall (rpm)	Spenning (V)
T200	50,1	0,85	21,6	340	~3800	15,2
Ny løsning (med Propell 25)	48,7	1,57	45,5	678	4100	14,9

Den gjennomsnittlige kraften til den nye løsningen er lavere enn eksisterende løsning fra Blue Robotics. Høyeste målte kraft generert med Propell 25 var 51,03 N.

$$\text{Maks moment til T200 ut i fra oppgitte data er (3800 rpm): } \frac{340,16W}{397,9 \frac{rad}{s}} = 0,85 \text{ Nm } ()$$

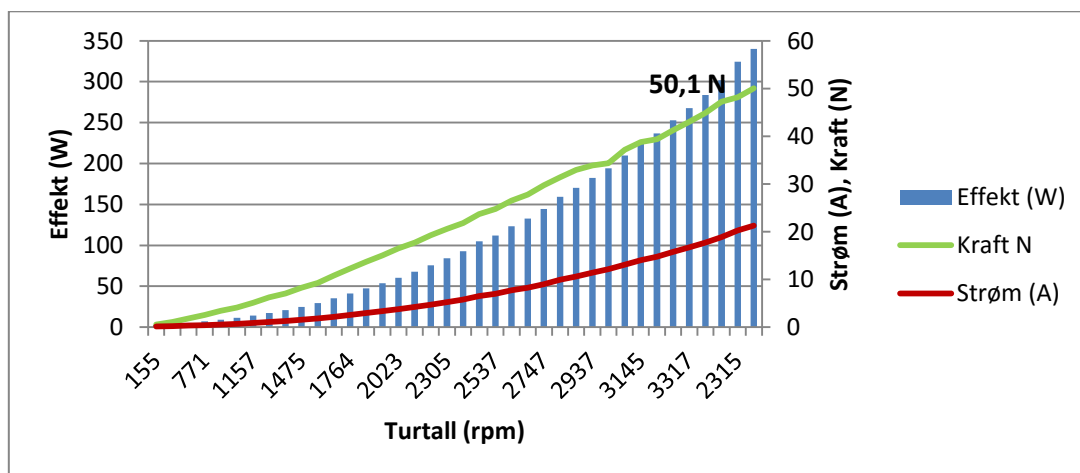
$$\text{Maks moment til ny løsning (4100 rpm): } \frac{677,95W}{429,13 \frac{rad}{s}} = 1,58 \text{ Nm } ()$$

Den nye motoren leverer litt under dobbelt så mye maks moment som motoren i T200 (M200). Den trekker samtidig dobbelt så mye strøm og effekt.

Tabell 33: Testresultatenes og T200's koeffisienter og effektivitet.

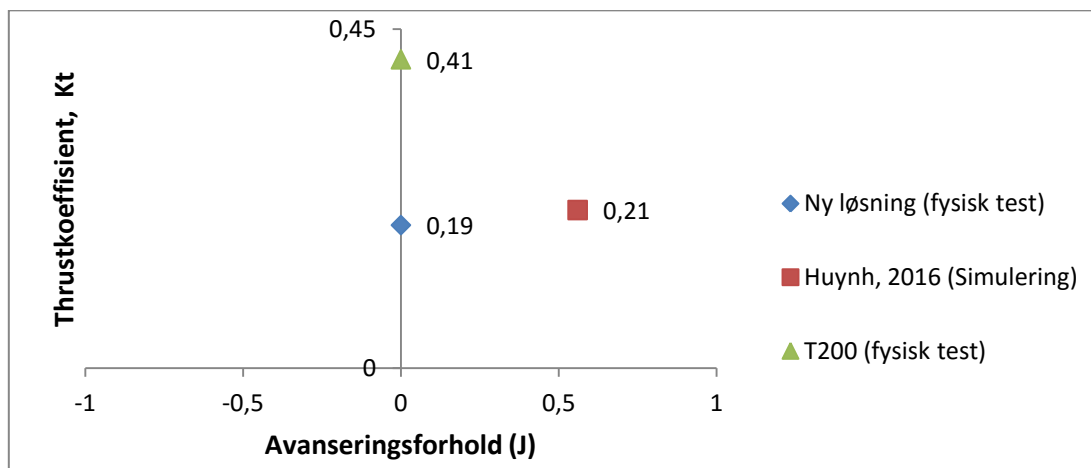
	Propell 25	T200
Opphav	Test	Kilde
K_T	0,19 ($\pm 0,005$)	0,41 ($\pm 0,16$)
K_Q	0,07 ($\pm 0,007$)	0,10 ($\pm 0,01$)
$\eta_{propell}$	0,20	0,47

Av fremgår det at T200 har dobbelt så høy K_T og effektivitet sammenlignet med foreslått løsning. Momentkoeffisientenes verdier er nærmere. Det observeres og at K_t verdien til T200 har noe høyt standardavvik.



Figur 90: Ytelsesdata for Blue Robotics T200 [71].

I Figur 90 er det gitt en oversikt over ytelsesdata til T200. Turtallsmålingene etter 3317 rpm stemmer ikke overens med tilhørende strøm, kraft og effektmålinger og er diskutert nedenfor i kap 9.7 Feilkilder.



Figur 91: Thrustkoeffisienter til ny, dagens og tidligere foreslått løsning. [49]

Den foreslåtte løsningen og T200 er testet med forankringstest og har derfor ikke et avanseringsforhold J . I simuleringen fra tidligere masterarbeidet av Huynh ble dette simulert et resulterende avanseringsforhold.

T200 har rundt dobbelt så høy thrustkoeffisient som testresultatene til den nye løsningen og løsningen simulert i tidligere masteroppgave.

Ut i fra turtallet på motoren ved maks kraft for propell 25 kan det konkluderes med at motoren kan trekke en propell med høyere stigning, som vil føre til større skyvekraft. Største begrensningen til thrusteren er propellen, og dens form må optimaliseres for å utnytte motorkraften bedre

9.7 Feilkilder

9.7.1 Generelt

- Det var viktig å ha nok plass bak thrusteren slik at kraftmålingen ikke påvirkes av genererte strømmer.
- Bassengets temperatur har effekt på kjølingen av motoren og dermed dens effektivitet.
- Utvasking av smøring i kulelagrene vil øke rotasjonsmotstanden til rotoren.

9.7.2 Kraftmåling

Siden utsidig dysevegg var parallell med festeplaten på stålstangen vil thrusteren peke nedover, som gir en dekomponering av kreftene. Effekten av denne dekomponeringen skal her sjekkes.

Et usikkerhetsmoment er nedbøying av stålørret under belastning. Stålets E-modul settes til $2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$ med en eksempelkraft på 50 N i enden av røret som har lengde lik 740mm. Kraften kan da uttrykkes som:

$$F_T = F_{avlest} \times \cos(\theta + \Delta\theta), \quad (9.2)$$

der $\Delta\theta$ er den ekstra vinkelen på grunn av nedbøying av stangen. Det gir følgende vinkel på belastet stålør:

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \left(\frac{FL^2}{2EI} \right) = \tan^{-1} \left(50 \times \frac{50N \times (740mm)^2}{2 \times 2,1 \times 10^5 \frac{N}{mm^2} \times \frac{\pi}{64} ((40mm)^4 - (35mm)^4)} \right) = 0,036^\circ \quad (8.2b)$$

Med tilhørende nedbøying:

$$y_{maks} = \frac{F_{gj.snitt} L^3}{3EI} = \frac{50N \times (740mm)^3}{3 \times 2,1 \times 10^5 \frac{N}{mm^2} \times \frac{\pi}{64} ((40mm)^4 - (35mm)^4)} = 0,62 \text{ mm} \quad (8.2a)$$

Dette resulterer i en kraft lik:

$$F_T = 50 \times \cos(3 + 0,036) = 49,9 \text{ N} \quad (9.2)$$

Dette er en kraftreduksjon på 0,2 % og er så liten at den velges å ses bort i fra.

9.7.3 Data fra kilde

Turtallene i oppgitt data fra Blue Robotics stemmer ikke overens med de andre verdiene in datasettet. Det ble derfor funnet ligningen til trendlinjen for effektverdiene mot turtall i Excel for å gi et estimat på rett verdi:

$$y = 0,2385x^2 - 0,2822x + 3,6458$$

Satte deretter inn verdier for oppgitt maksimalt turtall (3800 rpm):

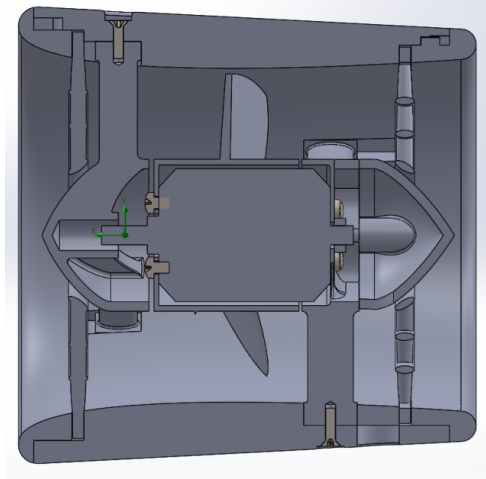
$$y(38) = 337,32 \text{ W}$$

Som stemmer greit med motorens oppgitte maksimale effekt (350W).

10. PRODUKTARKITEKTUR OG KONSEPTDESIGN

I dette kapittelet skal hver komponent vises hver for seg og montert sammen.

10.1 Sammenstilling og spesifisering



Figur 92: Endelig design.

Ytterligere spesifisering av thrusterkonstruksjonen gis i Tabell 34. Her spesifiseres det andre mål som ikke allerede er nevnt (se Tabell 22 i Kap. 6.6.1) .

Tabell 34: Øvrig spesifisering av interaksjoner og form.

Spesifisering	Verdi og enhet
Minste avstand mellom propellblad og dysevegg	1,4 mm
Klaring mellom rotor og propellsylinder	2,5 mm
Propellblad (tykkelse tverrsnitt)	Maks (Rot): 2,6 mm Maks (tupp): 1,6 mm
Propellblad (vridning av tverrsnitt i grader)	-
Låsespor med vridning	25 graders vridning

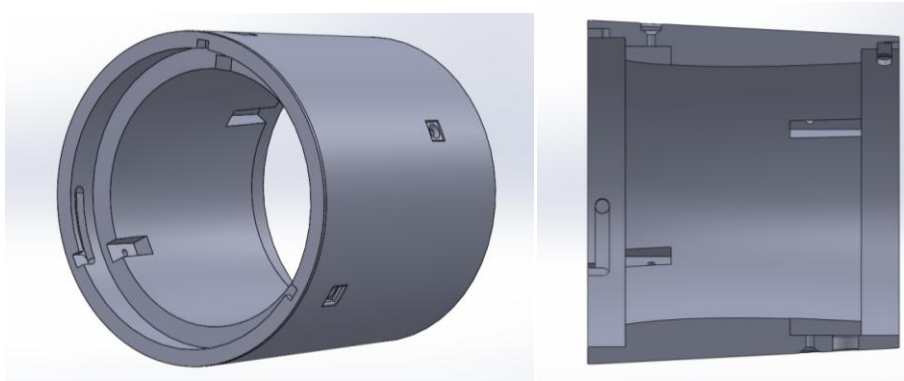
Fra Solidworks hentes propellbladarealene og gir følgende EAR:

$$EAR_{Propell\ 15} = \frac{3467,04\ mm^2}{5674,5\ mm^2} = 0,61\ (4.26)$$

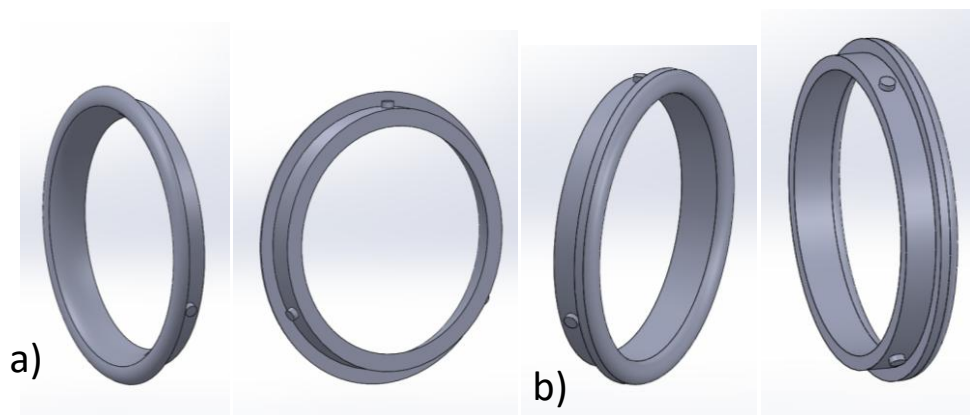
$$EAR_{Propell\ 20} = \frac{3526,08\ mm^2}{5674,5\ mm^2} = 0,62\ (4.26)$$

$$EAR_{Propell\ 25} = \frac{3562,47\ mm^2}{5674,5} = 0,63\ (4.26)$$

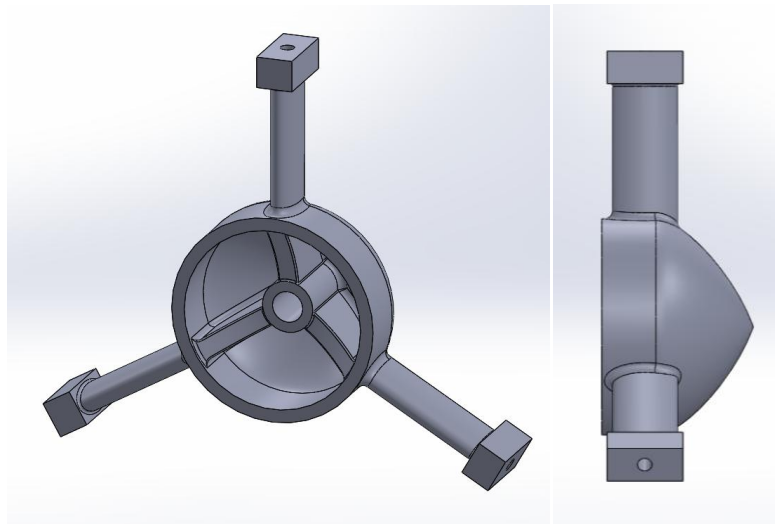
10.2 Komponenter



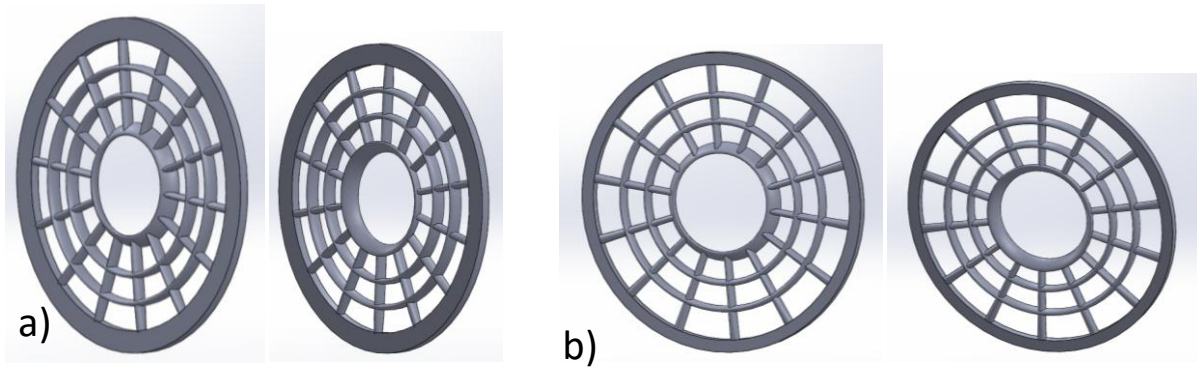
Figur 93: Dyseylinder a) Perspektiv b) Seksjonsvisning.



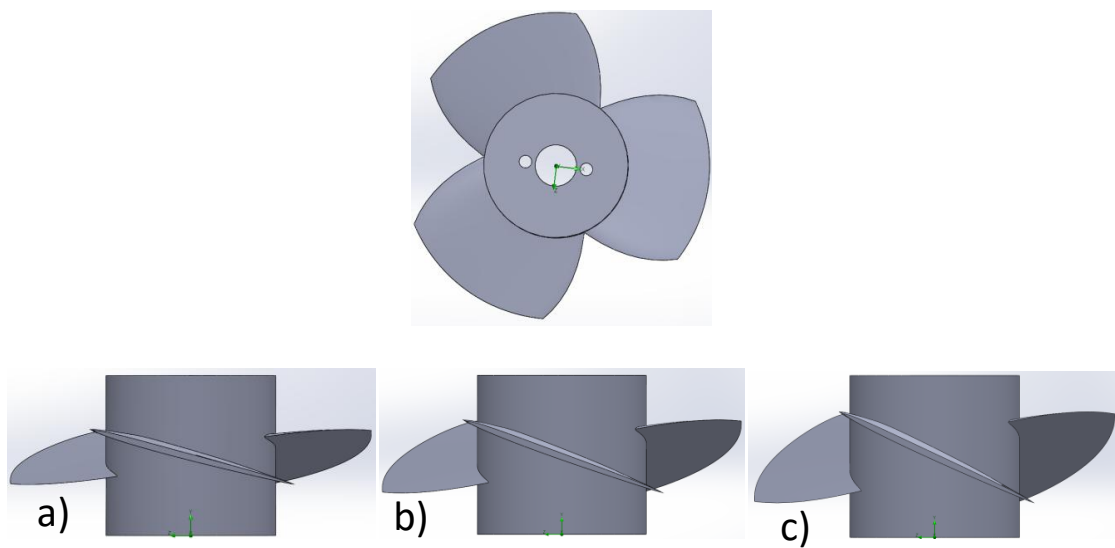
Figur 94: a) Dyseleppe front, b) Dyseleppe bak.



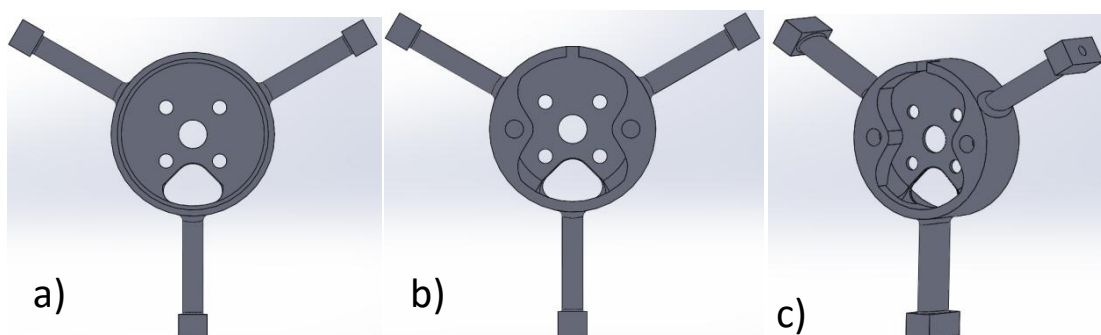
Figur 95: Deksel, front.



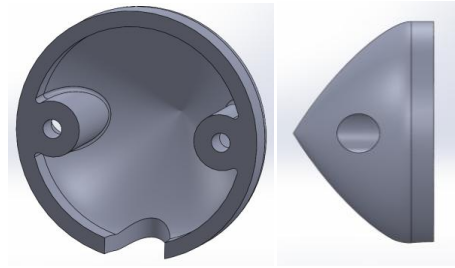
Figur 96: a,b) Dysegitter front, c,d) dysegitter bak.



Figur 97: a) Propellform sett ovenfra, og ulike stigninger på propellbladene. b) 15°, c) 20°, d) 25°.



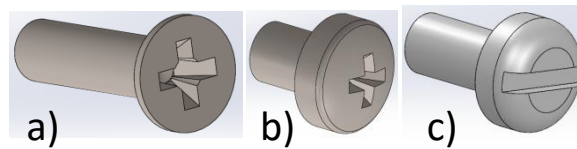
Figur 98: Motorfestet, a) Motorsiden, b) baksiden, c) Perspektiv, baksiden.



Figur 99: Deksel, bak.

10.3 Standardkomponenter

Til å feste støttestagene brukes treskruer og de korte maskinskruene brukes til å feste motoren til motorfestet. De lange maskinskruene brukes til å feste bakdekslet ved å skru inn i blindmuttere i motorfestet.



Figur 100: a) Treskrue, b) kort maskinskruer, c) lang maskinskruer

11. FRAMSTILLING OG PRODUKSJONSKOSTNADER

Serieproduksjonen av neste generasjons Blueye drone skal utføres av en tredjepart. Hvilket firma dette blir er enda ikke bestemt , men hovedtrekk av produksjonsmetoder er på forhånd mulig å forutse.

11.1 Produksjonsbeskrivelse

Et grovt estimat på produksjonsbeskrivelsen er diskutert med maskindesigningeniør i Blueye Robotics, Rune Hansen [81]. Til serieproduksjon er det tenkt å sprøytstøpe delene til ROV'en. Produksjonsvolum lik 3000 thrustere, som gir 27000 deler. Eneste delen som kan være en utfordring å sprøytstøpe er dysen på grunn av veggtykkelsen, men et design for serieproduksjon vil ha en annen oppbygning av thrusteren integrert i skroget.

Til sprøytstøping kan man lage former med flere deler i, så lenge volumene til komponentene er noenlunde like. Det er derfor aktuelt å slå sammen dysegitterene, dyseleppene og dekslene med støttestag, som gir totalt seks støpeverktøy til mellom 100-200 tusen NOK/stk. I tillegg kommer det en maskinkost på 500 NOK/time og en antatt syklustid på 45 sekunder for hver støping.

Tabell 35: Produksjonsmetoder for prototype og serieproduksjon.

	Produksjonsmetode
Prototype	3D-printing Manuell etterarbeiding
Serieproduksjon	Sprøytstøping

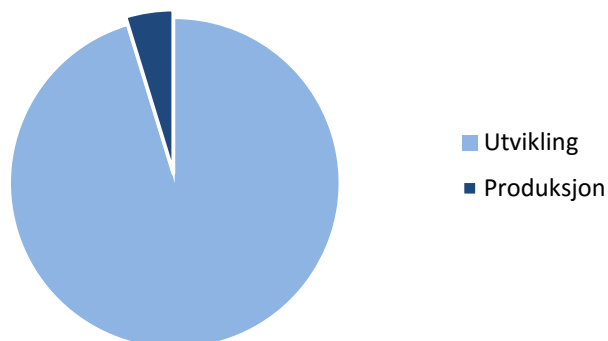
Monteringsarbeid utføres internt. Det må legges inn en kvalitetssikringsprosedyre der støpeemnene inspireres for ujevnheter og formfeil visuell inspeksjon. Etter montering må konstruksjonen testes for å se at alt fungerer som det skal i aktuelle bruksomgivelser med tilhørende belastninger.

11.2 Kostnadskalkyle for prototypen

Programfilene (.gcode) til 3D-print-programmet Cura gir et estimat på antall gram PLA som blir brukt til hver del som er brukt i kalkylen. Maskinskruer til motorfestet følger med motoren.

Tabell 36: Kostnadsoversikt for tilvirkning av prototype.

Konseptutvikling	Timer	Kvanta	Enhetspris (NOK)	Sum (NOK)
Utredningsarbeid	250	-	600	150000
Konseptutvikling	180	-	600	108000
3D-modellering	100	-	600	60000
FEM- og CFD-analyser	100	-	600	60000
Rapportskriving	250	-	600	150000
Delsum, konseptutvikling	880			528000
Arbeidskostnader	Timer	Kvanta	Enhetspris (NOK)	Sum (NOK)
3D-printer [71]	-	1	24283,8	24283,8
Bearbeiding av deler	1	-	600	600
Montering	1	-	600	600
Delsum, arbeidskostnader				25483,8
Materialer og komponenter	Timer	Kvanta	Enhetspris (NOK)	Sum (NOK)
Plast (3D-printing) [72]	-	0,702 kg	299,90	210,5
Motor [57]	-	1	290	290
Motorkontroller [63]	-	1	245	245
Treskruer M3 [73]	-	6	0,54	3,24
Maskinskruer M3 [74]	-	2	1,69	3,38
Blindmutter [61]	-	2	0,50	1
Delsum, materialer og komponenter				753,12
Sum				554236,92



Figur 101: Forholdet mellom utvikling- og produksjonskostnader for prototypen.

11.3 Kostnadskalkyle for serieproduksjon

Det planlegges å produsere 1000 ROV'er av neste generasjon Explorer. Det er som tidligere nevnt vedtatt å kutte ut den laterale thrusteren, som gjør at det er tre thrustere pr. ROV. Dette gir et totalt produksjonsvolum på 3000 thrustere.

Vekt (PLA): $0,685 \text{ kg} \times 3000 = 2055,5 \text{ Kg}$

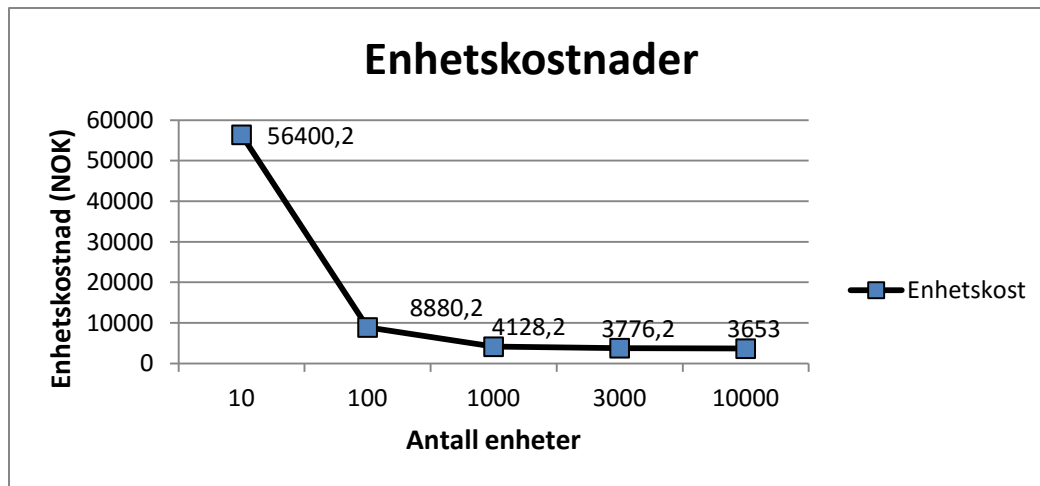
Totalt antall støpesykler: $3000 * 6 = 18000$ sykler

Total netto produksjonstid: $18000 * 45 \text{ sekunder} = 810000 \text{ s} = 225$ timer

Det tas utgangspunkt i vektanalysen i programmet Cura som brukes til 3D-printingen for å bestemme hvor mye plast som går med for hver thruster.

Tabell 37: Kostnadskalkyle for serieproduksjon.

Produksjon	Timer	Kvanta	Enhetspris (NOK)	Sum (NOK)
Maskinkost	225	-	500	112500
Støpeformer	-	6	150000	900000
Delsum, produksjon				9112500
Materialer og komponenter	Timer	Kvanta	Enhetspris (NOK)	Sum (NOK)
Plast (ABS)	-	2055,5 kg	24,35	50051,6
Motor	-	3000	290	870000
Hastighetsregulator	-	3000	245	735000
Treskruer M3	-	18000	0,54	9720
Maskinskruer M3 (6mm)	-	6000	1,69	10140
Maskinskruer M3 (4mm)	-	6000	1,69	10140
Blindmutter	-	6000	0,50	3000
Delsum materialer og komponenter				1688051,60
Sum				10800551,60
Pris pr. enhet				3600,20



Figur 102: Enhetskostnad ved ulike produksjonsvolum.

12. ROBUSTHET OG VEDLIKEHOLD

Først i dette kapitlet skal det undersøkes gjennom FEM-analyse hvordan maks kraft og moment fra testresultatet påvirker motorfestet og propellen. Det vil da avgjøres om tverrsnitt og veggtykkelser må justeres opp. Det skal og gjøres greie for forskjellige optimeringsfaktorer for komponentene og gis forslag til forbedrede design til videre testing. Det vil og bli gjort sammenligninger mellom testede propeller og nye forslag til propellutforming.

12.1 Strukturoptimering med FEM og CFD

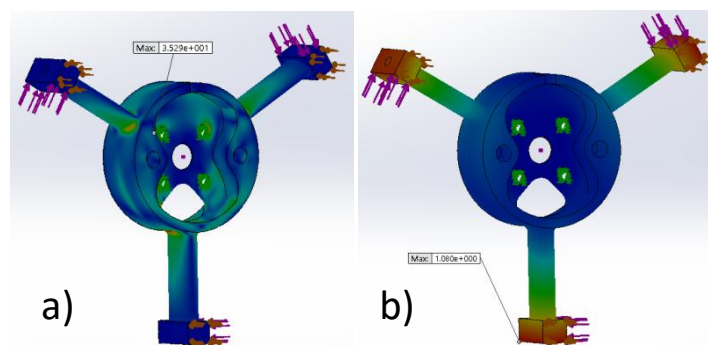
Etter testingen ble det opptredende momentet fra motoren ved maks turtall og Propell 25 funnet med en verdi:

$$M_{m,test} = 1,58 \text{ Nm}$$

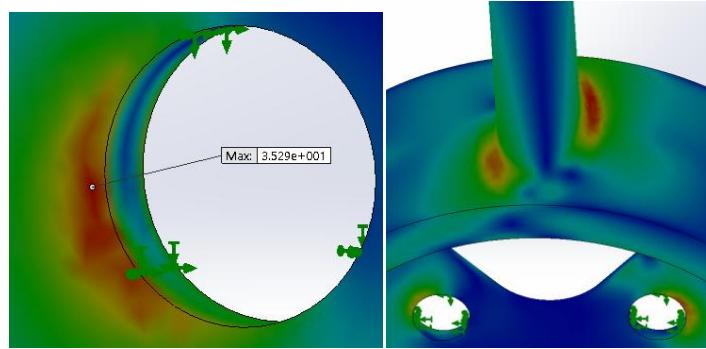
Kraft virkende på støttestagene blir da:

$$F_{stag,total} = \frac{1,58 \times 10^3 \text{ Nmm}}{30 \text{ mm}} = 52,7 \text{ N} \quad (8.1)$$

Dette gjør at de antatte spenningene i kapittel 8 er for lave enn det faktiske opptredende spenningene under maks belastning. Det gjøres en ny statisk simulering i to scenarier: først med krefter på motorfestet fra momentet lik totalt 52,7N og skyvekraft fra propell lik 50N virkende i z-retning:



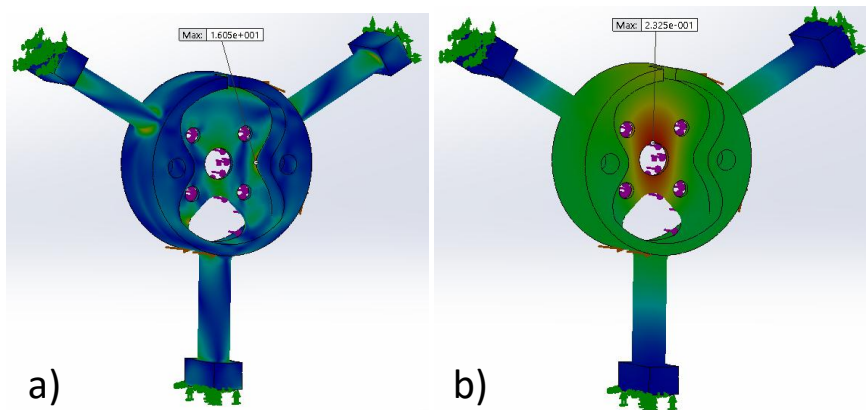
Figur 103: Ny simulering av motorfestet, scenario 1, a) Spenning (von Mises) b) Deformasjon.



Figur 104: Spenningskonsentrasjoner i skruerull og støttestag, motorfeste.

Største spenning opptrer i hullkant med en verdi 35,3 MPa, og største nedbøying blir 1,08 mm pr. støttestag (total vridding av motorfeste på 3,24mm). Spenningen er over utmattingsgrenseintervallet 22,2-27,7 MPa ved 10^7 sykluser.

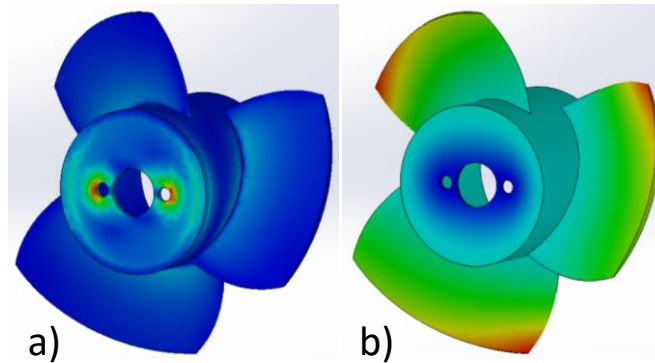
Andre scenarioet er med opplagring i enden av støttestagene og i skruerullene til motorfestet. Momentet $M_{m,test}$ påsettes motorfestesynderen og kraften fra propellen på 50N settes på veggen med skruerullene.



Figur 105: Ny simulering av motorfestet, scenario 2 a) Spenning (von Mises) b) Deformasjon.

Maks opptredende spenning er her 16,01 MPa og største nedbøying er 0,23 mm. Dette scenarioet er mer riktig med hensyn til opplagringene i enden av støttestagene. Det vil oppstå mindre deformasjoner og mindre spenninger enn i scenario 1.

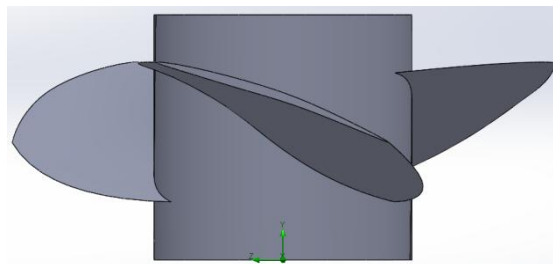
Videre simuleres Propell 25 med opplagring i skruerullene, påsatt M_m og skyvekraft fra propell lik 50 N.



Figur 106: Simulering av Propell 25 a) Spenning (von Mises) b) Deformasjon.

Største spenning lik 25,5 MPa og maks deformasjon lik 0,53 mm.

Propell med annen form som er foreslått til videre testing er illustrert i Figur 107. Denne har mer markert forskjell mellom stigning ved propellbladets rot og tupp. . Den har 30 graders stigning ved roten og 18 graders stigning ved tuppen, i tillegg til å ha en annen vridning. Denne formen vil redusere virvelstrømmer i lavtrykksonene på propellbladene og fordele kreftene jevnere over propellbladet. Den har en tverrsnittsform med S-form ved roten og vingeform ved tuppen av propellbladet.

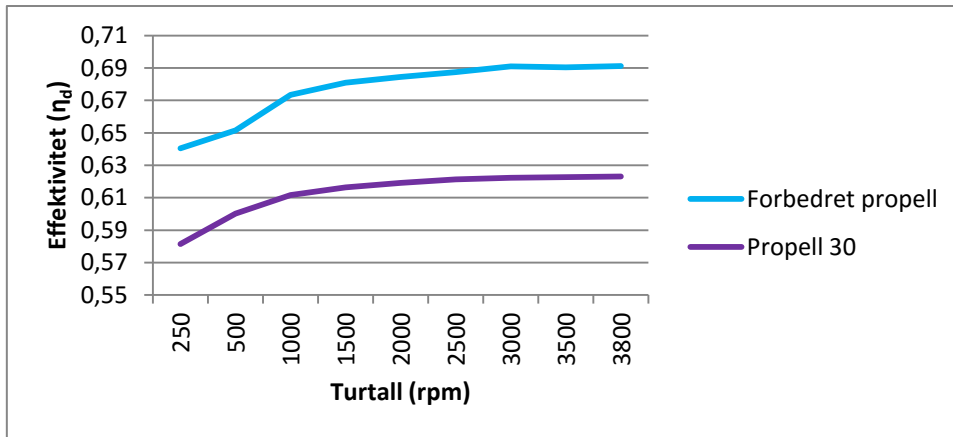


Figur 107: Ny foreslått propell.

Tabell 38: Simuleringsresultat for andre foreslåtte propellformer.

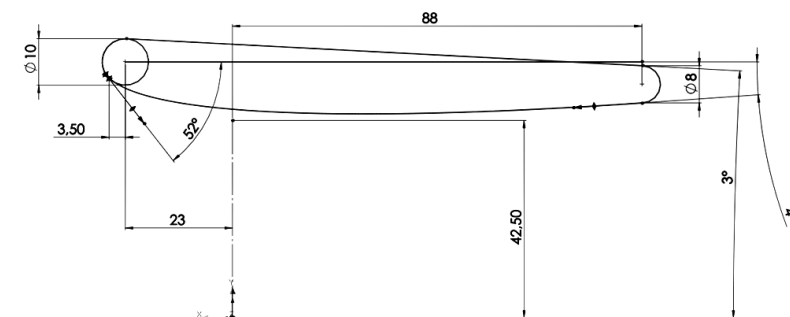
	Skyvekraft ved 3800 rpm	Moment (Nm)	K_T	K_Q	Effektivitet
Propell 30	96,0	1,57	0,45	0,08	0,61
Forbedret propell	71,5 N	0,91	0,33	0,05	0,68

Simuleringsresultatene viser at den nye foreslåtte formen oppnår mer skyvekraft ved lavere motstandsmoment i forhold til Propell 25 (71,5N ved 0,91 Nm mot , som i teorien betyr bedre utnyttelse av effekt. Under viser effektiviteten til de to nye foreslåtte propellformene i det aktuelle turtallsintervallet.

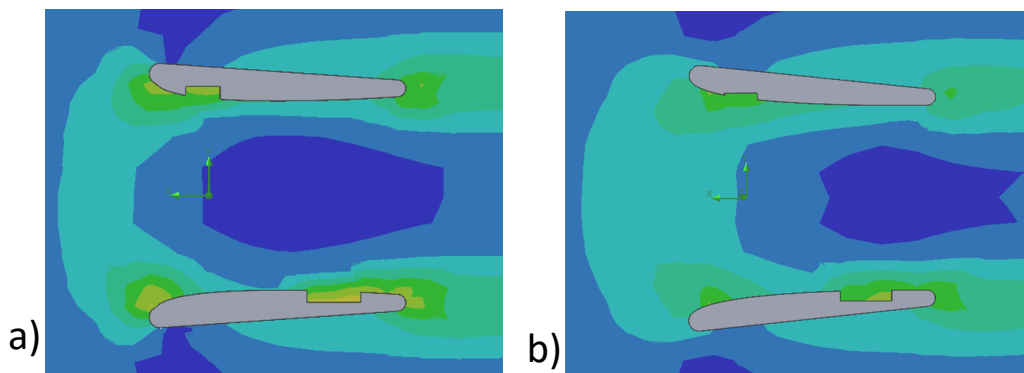


Figur 108: Effektivitet til Propell 30 og forbedret propell over ulike turtall.

For å justere formen på dysetverrsnittet måtte formen deles opp i ulike former som ble variert med metrisk spesifisering. Figur 109 viser variabler som har blitt justert i optimeringsprosessen, blant annet dysens lengde, inn- og utstrømningsareal, tykkelse osv. Propelldiameteren er og tatt hensyn til i sketsjen og tverrsnittet er justert deretter.



Figur 109: Sketsjoppsett for dysens tverrsnitt i Solidworks.



Figur 110 Strømningsanalyse som viser effekten av å øke vinkelen til dysetverrsnittet i forhold til strømningsretningen. a) 4 grader b) 6 grader.

Effekten av å øke stigningsvinkelen vises i Figur 110. Det akselererte volumet flyttes bakover og fluidet bremses mer i innstrømningen. Simuleringsoppsett der dysen er stasjonær og påvirkes av en væske i hastighet langs z-aksen.

12.2 Overflatebehandling og vedlikehold

For å sikre at systemet er velfungerende i saltvann under varierende trykk må kritiske deler gjøres vanntette og beskyttes mot korrosjon. Dette kan gjøres på forskjellige måter med ulike typer materialer. Fritt oksygen er hovedaktøren i rustdannelse og er spesielt til stede i akvatiske miljø. Sjøvann inneholder rundt 3,5 % salt og er generelt mer korroderende enn ferskvann [47]. Vedlikeholdet av thrusteren inneholder primært skylling med rent vann for å rense for urenheter forebygge mot korrosjon.

Det er viktig å finne en løsning som er slitasjeresistent over lenger tid, samtidig som at det er enkelt å påføre nytt beskyttelsesmateriale når det trengs.

Foreslått framgangsmåte:

1. Vaske plasten med varmt såpevann og tørk evt. over med silikonfjerner [75].
2. Pusse overflater med fint sandpapir.
3. Plastgrunning [76]
4. Lakkering [77]

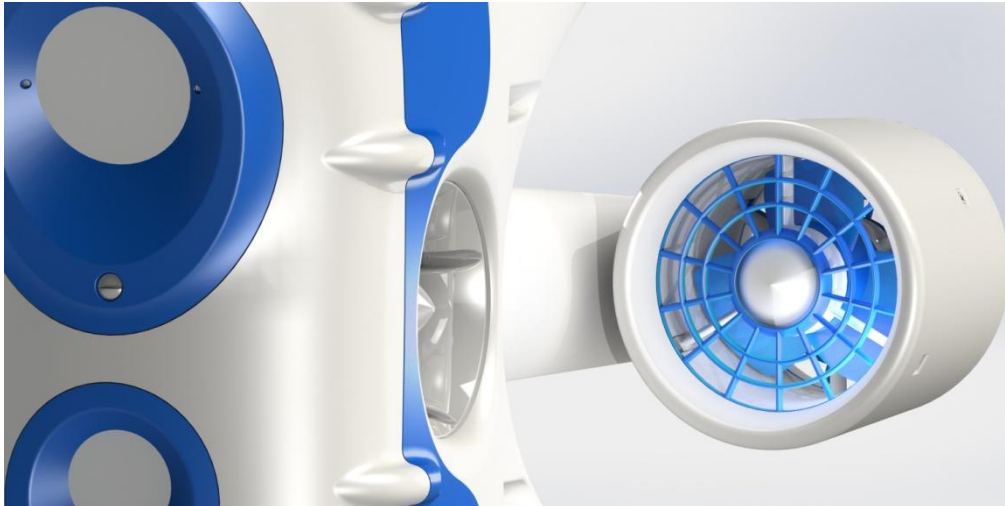
For å minske strømningsmotstanden til thrusteren er det ønskelig å påføre en overflatebehandling som gjør flatefriksjonen minimal. I dag er ROV'en laget i ABS, med overflaten lakkert i matt hvit. Informasjon om hvilken type lakk er ikke tilgjengelig.

Antall strøk må tas etter behov, men det er viktig å ikke legge for mange lag da det lettere kan sprekke opp ved belastning. Det er viktig å pusse med fint sandpapir mellom hvert lag, gjerne 1000 papir. For å redusere overflateruheten ytterligere kan det påføres hydrofob spray som Ultra Ever dry [78] eller NeverWet [79].

13. MARKEDSPRESENTASJON

Her skal det presenteres rendrerte visninger av thrusteren montert på Blueyes Explorer P1.

13.1 Rendreringer



Figur 111: Thrusteren montert på Explorer P1, perspektivvisning.



Figur 112: Thrusteren på nært hold.



Figur 113: Monteret på Explorer P2, visning bak.

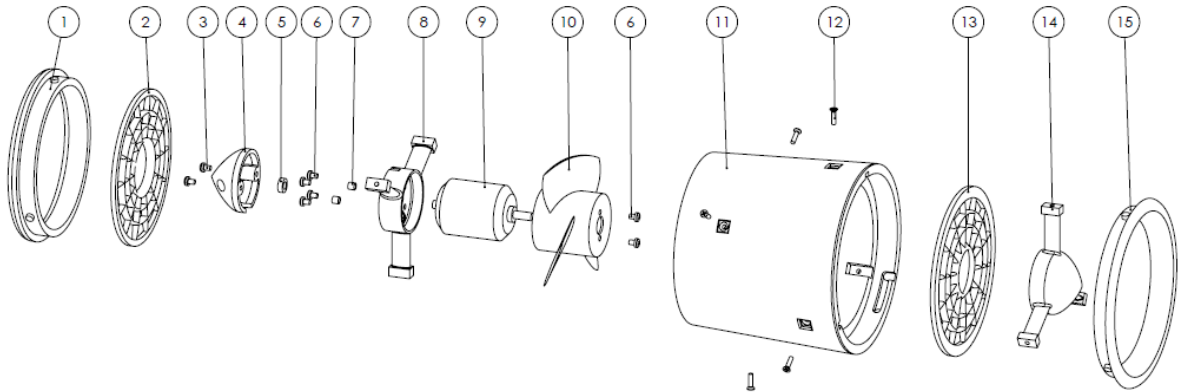


Figur 114: Monteret på Explorer P2, perspektivvisning bakfra.

13.2 Tekniske beskrivelser

Det skal her gis en oversikt over alle delene i den nye thrusterløsningen, samt en monteringsvisning med figurer og tekst.

13.2.1 Eksplosjonstegning

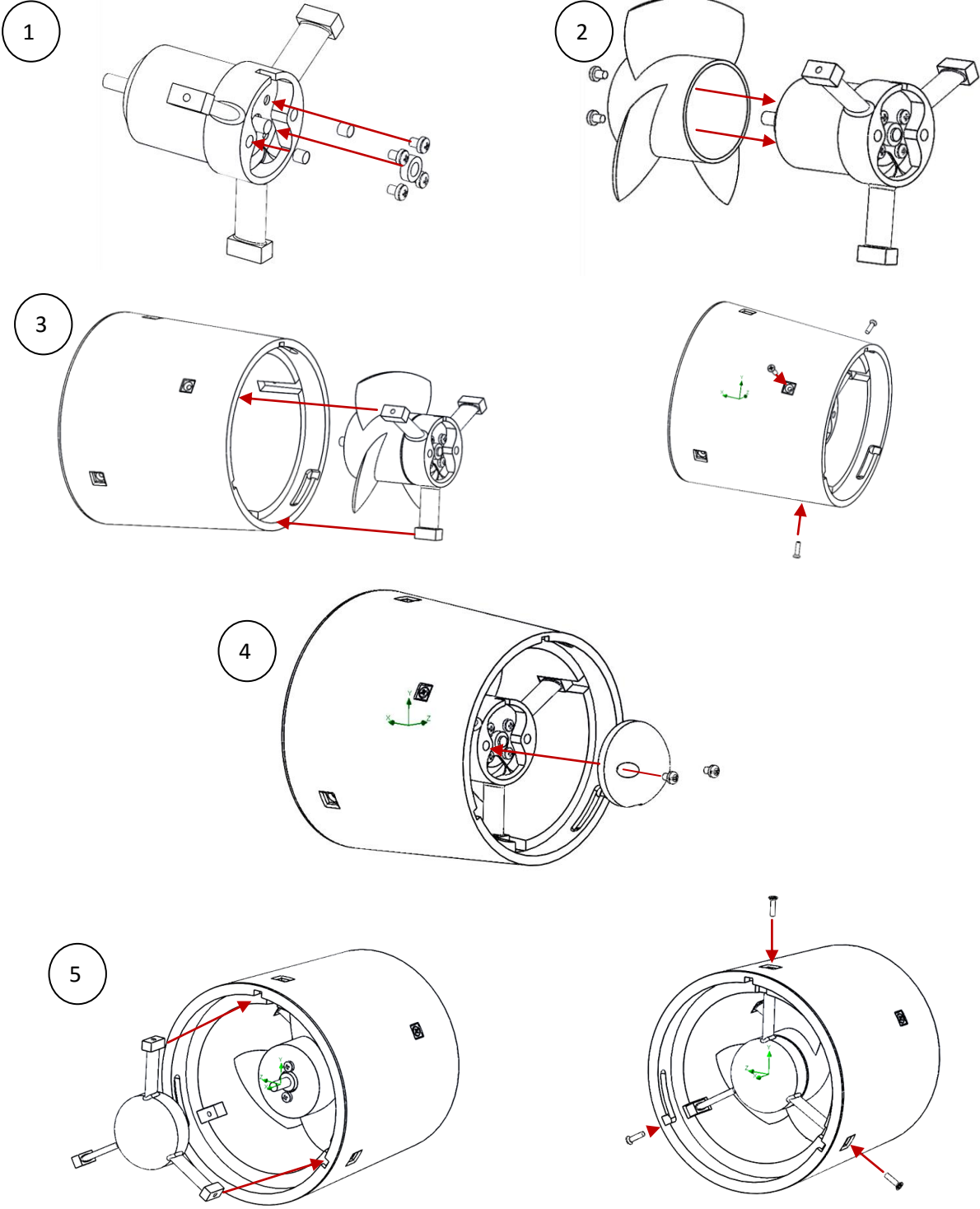


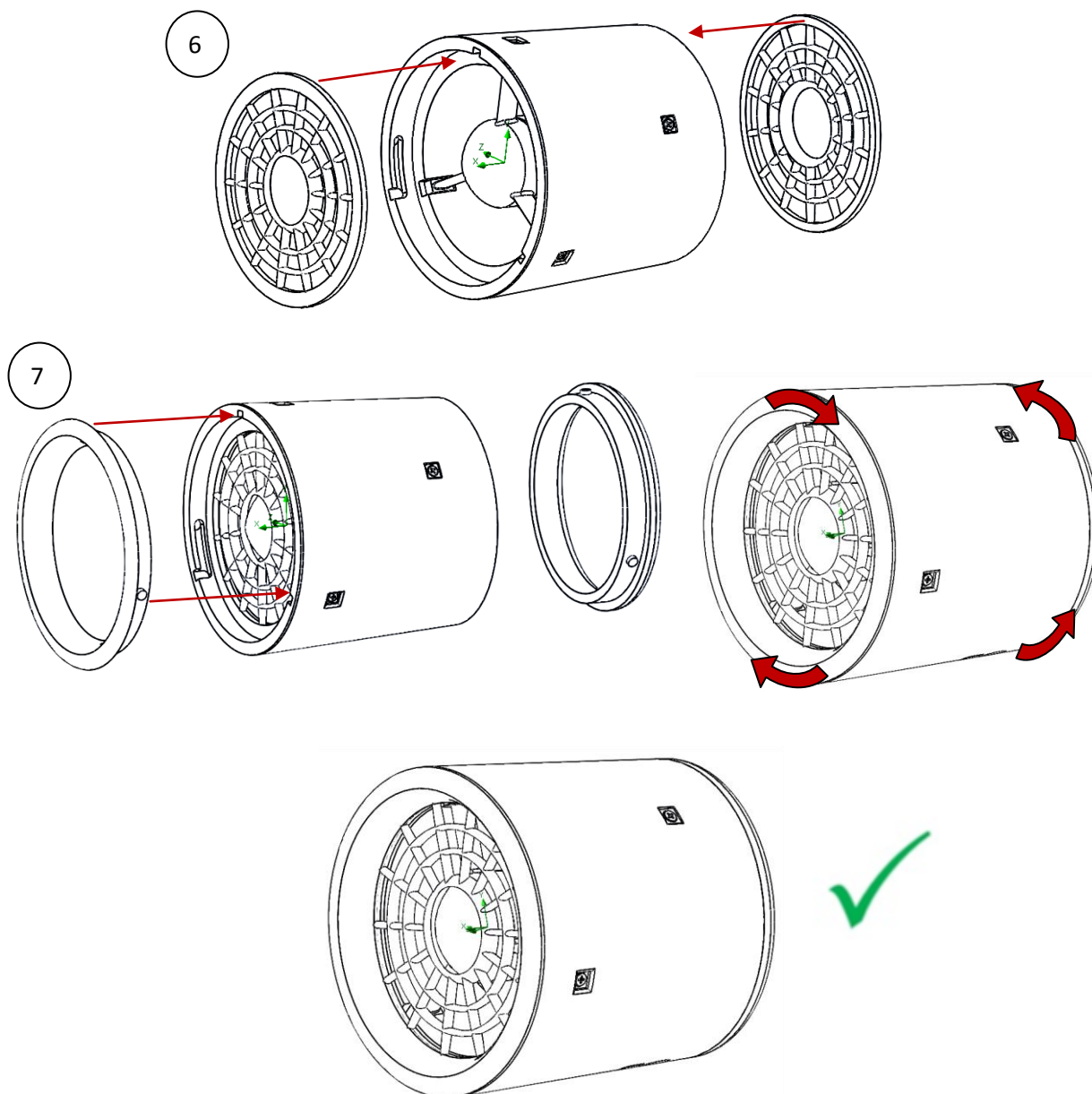
Figur 115: Eksplosjonstegning av thrusteren.

Tabell 39: Komponentoversikt med material og antall.

Komponent	Beskrivelse	Material	Antall
1	Dyseleppe bak	PLA	1
2	Dysegitter bak	PLA	1
3	Maskinskrue M3 (lang)	Rustfritt stål	2
4	Bakdeksel	PLA	1
5	Akselsikring	Rustfritt stål	1
6	Maskinskrue M3 (kort)	Rustfritt stål	6
7	Blindmutter M3	Rustfritt stål	
8	Motorfeste	PLA	1
9	Motor (Power Pro 2826)	PLA	1
10	Propell	PLA	1
11	Dyse	PLA	1
12	Treskrue M3	PLA	6
13	Dysegitter front	Rustfritt stål	1
14	Frontdeksel	PLA	1
15	Dyseleppe front	PLA	1

13.2.2 Monteringsanvisning





1. Press på plass blindmutterne med en tang, skru motoren fast i motorfestet med fire skruer og monter akselsikringen med en unbrakonøkkel.
2. Skru propellen fast i rotoren med to skruer.
3. Sett så denne sammenstillingen inn i dysesynderens ende med smalest diameter ved hjelp av sporene på innsiden av dysen og skru den fast med tre skruer fra utsiden av dysesynderen.
4. Skru på bakdekselet med to skruer.
5. Sett frontdekselet inn i andre enden av dysesynderen og skru fast med tre skruer fra utsiden av dysesynderen.
6. Sett inn dysegitterene i begge ender.
7. Sett på dyseleppene i sporene i dysesynderen og vri med klokka for å feste dem.

14. PROSESSEVALUERING OG DISKUSJON

Her skal utviklingsprosessen evalueres, og det skal påpekes hva som var bra og hva som kunne blitt gjort annerledes. Det skal og nevnes forslag til hvordan utviklingsprosessen kunne blitt forbedret.

14.1 Konseptutviklingsarbeidet

Masterarbeidet begynte med litteraturstudie i hydrodynamikk, propellteori og thrusterløsninger. Siden dette var nye fagområdet for min del lærte jeg litt etter hvert utover arbeidsperioden, noe som har gjort at designet ble justert langsgående. Litteraturstudiet kunne derfor startet tidligere for å få en utvidet konseptgenereringsperiode.

Skissering og 3D-modellering ble gjort parallelt store deler av tiden, da de hydrodynamiske formene måtte spesifiseres ved justering av buer, diametre og lengder i forhold til motor og propell. Ulike former for tverrsnitt ble testet ved strømnings og kraftpåkjenninger for å se om formene var optimale i forhold til funksjon og hydrodynamikk. Dette fungerte bra, og sørget for en kontinuerlig forbedringsprosess av designet.

Under produktutviklingsprosessen ble VDI2221 brukt som retningslinje som hjalp med å få en systematisk tilnærming av problemløsningen.

Testingen av prototypen burde startet tidligere slik at flere komponenter kunne blitt testet.

14.2 Designrevisjon, produksjon, kostnadsreduksjon

Det er lagt hovedvekt på prototypedesignet da denne skulle lages og testes ut. Det vil være markant forskjell mellom prototypedesignet og thrusterdesignet tilpasset ROV-skroget. Delvis på grunn av at helhetsdesignet til neste generasjon Explorer enda var i utvikling under masterarbeidet, men hovedsaklig på grunn av at prototypedesignet måtte tilpasses 3D-printing og testingen. I en serieprodusert utgave der testing og utprøving ikke står slik i fokus kan flere deler slås sammen og integreres for å forenkle produksjon og montering.

Prototypens løsning for å lett kunne bytte ut komponenter under testing fungerte bra og gjorde at testingen kunne gjennomføres effektivt. Det ble observert rust på skruene som fulgte med motoren, og de bør derfor byttes ut med rustfrie maskinskruer.

Vegtykkelsen til motorfestet påvirker hvor langt innpå akslingen akselsikringen kan festes. Ved implementering av glidelager i mellom akselsikring og motorfeste blir det mindre plass å feste sikringen på, og det må derfor vurderes å flytte akslingen i forhold til rotor.

Ved å lage thrusterdysen akselererende vil inn- og utgangsarealene til dysen være forskjellig. Dette fører til at thrusteren består av flere ulike deler og konstruksjonen blir mer kompleks.

For å sikre en jevn strømning gjennom thrusterdysen må propellen formes slik at den dytter vannet jevnt. Propellen burde derfor hatt en mer markant forskjell i stigning fra propellbladets rot til tupp. Etter testingen er det grunn til å tro at foreslått propellform vil danne virvelstrømmer på lavtrykksiden av propellbladet grunnet for stor og ensformig stigning. Dette resulterer i et dragsug på lavtrykksiden og tap av effekt. Det ble derfor i etterkant laget en 3D-modell av et nytt forslag til propellutforming til evt. videre testing. Simuleringer viser at denne er mer effektiv enn testet propell. Den testede propellbladformens følgende kant er noe tynn, og kan til fordel dimensjoneres opp for å gjøres mer robust og gi mindre deformasjon under belastning. Dette vil og forbedre formen for rotasjon mot klokka.

Det er tatt utgangspunkt i polymeren PLA sine egenskaper i utregningene. Middelerdien i de oppgitte verdiintervallene er brukt. PLA og ABS kan varieres i styrkeegenskaper ved at de legeres med andre polymerer. ABS er det materialet som blir brukt videre til å bygge thrusterne i serieproduksjonen, og den kan gjøres sterkere enn verdiene som er brukt for PLA. I tillegg er beregningene holdt konservative, det er derfor rimelig å anta at støttestagene og veggtykkelsene kan dimensjoneres ned, noe som vil gjøre produksjonen billigere og konstruksjonen mer hydrodynamisk.

Festepunktene til støttestagene i dyseveggen er sårbare punkt der det oppstår spenningskonsentrasjoner. Dette kan utbedres ved å gjøre festeklossene på stagene sylindriske og skifte retning på skruen til parallelt med innstrømningsretningen. Opptredende spenninger i hullkanter kan forebygges ved å ha gummipakninger ved skruene for å ta opp krefter generert av vibrasjoner.

Dysegitterets form ble påvirket av 3D-pinterens støttestruktur. Det ble etter beste evne skjært bort med kniv, men ble ikke perfekt. Dette kan ha påvirket testresultatene, som viser at foreslåtte dysegitter har for stor påvirkning på oppnådd skyvekraft og konkluderes med at de må dimensjoneres ned. Tverrsnittene kan reduseres til halvparten, om ikke mindre. Hvor tett mønster og styrken til beskyttelsen har er, som påpekt i konseptgenereringen, avhengig av bruksområde. Gitterets senter kan og lages som et heldekkende skall, i stedet for en ring, foran front- og bakdeksel for å lage en mer hydrodynamisk overflate.

I oppdragsbeskrivelsen var det et ønske om å finne en motor med større moment enn dagens løsning. Utfordringen med dette er å finne en sterkere motor med mindre eller lik diameter, og

samtidig holde effektbruken nede. Etter flere grundige søk blant BLDC-motorene på nettet kom det fram at motorene i denne størrelsen må enten øke i effekten eller diameteren for å gi et høyere moment enn eksisterende løsning. Med andre ord vil det enten gå utover batterikapasiteten eller thrusterens ytre dimensjoner. Da det var ønske om en thruster som var så kompakt som mulig, ble det valgt å øke effekten.

15. KONKLUSJON

I dette prosjektet ble det laget et forslag til et thrusterdesign ment for Blueye Robotics sin Explorer ROV. Thrusterløsningen tok utgangspunkt i ytre dimensjoner og ytelsesdata til eksisterende løsning og ble spesifisert etter ønskede spesifikasjoner fra oppdragsgiver. Det ble utarbeidet form på komponenter med grunnlag i styrkeegenskaper og hydrodynamikk, samt valgt motor og motorkontroller. Det ble kartlagt ulike kritiske faktorer i det mekaniske designet gjennom håndberegninger og FEM og CFD-analyse av de ulike komponentene. Resultatet var en ferdigstilt 3D-modell med tilhørende tekniske tegninger som var klar for produksjon. Det ble 3D-printet en prototype som ble testet og sammenlignet med eksisterende løsning. Det gjorde at det ble etablert et forskningsgrunnlag for Blueye Robotics som gjorde at prosjektmålet ble nådd.

15.1 Resultater

Målet med den nye løsningen var å finne en motor med større moment og dermed sterkere enn eksisterende løsning, noe som ut i fra testresultatene ikke ble oppnådd.

Det ble kartlagt hvordan ulike stigninger på propellbladene påvirket moment, kraft, turtall og strømbruk. Det ble logget ytelsesdata som kunne settes i en større sammenheng og sammenlignes med tidligere løsningsforslag fra tidligere masteroppgave og eksisterende løsning. Dette ga også grunnlag for å forbedre designet til fremtidig testing.

Av resultatene fra konsepttestingen fremgår det at den oppnår en gjennomsnittlig skyvekraft på 48,7 N ved rotasjonshastighet 4100 rpm, effekt på 678W, motorstrøm 45,5A, som tilsier et moment på 1,58 Nm. Den bruker dermed mer effekt og trekker mer strøm, samtidig som at det genererer rundt den samme skyvekraften som eksisterende løsning i følge eksisterende løsnings oppgitte data. Løsningens akselerasjon er en kraftforandring på 49,51N på 0,45 sekunder. De store propellbladene sørger for god akselerasjon, som er viktig med tanke på raske manøvreringer av posisjon og orientering. Om den nye løsningen kan akselerere mer effektivt (bruke mindre tid på manøvrering), enn eksisterende thruster, kan bety at det kan være en god løsning. Men dette må gjøres tester på for å si noe sikkert.

15.2 Anbefalinger

Den testede løsningen vil være ugunstig å ta i bruk med tanke på batterikapasiteten, da effektbruken er høy i forhold til oppnådd skyvekraft. Utvikling av en optimal thrusterløsning krever mer testing og optimering av designet. Det er derfor kortsiktig sett å anbefale for Blueye Robotics, som nå skal lansere sin første ROV på markedet i 2017, å ta i bruk thusterløsninger fra tredjeparter. Utvikling av

egenprodusert thrusterløsning kan være et langsiktig mål, og er realiserbart etter hvert som det blir etablert et større forskningsgrunnlag.

15.3 Videre arbeid

Det skal her foreslås poster til videre arbeid i utviklingen av en thrusterløsning for Blue Robotics. Det vil inneholde arbeid som grunnet tidsbegrensninger ikke ble utført, samt andre forslag til videre utvikling av thrusterløsningen.

- Thrusterene må sees på i forhold til helhetsdesignet på ROV'en for å optimalisere for stabilitet med å plassere thrusterne med hensyn til tyngdepunkt og treghetsmoment, tether-kabelen tatt i betraktning.
- Lage deksler for sammenkobling av thrusteren og ROV'skroget.
- Utarbeide forslag til vertikal thruster.
- Testing av konstruksjonen under trykk med syklisk belastning over lenger tid.
- Teste akselerasjon og sammenligne ny løsning med eksisterende.
- Teste thrusteren bakover (negativ z-retning).
- Teste flere typer propeller, dysegitter og dyseformer.
- Teste Blue Robotics sin T200 thruster og ny løsning i samme testoppsett for å få en mer nøyaktig sammenligning.
- Teste hvordan skyvekraften påvirkes når thrusteren er i bevegelse relativ til fluidstrømmen.
- Teste flere motorer . Det ble i tillegg til den testede motoren bestilt to Turnigy G25. Disse har lavere effekt (600W), samme diameter, men litt mindre moment enn Power Pro 2826. Siden batterikapasiteten skal reduseres i neste generasjons ROV, kan det være nyttig å teste denne som et alternativ.
- Logge bruksmønster til ROV'en for å se hvor stor prosentdel av brukstiden den akselereres fremover og bakover, dermed grunngi hvor stort behov det er for å designe dysen akselererende kontra nøytralt.
- Inkludere logging av volumstrøm i testingen for å finne den mekaniske effekten, og dermed effektiviteten til thrusteren.
- Undersøke mulighetene for periferidrevet propell.
- Opprette dialog med leverandør av glidelager og evt. kulelager i polymer.

16. REFERANSER

Nettkilder

Bilder

- [2] Bilde av Blueye Explorer P1 (med tillatelse fra Jonas Follesthø).
- [3] Blue Robotics T200, <https://www.bluerobotics.com/>
- [4] Deep Trekker DTX2, <https://www.deeptrekker.com/>
- [6] SeaBotix LBV150-4, <http://www.seascape.nl/>
- [7] SeaBotix Thruster, BT150, <http://www.seabotix.com/>
- [9] Videoray Pro 4, <http://www.videoray.com/>
- [10] Videoray Thruster, <http://www.videoray.com/>
- [12] AC-ROV 100, <http://www.rts.as/>
- [25] YouTube, Learn Engineering, Brushless DC Motor, How it works?, Skjermdump, <https://www.youtube.com/>
- [30] Outrunner og innrunner, Brushless <http://housecomputer.ru/>
- [33] Basic Mechanical Engineering, Laminær strømnig, <http://www.basicmechanicalengineering.com/>
- [38] Propell, skew, <https://navcadknowledge.files.wordpress.com/>
- [39] Michigan Propellers, Sailer 2, <https://www.miwheel.com/>
- [40] Michigan Propellers, M506, <https://www.miwheel.com/>
- [41] KA-serie: <http://svseeker.com/>
- [42] Rolls Royce Azimut, <http://img.nauticexpo.com/>
- [43] KTE, <http://kte.co.kr/>
- [44] Scana propulsion, Tunnel thrusters: <http://scanapropulsion.com/>
- [51] Marin 19A, <http://svseeker.com/>
- [52] Marin 37, <http://svseeker.com/>

Info

- [1] AMOS, <http://www.ntnu.edu/amos>
- [5] Deep Trekker Info
- [8] SeaBotix, Company profile, <http://www.seabotix.com/>
- [11] VideoRay, u.d. www.videoray.com. [Internett]
Available at: http://www.videoray.com/images/specsheets/2016/2016_P4STANDARDBASE_FINAL.pdf
[Funnet 24 August 2016].
- [13] AC-ROV spesifikasjoner, <http://ac-cess.com/>
- [14] DeepTrekker, spesifikasjoner: <https://www.deeptrekker.com/>
- [15] SeaBotix, LBV150, spesifikasjoner, <http://www.teledynmarine.com/>
- [16] Videoray Pro 4 thruster: <http://www.videoray.com/>
- [17] AC-ROV, spesifikasjoner, <http://ac-cess.com/>
- [20] Pugs Method: <http://www.decision-making-confidence.com/>
- [28] Garfinkel, S. R., 2011. *Ellipsah LLC*. [Internett]
Available at: <http://www.ellipsah.com/blog1/?p=75>
[Funnet 17 September 2016].

- [34] TSL Technology Ltd. , 2016. [Internett]
Available at: <http://www.tsstechnology.com/docs/PA-THR-DS-0014.pdf>
[Funnet 28 August 2016].
- [36] Mercury Marine, 2004. [Internett]
Available at: <http://argonaute.pagesperso-orange.fr/Helice.pdf>
[Funnet 6 September 2016].
- [37] HydroCom, Inc., 2014. *Evaluating skewed propellers*. [Internett]
Available at: <http://hydrocompinc.com/knowledge/evaluating-skewed-propellers>
[Funnet 7 September 2016].
- [40] Victoria Propeller Ltd., 2015. *www.vicprop.com*. [Internett]
Available at: <https://www.vicprop.com/propeller101.htm>
[Funnet 15 September 2016].
- [45] World Hovercraft Organization, 2004. *DiscoverHover*. [Internett]
Available at: <http://www.discoverhover.org/infoinstructors/guide8.htm>
[Funnet 21 September 2016].
- [48] Blue Robotics T200, tabell og bilde, <http://docs.bluerobotics.com/>
- [53] Euro valuta, <http://www.xe.com/currencyconverter>
[Funnet 30 September 2016].
- [54] USD, <http://www.xe.com/>
[Funnet 30 September 2016].
- [55] Turnigy G10, <https://www.hobbyking.com/>
- [56] Turnigy G25, <https://www.hobbyking.com/>
- [57] Powerpro 2826, <http://modellflybutikken.no/>
- [58] Blue Robotics M200: <https://www.bluerobotics.com/>
- [59] Treskrue M3, <http://guideimg.alibaba.com/>
- [60] Maskinskrue M3, <http://cdn3.volusion.com/>
- [61] Blindmutter M3, <http://aerofpl.com/>
- [62] GGB, DP4 Flanged bushes, <http://www.servicatalogue.com/>
- [63] Modellflybutikken, Power Pro ESC 50A: <http://modellflybutikken.no/>
- [64] Filament, 3D-printer, Guide, <http://www.protoparadigm.com/>
- [70] Blue Robotics T200: <http://docs.bluerobotics.com/>
- [71] Ultimaker Pris, <http://no.rs-online.com/>
- [72] 3D-print, filament, gul, PLA, Pris, <https://www.kjell.com/>
- [73] Clas Ohlson, Forsenket treskrue M3, <http://www.clasohlson.com/>
- [74] Clas Ohlson, maskinskrue, pris, <http://www.clasohlson.com/>
- [75] Norbond, Silikonfjerner CS Mild, <http://www.norbond.no/>
- [76] Lakksalg, S2003/AL, plastikk primer, <http://www.lakksalg.no/>
- [77] Biltema, Plastlakk, <http://www.biltema.no/>
- [78] UltraEverDry, <https://www.ultraeverdry-store.eu/>
- [79] NeverWet, <http://www.neverwet.com/>

Skriftlige kilder:

- [19] Kara, S., 2009. *Concurrent Product and Process Development*. Sydney: UNSW Publications, 27 sider.
- [21] VDI2221 :: VDI Society for Product Development, Design, and Marketing, 1986. *Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products*. 33 sider.
- [22] Dr. Alex Green, MANF3100, UNSW, Australia, Lecture 3, Design for Assembly, 45 sider.

- [23] Norsk Teknologisenter, 2003. *NORSOK STANDARD, U-102*.
- [24] Wildi, T., 2014. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. 6 red. Harlow(Essex): Pearson Education Limited.
- [26] Tipler, P. A. & Mosca, G., 2008. *Physics for Scientists and Engineers, with Modern Physics*. Sixth Edition red. New York: W. H. Freeman and Company.
- [27] Lin, D., Zhou, P. & Cendes, Z. J., 2009. *In-depth Study of the Torque Constant for Permanent-Magnet Machines*, Pittsburg, PA: Ansoft, LLC.
- [29] Ramesh, M. et al., 2011. *Speed Torque characteristics of Brushless DC motor in either direction on load using ARM controller*, s.l.: IISTE.
- [31] Padmaraja, Y., 2003. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*.
- [32] Finnemore, J. E. & Franzini, J. B., 2002. *Fluid Mechanics, with Engineering Applications*. Tenth Edition red. New York: McGraw-Hill Higher Education.
- [35] Lea, M. et al., 2003. Scale Model Testing of a Commercial Rim-driven Propulsor Pod. *Journal of Ship Production*, Mai, Issue 19, pp. 121-130.
- [46] DNV GL AS, 2015. *Calculation of marine propellers* (DNVGL-CG-0039).
- [47] Callister, W. D. & Rethwisch, D. G., 2011. *Materials Science and Engineering*. Eight Edition red. s.l.:John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd.
- [49] Huynh, J. Q. T., 2016. *Detailed Design og a Thruster Solution for a Small Mass-Market Remotely Operated Underwater Vehicle, 129 sider*.
- [50] Zondervan, G.-J., Hoekstra, M. & Holtrop, J., 2006. *Flow Analysis, Design and Testing of Ducted Propellers*.
- [66] Geir Terjesen. TMP301, IMT/NMBU 2015, Deformasjon av bjelker og aksler, 23 sider.
- [67] Geir Terjesen. TMP301, IMT/NMBU 2015. Skrueforbindelser, 32 sider.

Personlige referanser:

- [18] Professor Martin Ludvigsen (NTNU), CTO Blueye Robotics
- [68] Borja Serra, Hardware Design Ingeniør, Blueye Robotics.
- [69] Bo Peng, Elektroingeniør, Blueye Robotics
- [81] Rune Hansen, maskindesigningeniør, Blueye Robotics

Programvare:

- [65] Granta Design Limited: CES Edupack 2016 Versjon 16.1.22, EduLevel 2, Polyactide (PLA)
- [80] Granta Design Limited: CES Edupack 2016 Versjon 16.1.22, EduLevel 2, Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

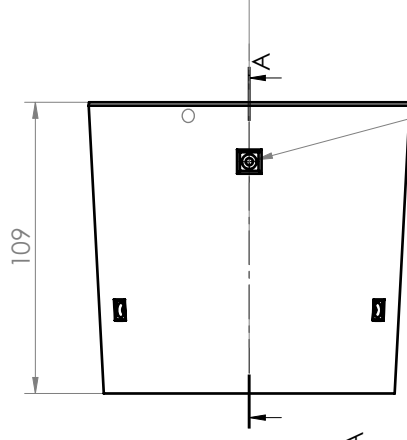
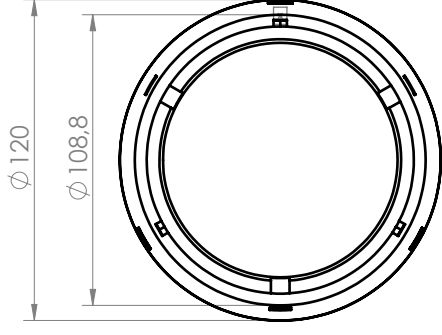
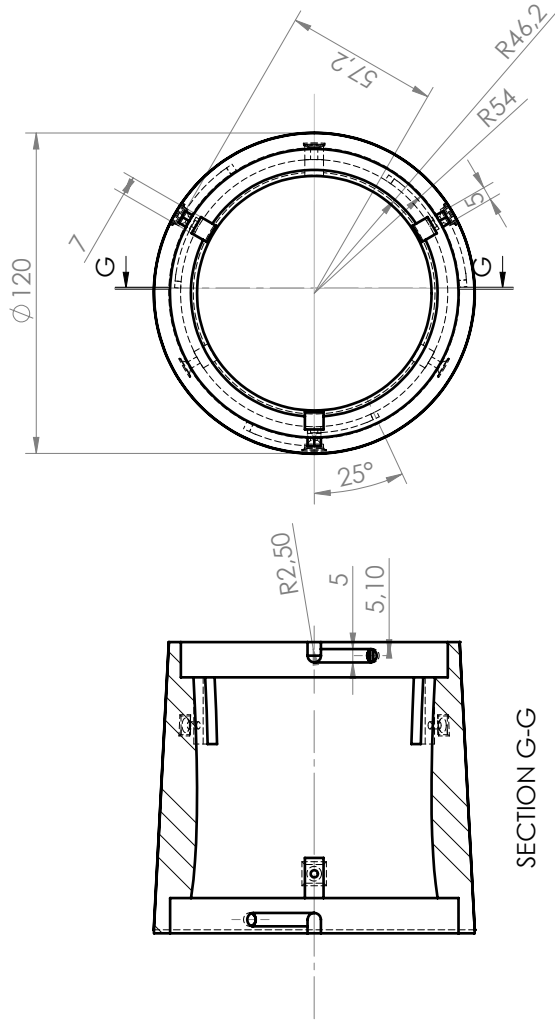
VEDLEGG

Vedlegg 1 Gantt Diagram

Vedlegg 2 Testresultat kraftmåling

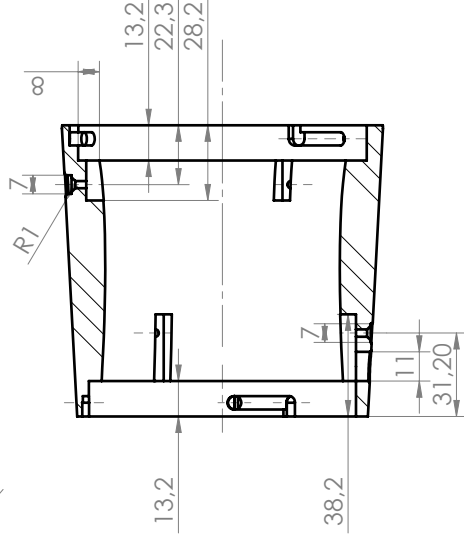
Vedlegg 3 Tekniske tegninger

	PWM (micro s)	Gjennomsnitt måling				Gjennomsnitt gjennomsnitt	Måling			Gjennomsnitt stdav	Stdv stdv	Stdrfeil stdv stdv
		1	2	3			1	2	3			
Propell 15	1150	2,346066926	2,083975185	2,049800403	2,159947505	0,73665114	0,05719794	0,077225594	0,290358228	0,386630705	0,06730377	
	1200	4,444026846	4,323265784	4,333707073	4,366999901	0,25652973	0,06195054	0,142951442	0,153810572	0,097743058	0,01701488	
	1250	7,830432531	7,538863471	7,57041934	7,646571781	0,33389173	0,12806499	0,132425685	0,198127468	0,117595515	0,02047075	
	1300	11,86235104	11,68711839	11,70763206	11,75236716	0,43261496	0,16743563	0,164953925	0,255001505	0,153822769	0,02677711	
	1350	16,70891964	16,32266123	16,31133276	16,44763788	0,59442931	0,1392402	0,177484919	0,303718143	0,252488422	0,04395259	
	1400	20,91637918	20,17832554	20,04460387	20,37976953	0,94449772	0,35048899	0,336034645	0,543673784	0,347198938	0,06043958	
	1450	24,97830339	24,59281973	24,57550453	24,71554255	0,88334864	0,29558426	0,189123433	0,456018777	0,373887126	0,06508539	
	1500	29,09794478	28,59114832	28,42526419	28,70478576	0,88652025	0,19881626	0,266052594	0,450463035	0,379130058	0,06599807	
	1550	32,6921137	32,00794104	31,88574594	32,1952669	0,93272021	0,31926321	0,285351389	0,512444937	0,364363806	0,0634276	
	1600	35,62364382	34,80063386	34,58615066	35,00347611	1,04134655	0,27188941	0,278172388	0,530469448	0,442443697	0,07701956	
	1650	35,62364382	34,80063386	34,58615066	35,00347611	1,04134655	0,27188941	0,278172388	0,530469448	0,442443697	0,07701956	
1700	35,59498134	34,68356936	34,50677224	34,92844098	1,13011334	0,29843479	0,330050935	0,58619969	0,471308224	0,08204423		
Propell 20	1150	3,338871457	3,243926886	3,307159958	3,296652767	0,12549447	0,05333622	0,048435596	0,07575543	0,043144911	0,00751056	
	1200	6,709312136	6,596985817	6,638416001	6,648237985	0,10386484	0,10416841	0,093150923	0,100394726	0,006275153	0,00109236	
	1250	11,7482542	11,70247867	11,71142124	11,72071804	0,17080449	0,06624634	0,071852247	0,102967693	0,058815219	0,01023842	
	1300	17,44307894	17,30927699	17,35931703	17,37055765	0,56354044	0,14259669	0,152908909	0,286348681	0,240110473	0,04179787	
	1350	23,69866753	23,53069063	23,46068746	23,56334854	0,63622048	0,14106298	0,129146857	0,302143438	0,289380546	0,05037469	
	1400	29,1017	28,73054025	28,47937971	28,77053999	0,74496077	0,25842314	0,226114164	0,409832693	0,290678672	0,05060066	
	1450	34,54575209	34,23182921	34,03572198	34,27110109	0,71430334	0,19155851	0,133177826	0,34634656	0,319994094	0,05570382	
	1500	39,67297687	39,124121	38,81799733	39,20503173	0,72592185	0,21166903	0,178175103	0,371921997	0,30702994	0,05344705	
	1550	43,48077589	42,92148787	42,62539812	43,00922062	0,74284609	0,24910771	0,257897363	0,416617054	0,282556816	0,04918683	
Propell 25	1150	3,8432487	3,789893447	3,759372776	3,797504974	0,31630583	0,04589302	0,044506102	0,135568315	0,156524811	0,02724747	
	1200	8,00848743	7,878391728	7,904282209	7,930387122	1,43230531	0,0701759	0,04854067	0,517007294	0,792745149	0,13799922	
	1250	14,68243717	14,49479063	14,51172684	14,56298488	0,52018395	0,10146694	0,097881536	0,23984414	0,242788015	0,04226397	
	1300	20,84913364	20,80363985	20,81545795	20,82274381	0,57002785	0,1310234	0,098522459	0,266524568	0,263343423	0,04584221	
	1350	28,00581799	27,86450606	27,79484182	27,88838862	0,51500213	0,11966377	0,144322074	0,259662658	0,221473906	0,03855366	
	1400	33,91015625	33,5543547	33,37432896	33,61294664	0,52835248	0,2010617	0,232116054	0,320510078	0,180665271	0,03144979	
	1450	40,08805986	39,51499164	39,27555026	39,62620059	0,55764507	0,16841594	0,158653878	0,294904963	0,227591951	0,03961867	
	1500	45,52125896	44,77904996	44,40308241	44,90113045	0,7990107	0,2172393	0,199162054	0,405137351	0,341224057	0,05939948	
1550	49,18538088	48,60892383	48,19471498	48,66300656	0,63051974	0,20919126	0,209739851	0,349816948	0,243095901	0,04231756		



$\phi \ 2.70 \nabla 11$
 $\phi \ 5.50 \times 90^\circ$

SECTION G-G

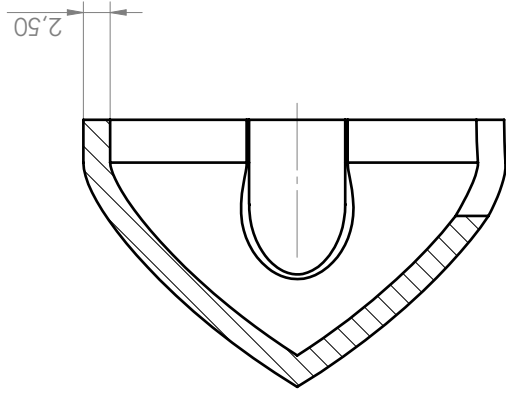
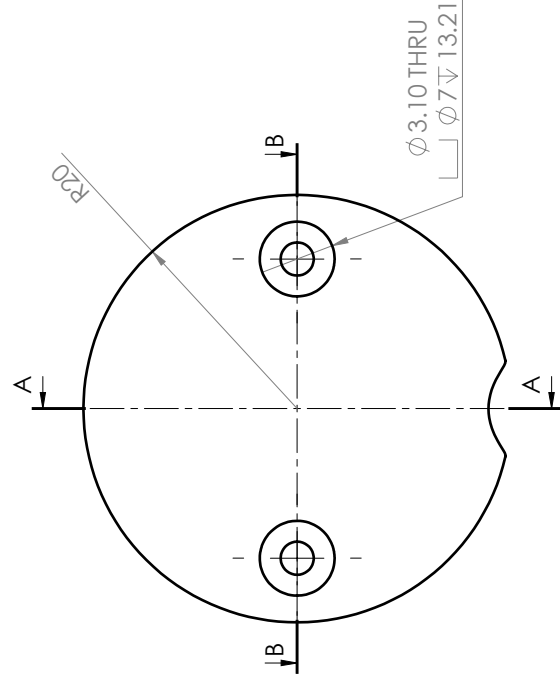
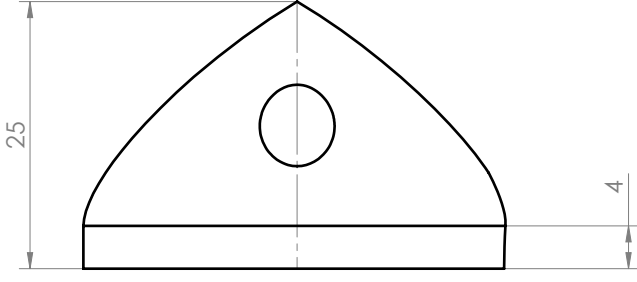


SECTION A-A

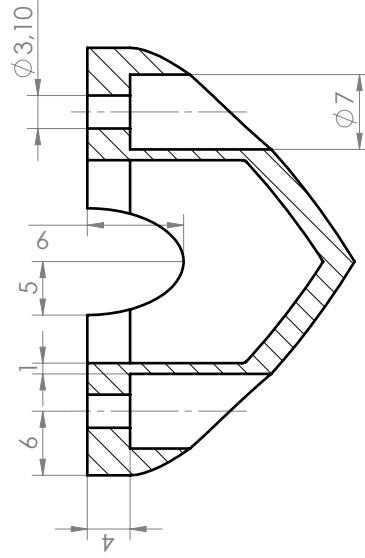


**SOLIDWORKS Student Edition.
 For Academic Use Only**

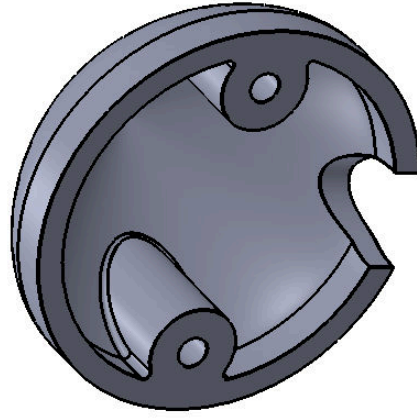
Dato:	27.11.16	Konstr./Tegnet:	H,L	Projeksjon:		Målestokk:	1:2	NMBU
Henvising:								Erstatter for:
								Erstatter av:
								Dyse
Masteroppgave 2016								
Thruster								
Beregning:								



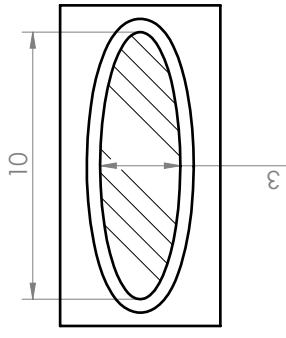
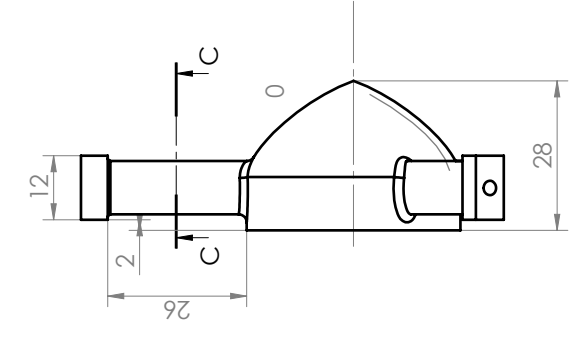
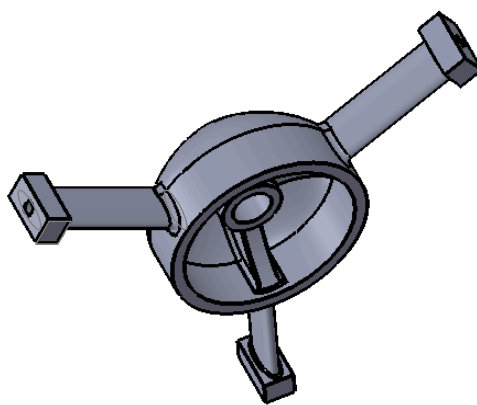
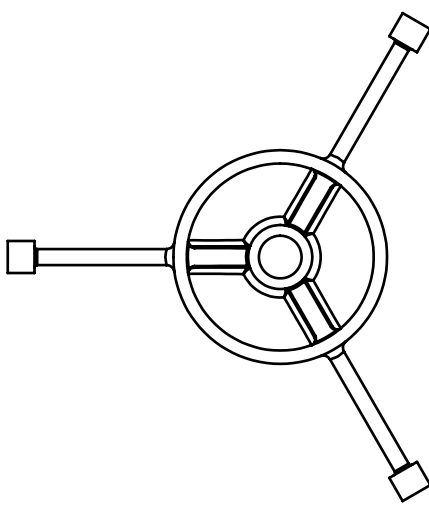
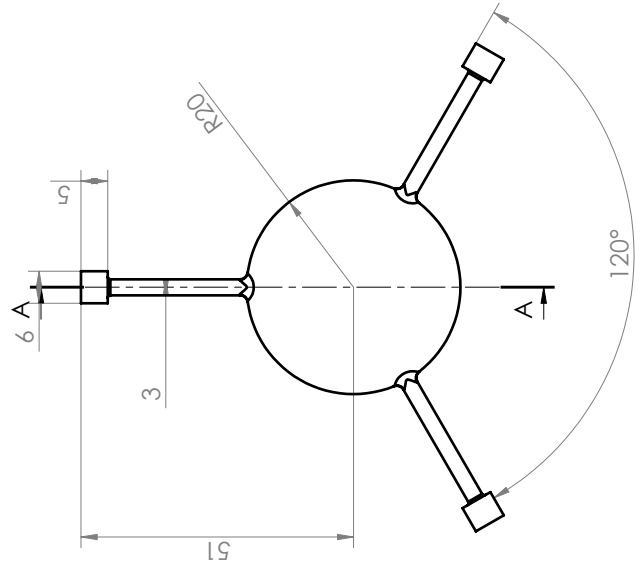
SECTION A-A



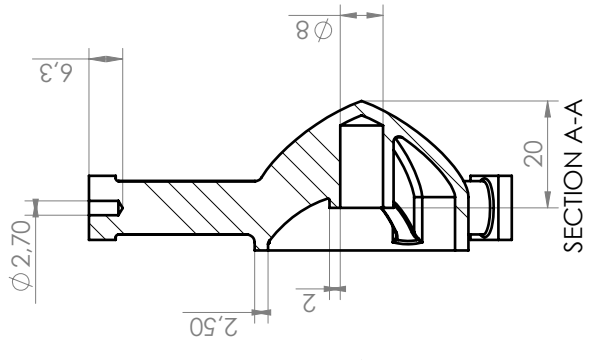
SECTION B-B



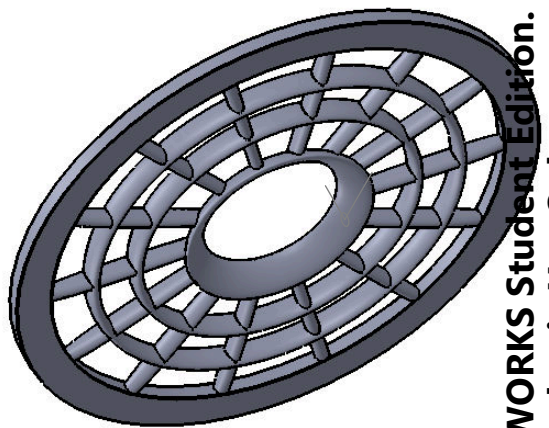
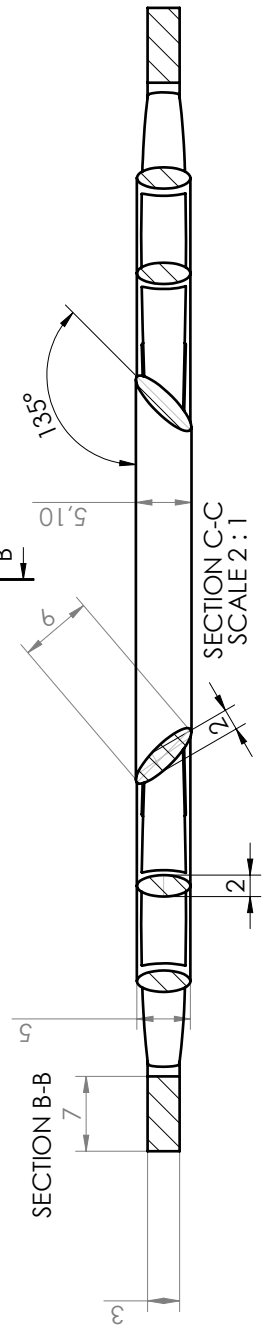
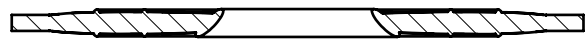
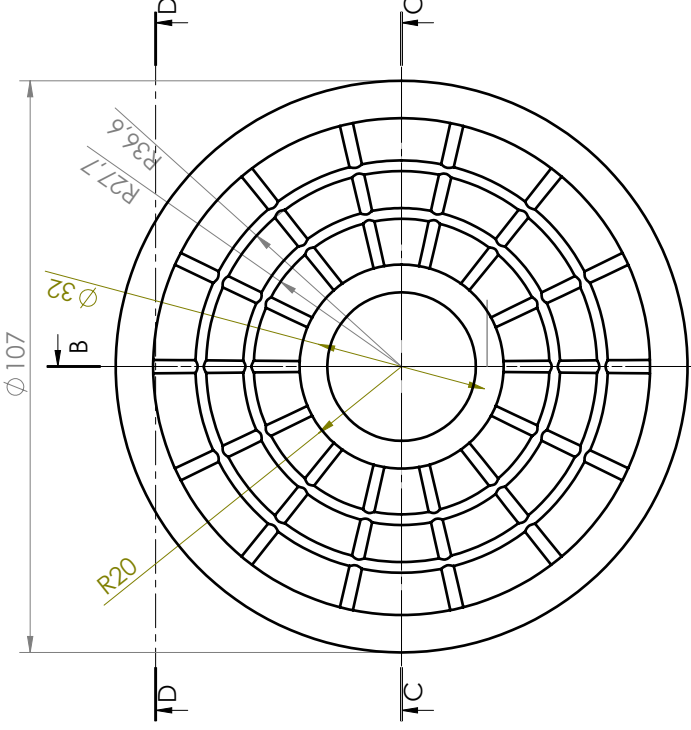
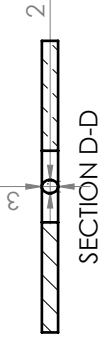
Dato: 27.11.16	Konstr./Tegnet: H.L	Projeksjon:	Målestokk: 2:1	NMBU
Masteroppgave 2016				Erstatning for: Erstattelet av:
Thruster				Deksel (bak)
Henvising:			Beregning:	



SECTION C-C
SCALE 5:1

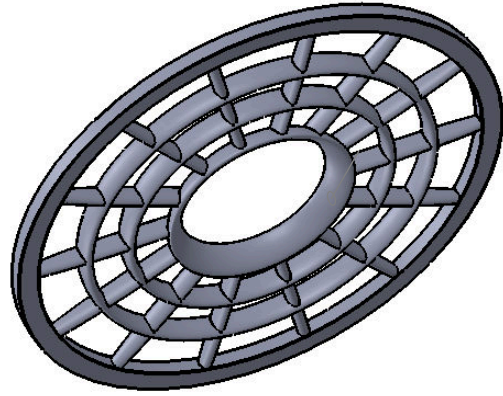
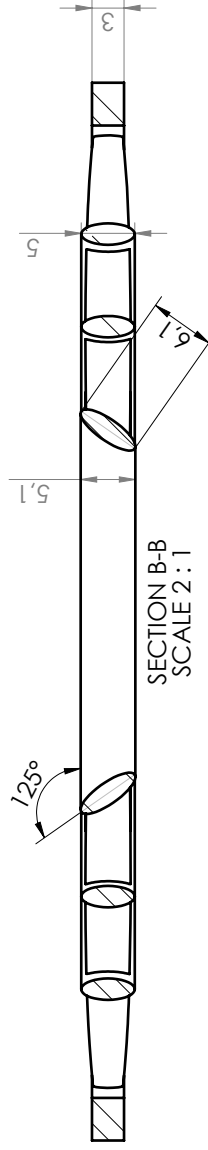
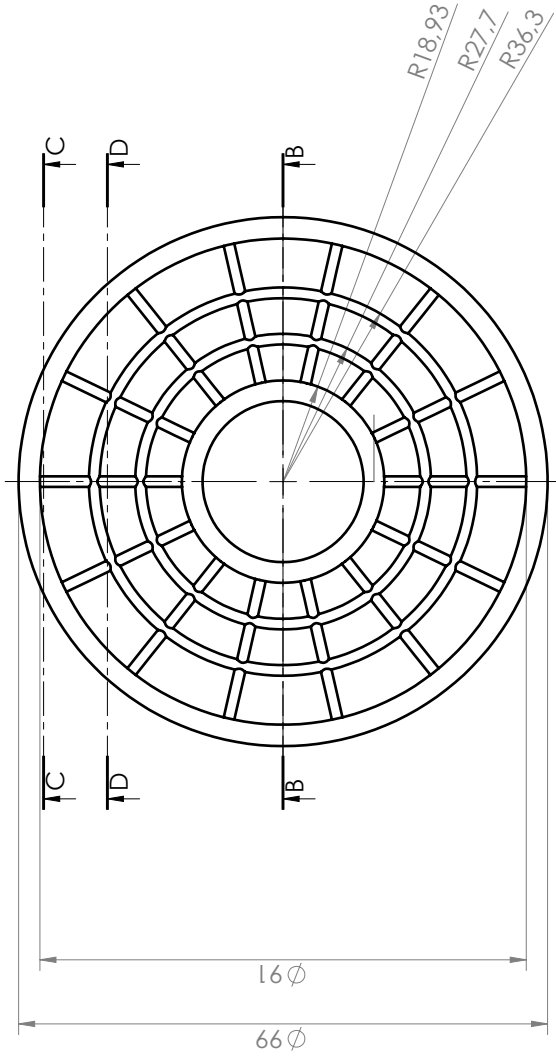
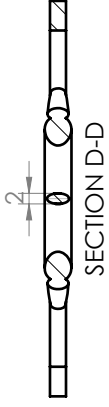
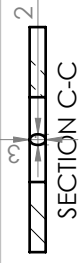


Dato: 27.11.16	Konstr./Tegnet: H.L	Projeksjon:	Målestokk: 1:1	NMBU
Masteroppgave 2016				Erstatter for: Erstattelet av:
Thruster				Deksel (front)
Henvising:				Beregning:



SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

Dato: 27.11.16	Konstr./Tegnet: H.L	Projeksjon:	Målestokk: 1:1	NMBU
Masteroppgave 2016				Erstatter for: Erstattelet av:
Thruster				Dysegitter (front)
Henvising:			Beregning:	



**SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.**

Dato: 27.11.16

Konstr./Tegnet: H.L

Projeksjon:



Målestokk:

1:1

NMBU

Erstatter for:

Erstatter av:

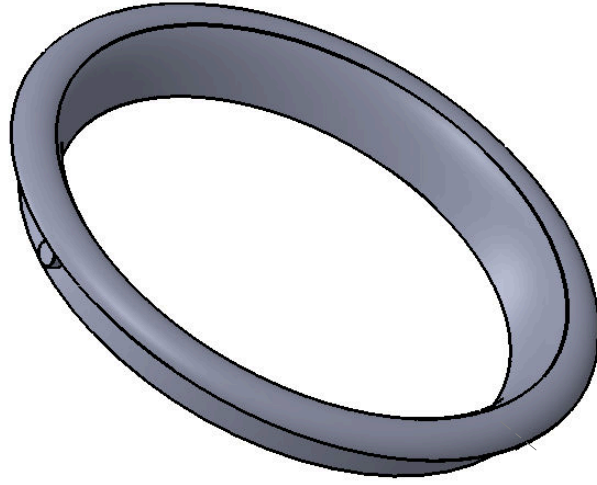
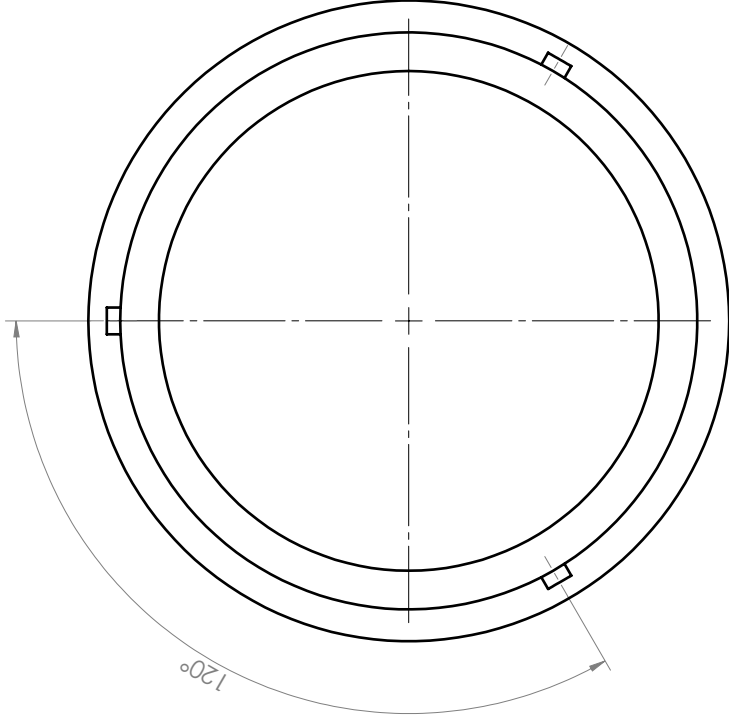
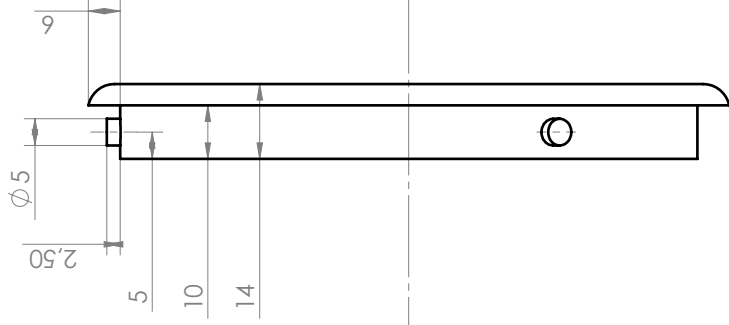
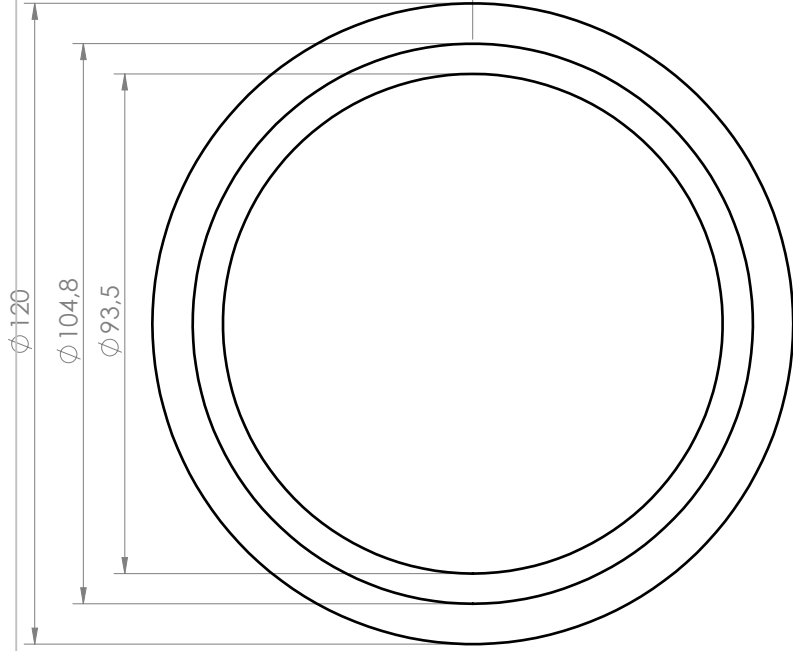
Masteroppgave 2016

Thruster

Dysegitter (bak)

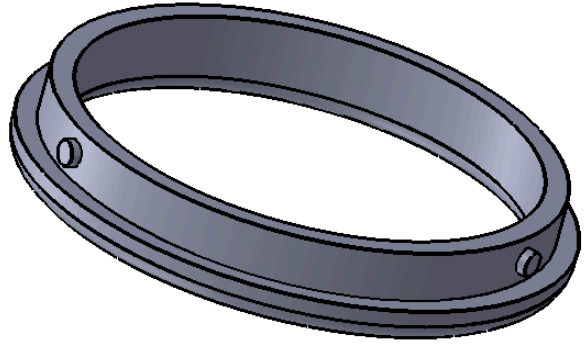
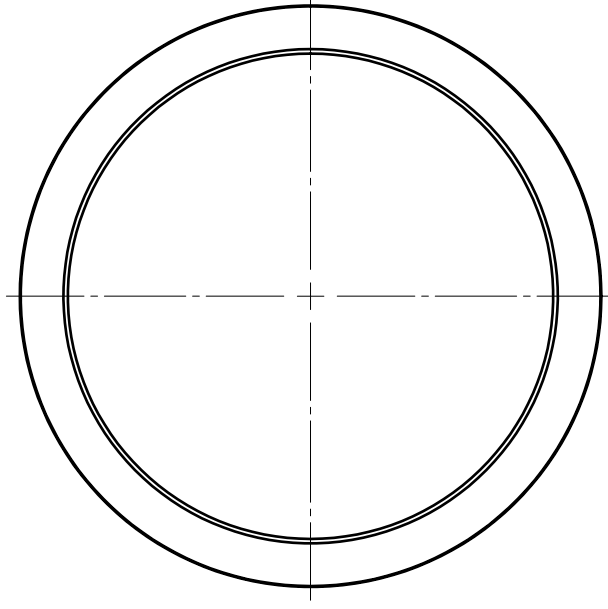
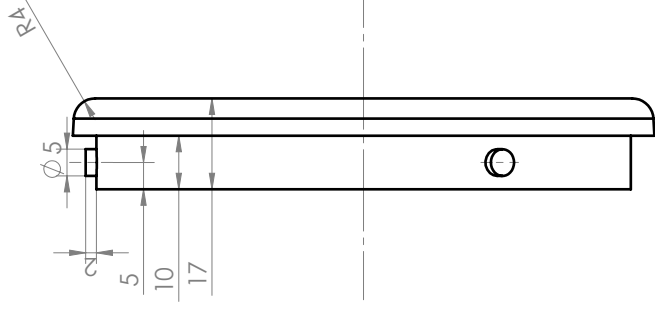
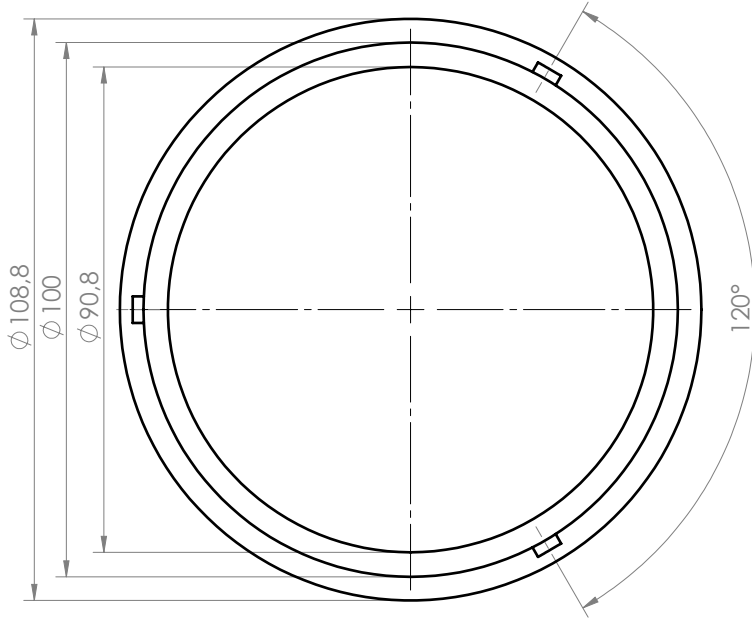
Henvising:

Beregning:



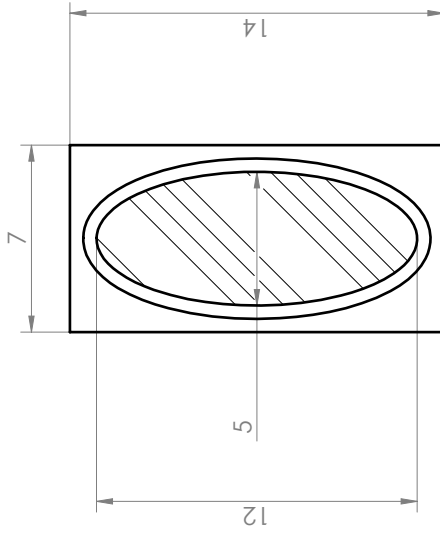
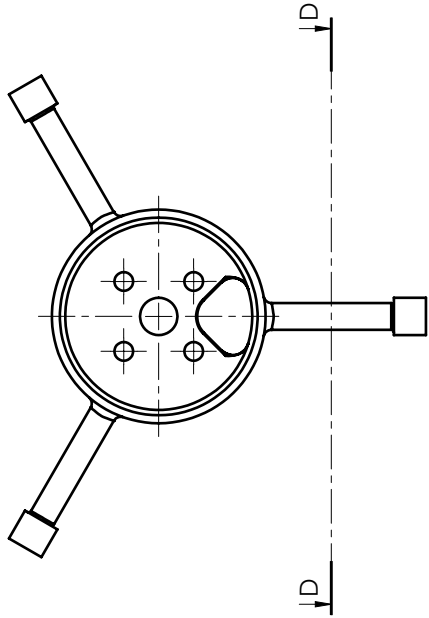
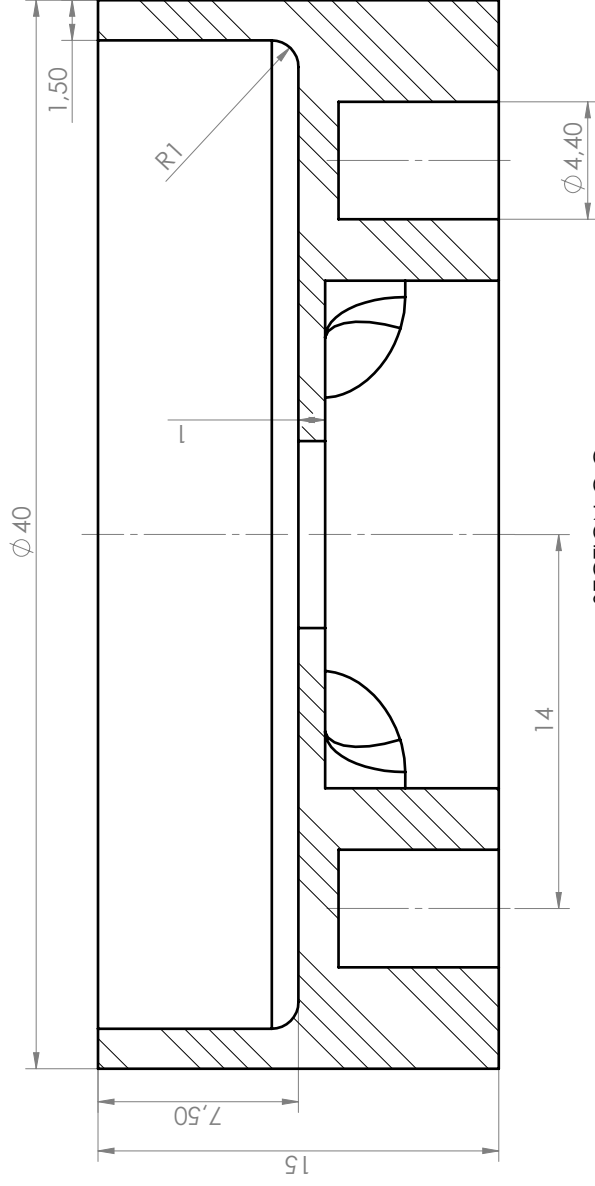
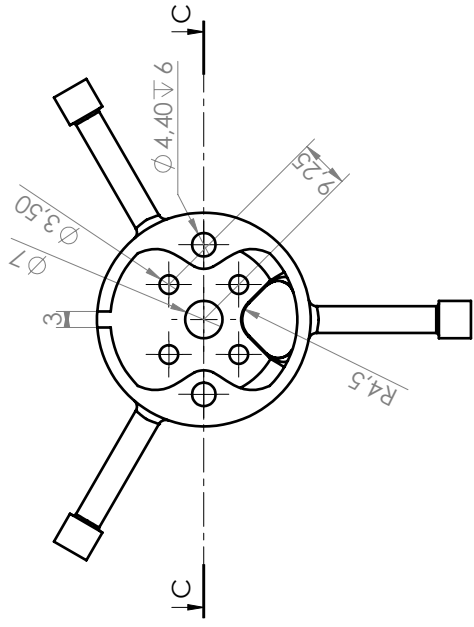
**SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.**

Dato: 27.11.16	Konstr./Tegnet: H.L	Projeksjon:	Målestokk: 1:1	NMBU
Masteroppgave 2016				Erfattatlet av:
Thruster				Dyseleppe (front)
Henvising:				Beregning:



**SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.**

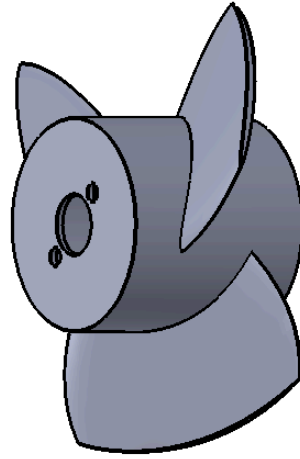
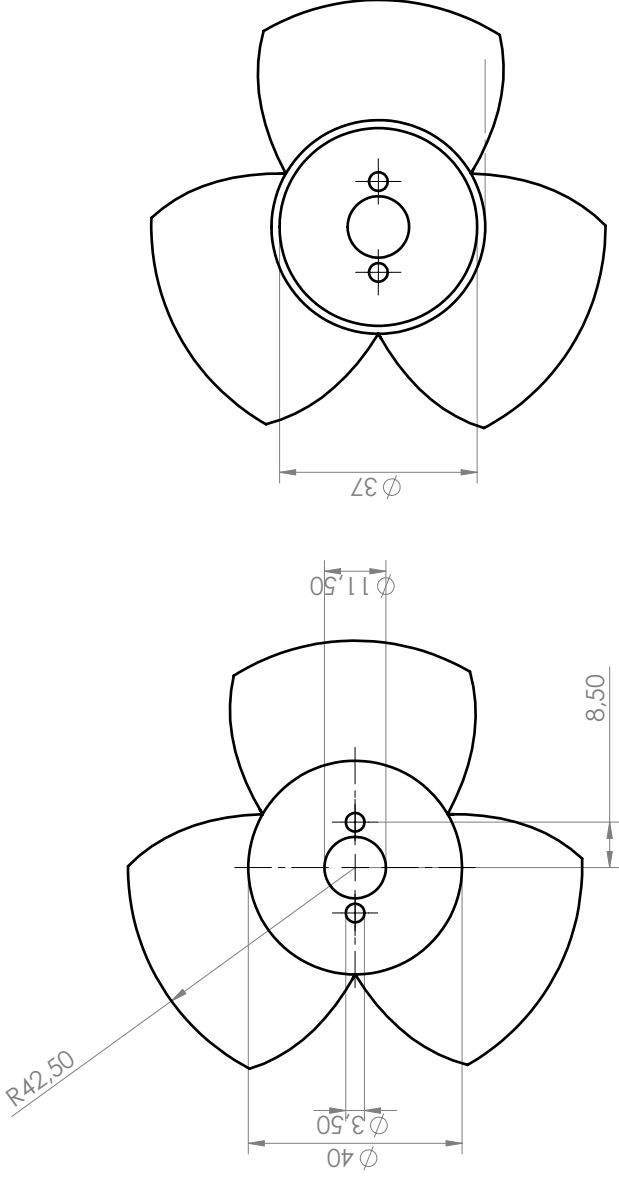
Dato: 27.11.16	Konstr./Tegnet: H.L	Projeksjon:	Målestokk: 1:1	NMBU
Masteroppgave 2016			Eerstattet av:	
Thruster			Dyseleppe (bak)	
Henvising:			Beregning:	




SECTION C-C
SCALE 5:1

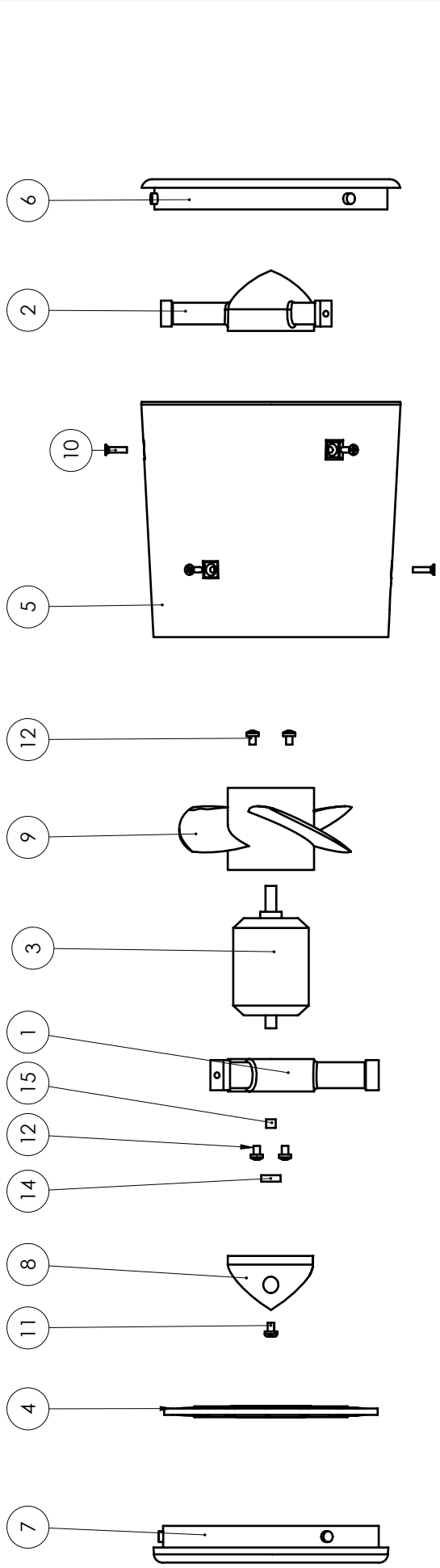
SECTION D-D
SCALE 5:1

Dato: 27.11.16	Konstr./Tegnet: H.L	Projeksjon:	Målestokk: 1:1	NMBU
Henvising:				Erstatning for: Erstattelet av:
Masteroppgave 2016				Motorfeste
Thruster				
Beregning:				



**SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.**

Dato: 27.11.16	Konstr./Tegnet: H.L	Projeksjon: 	Målestokk: 1:1	NMBU
Masteroppgave 2016 Thruster				Eerstatter av: Propell (25)
Henvising:			Beregning:	



ITEM NO.	PART NUMBER	Material	QTY.
1	Motorfeste	PLA	1
2	Deksel (Front)	PLA	1
3	Power Pro 2826		1
4	Dysegitter (bak)	PLA	1
5	Dyse	PLA	1
6	Dyseleppe (front)	PLA	1
7	Dyseleppe (bak)	PLA	1
8	Deksel (bak)	PLA	1
9	Propell	PLA	1
10	Treskrue M3, 11mm		6
11	Maskinskruer M3x0,5 6mm		2
12	Maskinskruer M3x05 4mm		6
13	Dysegitter (front)	PLA	1
14	Akselsikring		1
15	blindmutter		2

Dato: 27.11.16

Konstr./Tegnet: H,L

Projeksjon:

Målestokk: 1:2

NMBU

Erstatning for: Erstatet av:

Masteroppgave 2016

Thruster

Henvising: Beregning:

Eksplisjonsvisning



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway