

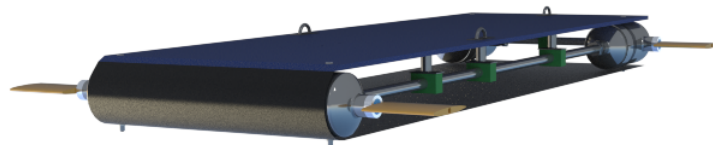
Katherine Galdames
Endre Myhre

Design av slepe-ROV

Bacheloroppgave i Produkt- og systemdesign

Veileder: Lars P. Bryne, Paul S. Kleppe, Håvard Lien og Ottar Osen

Mai 2021



Katherine Galdames
Endre Myhre

Design av slepe-ROV

Bacheloroppgave i Produkt- og systemdesign
Veileder: Lars P. Bryne, Paul S. Kleppe, Håvard Lien og Ottar Osen
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

I denne oppgaven blir det utviklet flere konsepter for en fjernstyrt farkost, også kalt ROV (*Remotely operated vehicle*), som skal slepes fra båt, og styres opp og ned i dybden. Sammen med veiledere ble det valgt et konsept som skulle videreutvikles, og som det skulle bygges en prototype av. Med en slepe-ROV kan en oppnå fordeler som enklere tilvirkning og lavere kostnader. Dette kan bidra med å gjøre det enklere å drive forskning, søk, og miljøarbeid i havet.

Gjennom dialog med en brukerprofil, ble det laget en oversikt over prioriterte egenskaper for en slepe-ROV. Disse egenskapene ble brukt som grunnlag i design-prosessen. Materialvalgene ble i hovedsak syrefaste rørdeler på grunn av sikre metoder for å holde tett, og motstand mot korrosjon.

Det ble utviklet et fleksibelt konsept med moduler som kan settes sammen som en ønsker. Det blir brukt vinger i hydrofoil-profiler som aktuatorer for dybdestyring. Vingene drives av steppermotorer med gir-reduksjon.

Nedstenginger som følge av covid19-utbrudd begrenset tilgangen til NTNU i Ålesund. Dette medvirket til at det bare ble tid til å lage en av fire nødvendige moduler. Uten en ferdig prototype ble det ikke utført sjøtester av konseptet. Selv om det ikke ble bygget en ferdig prototype gir denne oppgaven en oppskrift på et konsept, og et grunnlag for videre testing og utvikling.

Summary

In this thesis, several concepts for a remotely operated vehicle (ROV), that is towed from a boat and has depth steering, is developed. Together with supervisors, one concept was chosen to be further developed and to build a prototype of. With a towed ROV, one can achieve benefits like easier manufacturing and lower costs. This can make research, search, and environmental work at sea easier.

Through dialog with a user profile, it was made an overview of prioritized properties for a towed ROV. These properties were the basis for the design process. Stainless steel and pipe systems was chosen as materials because of secure sealing methods and resistance to corrosion.

A flexible concept was developed with modules that can be put together as desired. Wings in hydrofoil profiles are used as actuators for depth control. The wings are driven by stepper motors with gear reduction.

Shutdowns due to covid19 outbreaks restricted the access to facilities at NTNU in Ålesund. Therefore, the prototyping was limited to one out of four needed modules. Without a finished prototype, it was not performed any tests at sea. Although no finished prototype was built, this thesis provides a recipe for a concept, and a basis for further testing and development.

Forord

Takk til automasjonsstudentene for samarbeidet, og for å stille til brukerprofilintervju.

Takk til veilederene i denne oppgaven.

Takk til Henry Peter Piehl for hjelp med FEA-analyser.

Takk til André Tranvåg, og lærlingene i det mekaniske verkstedet ved NTNU i Ålesund.

Takk til Anders Sætersmoen for hjelp med bestillinger av deler.

Innhold

Figurer	vi
1 Introduksjon	1
1.1 Formål	1
1.1.1 Miljøarbeid	2
1.1.2 Søk	2
1.1.3 Forskning	2
1.2 Problemstillinger	2
1.2.1 Oppdrift og stabilitet	2
1.2.2 Hydrodynamikk	2
1.2.3 Tilvirkning	3
1.2.4 Material	3
1.2.5 Elektronikk	3
1.3 Lignende produkt	3
1.3.1 Towfish	3
1.3.2 The Acrobat	4
1.4 Tidligere oppgaver fra NTNU i Ålesund	4
1.4.1 Bachelor-prosjekt 2018	4
1.4.2 Bachelor fra 2019	5
1.4.3 Mekatronikkprosjekt 2020	6
2 Teroretisk Bakgrunn	8
2.1 Mekanikk	8
2.1.1 Oppdrift	8
2.1.2 Hydrostatisk trykk	8
2.1.3 Viskositet	8
2.1.4 Strømning	9
2.1.5 Løft	10
2.1.6 Drag og turbulens	11
2.1.7 Statikk	12
2.1.8 Hookes lov	13
2.2 Styring	13
2.2.1 Vinger	13
2.2.2 Flytting av kabelfeste	13

2.2.3	Vekt og ballast	14
2.2.4	Propell	15
2.3	Kabelfeste	15
2.3.1	Plassering	16
2.3.2	Festemetoder	17
2.4	FEM-analyse	19
2.5	Tilvirkning	19
2.5.1	TIG-sveising	19
2.5.2	Dreining	19
2.5.3	Fresing	20
2.6	Materialer	21
2.6.1	Metall	21
2.6.2	Plastikk	21
2.7	Transmisjon	22
2.7.1	Steppermotor	22
2.7.2	Snekkeveksel	22
2.7.3	Planetveksel	23
3	Produktutvikling	24
3.1	Brukerprofil	24
3.2	Konsept	25
3.2.1	Konsept 1	25
3.2.2	Konsept 2	27
3.2.3	Konsept 3	28
3.2.4	Valgt konsept	30
3.3	Konsept for montering av innvendig elektronikk	31
3.3.1	konsept 1	31
3.3.2	Konsept 2	32
3.3.3	Konsept 3	33
3.4	Valg av material og form	34
3.4.1	Motor- og elektronikkmodul	34
3.4.2	Aksel og akselgjennomføring	35
3.4.3	Vinger	36
3.4.4	Plate	36
3.4.5	Klammer	36

3.5	Valg av transmisjon	36
3.5.1	Motor med planetveksel	37
3.5.2	Motor med snikkeveksel	37
3.6	Konstruksjon og beregninger	38
3.6.1	Motormodul	38
3.6.2	Aksel og akselgjennomføring	40
3.6.3	Vinge	44
3.6.4	Ermatorør	48
3.7	Plate og festeanlegg	51
3.8	Slepepunkt	52
3.9	Oppdrift	59
3.10	Kostnad	60
4	Resultat	61
4.1	Valg av konsept	61
4.2	Elektronikkmodul	61
4.3	Aksel og akselgjennomføring	61
4.4	Motormodul	63
4.5	Vinger	64
4.6	Slepepunkt	64
4.7	Oppdrift	65
5	Diskusjon og videre arbeid	66
5.1	Design	66
5.2	Motormodul	66
5.3	Vinge	66
5.4	Slepepunkt	66
5.5	Oppdrift og trykkutjevning	67
5.6	CFD-analyse	67
6	Konklusjon	68
	Bibliography	69
	Appendix	70

Figurer

1	Pitch-, yaw- og roll-vinkel	2
2	PULSAR	3
3	The Acrobat	4
4	Prototype fra 2018	4
5	Tidligere prinsipp for vingestyring	5
6	Prototype fra 2019	5
7	Prototype fra 2020	6
8	Styreprinsipp fra mekatronikk 2020	6
9	Tannhjulprinsipp fra mekatronikk 2020	7
10	Likevekt slepe-ROV	8
11	Viskositet sjøvann	9
12	Symmetrisk vingetverrsnitt	10
13	Usymmetrisk hydrofoiltverrsnitt	10
14	Ingen separasjon	11
15	Separasjon	11
16	Fritt-legeme-diagram av ROV	12
17	Styring- skyving av kabelfestet	14
18	Styring ved masseflytting	14
19	Styring ved masseflytting, vinkel	14
20	Styring ved å flytte en positiv oppdrift	15
21	Styring i vinkel med stempel	15
22	Styring med ballast	15
23	ROV i vinkel	16
24	Plassering av kabelfeste - 1	16
25	Plassering av kabelfeste - 2	17
26	Plassering av kabelfeste - 3	17
27	Plassering av kabelfeste - 4	18
28	Kabelvinkel - 1	18
29	Kabelvinkel - 2	18
30	Dreiebenk.	20
31	Fresemaskin.	21
32	Snekkeveksel	22
33	Planetveksel	23

34	Konsept 1	25
35	Illustrasjon	26
36	Konsept 2	27
37	Prototype av vinsjestyling	28
38	Konsept 3	28
39	Valgt konsept	30
40	Løsning for feste av innvendig elektronikk	31
41	Løsning for feste av innvendig elektronikk	32
42	Løsning for feste av innvendig elektronikk	33
43	Endebunn, sveisenippel og muffe	35
44	Aksel og akselgjennomføring - mekatronikk 2020	35
45	Motor med planet-girkasse	37
46	Planetgir - dreiemoment i forhold til omdreiningtall.	37
47	Motor med snikke-girkasse	38
48	Snekkemodul- 3D-modell	38
49	Planetmodul- 3D-modell	39
50	Aksel og akselgjennomføring- 3D-modell	40
51	Aksel og akselgjennomføring montert i snekkemodul	41
52	3D-MESH model av aksel	41
53	Ferdig SIM-Model	42
54	Displacement	42
55	VonMises	42
56	Displacement	43
57	VonMises	43
58	Skjær- og bøyemomentdiagram	44
59	NACA 0010-65	45
60	Volumsenter NACA-profil	45
61	Løftkoeffisient i forhold til angrepsvinkel.	46
62	Beregnet vingebredde	46
63	Modellert vinge	47
64	Snekkemodul med vinge	47
65	Modell av støpeform for vinge.	48
66	CFD-analyse av strømming bak vinge-1	49
67	CFD-analyse av strømming bak vinge-2	49
68	CFD-analyse av strømming bak vinge-3	49

69	T-kobling	50
70	GE, snittring og mutter.	50
71	Ermetorør montert-1.	50
72	Ermetorør montert-2.	51
73	Rørklammer.	51
74	Montert plate.	52
75	Nedbøyning i platen.	52
76	Oppsett for test av kabelfestepunkt.	53
77	Elastisk igangsettelse av bevegelse.	53
78	Utretting mot sleperetning.	53
79	Valgt festemetode.	54
80	Tenkt virkemåte av slepefeste.	54
81	Bøyer til taufeste.	55
82	Analysere av dragkraft.	55
83	Fritt-legeme-diagram uten elastisk tau.	56
84	Test av gummiline sin forlengelse.	57
85	Free body-diagram med elastisk tau.	58
86	Regneark for elastisk snor.	58
87	ROV med alle tau montert.	59
88	Regneark med beregnet netto oppdrift.	60
89	Regneark med kostnadestimat.	60
90	ROV med fiberduk	61
91	ROV med fiberduk	61
92	Ferdig maskinert motoraksel og gjennomføring	62
93	Ferdig montert motoraksel og gjennomføring	62
94	Resultat planetmodul.	63
95	Resultat planetmodul 2	63
96	Støpeform til vinge.	64
97	Resultat, motormodul med vinge.	64
98	3,5kg på gummiline.	65
99	Resultat test av forlengelse.	65
100	ROV med rør.l og gjennomføring	66

1 Introduksjon

Det skal i denne oppgaven utvikles en fjernstyrt farkost, også kalt ROV (*Remotely operated vehicle*), som blir slept av båt, og styres i dybden. Ved å slepe ROV-en fra båt kan en oppnå fordeler som lavere kostnad og enklere tilvirkning da ROV-en ikke har behov for egen propulsjon.

Denne oppgaven er en del av slepeROV-prosjektet ved NTNU i Ålesund. Det har tidligere blitt laget tre prototyper i prosjektet. To av dem ble laget i bachelor-oppgaver, den første i 2018 og den andre i 2019. Den tredje prototypen ble laget i faget mekatronikk i 2020.

Denne oppgaven er den ene av to bachelor-oppgaver i slepeROV-prosjektet i vårsemesteret 2021. Den andre oppgaven blir utført av automasjon. Automasjonstudenter arbeider videre med prototypen fra mekatronikkfaget 2020, der skal de gjøre tester i sjø, gjøre forbedringer av software, og koble nytt utstyr. Dette gjøres i samarbeid med Runde Miljøsentere.

I denne oppgaven fra produkt- og systemdesign, skal det utvikles flere konsept av en ny slepe-ROV. I samarbeid med veiledere skal det velges et konsept som det skal lages en prototype av. Det er automasjon som skal koble elektronisk utstyr, videreutvikle, og i hovedsak bruke ROV-en. Derfor vil automasjon bli sett på som en kunde i denne oppgaven, og brukerprofilen blir sett på som en automasjonstudent. I dialog med studentene fra automasjon-oppgaven, og prosjektleder i slepeROV-prosjektet skal det forsøkes å dekke ønsker og behov som de har for det fysiske designet.

ROV-en skal kunne:

1. Slepes av båt, og holde seg stabil.
 - En skal kunne slepe ROV-en uten at den snur seg, eller har forstyrrende bevegelser.
 - Slepekabelen er en tether-kabel som også forsyner ROV-en med strøm fra båt.
 - En skal kunne bruke mindre fritidsbåter.
2. Styres til en gitt dybde ved hjelp av automatiserte aktuatorer.
 - En trykksensor føler på vannsøyletrykket, og ROV-en sin dybde under havoverflaten regnes ut automatisk.
 - Ekkolodd på båt kommuniserer hvilken dybde, eller hvilken avstand fra havbunnen ROV-en skal styres til.
3. Bygges opp av moduler.
 - Moduler med spesifikke oppgaver og funksjoner kan gjøre det enklere å tilpasse ROV-en til ulike brukssituasjoner.
 - Moduler kan bidra med å ha bedre tilgang til reservedeler.
 - Moduler kan gjøre det enklere å feilsøke problemer.
 - Moduler kan gjøre det enklere å arbeide med ROV-en.
4. Være mottagelig for forskjellig utstyr for flere brukssituasjoner.
 - En skal kunne koble og frakoble utstyr ut i fra hva oppgaven til ROV-en er for hver tur.
 - Eksempler på utstyr er kamera, ekkolodd, side-scan sonar, oksygenmåler, turbidometer, salinometer, m.m.

1.1 Formål

Formålet med denne oppgaven er å utvikle et konsept, og bygge en prototype av en ROV som er enkel å tilvirke og enkel å tilpasse en tenkt brukssituasjon for hver tur. Det skal tilrettelegges for å dele løsninger, utstyrliste, tekniske tegninger og oppskrift på tilvirkning *open source*. Dette skal bidra med å gjøre det enklere å drive søk og kartlegging i havet, og med mulighet for å effektivt dekke store areal.

1.1.1 Miljøarbeid

Flere forurensende og ødeleggende forekomster ender opp i havet. Fiskeredskaper som mistes på havet ender ofte opp med å fortsette fisingen på havbunnen til ingen nytte. Dette fører til lidelse og død av dyreliv (Fiskeridirektoratet 2021). En slepe-ROV kan finne og logge posisjon for senere opphenting.

1.1.2 Søk

Ved søk etter forlis og/eller savnede mennesker skal man kunne rykke ut på kort varsel. En slepe-ROV bygget med sikre metoder med tanke på hindring av vann-inntrenging og håndtering av trykk, skal kunne være et pålitelig redskap for slikt arbeid.

1.1.3 Forskning

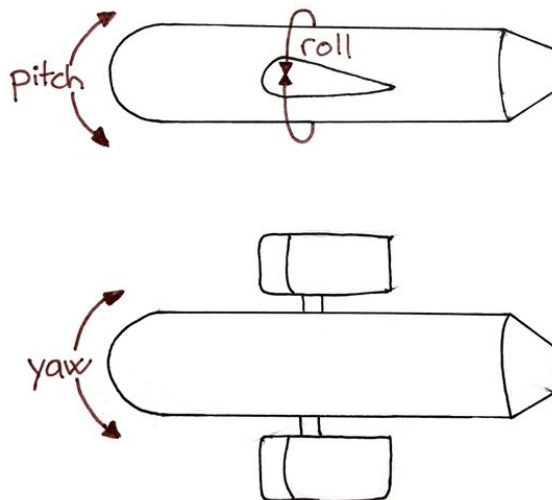
En slepe-ROV kan være et godt redskap til å hente informasjon og data fra havet som for eksempel kartlegging av havbunn, vegetasjon og dyreliv.

1.2 Problemstillinger

1.2.1 Oppdrift og stabilitet

Det er en ønskelig at ROV-en er tilnærmet vektløs i sjøvann. Dette for å unngå at aktuatorene som skal styre ROV-en må jobbe mot en betydelig kraft.

ROV-en må heller ikke kunne snu eller vende seg under bruk. Yaw-vinkel, pitch-vinkel og roll-vinkel, vist i Figur 1, må ligge rett i forhold til hastighet- og vannstrømretning.



Figur 1: Vinkler ROV-en kan ha i forhold til vannstrøm

1.2.2 Hydrodynamikk

For å kunne styre ROV-en forutsigbart må turbulenser og betydelige drag-krefter reduseres i størst mulig grad. Hvor og hvordan snordraget fra slepekabelen angriper har stor betydning for hvordan ROV-en oppfører seg under bruk.

1.2.3 Tilvirkning

Det er ønskelig at løsninger skal kunne kopierest og videreutvikles av andre. Derfor burde alle delene som blir kjøpt inn være hyllevarer av internasjonal standard. Annet nødvendig utstyr for bygging burde begrenses til det som er forventet at relevante utdanningsinstitusjoner har tilgjengelig.

1.2.4 Material

Styrke, sjøvannsbestandighet, pris og vekt er avgjørende når materiale skal velges til de ulike delene i en ROV. Korrosjon i metaller kan utvikle seg usynlig og forårsake plutselige brudd. Ved valg av metall-materiale må det også vurderes bruk av anoder eller overflatebehandling.

Materialer som ikke korroderer kan ha andre problemstillinger i sjøvann, som at det blir sprøtt, morkner, eller at det absorberer vann.

1.2.5 Elektronikk

Det må tilrettelegges for enkel tilgang til elektronikken ombord i ROV-en. Det er ønskelig at sensorer og annet elektronisk utstyr enkelt skal kunne kobles på eller av avhengig av brukssituasjon for hver tur. Det må legges til rette for tilstrekkelig med festeanlegg for utvendig utstyr.

1.3 Lignende produkt

1.3.1 Towfish

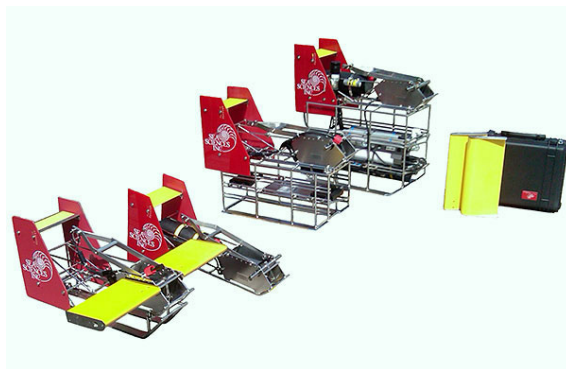
Towfish er et begrep for datasamlende utstyr som blir slept av båt. Det finnes flere ulike produkter uten automatisert styring som faller under denne kategorien. Kongsberg sin Pulsar (Kongsberg 2021), vist i Figur 2, er en towfish som bruker en side scan sonar til å ta bilder av havbunnen.



Figur 2: PULSAR towfish

Kilde: Kongsberg

1.3.2 The Acrobat



Figur 3: The Acrobat

Kilde: Sea Sciences Inc

The Acrobat, vist i Figur 3, er en slepe-ROV produsert av Sea Sciences Inc fra USA (Sea Sciences INC 2021). The Acrobat er bygget opp av et rammeverk av rustfritt stål og styres i dybden med motorstyrte vinger. Den har to vertikale halefinner, og en manuelt justerbar spoiler. The Acrobat kommer i forskjellige utgaver og størrelser.

1.4 Tidligere oppgaver fra NTNU i Ålesund

Denne oppgaven er en fortsettelse på et prosjekt hos NTNU i Ålesund, og det har fra tidligere blitt utviklet tre andre prototyper.

1.4.1 Bachelor-prosjekt 2018



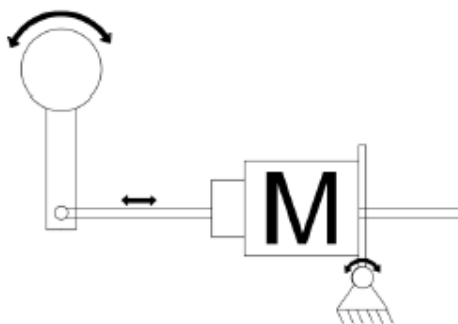
Figur 4: Prototype fra 2018

Kilde: Towed ROV bachelor thiesis, Homdrom mfl. 2018

Figur 4 viser den første prototypen som ble laget i prosjektet. Den ble laget i anledning av en bachelor-oppgave i 2018.

Akrylplast-plater ble boltet til et rammeverk av aluminiumprofiler. Beholderene for elektronikk ble 3D-printed i PLA-plastikk, som så fikk påført et gummi-belegg for å hindre vanninntrenging. Beholderene for elektronikk ble også fylt opp med rapsolje for å beskytte deler mot vanninntrenging, og for å hjelpe med å håndtere kreftene forårsaket trykkforskjellene utvendig og innvendig.

Vinger ble brukt for styring i dybde, og for å justere roll-vinkel. Disse ble 3D-printet i PLA-plastikk. Vingene ble rotert av lineæraktuatorer drevet av steppermotorer. Styreprinsipp illustrert i figur 5.



Figur 5: Tidligere prinsipp for vingestyring

Relevante erfaringer:

1. Hydrodynamikk.

- Bruke et bedre forhold mellom høyde, bredde og lengde på ROV-en. Dette for å forbedre stabilitet.
- Spissen i front er ikke optimal med tanke på å redusere drag-krefter.
- Vingeplassering over massesenter virker stabiliserende.

2. Design

- Unngå slark i vingene.
- Benytte seg av sylindriske former for å håndtere trykk bedre.
- Forenkle montering.

3. Material

- 3D-print i PLA holder ikke tett over tid, og er ikke egnet for å håndtere trykk. PLA ble også brukt som flensmateriale, men ga etter i boltehull slik at pakninger ikke ble komprimert nok til å holde tett.
- Bruke sterkere materialer.

1.4.2 Bachelor fra 2019



Figur 6: Prototype fra 2019

Kilde: Towed ROV bachelor thesis, Haram mfl. 2019

Figur 6 viser en prototype som ble laget i anledning av en bachelor-oppgave i 2019.

Det er brukt samme bygge- og styreprinsipp som i prototypen fra 2018. Annet enn et forbedret lengde-, bredde- og høyde-forhold ble de meste forbedringene gjort i elektronikken.

Istedenfor 3D-printede beholdere for elektronikk, var det i denne prototypen brukt bokser av sammenlimte akryl-plastikkplater. Boksene hadde flenser i samme akryl-material for å tette med blindflens og gummipakning. Denne løsningen fikk også problemer med lekkasje, da akrylflensene sprakk i boltehullene på flensene. Sanitær-silikon som ble brukt som lim fikk ikke tilstrekkelig feste til akrylplatene.

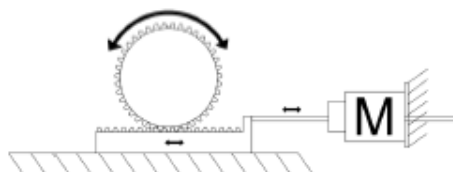
1.4.3 Mekatronikkprosjekt 2020

Figur 7 viser en prototype som ble laget i anledning av en oppgave i faget mekatronikk i 2020.



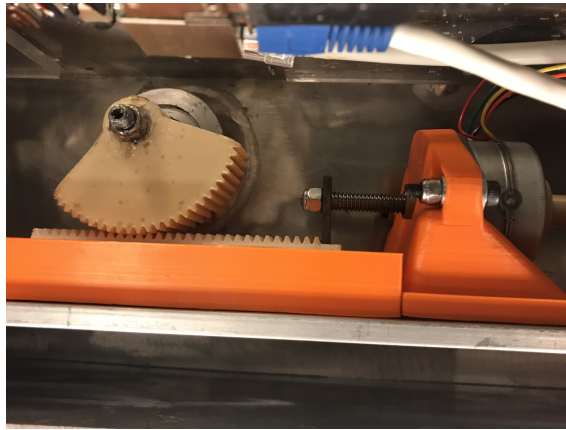
Figur 7: Prototype fra 2020

Denne prototypen er en kasse bygd opp av sammensveiste aluminiumsplater. Begge motorene og all elektronikk utenom kamera er montert inne i kassen. Kamera er montert inne i en separat kuppel, med tett kabelpenetrering inn til kassen. Det ble brukt opp igjen utstyret fra 2019-prototypen. Vingestyringen ble utført av de samme lineæraktuatorene, bare at det i denne versjonen ble brukt tannhjul og tannstang som vist i Figur 8 og 9.



Figur 8: Styreprinsipp fra mekatronikk 2020

Kilde: Towed-ROV Semester report in Mechatronics, NTNU 2020



Figur 9: Tannhjulprinsipp fra mekatronikk 2020

Kilde: Towed-ROV Semester report in Mechatronics, NTNU 2020, (Ringdal mfl. 2020)

Denne prototypen hadde ingen problemer med lekkasjer, og blir brukt for å videreutvikle elektronikk og datastyring i en bachelor-oppgave for automasjon. Kombinasjonen med tannhjuløsning, to opplagringer på vingearsel og tett akselgjennomføring fikset tidligere problemer med slark i vingene.

Formen er ikke optimal med tanke på hydrodynamikk.

Relevante erfaringer:

1. Hydrodynamikk.

- Fronten må være mer egnet for å forflytte seg i vann.
- Alle utstikkere vil skape turbulenser.

2. Design

- Benytte seg av sylindriske former for å håndtere trykk bedre.
- Forenkle montering.
- Koblinger i transmisjonsystem var ikke egnet til å overføre dreiemoment. Måtte limes.

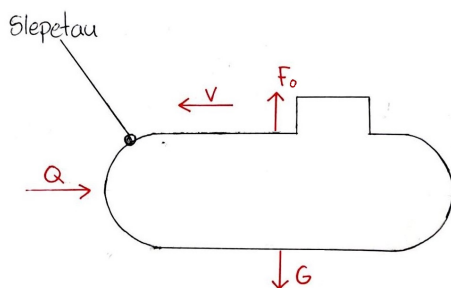
3. Material

- Aluminium-gjenger har begrenset levetid ved gjentatt montering og demontering.
- Plassering av slepekabel over massesenter førte til at ROV-en snudde seg.

2 Teroretisk Bakgrunn

2.1 Mekanikk

2.1.1 Oppdrift



Figur 10: Forskjellen mellom oppdriftskraft F_O og tyngden G avgjør om ROV-en synker eller flyter

Om ROV-en synker, flyter eller ligger nøytralt i sjøvann kommer an på ROV-en sitt forhold mellom vekt og volum. Arkimedes lov viser at oppdriftskraften er lik tyngden på den fortrengte fluid, som vist i Ligning 1.

$$F_O = \rho \cdot V \cdot g \quad (1)$$

Oppdriftskraften F_O virker i motsatt retning av tyngden G som er ROV-en sin totale masse m multiplisert med tyngdeakselerasjonen g .

Oppdriftskraften angriper fra volumsenter av den fortrengte væsken, og tyngden angriper fra ROV-en sitt tyngdepunkt.

2.1.2 Hydrostatisk trykk

Etterhvert som en ROV styres nedover i dybde, vil en større mengde sjøvann befinne seg over den. Tyngden av vannet som ligger over ROV-en fører til et trykk som en kan si virker likt over hele ROV-geometrien. En finner det hydrostatiske trykket med Ligning 2.

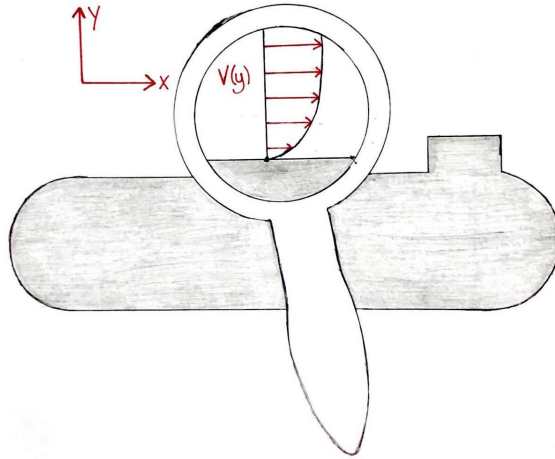
$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (2)$$

Rov-en må utformes slik at den kan håndtere trykket, eller at den utligner trykkforskjellene.

2.1.3 Viskositet

Det er sjøvann som skal strømme rundt ROV-geometrien. Sjøvann er en newtonsk væske, og viskositeten kan beskrives med newtons viskositetslov.

Om en deler opp vannstrømmen i flere lag fra der vannet er i kontakt med ROV-en og utover, vil lagene ha ulike hastigheter i forhold til hverandre. Mellom lagene med ulike hastigheter er det skjærspenninger.



Figur 11: Sjøvannets hastighet ved ROV-kroppen

Som vist i Figur 11, er den relative hastigheten til sjøvannet i laget inntil ROV-kroppen null, og hastighetsforskjellen i lagene oppover langs y-aksen øker eksponentielt. Den eksponentielle økningen fører til større hastighetsforskjeller i lagene nært ROV-kroppen og derfor større skjærspenninger, og mindre hastighetsforskjeller i lagene lengst unna ROV-kroppen og derfor mindre skjærspenninger. Den dynamiske viskositeten μ_d , og beskrives av newtons viskositetslov som vist i Ligning 3

$$\tau = \mu_d \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

I beregninger benytter man seg også av den kinematiske viskositeten, som er den dynamiske viskositeten dividert på væskens massetetthet som vist i Ligning 4

$$\nu_k = \frac{\mu_d}{\rho} \quad (4)$$

2.1.4 Strømning

Strømningen i en fluid skilles mellom laminær og turbulent. Strømningen av sjøvann rundt en ROV under slep i en gitt hastighet kan opptre tilnærmet rettlinjert rundt ROV-geometrien. Dette kalles laminær strømning. Ved en økning i slepehastigheten kan sjøvannsstrømningen rundt ROV-geometrien bli kaotisk med tilfeldige bevegelser i ulike hastigheter. Dette kalles turbulent strømning.

De to strømningstypene vil påvirke en slepe-ROV ulikt. En kan anslå strømningstype på bakgrunn av geometrien til legemet som fluiden beveger seg i eller rundt, massetettheten til fluiden, viskositeten til fluiden, og hastigheten til fluiden, ved å benytte seg av reynolds' tall, vist i Ligning 5.

$$R_E = \frac{\rho \cdot v \cdot L_k}{\mu_d} = \frac{v \cdot L_k}{\nu_k} \quad (5)$$

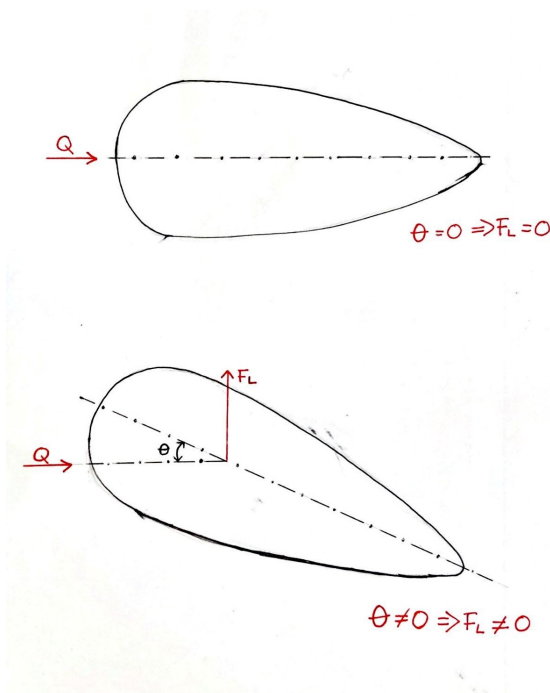
Reynolds' tall er et forholdstall mellom treghetskrefter og viskøse krefter. Den karakteristiske lengden L_k avhenger av geometrien som strømningen beveger seg i eller rundt, som for eksempel lengden av en hydrofoilprofil eller den indre diameteren av et sirkulært rør.

Dersom det er de viskøse kreftene som dominerer, vil strømningen ha en tendens til å være laminær, og når treghetskreftene dominerer har strømningen en tendens til å være turbulent. Men reynoldstallet må tolkes ut i fra hver enkelt situasjon for å kunne anslå strømningstype.

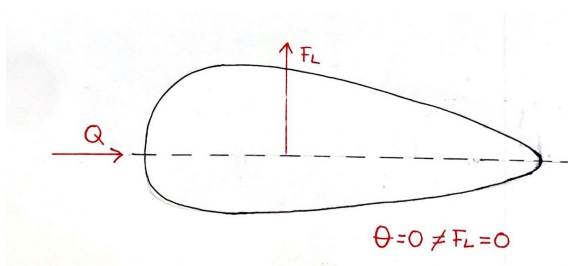
I tillegg til å anslå strømmingstype, blir reynoldstallet brukt til å finne andre verdier som er relevant for videre berekninger, som for eksempel løftkoeffisienter.

2.1.5 Løft

En kan få forutsigbare løftkrefter F_L dersom geometrien til legemet som beveger seg gjennom en væske fører til forskjellige strømningshastigheter på over og undersiden. Dette kan oppnås ved en spesiell geometri, eller ved en vinkel i forhold til væskestrømmen. De ulike strømningshastighetene fører til trykkforskjeller som resulterer i en løftkraft som virker normalt på væskestrømmen, og angriper fra geometrien sitt volumsenter. Figur 12 og Figur 13 viser hvordan symmetriske og usymmetriske hydrofoilprofiler virker forskjellig på grunn av geometri og vinkling.

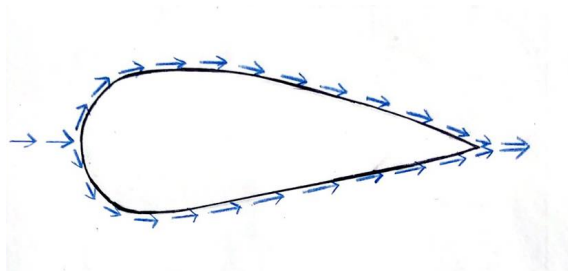


Figur 12: Et symmetrisk hydrofoiltverrsnitt genererer bare løftkrefter når den er vinklet i forhold til vannstrømmen

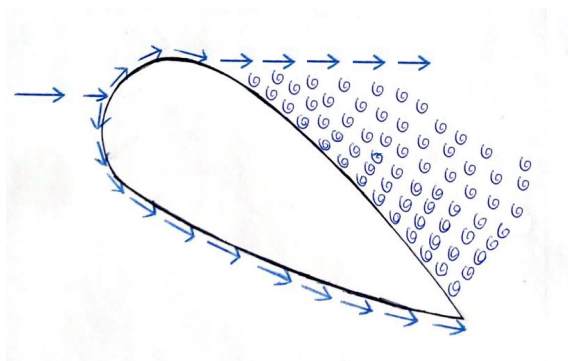


Figur 13: Et usymmetrisk hydrofoiltverrsnitt genererer løftkrefter, også når den ikke står i vinkel i forhold til vannstrømmen

En får ikke like forutsigbare løftkrefter med geometrier som skaper separasjon i vannstrømmen. Egnede geometrier kan skape separasjoner ved å ha for høy vinkel i forhold til vannstrømmen. Figur 14 viser et hydrofoiltverrsnitt uten separasjon, og Figur 15 viser det samme hydrofoiltverrsnittet med separasjon i vannstrømmen på grunn av for høy vinkel i forhold til vannstrøm (Chang 1970).



Figur 14: Ingen separasjon.



Figur 15: Separasjon på grunn av stor vinkel i forhold til vannstrømmen.

Løftkrefter kan beregnes med Bernoullis ligning. Bernoullis ligning beskriver friksjonsfri strømning uten tap av energi ved statisk trykk, dynamisk trykk og høyde trykk. I tilfellet med løftkrefter ser man på det statiske og dynamiske trykket i systemet. En sier at det totale trykket er konstant som vist i Ligning 6.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p = \text{konstant} \quad (6)$$

Denne ligningen kan bli løst ut slik at man får et uttrykk for en kraft F som vist i Ligning 7.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (7)$$

Kraften F er kraften fra det statiske trykket som virker over arealet A . For å finne løftkraften F_L , trenger en løftkoeffisienten C_L . Løftkoeffisienten tar for seg vinkelen legemet har i forhold til væskestrømmen, geometri, strømningsform, viskositet av væsken, m.m. Det er flere måter å finne løftkoeffisienter til bruk i beregninger. En av dem er å lese av tabell fra kjente profiler. Med løftkoeffisienten finner en løftkraften som vist i Ligning 8.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_L \quad (8)$$

Arealet A er i denne oppgaven det våte arealet.

2.1.6 Drag og turbulens

Når ROV-en blir slept, oppstår det motstand i sjøvannet den beveger seg gjennom. Dette er krefter som kalles drag. Alle geometrier som er banen til vannstrømmen vil resultere i drag- krefter. Etterhvert som sjøvannet skal fylle tilbake rommet ROV-en har forlatt underveis i slep, vil det

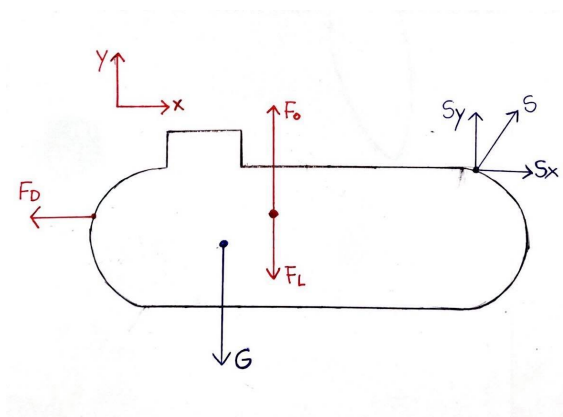
oppstå turbulenser. Selv om ROV-en ikke bruker egen energi til å bevege seg fremover, vil det være fordelaktig å minimere drag-krefter og turbulenser da de kan virke forstyrrende på styring og stabilitet. Dersom vannstrømmen separeres fra ROV-geometrien, kan et område med lavt trykk og sirkulerende strømninger føre til en større drag-kraft og vibrasjoner. Drag-krefter kan beregnes ved å bruke Ligning 9.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_D \quad (9)$$

Dragkoeffisienten C_D skal ta for seg geometri, turbulens, viskositet på væsken med mer. Arealet A er i denne oppgaven det projiserte arealet.

2.1.7 Statikk

Alle kreftene som virker på ROV-en under slep kan skape momenter og bevegelser som kan virke ødeleggende for prestasjoner. Noen av kreftene kan forandre størrelse, retning og angrepspunkt ut i fra situasjonen ROV-en befinner seg i. Aktuatorene som styrer ROV-en må kunne kompensere for slike forandringer, men det er avgjørende å forenkle arbeidet til styringsaktuatorene i designet, for å få en så effektiv og forutsigbar styring som mulig. En får oversikt over de forskjellige kreftene får en ved å sette opp et fritt-legeme-diagram som vist i Figur 16.



Figur 16: Fritt-legeme-diagram

1. Oppdriftkraften F_O
 - Angrepspunkt fra volumsenter av det fortrenge sjøvannet.
 - Vertikal retning mot havoverflaten.
2. Tyngden G
 - Angrepspunkt fra ROV-en sitt massesenter.
 - Vertikal retning mot havbunnen.
3. Løftkraften F_L
 - Angrepspunkt fra volumsenter av det fortrenge sjøvannet.
 - Forandrer seg i størrelse ut i fra vannstrømseparasjoner, vannstrømretninger, hastighet, og trykkforskjeller i omgivelsene.
 - Kan forandre retning 180° . Angriper normalt på væskestrømmen, enten mot havbunn eller mot havoverflate.
4. Drag-kraften F_D
 - Kan forandre angrepspunkt ut i fra prosjektert areal og trykkforskjeller.

-
- Forandrer seg i størrelse ut i fra vannstrømseparasjoner, vannstrømretninger, hastighet og trykkforskjeller i omgivelsene.

5. Snordraget S

- Angrepspunkt fra kabelfestet.
- Angriper i kabelen sin retning.
- Forandrer seg i størrelse etter dragkraften, løftkraften, kabelvinkel, og dersom slepe-fartøy akselererer.

Under en operasjon i en gitt hastighet i ønskelig dybde, må ROV-en kunne holde seg stabilt i likevekt. ROV-en ligger omgitt av sjøvann uten opplagringer, og en kommer ikke unna aktuatorer som må kompensere for skiftende krefter slik at summen av alle krefter og summen av alle moment er lik null, som vist i Ligning 10 og Ligning 11.

$$\sum F = 0 \quad (10)$$

$$\sum F \cdot s = \sum M = 0 \quad (11)$$

Når en vil at ROV-en skal settes i bevegelse enten i retning mot havbunnen eller havoverflaten, må en kraft eller flere krefter i ønsket retning overstige kreftene som angriper motsatt vei.

2.1.8 Hookes lov

Hookes lov beskriver elastiske egenskaper i materialer i den retningen en kraft virker, som vist i Ligning 12.

$$F = k \cdot x \quad (12)$$

Der k [N/m] er fjærkonstanten og x [m] er lengden materialet har strekt seg ut fra opprinnelig lengde.

2.2 Styring

Målet med styringen i denne prototypen er i hovedsak å kunne styre opp og ned i dybde.

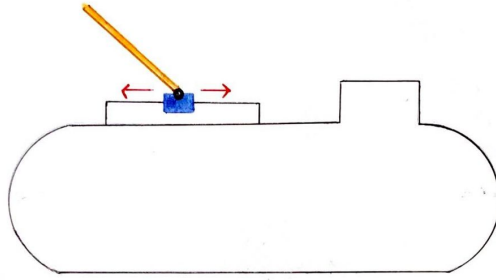
2.2.1 Vinger

I de tidligere slepe-ROV-prototypene fra NTNU i Ålesund har det blitt brukt to vinger til dybde-styringen. Det har blitt forsøkt med både hydrofoil og plate som vingeform.

Dersom vingene har hydrofoilprofil kan de vinkles i større grad enn plater før det oppstår separasjon i vannstrømningen. Dermed kan en oppnå høyere løftkrefter på samme vingereale ved å bruke hydrofoilprofil i forhold til plate. En plate er derimot mindre komplisert og enklere å tilvirke.

2.2.2 Flytting av kabelfeste

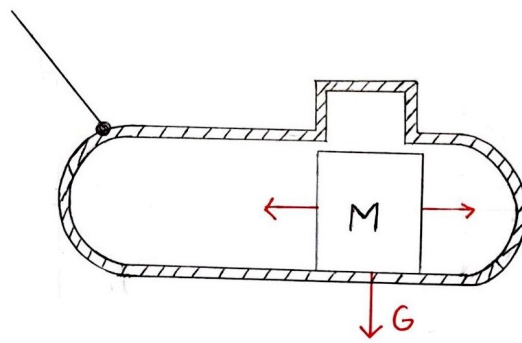
En kan flytte kabelfestet langs ROV-en sin lengderetning for å vinkle ROV-en i forhold til vannstrømmen. Ved å flytte kabelfestet kan man regulere innvirkningen av momentet skapt av snordraget i forhold til de andre kreftene som virker på ROV-en. Da vil en løftkraft virke på ROV-en så lenge den har en egnet geometri.



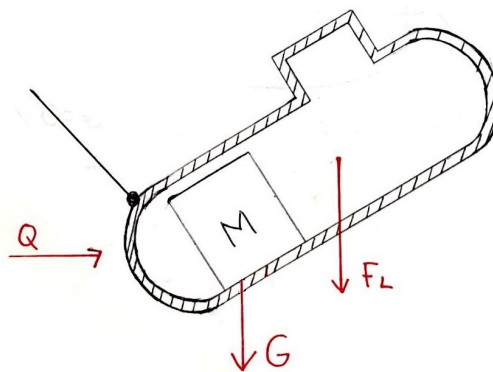
Figur 17: Å flytte kabelfestet kan styre ROV-en i dybde.

2.2.3 Vekt og ballast

En slepe-ROV kan styres i dybde ved å flytte på tyngdepunktet. Dersom en fører en vekt langs ROV-en kan en få ROV-en til å vinkle seg i forhold til vannstrømmen som illustrert i Figur 18 og Figur 19.

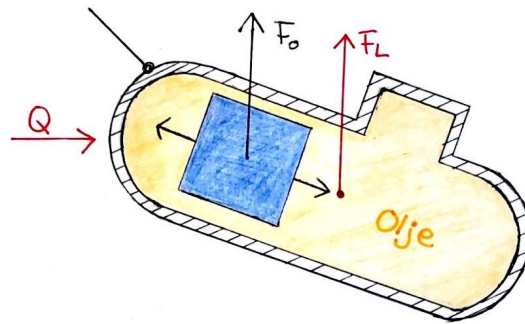


Figur 18: Ved å flytte en masse kan en vinkle ROV-en i forhold til vannstrømmen

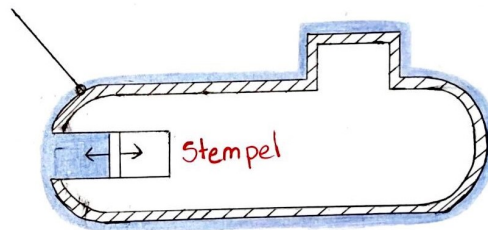


Figur 19: Massen er flyttet for å vinkle ROV-en

En kan også flytte på en gjenstand som gir positiv netto oppdrift i sitt punkt for å vinkle ROV-en mot vannstrømmen. Da må den positive oppdriften ta opp plass fra noe tyngre, som illustrert i Figur 20 . En kan også ta inn vann med et stempel som vil vinkle ROV-en som illustrert i Figur 21.

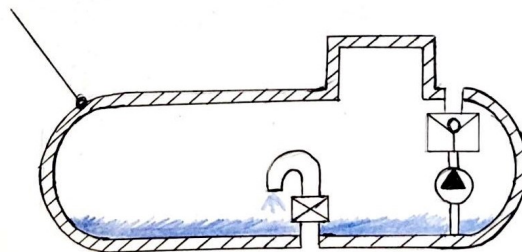


Figur 20: En gjenstand med høy oppdrift kan ta opp plass fra olje for å styre vinkel



Figur 21: Ved å ta inn vann i front, kan en vinkle ROV-en i forhold til vannstrømmen

En annen måte å styre en slepe-ROV, der en ikke bruke løft-krefter, er å regulere med ballast. Når den skal synke ned, må en ta inn nok vann slik at ROV-en sin tyngde blir større enn oppdriftskraften. Når den skal flyte opp må vann pumpes ut. Illustrert i Figur 22



Figur 22: Netto oppdrift reguleres ved å slippe inn og pumpe ut vann

2.2.4 Propell

En kan ta i bruk propeller til å styre i dybde. Propeller kan vinkle en slepe-ROV i forhold til vannstrømmen slik at en løftkraft virker på ROV-kroppen. Propeller kan også skyve ROV-en i en gitt retning.

Propellblader kan bli sett på som roterende vinger, og de kombinerte løftkreftene resulterer i en thrust-kraft.

2.3 Kabelfeste

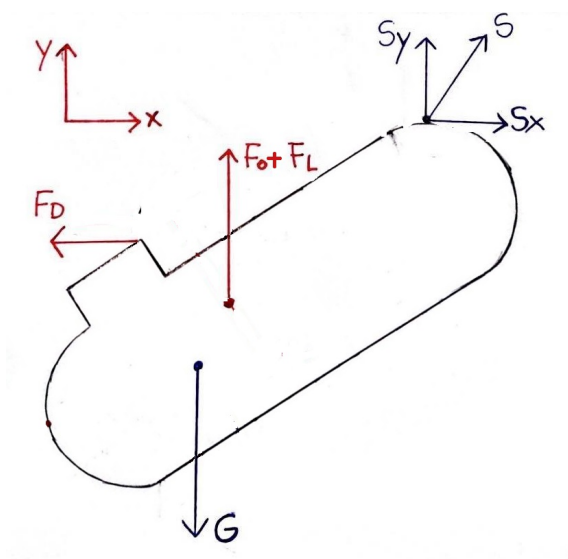
Kabelen som sleper ROV-en er en tether-kabel, som i tillegg skal forsyne ROV-en med elektrisk energi.

Som nevnt ovenfor i 2.1.7 statikk, vil et snordrag S angripe fra punktet taukabelen festes. Snordraget er en kraft som virker i taukabelen sin retning. Det er flere viktige problemstillinger som må vurderes før en bestemmer et festepunkt.

2.3.1 Plassering

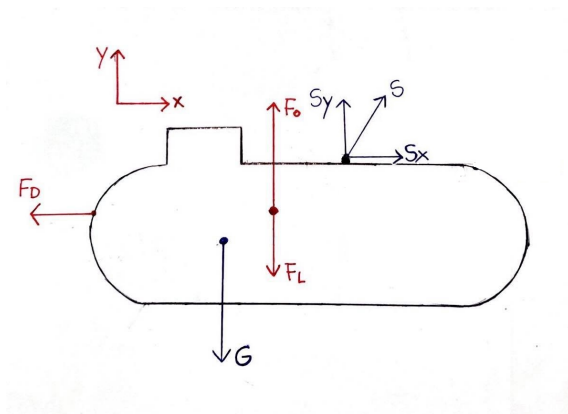
Hvor kabelfestet plasseres kommer an på hvor alle de andre kreftene virker, og omfanget av disse. Målet med plasseringen av kabelfestet er å tilpasse krefter slik at ROV-en kan styres i dybde, og oppnå likevekt i gitte hastigheter. Dette kommer an på ROV-geometrien, hvor alle krefter er plassert, og hva størrelsen av disse er.

Snordraget S fra kabelfestet vil skape et moment på ROV-en. Om ikke summen av alle momenter som virker på ROV-en er lik null i ethvert punkt, vil ROV-en rotere seg til en vinkel som vist i Figur 23 .



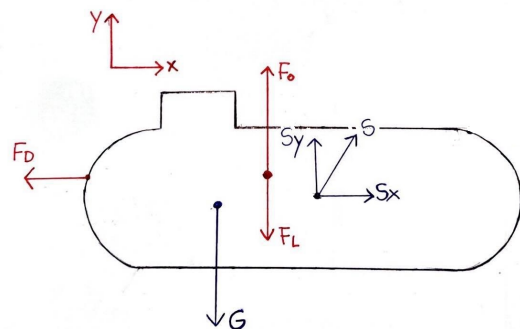
Figur 23: ROV-en kan rotere til en uønsket vinkel ved feil plassering av kabelfestet

En kan plassere kabelfestet slik at kraftarmen i minst mulig grad bidrar til en rotasjon. Det må sørges for at momentarmene til kraftkomponentene S_x og S_y ikke fører til at det skapes et moment som overgår eller bidrar til et moment som vinkler ROV-en uten at aktuatorene er i stand til å kompensere. I eksempelet som er illustrert i Figur 24, er snorkraften S flyttet lengre inn på ROV-en i x-retning, for å minimere virkningen momentarmen som kraftkomponenten S_y har i forhold til de andre kreftene.



Figur 24: Snordrag plassert lengre inn på ROV-en.

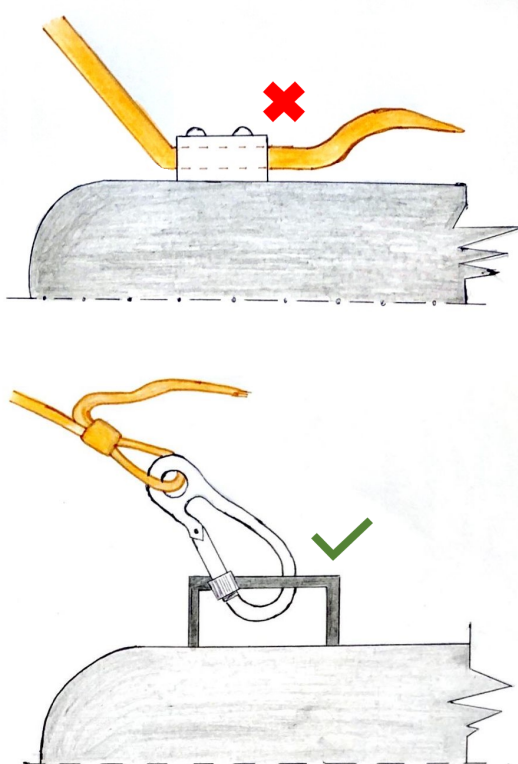
Snordrag-momentet kan reduseres ytterligere ved å flytte kabelfestet mot senter av ROV-en i y-retning som vist i Figur 25. Dette kan gjøres ved å ha festeanordning på hver side av ROV-en.



Figur 25: Snordrag plassert inn mot senter av ROV-en.

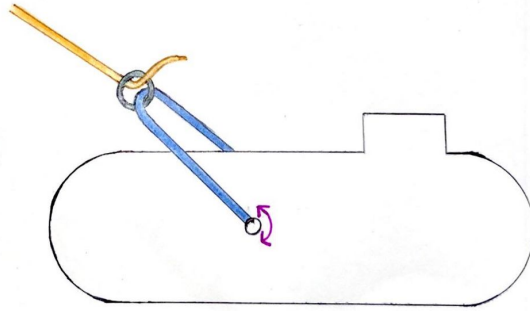
2.3.2 Festemetoder

Kabelfestet må tillate rotasjon slik at det ikke slites og deformeres i kabelen som vist i Figur 26. Dette vil føre til større slitasje, og kortere levetid på det punktet av kabelen.



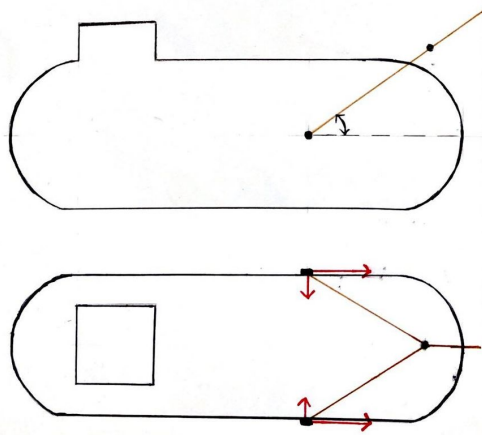
Figur 26: Regelmessige deformeringer i kabel må unngås.

Som nevnt i 2.3.1 kan en regulere omfanget av momentet skapt av x-komponenten av snordraget ved å justere kabelfestet sin plassering langs y-aksen, se Figur 25. En måte å gjøre dette på er illustrert i Figur 27.

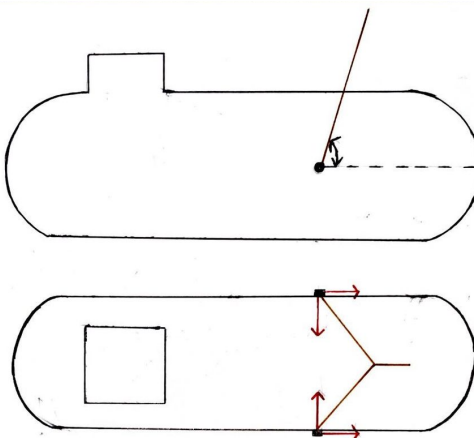


Figur 27: Ett feste på hver side av ROV-en.

Et slikt feste vil i tillegg bidra til å hindre uønskede bevegelser i yaw-vinkel. Kabelen kan bli sett på som flere ledd, noe som vil gi to frihetsgrader i flaten av ROV-en sett ovenfra i Figur 29 og Figur 28. Det er større krefter som skal til, fra for eksempel havstrømmer inn fra siden, for å rotere ROV-en om rotasjonspunktet fra taukabelen dersom vinkelen ikke er for bratt.



Figur 28: Mindre bratt vinkling av taukabel



Figur 29: Bratt vinkling av taukabel

Etterhvert som vinkelen blir brattere, vil den langsgående kraftkomponenten minke i omfang, og

den tversgående kraftkomponenten sin angrepslinje vil nærme seg å gå gjennom rotasjonspunktet. Dette vil føre til mindre motstand mot rotasjon om kabelen.

2.4 FEM-analyse

FEM-analyse (Finite Element Method) er en metode som blir brukt for å beregne deformasjoner og spenninger i en konstruksjon. FEM-analysene i denne oppgaven blir utført i Siemens NX. For å kunne utføre en FEM-analyse må det først lages en 2d eller en 3d- modell av delen som skal analyseres. Videre må det legges på en "mesh". Meshen kan være endimensjonal, todimensjonal eller tredimensjonal. Type materiale, antall element og eventuelle egenskaper til meshen, som tykkelse og tverrsnitt må defineres. Det samme gjelder grensebetingelser og last-tilfeller. Grensebetingelser som type opplager, last-tilfeller i form av krefter, moment og trykk.

Analysen gir informasjon om delens deformering, konturplott, stress og belastning.

2.5 Tilvirkning

2.5.1 TIG-sveising

Når en TIG-sveiser må en mate tilsettmaterialet manuelt. I noen tilfeller er det ikke nødvendig å bruke tilsettmateriale. En lysbue dannes mellom en wolframelektrode og arbeidsstykket med høy nok temperatur til å smelte arbeidsstykket. Hvor varm lysbuen er, og hvor mye av arbeidsstykket som smelter over tid, kommer an på hvor mye elektrisk strøm som går gjennom luftspalten til lysbuen. En justerer strømmengden i ampere på sveisemaskinen. Wolframelektroden stikker ut av en gasshylse. En dekk-gass, oftest argon, beskytter lysbuen og smeltebadet fra oksygen. Dette fordi den høye varmen fremskynder oksideringsprosessen i så stor grad at materialet ødelegges om det ikke er oksygenfritt der en sveiser.

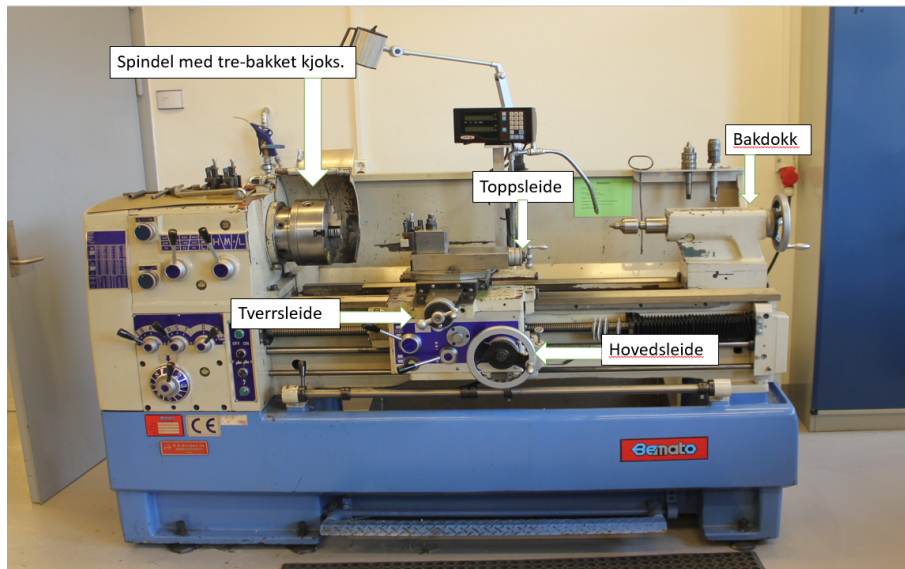
Annet enn sveiseren sin teknikk og riktig dekk-gass-innstillinger, er det strømmengde og sveisehastighet som avgjør et sveiseresultat. En strømmengde og hastighet må tilpasses material og materialtykkelse. En lav strømmengde krever en saktere sveisehastighet. Dette kan føre til at varmen sprer seg over et større område på arbeidsstykket.

TIG-sveising vil vanligvis føre til høyere temperaturer i sveisepunktet, og større spredning av varme i materialet enn andre sveisemetoder. Derfor vil en ha større utfordringer med sammentrekninger i sveisen ved TIG-sveising. Metallet utvider seg når det er varmt, og trekker seg sammen etterhvert som det kjøles og smelten størkner. Det oppstår indre spenninger som kan trekke og deformere i den sveiste delen. Aktuelle tiltak mot slike problemstillinger i dette prosjektet vil være å tilrettelegge designet slik at en minimerer deformering, og å sveise i riktig rekkefølge. Riktig rekkefølge kan være å starte med sveisene som befinner seg der det er mest motstand mot bevegelser og deretter diagonaler, eller en sveis som er speilvendt i forhold slik at kreftene fra de indre spenningene virker mot hverandre. Sveiserekkefølge må vurderes ut i fra situasjon. Jo høyere fasthet i metallet, jo høyere spenninger i sveiser. Stål vil trekke seg mer enn sveisbare aluminium-legeringer.

2.5.2 Dreieing

En dreiebenk består av en roterende spindel med en påmontert kjoks for feste av et arbeidsstykke. En dreiebenk blir brukt for å fjerne material fra et godstykke både utvendig og innvendig.

Vanligvis beveger en dreiestålet, som utfører skjæringen, bare i to akser. Z-aksen er langs arbeidsstykket, og X-aksen er på tvers av arbeidsstykket. Toppsleiden beveger dreiestålet i begge akser ved å stille inn en vinkel. Hovedsleiden beveger dreiestålet i X-aksen, og tverrsleiden beveger dreiestålet i Z-aksen. Figur 30 viser dreiebenken brukt i dette prosjektet.



Figur 30: Dreiebenk ved NTNU i Ålesund.

Ulike begrep innen dreining:

1. Turtall.

- Turtallet ved maskinering regnes i denne oppgaven som omdreininger per minutt. Turtallet for dreining av et arbeidsstykke vil variere etter diameter på arbeidsstykket, skjærhastighet $[v]$ også kalt mating (meter per minutt) og material. Skjærhastigheten bestemmes av materialet på skjærstålet. Dette kan man finne i verkstedhåndboken, eller med leverandør av skjærmetallet.

2. Grovdreining

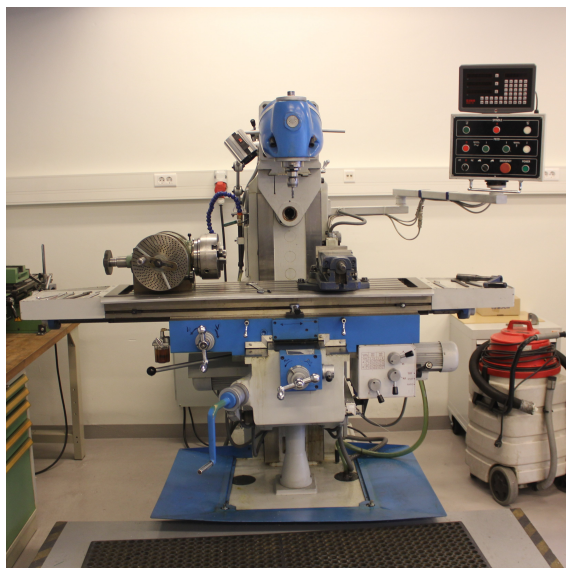
- Å grovdreie vil si å skjære vekk større mengder av materialet på et kutt". Ved grovdreining skjærer man av fra 1mm og oppover fra diameteren. Når en grovdreier bruker man også høy skjærhastighet for å unngå lange spon, og for at arbeidsstykket ikke skal bli varmt. Det meste av varmen fra skjæringen skal gå ut med sponet. Dette fører til grov materialoverflate og blir vanligvis brukt for å fjerne større mengder material før man findreier.

3. Findreining

- Findreining er et begrep som blir brukt for små kutt som fører til riktig diameter og - materialtoleranse. Ved findreining skjærer man kutt som resulterer i en diameter-redusering på under 1mm. Det er viktig å bruke lav skjærhastighet for å få fin materialoverflate. Innen findreining finner man også begrepene "målekutt" og sluttkutt". Målekutt er det nest siste kuttet som blir tatt før man måler en siste gang hvor mye som står igjen før riktig toleranse blir nådd. Når man har målt dette stiller man inn til den resterende diameteren og tar sluttkuttet.

2.5.3 Fresing

Ved fresing er det skjærstålet som roterer, og arbeidsstykket som er spent fast. Dimensjonene til arbeidsstykket har ingenting å si for utregning av turtall og skjærhastighet. En freser i tre akser, X, Y og Z som blir definert ulikt dersom en har en vertikal eller horisontal fresemaskin. Ved NTNU i Ålesund er det en vertikal maskin, der arbeidsstykket beveger seg i alle tre aksene, og skjærstålet har en fast posisjon. Sett mot maskinen er X-aksen sidelengs, Y-aksen mot maskin, og Z-aksen er oppover. Fresemaskinen som ble brukt i dette prosjektet vises i Figur 31.



Figur 31: Fresemaskin ved NTNU i Ålesund.

2.6 Materialer

2.6.1 Metall

De aktuelle metallene til bruk som materiale for en ROV, med tanke på tilgjengelighet, sjøvannbestandighet, standardiserte byggedeler, pris, og tilgjengelig utstyr på den mekaniske laben ved NTNU i Ålesund, er aluminiumlegeringer, kobberlegeringer og stållegeringer. Disse metallene må legeres for å oppnå egenskaper innen sveisbarhet, hardhet, styrke og korrosjonsbestandighet.

Metaller korroderer i ulik grad i ulike situasjoner. Kontakt med vann, og spesielt saltvann vil kunne fremskynde korrosjonsprosessen. Men også det at ulike metaller med forskjellig elektrokjemisk spenning blir montert sammen vil kunne bidra til økt korrosjon. Størrelsen av spenningsforskjellen mellom metallene avgjør hvor raskt det korroderer. Korrosjonen vil da gå mest ut over metallet med lavest spenning. Før en monterer sammen ulike metallegeringer, må de elektrokjemiske spenningene sammenlignes.

Elektrisk strøm som går over til metallkonstruksjonen fra et batteri via dårlige kontakter eller dårlig isolerte kabler (krypstrøm) vil også kunne fremskynde en korrosjonsprosess. Det er flere grunner til en fremskyndt korrosjonsprosess, men de nevnt ovenfor er de enkleste å gjøre tiltak mot.

En kan beskytte mot korrosjon som oppstår på grunn av omgivelsene ved å overflatebehandle metallet med for eksempel maling. En offeranode vil beskytte mot korrosjon som oppstår ved bruk av flere metaller. Offeranoden monteres i kontakt med metallkonstruksjonen, og vil gå i oppløsning til fordel for de andre metallene. En offeranode består av ulike legeringer av uedle metaller som sink, magnesium, indium og aluminium. Nødvendig vekt og overflateareal av offeranode finner en i tabeller som tar hensyn til omgivelser, og materialene og dimensjonene til det som skal beskyttes.

Metaller er bærekraftige materialer som i teorien kan gjenvinnes i det uendelige samtidig som de beholder egenskaper.

2.6.2 Plastikk

Plastikk kommer med flere ulike egenskaper. Mange typer plastikk egner seg godt i sjøvann og er ofte i tillegg sveisbare, støpbare og maskinerbare. En får og rimelige og pålitelige 3D-printere for plastikkmaterialer. Plastikk kan erstatte metall på flere områder, men må dimensjoneres annleddes da styrken vil være lavere. En kan heller ikke belage seg på friksjonskrefter i like stor grad som ved

metall. De aktuelle tekniske plastikktypene for denne ROV-en har en lavere massetetthet enn de aktuelle metalltypene. Dette gjør at en kan spare seg for en del vekt ved å benytte plastikk.

Plastikk brytes ned svært sakte, og kan være skadelig for miljø og dyreliv om det skulle løsne fra ROV-en. Dersom en plastikktype kan gjenvinnes, vil den ofte miste flere egenskaper, så en må begrense antall slidedeler av plastikk.

2.7 Transmisjon

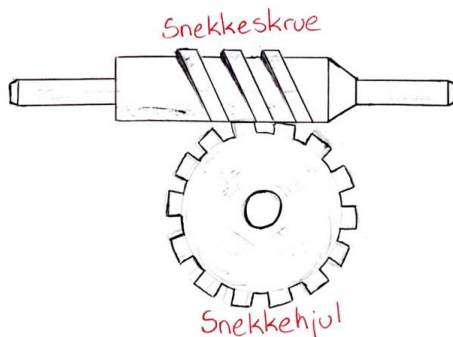
2.7.1 Steppermotor

Det skal benyttes steppermotorer i ROV-en. Dette var et ønske fra automasjonsstudentene som jobber med elektronikkdelen i slepe-ROV-prosjektet. En steppermotor gjør det mulig å telle stegene akselen gjør i vinkel, vanligvis $1,8^\circ$ pr. steg. Slik at en kan logge vinkelposisjonen til akselen. Dette har fordeler når en skal programmere automatisk styring.

Elektriske pulser sendes fra for eksempel en mikrokontroller til en stepperdriver. Dette får motoren til å bevege seg stegvis i vinkel i en gitt frekvens og i en gitt retning. Steppermotorer er vanligvis bare oppgitt med en elektrisk effekt, og dreiemomentet til akselen har ikke et lineært forhold til omdreiningshastigheten. Det følger ofte med en graf fra motorprodusent over hva dreiemomentet er ved aktuelle omdreiningstall.

Systemet som styrer en steppermotor teller bare stegene og vet ikke hva vinkelposisjonen er. Derfor må en benytte seg av enkoder som leser av posisjon, eller sensor til å nullstille i en kjent posisjon. Dette må tilrettelegges i designet.

2.7.2 Snekkeveksel



Figur 32: Snekkeveksel

Figur 32 viser snekkevekselen. Snekkeveksler brukes for det meste som turtallreducerende utvekslinger der snekkeskruen er koblet til den drivende akselen. I en snekkeveksel blir den drivende akselen og drevne akselen vinklet 90° i forhold til hverandre. En ofte nyttig egenskap snekkeveksler kan ha, er at det drevne snekkehjulet låses for uønsket rotasjon i snekkeskruen.

Det er gliding mellom gjengene på snekkeskruen og tennene til snekkehjulet. Glidingen gjør at snekkeveksler vanligvis har en lavere virkningsgrad enn girutvekslinger som ruller. En kan få høye virkningsgrader opptil 95% ved riktig materialvalg og smurning. En vanlig materialkombinasjon er snekkeskrue i stål, og snekkehjul i bronse. Tilvirkningskostnadene er vanligvis høye i forhold til andre utvekslingsmetoder, og spesielt om de blir konstruert for et lavt effekttap.

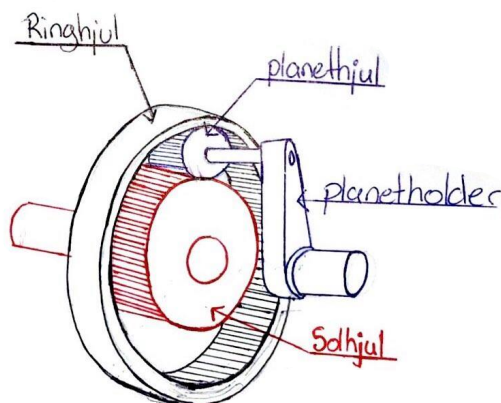
I en transmisjon med steppermotor og snekkeveksel for en ROV, er det en drivende skrue som er

aktuelt. I dette tilfellet får en et oversetningsforhold i som vist i Ligning 13.

$$i = \frac{n_{inn}}{n_{ut}} = \frac{z_2}{z_1} \quad (13)$$

z_2 er antall tenner på snekkehjulet, og z_1 er antall delinger. Antall delinger er hvor mange tenner på snekkehjulet som skyves frem av en omdreining på snekkeskruen.

2.7.3 Planetveksel



Figur 33: Planetveksel

Figur 33 viser planetvekselen. I et planetgir er det tre elementer som sørger for utveksling. Solhjulet, planethjulene og ringhjulet, som alle har samme tannhjulmodul. Det er forholdet mellom diameterene på hjulene som avgjør utvekslingen. Så lenge det blir brukt mer enn to planethjul, vil det ikke være bøyemoment på akslene. Ved å bruke planetgir får en utvekslingen langs drivakselens senterakse, og flere planetgir kan kobles i serie for å øke utvekslinger, eller å kunne veksle mellom nedgiring, oppgiring og revers. Dette kan gjøres ved å veksle mellom hvilket hjul som har den drivende eller utgående akselen, hvilket hjul som er fastlåst, og hvilken aksel planetholderen er tilkoblet. En kan veksle mellom å låse eller åpne opp for bevegelser i enkelte hjul ved å bruke en clutch. Ved å låse alle hjulene kan systemet kjøres direkte uten utveksling.

I tilfellet med steppermotor til en ROV, er det sannsynlig at det er nedgiring/reduksjon som er aktuelt. En steppermotor er i stand til å skifte dreieretning, så girkassen blir avgrenset til nedgiring forover. En vil da ha ringhjulet på inngående aksel, planetholderen på utgående aksel og fastlåst solhjulet. Oversetningforholdet i blir som vist i Ligning 14.

$$i = \frac{n_{inn}}{n_{ut}} = \frac{z_1 + z_3}{z_3} \quad (14)$$

Der tanntallet til solhjulet er z_1 , og tanntallet til ringhjulet er z_3 . En typisk verdi for virkningsgraden er 97% for hver planetveksel i girkassen.

3 Produktutvikling

3.1 Brukerprofil

ROV-en kan deles opp i to hovedgrupper av brukere som det fysiske designet må ta hensyn til.

1. Teknisk bakgrunn.

- Skal montere, koble, bytte og justere elektronisk utstyr.
- Håndterer vanlige verktøy.
- Vil ha enkel tilgang til elektronisk utstyr uten tidskrevende og komplisert demontering.
- Vil ha fleksible festeanlegg til utstyr.
- Vil ha plass til å komme til med verktøy.

2. Ingen teknisk bakgrunn.

- Skal bruke ferdig tilpasset med elektronikk.
- Ønsker ikke å måtte bruke verktøy.
- Bare interessert i å hente ut data fra havet.
- Uvitende om svake punkt.

Felles for begge:

- Vil unngå tunge løft.
- Vil ha godt grep ved løft.
- Må være ukomplisert å sjøsette og ta på land igjen.
- Må være håndterbar på land.

Brukeprofilen til denne ROV-en er en automasjonsstudent. Et kort intervju ble gjort med automasjonsstudentene som var med på å utvikle prototypen fra mekatronikk-prosjektet 2020.

Hva er det perfekte fysiske designet av en slepe-ROV?

Svar:

- Robust, må tåle å bli brukt/få litt juling.
- Eventuelle utsatte deler burde være enkle å montere/demontere.
- Bærbar for to personer 50-100 meter.

Hva liker du med dagens ROV?

Svar:

- God plass til å jobbe med elektronikk.
- Skrog er robust.

Hva misliker du med dagens ROV?

Svar:

- Skjøre fester til vinger.
- Tung med olje.
- Komponenter utsatt for skade ved flytting.
- Lite plass til nye utvendige komponenter, og tungvint å feste disse.

I prioritert rekkefølge, hva er de viktigste egenskapene til det fysiske designet av en slepe-ROV til deres bruk?

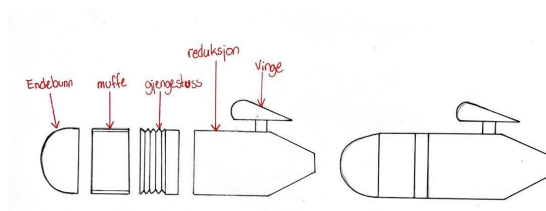
Svar:

1. Bærbar
2. Fleksible festeanlegg for utstyr.
3. Robust.
4. Enkel tilgang til utstyr.
5. Tilgang med verktøy.
6. Vanlige verktøy.

3.2 Konsept

I den tidlige fasen av produktutviklingen ble det skissert ulike konsept for en slepe-ROV. Konseptene ble presentert for veiledere som kom med innspill og ønsker.

3.2.1 Konsept 1

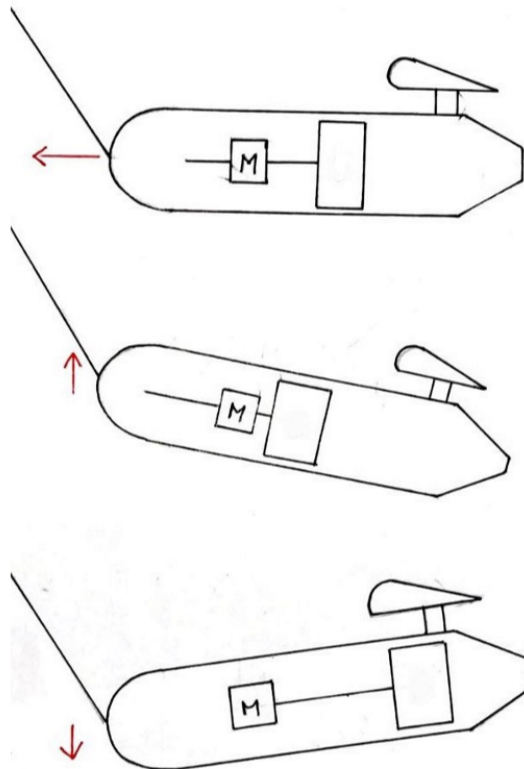


Figur 34: Skisse av konsept 1

Figur 34 viser det første konseptet som ble jobbet med. I dette konseptet ble det sett på om det var mulig å styre ROV-en uten mekaniske bevegelser fra innsiden til utsiden av ROV-en. På denne måten kunne man unngå vanninntrengning og få en helt tett ROV.

Skroget er formet som en torpedo og er godt egnet til å håndtere trykkforskjellene mellom sjø og innvendig ROV. I tillegg til gode egenskaper mot trykk, er den sylindriske formen gode hydrodynamiske egenskaper.

ROV-en er moduloppbygget med endebunn, muffe, gjengestuss og reduksjon som er vanlige standardiserte deler (se 3.4.1 for bilder og beskrivelse av disse delene). Dette medfører at det er enkelt å justere lengden på ROV-en etter ønske. Innvendig elektronikk er tenkt å huses i endebunnen.



Figur 35: Illustrasjon av tenkt manøvrering

Figur 35 viser hvordan det var tenkt å styre ROV-en i dybden. Dette konseptet går ut på å kunne flytte en masse med positiv netto oppdrift som er omgitt av olje, som deretter vinkler ROV-en i vannet. Funksjonen er forklart i 2.2.3 Vekt og ballast på side 14. I dette tilfelle var det tenkt å ha en lineæraktuator som skyver massen i horisontal retning. Vingen er tenkt å hjelpe til med stabilitet, og for å øke løftkreftene.

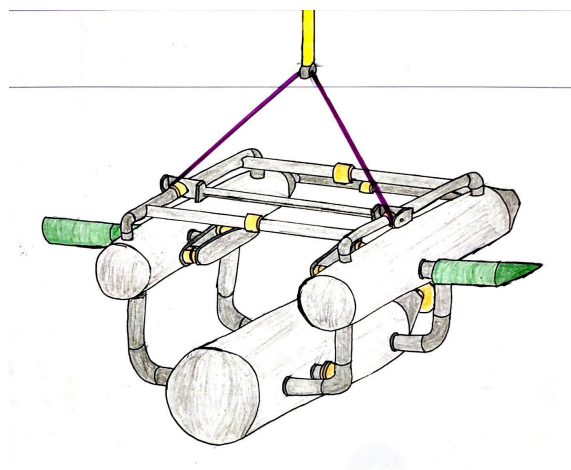
1. Fordeler.

- Godt egnet mot trykkforskjeller
- Standardiserte deler
- Godt sikret mot vanninntrenging.
- Enkel geometri
- God hydrodynamisk form
- Modul-opbygget
- Få byggedeler, rimelig byggekostnad.

2. Ulemper.

- Vanskelig å unngå rotering uten vinger på sidene
- Kan være vanskelig å få godt grep for å demontere
- Klønete geometri mtp. løft og transport
- Lite muligheter for å justere festet på tau
- Gir bare justeringsmuligheter i pitch-vinkel.
- Lite anlegg for feste av utvendig utstyr.

3.2.2 Konsept 2



Figur 36: Konsept med trinsesystem

Figur 36 viser et konsept der det ble det sett på om en kunne utnytte mekaniske fordeler med vinsjer og trinser.

Elektronikk og annet utstyr ville blitt plassert i det nederste røret. Røret ville blitt fylt med matolje for ytterligere beskyttelse mot vanninntrenging. Rørene over skulle ha positiv netto oppdrift sammen med vingene. Ved å ha større tyngde under, og oppdrift over, ville ROV-en blitt stabil mot å rotere i roll-vinkel.

Vingestyringen ville bli gjort av steppermotorer som roterte en todelt trommel. En arm med en trinse i hver ende er montert på vingeakselen. To vaier går fra hver sin del av trommelen, rundt en trinse, og tilbake til et feste på trommelen. Dette oppsettet gjør at snorkraften dobles, og en har momentarm om vingeakselen. Siden det er samme vinkelhastighet og diameter på hver del av trommelen, vil den ene delen kunne slippe ut vaier mens den andre rullet til seg vaier i like stor grad.

Vinsj og vaier skulle brukes til å skyve kabelfestet langs ROV-en sin lengderetning. Dette for å justere i pitch-vinkel. To kabelfester skulle gli med plastikkforinger over ett metallrør. En todelt trommel lik de til vingestyring skulle bli montert på aksel fra steppermotor på ROV-en sin bakende. Trinser på egne festeanlegg mellom de to øverste rørene skulle gjør det mulig å doble snorkraften.

En prototype av styringssystemet for vingene ble 3D-printet og testet, som vist i Figur 37. Vaiersystemet fungerte og ga gode mekaniske fordeler. Et problem var at vinkelhastigheten til vingeakselen var synkende jo mer momentarmen vinklet seg. Dette ville ha ført til et mer komplisert programmeringsarbeid.



Figur 37: Prototype av to-delt vinsj

Etter samtale med veiledere ble det poengtert at selv om torpedoformen egner seg bra hydrodynamisk, vil flere ved siden av hverandre ødelegge disse egenskapene. Flere geometrier som ben og anlegg for utstyr måtte også ha kommet med, og disse ville ha bidratt til ytterligere til hydrodynamiske forstyrrelser.

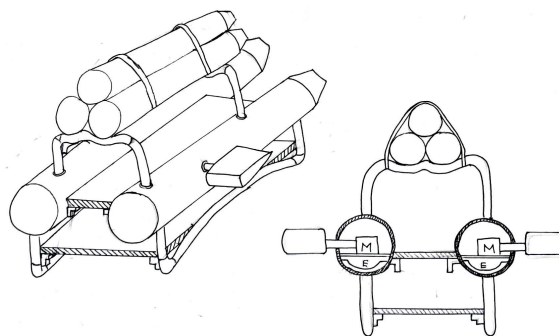
1. Fordeler.

- Rør håndterer trykkforskjeller.
- Kan bruke standardiserte hyllevarer.
- Enkelt å tre vaier, og å feste vaiere.
- Vaier gir mulighet for større toleranser under tilvirkning.
- Gode mekaniske fordeler med rimelige motorer uten gir.
- Rimelige byggevarer.

2. Ulemper.

- Vegetasjon o.l. kan sette seg fast i konstruksjon og styresystemer.
- Klønete geometri med tanke på håndtering og løft.
- Usikkert hvor godt flytting av kabelfestet fungerer i praksis.
- Mange ledd
- Forandringer i vinsjen sin vinkelhastighet.

3.2.3 Konsept 3



Figur 38: Motor på vinge

I konsept 3 ble det sett på om det var mulig å bruke rør av forskjellige material for å kunne justere oppdrift etter behov.

Tanken var å kunne trekke fra og legge til rør på toppen av ROV-en etterhvert som nytt elektrisk utstyr ble montert på utsiden. Denne løsningen ville gjort det enkelt å regulere oppdriften. Å for eksempel bruke PVC-rør ville gjort at ROV-en ble lettere enn ved bruk av bare metallrør.

Permanent elektronikk og motor ville blitt fordelt mellom de to nederste rørene. Å kunne benytte seg av to rør ville gitt god plass til montering av elektronikk. Rørene ble tenkt å være av stål. I likhet med konsept 2, blir rørene fylt med matolje for å beskytte elektronikken mot vanninntrenging. For å feste utvendig elektronikk var det tenkt å sveise vinkler der plater kan festes. Som vist i Figur 38 er det mulighet for å ha flere plater dersom behovet oppstår. Dette ville gitt god plass til å feste utvendig utstyr.

For å unngå vaiere og trinser ble motor plassert rett på vinge. Her er det tenkt å bruke en step-motor. Vingene ville også gitt positiv netto oppdrift.

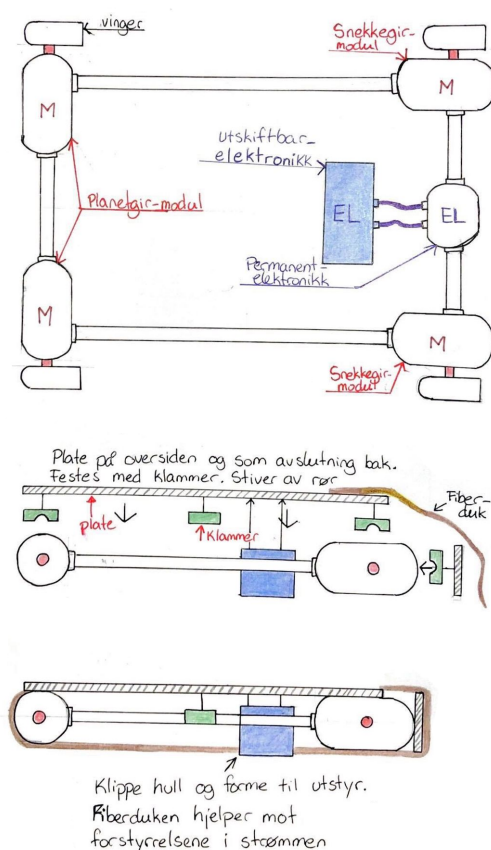
1. Fordeler.

- Tyngdepunkt nede og oppdrift oppe.
- Enkelt å regulere oppdrift.
- Motor rett på vinge.
- God plass til elektronikk.
- Enkelt å justere vekt.

2. Ulemper.

- Hydrodynamikk ikke optimal, utvendige komponenter forstyrrer.
- Klønete å håndtere.
- Komplisert mtp. moduloppbygging.
- Tidkrevende med alle rørene som skal bøyes og tilpasses.

3.2.4 Valgt konsept



Figur 39: Valgt konsept

Med det valgte konseptet, vist i Figur 39, kan en montere et ønskelig antall motormoduler og elektronikkmoduler som er koblet sammen av mindre rør. Kabler kan trekkes gjennom rørene. Oppå de sammenkoblede modulene og rørene monteres en plate som andre deler kan monteres på. Disse delene blir da montert på undersiden av platen slik at de omringes og beskyttes av modulene. En fiberduk eller gummiduk kan trekkes og tilpasses rundt den åpne bunnen for å gjøre den mer hydrodynamisk egnet. Dette konseptet bruker vinger for styring i dybde.

Ved å klamre rørene til platen vil en kunne stive av hele konstruksjonen. De mindre rørene er tenkt å være koblet med snittringarmatur/ermeto, slik at ROV-en sin lengde og bredde kan forandres ved å kappe ønsket rørlengde og dra på mutter og snittring. Dette gir tette og sikre koblinger. Det finnes mange ermetodeler som T-koblinger, albuer og skjøter som en kan koble på rørene til forskjellig utstyr, eller for å bygge i forskjellige retninger. En kan da også bygge i høyden. I tillegg til mye festanlegg på platen, vil plastikkammer med sveiseplate gjøre det mulig å lage robuste festebreketter langs ermeto-rørene.

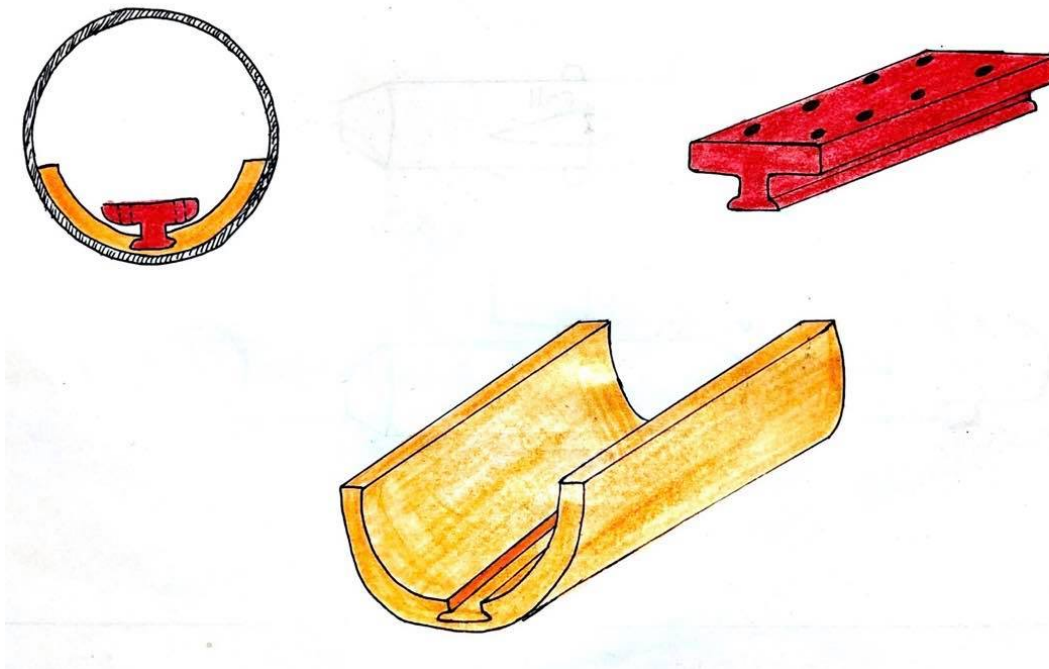
Det er tenkt å lage to motormoduler. En med motor med påmontert snেকে-girkasse og en med planetgirkasse. En kan montere motormoduler hvor en ønsker langs rørene. En slik modul kan bli snudd slik at en vinge står vertikalt og fungerer som et rør. Dette at ROV-en kan justere yaw-vinkel, eller ta svinger.

Dette konseptet tillater større fleksibilitet på de fleste områder, men prisen øker betydelig da det blir behov for mer innkjøpte deler. Derimot, vil det tenkte konseptet innfri flere av ønskene til brukerprofilen. For det første vil en kunne skjerme alle monterte deler under transport og annen håndtering. For det andre vil det være rikelig med festanlegg og flater for montering av deler. For det tredje vil det være enkel tilgang til utstyr og deler.

3.3 Konsept for montering av innvendig elektronikk

Det ble sett på ulike løsninger for å feste elektronisk utstyr innvendig i ROV-en.

3.3.1 konsept 1



Figur 40: Konsept med kilesporforbindelse

Denne løsningen tillater at hele elektronikken lett kan skyves inn og ut av røret den skal monteres i. Begge delene kan 3D-printes. Den U-formede delen kan limes fast i røret. Delen med påmontert elektronikk skyves inn i U-formen i en svalehale. Med en slik geometri kan en enkelt printe ut passende festeplater.

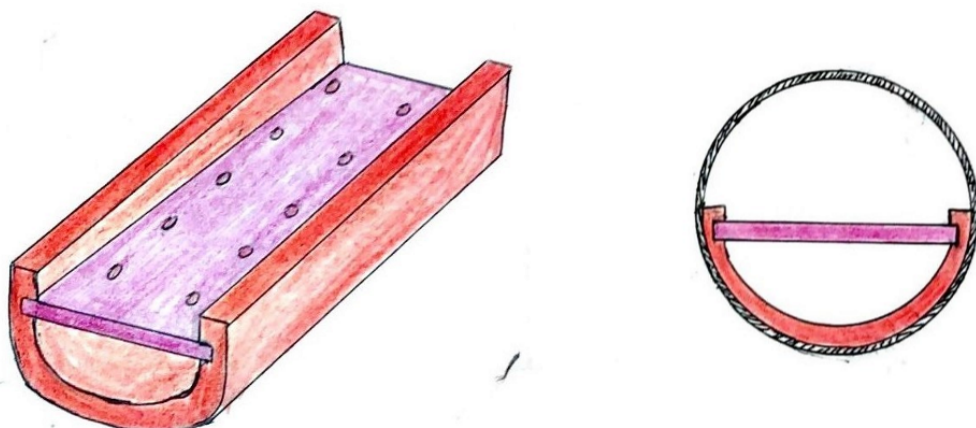
1. Fordeler.

- Enkel geometri.
- Utskiftbar.
- Kan tas ut for å skifte elektroniske deler.
- Enkel å 3D-printe.

2. Ulemper.

- Geometrien tillater ikke å montere elektronikk på begge sidene.
- Kan bevege seg under drift.
- Lang produksjonstid.

3.3.2 Konsept 2



Figur 41: Konsept med hylleforbindelse

Denne løsningen fungerer som en skuff. Dette gjør det mulig å ta ut elektronikken fra begge rørender. Hyllen har en fri overflate på begge sidene som vil gjøre det mulig å montere deler på begge sidene. På samme måte som konsept 1, er det tenkt å lime fast U-profilen til røret den skal monteres i.

Dette konseptet tillater å kombinere flere metoder for å framstille produktet. Eksempelvis kan U-profilen 3D-printes, mens selve hyllen kan skjæres ut i for eksempel akrylplast. Dette vil redusere produksjonstiden i forhold til å bare 3D-printe. På denne måten kan man lett bore så mange hull man vil i platen, og eventuelt skjære ut en ny dersom andre behov oppstår.

1. Fordeler.

- Enkel geometri
- Kan kombinere forskjellige materialer
- Hyllen kan tas ut for å skifte elektroniske komponenter
- Festeoverflate på begge sidene

2. Ulemper.

- Ledninger kan ryke ved forskyvning av hyllen
- Mindre overflate for montering av komponenter på undersiden

3.3.3 Konsept 3



Figur 42: Konsept helstøpet feste

Dette konseptet er uten muligheter for å ta ut elektronikken som en helhet. Konseptet ble utviklet etter beskjed fra automasjon om at det skulle kjøpes inn en koblingsboks for å enkelt bytte elektronikk. Dette konseptet skal være til elektronikk som alltid skal stå i ROV-en.

Det er her tenkt å 3D-printe en støpeform, og støpe delen i polyuretan slik at en får en massiv del.

1. Fordeler.

- Enkel geometri
- Festeoverflate på begge sidene
- Solid material
- Tillater kabler å tres fritt i alle retninger
- Kan justeres i lengde etter ønske

2. Ulemper.

- Vanskelig å demontere elektriske komponenter dersom noe blir ødelagt
- Må mest sannsynlig ødelegges dersom noe skal demonteres

3.4 Valg av material og form

3.4.1 Motor- og elektronikkmodul

Motormodulene og modulen for permanent elektronikk er bestemt å bli laget av metall. Dette fordi en kan bruke metoder som gir robuste beholdere med sikre koblinger. I tillegg får en kjøpt standardiserte rørdeler i passende dimensjoner med BSP-gjenger som holder over tid, og som holder tett med riktig bruk av gjengetetninger. Ved bruk av gjengede koblinger og gjengetetning slipper en flenser som bygger ut i større diameterer, og en slipper bolter og mutterer. Slike gjenge-deler kan sveises sammen som en vil. Det ble valgt en rørdimensjon på 114,3mm, som er en størrelse de fleste får hele hånden inn i. Gjengedeler til 114,3mm rør har 4" BSP-gjenger. De innkjøpte delene som det skal lages moduler av er.

1. Rør-lengde.
2. Muffe.
 - Rørstuss med innvendige gjenger.
3. Sveisenippel
 - Rørstuss med utvendige gjenger.
4. Endebunn
 - Avrundet skål til avslutninger.

Av hyllevarer av slike deler hos industrileverandører, finner en materialer som sort stål, rustfritt stål, galvanisert stål, syrefast stål og cunifer. Aluminium finnes ikke lett tilgjengelig i slike deler, blant annet fordi aluminiumgjenger er svake og rives bort om den blir utsatt for gjentakende montering og demontering.

Sort stål er et sterkt og rimelig materiale. Uten overflatebehandling i saltvann, vil det begynne å korrodere i form av rust. Rust fører til tregere gjenger og dårligere materialegenskaper, og kan etterhvert forårsake hull og brudd. Oppskrapinger ved håndtering av ROV er unngåelig, så rustproblemer vil oppstå selv med maling. Om en sender stålkonstruksjoner til galvanisering kan det ødelegge for gjenger, skruforbindelser og toleranser. Ved sveising, vil allerede galvanisert stål skape giftig røyk, og de korrosjonsbestandige egenskapene ødelegges.

Cunifer, som er en legering av kobber, nikkel og jern, er et korrosjonsbestandig materiale som blir mye brukt som sjøvannsrør. Det er et godt sveisbart materiale. Men i tillegg til å være kostbart, er det et problem at det er et mykt metall. Det behøver store godstykkelser for å kunne bli håndtert med verktøy, noe som er et problem med tanke på at massetettheten er omtrent $8900\text{kg}/\text{m}^3$, som er omtrent $1000\text{kg}/\text{m}^3$ mer enn konstruksjonstål. Rørlengder har lett for å få bulker om de blir utsatt for slag.

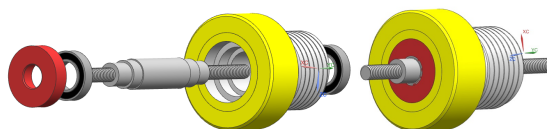
Det ble bestemt å bruke syrefast stål (inneholder molybden i tillegg til krom) som har bedre korrosjonsbestandige egenskaper enn rustfritt med krom og nikkel. Syrefast stål brukes mye til sjøvannsrør, og det er enkel tilgang til rørdeler. Syrefast stål er sterkt, og en prototype krever ingen overflatebehandling som maling, men en må helst syrevaske overflaten på sjøsiden. Figur 43 viser endebunn, muffe og sveisestuss i syrefast stål.



Figur 43: Endebunn, sveisenippel og muffe i syrefast stål.

For å få mest ut av styrken til syrefaste rørsveiser, må en beskytte baksiden av sveisefugen fra oksygen. Dette gjøres vanligvis ved å fylle røret med dekk-gass. Dette kalles bak-gassen. Uten bak-gassen vil baksveisen (sveisemateriale som har penetrert sveisefugen) korrodere raskt i den høye sveisetemperaturen. Dette er bare synlig fra innsiden av røret. En kan få pene og holdbare sveiser på utsiden av et rør uten bakgass, men det vil gå ut over styrken og korrosjonsbestandigheten på baksveisen. En kan vurdere å ikke bruke bakgass dersom en får tilstrekkelig styrke i sveisen uten, og dersom det ikke er et korroderende miljø ved baksveisen.

3.4.2 Aksel og akselgjennomføring



Figur 44: Aksel og akselgjennomføring fra mekatronikkprosjektet 2020

Figur 44, viser løsningene for å holde tett i akselgjennomføringene fra mekatronikkprosjektet 2020. Denne løsningen har fungert. Derfor vil samme løsning med noen forbedringer bli brukt i denne prototypen. Mellom to kulelager med tetninger er det fylt opp med propellaksel-grease, og samme grease ligger mellom lager og akseltetting mot sjø. Gjennomføringen er gjenget til 1" BSP-gjenger som blir skrudd med gjengetetning til en muffe sveist i ROV-en.

Akselen dreies ut av syrefast stål, og gjennomføringen dreies ut av aluminium. Aluminium blir brukt som gjennomføringsmateriale også til denne prototypen fordi det må dreies ut av en $\varnothing 40\text{mm}$ aksel, og det må fjernes mye materiale i tillegg til å gjenges. På aluminium kan en ta dypere kutt, og en kan gjenge 1" BSP-gjenger med en gjengebakk. Gjengebakk til 1" BSP-gjenger ville blitt svært tungt på en syrefast aksel, så en måtte hatt behov for dreiestål til å gjenge BSP-gjenger.

Syrefast stål og aluminium er vanlig å montere sammen. Inne i aluminium-båter blir syrefaste festemateriell skudd rett på aluminiumen. Der aluminium og syrefast er sammenmontert ute i sjø, blir det brukt coating på aluminiumdelen.

3.4.3 Vinger

I mekatronikkprosjektet 2020, ble vingen støpt fra en 3D-printet hydrofoilprofil, i en to komponent polyuretan. Den ferdigstøpte polyuretanen har en massetetthet på $1100\text{kg}/\text{m}^3$, noe som gjør de tilnærmet vektløs i sjøvann. Å ha en vektløs vinge gir fordeler da akselen og kulelagrene slipper å ta opp krefter fra enten en oppdrift eller tyngde. I tillegg til en et lavt omdreiningstall vil dette sørge for lang lagerlevetid.

Ved støping av hydrofoilprofiler vil vingene være av polyuretan. Dersom det bare skal brukes plate vil ethvert materiale med tilstrekkelig styrke og som gjør vingene vektløs fungere.

3.4.4 Plate

Platen til å feste utvendig utstyr og elektronikk bør være et lett materiale som er enkelt å bearbeide. Polyetylen er maskinerbart, sveisbart og tilgjengelig.

3.4.5 Klammer

Til å klamre platen til ermetorørene, brukes plastikklammer med sveiseplate. Sveiseplatene er gjenget M6, og plastikk-klammerene har senking til sylindrisk unbrako-hode til boltene. M6 unbrako bør også da gå igjen i andre skruforbindelser på ROV-en slik at de fleste monteringer og demonteringer kan gjøres med en 5mm sekskantnøkkel.

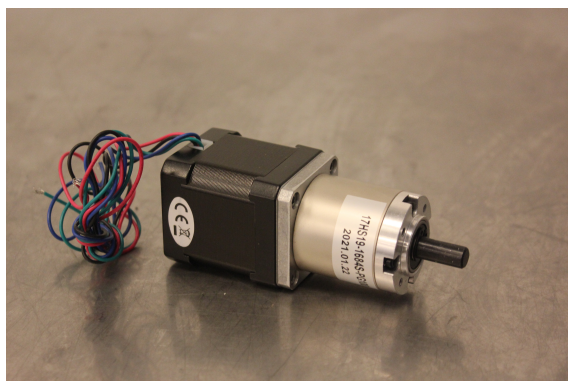
3.5 Valg av transmisjon

Det ble besluttet å kjøpe ferdige gir-løsninger til steppermotorene for å spare tid, og for å forenkle byggingen.

Så lenge en treffer vingeakselen på vingen sitt volumsenter, behøver ikke transmisjonsystemet jobbe store momenter skapt av vingene. Prototypen fra mekatronikkprosjektet 2020 hadde vinger som var tilnærmet vektløse i sjøvann, og fikk rotert vingene med et dreiemoment på omtrent 2Nm , og et omdreiningstall på omtrent 5 o/min. Dette dreiemomentet og omdreiningstallet fungerte. Siden det ble bestemt at motormodulene skulle lages av rør med en indre diameter på 110.3mm, ble det besluttet å bruke en Nema17 steppermotor. Nema17 har en størrelse som gjør den håndterlig inne i røret, og passende girkasser utveksler til passende dreiemoment.

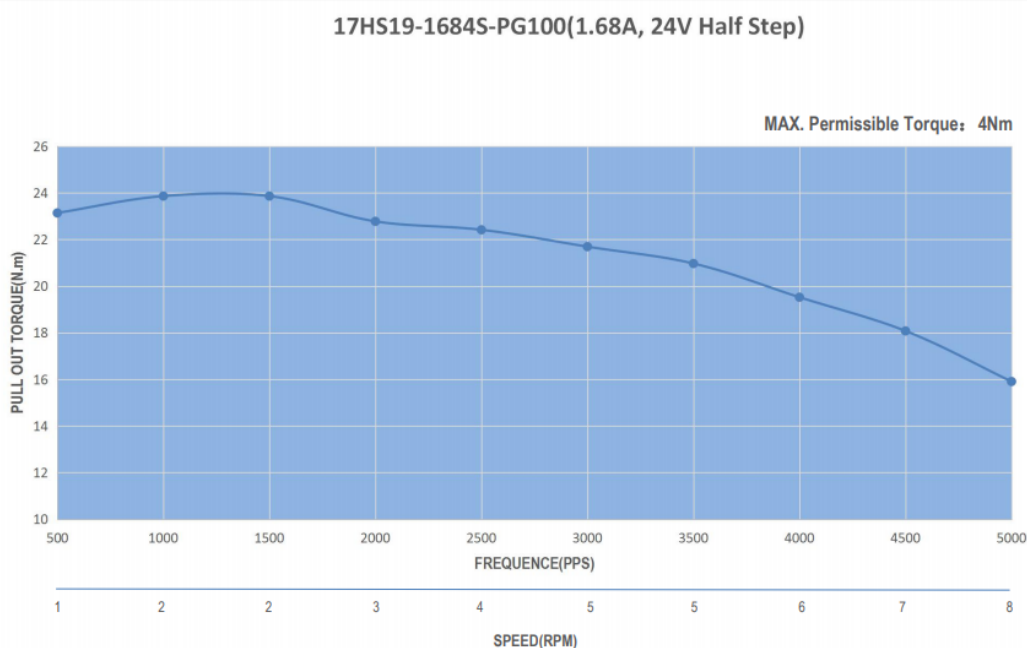
Det ble bestemt å lage to motormoduler, ett med og ett uten vinkelgir. Dette for mer fleksibilitet når en skal bygge sammen en passende ROV.

3.5.1 Motor med planetveksel



Figur 45: Motor med planetgirskasse.

Det ble valgt en steppermotor der en planetgirskasse med 99.05:1 utveksling fulgte med som vist i Figur 47. Det er oppgitt at det maksimale dreiemomentet denne kan rotere basert på mekanisk styrke er 4Nm, men det skal enda høyere motstander mot rotasjon til for at den skal miste steg. Figur 46 viser en graf fra leverandør der forholdet mellom dreiemomentet som skal til for at motoren mister steg (*pull out torque*), og omdreiningtall er plottet.



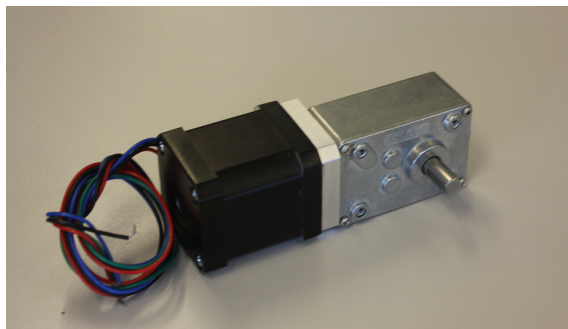
Figur 46: Dreiemoment i forhold til omdreiningtall.

Kilde: omc-stepperonline.com (Stepperonline 2021)

3.5.2 Motor med snikkeveksel

Utvalget av steppermotorer med påmontert snikkeveksel var mindre enn utvalget med planetveksel. Det var ønskelig å ha like aksler ut fra begge motorer slik at en kunne bruke en standard aksel ut til vinge. Motoren og giret som ble funnet har minimalt med informasjon oppgitt fra leverandør. Det eneste som er oppgitt er oversetningforholdet 1:49, og en *holding torque*, som er hvor stort

et dreiemoment må være for å tvinge rotasjon i akselen når motor holder igjen uten å rotere selv. Dette dreiemomentet var oppgitt til å være 0,5Nm. Det var ikke oppgitt, men denne *holding torque-en* må gjelde motor uten gir. Det må gjøres tester på denne motor- og girkjøringen for å finne mer informasjon om styrken.

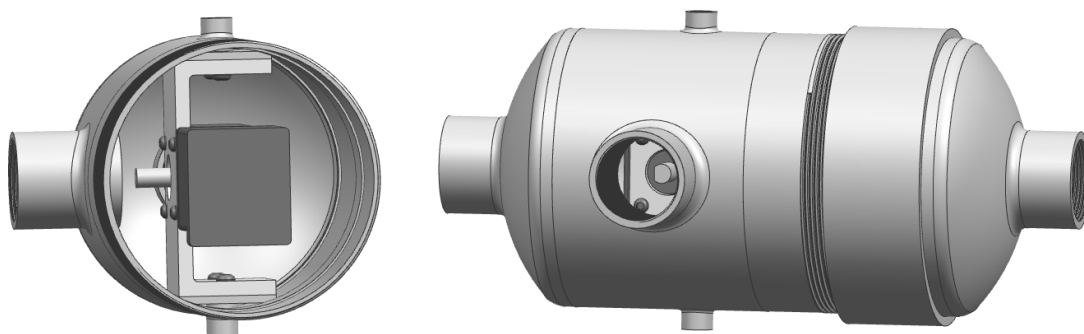


Figur 47: Motor med påmontert girkasse med snikkeveksel.

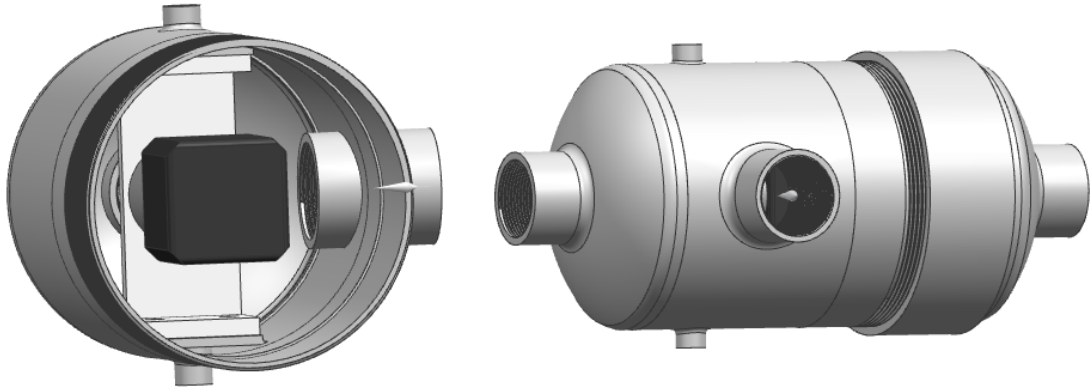
3.6 Konstruksjon og beregninger

3.6.1 Motormodul

Alle rørdeler og motorer ble 3D-modellert i Siemens NX som vist i Figur 48 og Figur 49. Ved å modellere hver del uavhengig av de andre, kan en se på forskjellige måter å sette de sammen. Dette bidro til at en får brukt de samme delene og metodene under byggingen av begge modulene.



Figur 48: 3D-modell av snikkemodul.



Figur 49: 3D-modell av planetmodul.

Det svakeste punktet i modulen med tanke på vannsøyletrykket er rørlengden på 80mm. Godstykkelsen til denne er 2mm, 1mm mindre enn de andre delene. Ved en dybde vil vannsøyletrykket bli så stort at røret kan kollapse eller knekke. Det brukes formel for kritisk undertrykk fra rørhåndboka (Pipelife 2007), vist i Ligning 15, der p_{kr} er trykkforskjellen utvendig og innvendig, E er elastisitetmodul til syrefast, ν er tverrkontraksjonstallet til syrefast, t er rør-godstykkelsen, og d_m er røret sin mellom diameter.

$$p_{kr} = 2 \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{t}{d_m}\right)^3 = 2 \cdot \frac{193000 \cdot 10^6}{1 - 0,265^2} \cdot \left(\frac{0,002}{0,1143 - 0,002}\right)^3 = 2345093 Pa \quad (15)$$

Så finner en en kritiske dybde h for en motormodul som er lukket ved 1atm og som ikke er fullt opp med inkompressibel olje med Ligning 16.

$$h = \frac{p_{kr}}{\rho \cdot g} = \frac{2345093}{1025 \cdot 9,81} = 223m \quad (16)$$

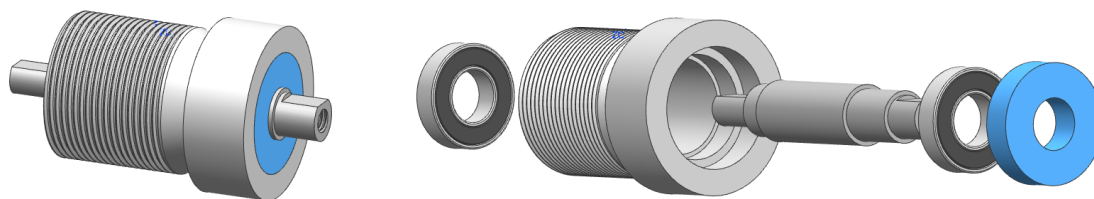
En må forberede delene som inngår i en motormodul før en begynner å punktsveise. 4" BSP-muffene må splittes i to. En får altså muffe til to moduler når en kjøper en. En 4" BSP-sveisestuss må kortes inn slik at det er 24mm fra sveisefugen til starten av gjengene. Det må bores hull i senter av to endebunner til 1" BSP-muffer. To 50x40x3mm syrefaste plater som motorbrakett skal boltes til, bores og gjenges M6, og det bores et 10mm hull i senter mellom de gjengede hullene. To akselbiter kappes 17mm lang. Akslene dreies ned til Ø13,2mm, og ene enden dreies ned ytterligere til Ø10mm 3mm inn på akselen. Enden på Ø13,2mm bores og gjenges M6. Ø10mm-delen av akselen settes ned i Ø10mm hullet av platen og punktes fast. To 40x40x5 aluminiumplater bores med frihull til M6 så de passer med den syrefaste platen. En 85x40x5 aluminiumplate bores ut slik at motoraksel kan bli ført gjennom senter av platen og boltet fast. En kapper 80mm av en Ø114,3x2mm syrefast rør. En legger en vinkel over røret sin lengderetning, og risser inn en referanselinje. En merker av en referanselinje på et smergelpapir, og så merker en av lengden til en kvart og en halv runde av røret sin diameter pluss to smergelpapir-tykkelser. Deretter markerer en av posisjonene på røret, og risser linjer langs lengderetningen. En merker av avstandene til hullene, og slår kjerne merke før en borer to Ø13mm hull og et Ø40mm hull.

Wolfram-elektroden slipes spiss. Lengden på spissen skal være omtrent to ganger elektrodiameter, og sveisemaskinen stilles på mellom 75-85 Ampere. En starter med å tre akselene på de syrefaste platene gjennom Ø13mm hullet på røret og punkte i de fire hjørnene. Denne platen skal ikke helsveises. Deretter kan alt det andre punktes fast med minst fire punkt i hver sveisefuge før en fyller konstruksjonen med bakgass og helsveiser. De syrefaste platene blir tredd med på-sveist aksel gjennom et nøyaktig plassert hull i røret fordi da slipper en å vinkle ut og måle korrekt plassering inne i røret. Den utstikkende akselen med innvendig M6 kan brukes til festeanlegg, eller de kan slipes bort.

En demonterer festeanlegget til steppermotorene, og monterer på 85x40x5mm aluminiumplaten. En monterer 40x40x5 aluminiumplatene til de syrefaste 40x50x3-platene. Akselgjennomføringen skrues på plass, og 85x40x5-platen settes mellom de monterte 40x40x5-platene. En fester akselen sammen slik de skal være, og punkter fast aluminium-platene før en demonterer alt og helsveiser aluminiumplatene. Deretter kan alt monteres sammen igjen. I modulen med snekkemotor må en punkte fast aluminiumen før endebunnen punktes og sveises. Aluminium ble valgt som brakett for motorfeste fordi det u-edle aluminiumet trekker seg ikke i like stor grad som stål, og derfor vil den holde riktig posisjon etter helsveising.

Etter helsveisingen påføres en egnet syre over hele sjøsiden av modulen, slik at en får bort missfarging fra sveising, og det syrefaste stålet oppnår de rustbestandige egenskapene sine på nytt.

3.6.2 Aksel og akselgjennomføring

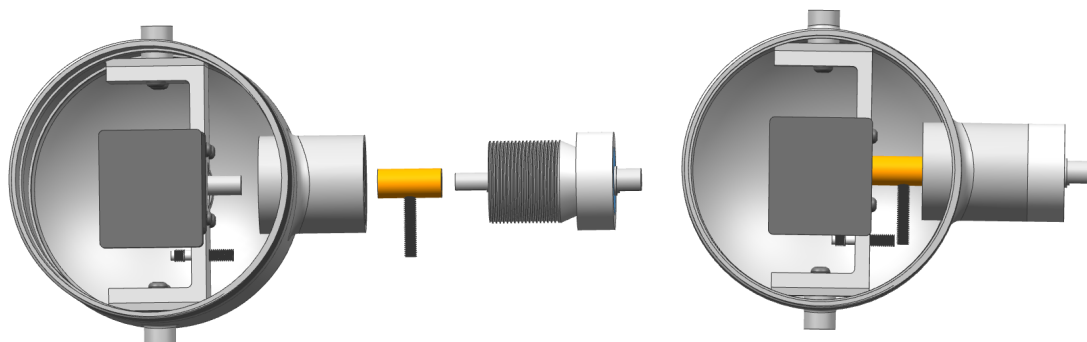


Figur 50: 3D-modell av aksel og akselgjennomføring.

Figur 50 viser aksel og akselgjennomføringen. Systemet er konstruert med fokus på enklest mulig tilvirkning. Den minste akselen tilgjengelig i syrefast stål hos leverandør var 12mm. Utvalg av rimelige lager og tetninger som kan kombineres til dimensjoner under 12mm er mindre enn 12mm og oppover. Når dimensjonene går under 12mm vil i tillegg krefter fra selve maskineringen være nok til å bøye og deformere akselen. Steget opp fra 12mm hos leverandør var 16mm, noe som ga flere muligheter. Begge lagerene har presspasning i både inner-ring og ytter-ring. Dette for å holde tett. Med små dimensjoner som indre diameter på 12mm, og ytre diameter på 24mm, er det enkelt å presse med presspasning på alle lager-ringene.

Kulelager 6901-2RS blir presset til akselen sin motor-ende. Deretter fylles det propellaksel-grease fra gjennomføringen sin gjengede ende, og opp til neste lager-sete, der en sørger for at det ikke kommer med luftbobler. Aksel føres inn i gjennomføringen sin gjengede ende, og lageret på akselen blir presset til setet. Overflødig grease tørkes av. En hylse støtter på inner- og ytter-ringene til det allerede pressede lageret slik at det neste lageret kan presses på på plass i både aksel og gjennomføring. Akseltettingen fylles med grease og presses på plass.

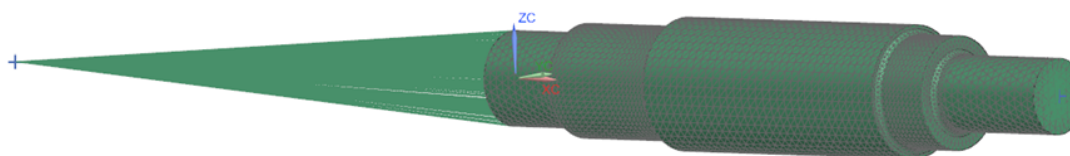
Siden en ikke kommer til med verktøy for å stramme settskruer på motorakselen til planetmodulen, er det tenkt å støpe adapter i polyuretan. En 3D-printer adapteren og lager en støpeform av silikongummi. Begge motorene har den samme flaten frest i aksel. I denne adapteren skal det bores og gjenges slik at en kan montere inn et gjengestag som skal rotere med akselen, og treffe en sensor for å kunne nullstille posisjon. Sensoren blir montert på aluminiumbraketten til motoren som vist i Figur 51.



Figur 51: Montering av aksel-system i snekkemodul.

I vanlig drift vil ikke akselen bli utsatt for store torsjonsspenninger siden omdreiningstallet er lavt, og det er lite motstand mot rotasjon i vingen. En FEM-analyse ble gjort for å finne et kritisk dreiemoment for akselen. Det ble tatt analyse av akselen både ved 4Nm og 22Nm. 4Nm er det maksimalt tillatte momentet motoren kan utsettes for under vanlig bruk. 22Nm er momentet som skal til for at motoren mister steg.

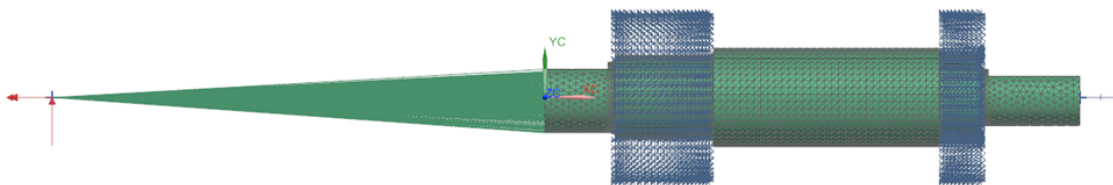
FEM-analysen ble gjennomført på Siemens NX. Det ble valgt 3D-mesh TET(10-noder), 1mm element størrelse. Materialet som ble valgt for akselen var AISI310, da AISI316 ikke var tilgjengelig i programmet. AISI310 er et rustfritt stål med lignende flytgrense og strekkfasthet som AISI316. For å kunne simulere vridning ble det laget to punkter i CAD-modellen som ble overført til FEM-modellen. Det ene punktet ble plassert i senter der akselen blir koblet til motor. Det andre punktet ble plassert 70mm fra motsatt akselende, som er der løftkraften til vingen virker. Disse punktene blir koblet til akselen gjennom 1D-elementer av typen RBE2. Figur52 viser den ferdige FEM-modellen.



Figur 52: Aksel med TET(10)mesh og 1D-elementer

Da FEM-modellen var ferdig ble det laget en SIM-model. Her ble grensebetingelser og krefter bestemt. På motorsiden ble akselen låst i x-retning på flaten hvor lageret ligger mot akselen. For å simulere lagrene ble det brukt *cylindrical constraint*. Denne blir låst i *radial growth* som vil si at akselen ikke kan deformere seg ved dette området. På punktet som ligger ved motorsiden blir akselen låst mot rotasjon rundt X-aksen, dette gir fortsatt akselen rom til å rotere fritt rundt Y- og Z-aksen. På dette tidspunktet er akselen fast ved motorenden og kan ikke bevege seg i X-retning eller deformere seg, men kan fortsatt rotere fritt.

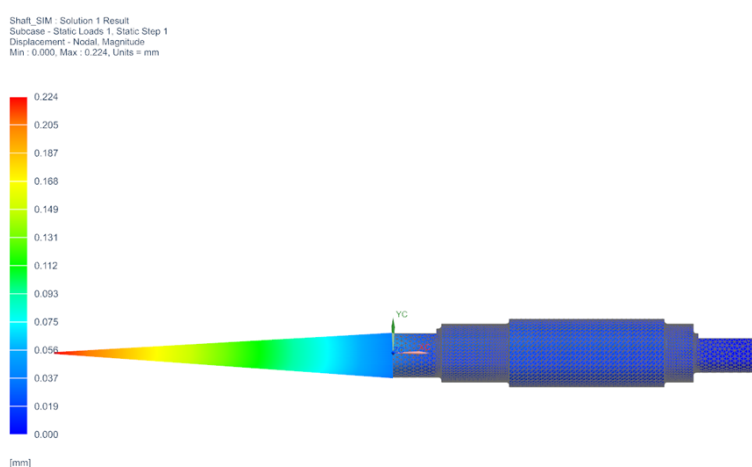
Det ble satt et momentet fra vingepunktet. Det ble forsøkt med både 4Nm og 22Nm. I tillegg til momentet ble det lagt på en kraft som skal simulere løftkraften fra vingen. Denne ble satt til 214N. Figur53 viser ferdig SIM-modell med alle grensebetingelser og krefter.



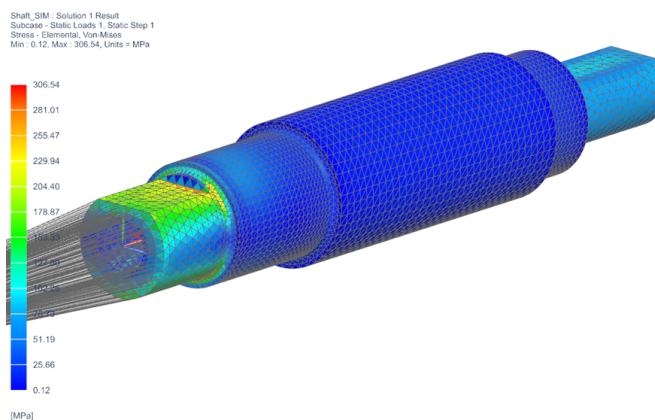
Figur 53: Illustrasjon av SIM-model med grensebetingelser og krefter

Første resultat vist i Figur 54 viser at akselen ikke blir utsatt for forskyvninger.

Andre resultat vist på Figur 55 viser de totale indre spenningene som oppstår i akselen ved 4Nm. Resultatet viser at akselen blir mest utsatt på vingesiden ved dette momentet hvor de maksimale spenningene er på rundt 300Mpa. Dette indikerer en varig deformasjon, men blir ikke sett på som kritisk ettersom denne spenningene bare virker på et lite område på en skarp kant.



Figur 54: Resultat av forsyvning ved 4Nm

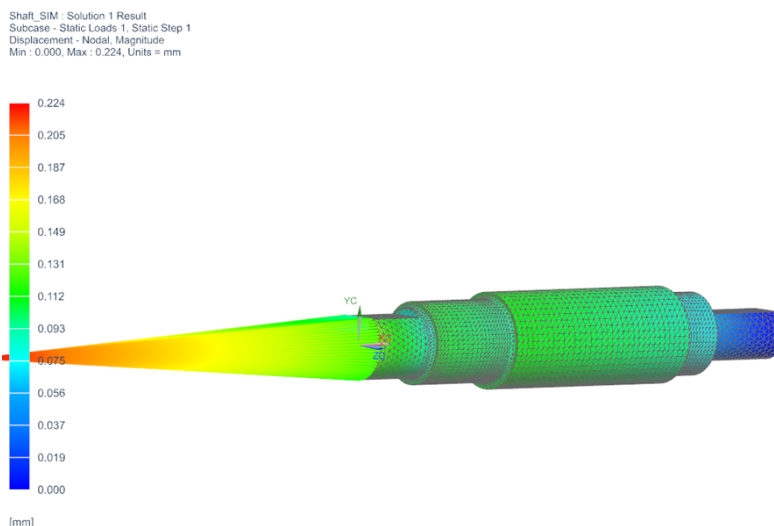


Figur 55: Resultat av jevnførende spenninger ved 4Nm

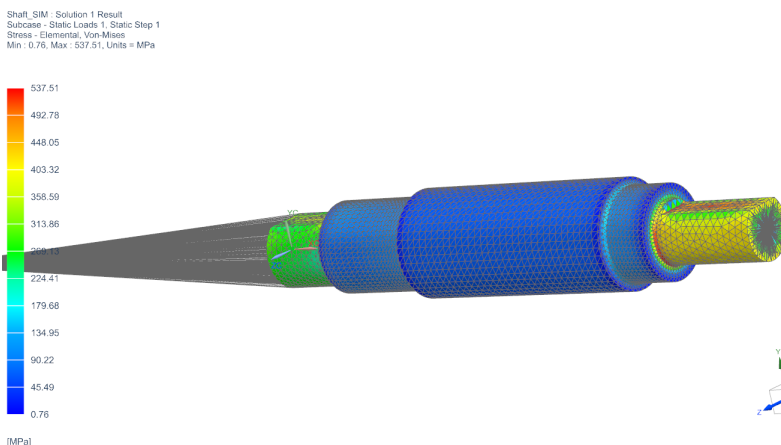
Tredje resultat vist på figur 56 viser forskyvningen akselen blir utsatt for ved 22Nm. I motsetning til det første resultatet ved 4Nm, er akselen nå mer utsatt for forskyvninger i X-retning.

Siste resultat vist på figur 57 viser de indre spenningene som oppstår i akselen ved 22Nm. Simuleringen viser spenninger over 500Mpa som er strekkfastheten til materialet, og godt over flytgrensen. For å beskytte akselen mot brudd, kan adapteren som kobler aksel til motor dimensjoneres til å få

brudd før en når spenninger som gir brudd i aksel.



Figur 56: Resultat av forsyvning ved 22Nm



Figur 57: Resultat av jevnførende spenninger ved 22Nm

Ø16mm akselen blir kappet i båndsgag 77mm lang. Det blir brukt hardmetall-skjær med 1,2mm nesoradius til grovdreiningen og 0,4mm nesoradius til findreiningen. Etter beregninger for turtall etter verkstedhåndboka viser den med akselens dimensjoner et turtall på 1392 r/min. Akselen blir spent opp i dreiebenken med 35mm utstikk.

Vingesiden på akselen har et hull med M6 gjenger. Etter planing av enden blir dette hullet boret og gjenget så en ikke risikerer å knekke en gjengetapp i en ferdig maskinert aksel. Dette hullet brukes senere til sentrering av akselen med senter-spiss i bakdokken. Hullet bores med en Ø5mm bor, med et turtall på 700 r/min.

Akselen blir dreiet først på vingesiden. Her blir alle målene dreiet med grovkutt til det står igjen 0,8mm før riktig diameter. Deretter tar man et målekutt av hvert parti, og måler med mikrometer. En tar så et slutt-kutt ned til riktig dimensjon, og riktig overflateruhet. Samme prosess gjentar seg for motorsiden av akselen. Sporene blir frest i en fresemaskin. Ved å spenne opp akselen med 2mm utstikk opp fra skrustikken får en frest begge D-sporene i en oppspenning.

For akselgjennomføringen blir det brukt Ø40 aluminiums aksel. Det gjennomgående hullet blir boret i dreiebenken. Først blir det forboret med Ø12 bor, beregninger viser turtall på 1100 r/min for Ø22 bor. Dreiningen foregår med samme metoder som akselen, beregninger for turtall viser

954r/min. For å lage gjengerille i akselgjennomføringen blir det brukt et radiuskjær på 4mm. Dette blir gjort for å være sikker på at det blir hele gjenger- og at akselgjennomføringen går helt til bunns i de innvendige gjengene. Det blir brukt gjengebakke for å lage de utvendige 1" BSP-gjengene. Med arbeidsstykket spent opp i dreiebenken, holder en gjengebakken plan til akselen med bakdokken når en skrur.

3.6.3 Vinge

En hydrofoilprofil vil gi et større spekter av vinkler som gir forutsigbare løftkrefter enn en plate. Plater av plastikkmaterialer med lignende massetetthet som sjøvann vil i tillegg trenge en tykkelse som kan ødelegge for strømninger dersom de skal holdes stabile når krefter virker på dem. På grunn av dette ble det besluttet å lage vinger av polyuretan i hydrofoilprofiler. Det ble besluttet å bruke en symmetrisk profil slik at en kan kjøre vingen til en nøytral stilling, og en kan bruke samme støpeform for vingene på begge sidene av ROV-en.

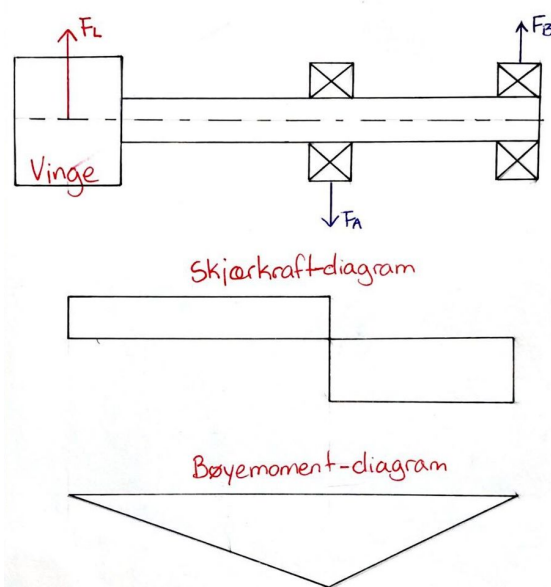
Vingene dimensjoneres etter bøyemomentet løft-kraften utsetter akselen for. En bred vinge vil føre til et større bøyemoment enn en lengre vinge med samme areal på grunn av kraftarmen.

Det blir brukt en sikkerhet på 3 (Dahlvig og Christensen 2002) for å ta høyde for akselen sine kjerper i det tillate bøyemomentet som vist i Ligning 17.

$$\sigma_{btill} = \frac{R_e}{3} = \frac{200MPa}{3} = 66,7MPa \quad (17)$$

En kan da finne det maksimale bøyemoment akselen kan utsettes for med akselen sin tverrsnitt-modul, som vist i Ligning 18.

$$M_{bmaks} = \sigma_{btill} \cdot W = \sigma_{btill} \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{32} = 66,7 \cdot \frac{\pi \cdot 14^3}{32} = 17968Nmm \quad (18)$$

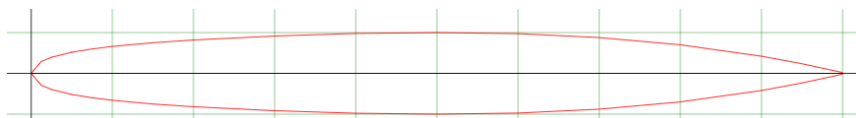


Figur 58: Skjærkraftdiagram og bøyemomentdiagram

En finner det største bøyemomentet i akselen ved kulelageret mot sjø, som vist i Figur 58. Dette momentet er løftkraften multiplisert med avstanden til sjøsidelageret.

Nettsiden airfoiltools.com ble benyttet ved valget av hydrofoilprofil. På denne siden finner en profiler som er testet, og en får koeffisienter til løft- og dragkrefter på bakgrunn av reynolds tall og vinkel i forhold til væskestrøm. En ser også for hvilken vinkel en får separasjon i væskestrømmen.

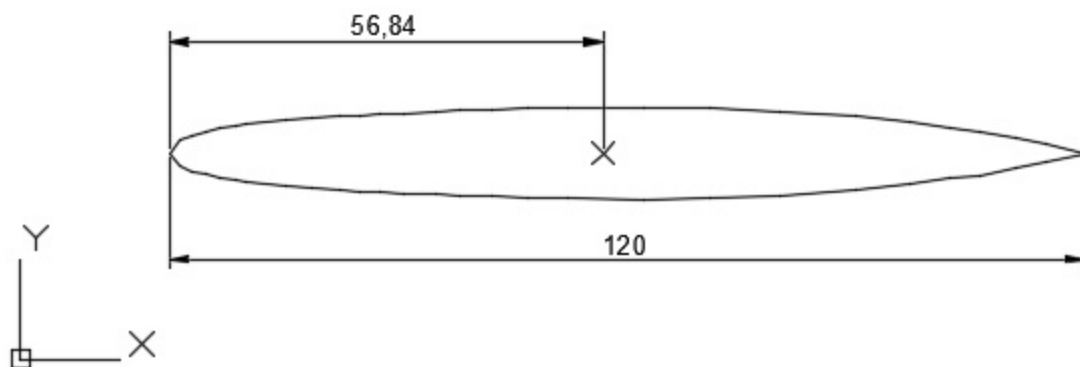
Profilen NACA 0010-65, som vist i Figur 59 ble valgt siden volumsenteret da ligger omtrent i senter i profilen sin lengderetning (Airfoiltools 2021). På den måten kan en velge en lengde som gjør at en kan kjøre vingen helt rundt mens ROV-en står på land. Dette gir fordeler under land-tester. Når aksel plasseres i volumsenter vil ikke løftkreftene ha en momentarm som må jobbes imot. For å få en klaring mot kollisjon i bakken ved rotasjon bestemmes vingelengden til 120mm. Denne lengden passer også i de fleste 3D-printere.



Figur 59: NACA 0010-65

Kilde: airfoiltools.com

Figur 60 viser avstanden til NACA-profilen sitt volumsenter i lengderetning som ble funnet i Autocad. Omkretsen av hydrofoiltverrsnittet ble målt til $O = 243mm$

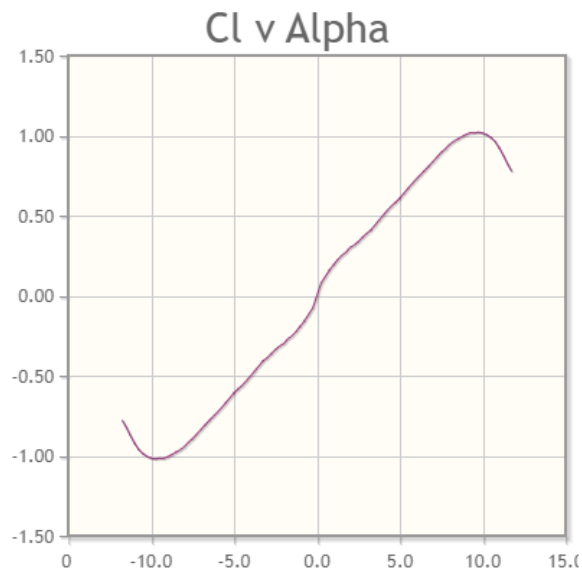


Figur 60: NACA 0010-65 lengde til volumsenter

ROV-en fra mekatronikkprosjektet kjøres vanligvis med en hastighet på 3,5m/s, og vingene dimensjoneres etter dette. Denne hastigheten gir et reynolds tall som vist i Ligning 19.

$$R_E = \frac{\rho \cdot v \cdot L_k}{\mu_d} = \frac{1025 \cdot 3,5 \cdot 0,12}{1,22 \cdot 10^{-3}} = 352869 \quad (19)$$

Dette reynolds-tallet fører til et forhold mellom løftkoeffisient og angrepsvinkel som vist i Figur 61.



Figur 61: Løftkoeffisient i forhold til angrepsvinkel.

Kilde: airfoiltools.com

NACA 0010-65 profilen får separasjoner i væskestrømmen når angrepsvinkelen går over 10° , og har i denne vinkelen en løftkoeffisient $C_L = 1$. Avstanden fra løftkraften til sjøsidelageret er summen av avstanden fra lageret til vingen l addert med halve vingebredden $\frac{b}{2}$. Vingeearealet er det våte arealet, $A = O \cdot b$. En finner da maksimal tillatt vingebredden ved å løse ut Ligning 20.

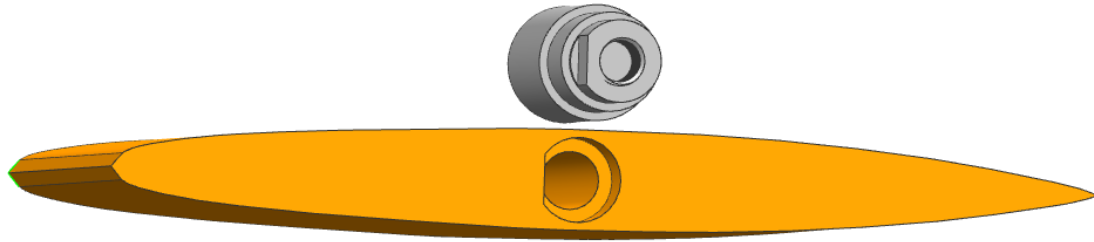
$$M_{bmaks} = F_L \cdot \left(\frac{b}{2} + l\right) = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot O \cdot b \cdot C_L \cdot \left(\frac{b}{2} + l\right) \quad (20)$$

Ligning 20 ender med en andregradsligning med to løsninger for vingebredden b . Det ble laget et justerbart regneark som vist i Figur 62

Vingebredden	b	140	mm
Vingekomkrets	O	243	mm
Slepehastighet	v	3,5	m/s
Største løftkoeffisient	CL	1	
Avstand fra vingefeste til sjøsidelager	l	12	mm
Massetetthet sjøvann	ρ	1025	kg/m ³
Løftkraft	F_L	214	N
Tillatt bøyemoment	M_{bmaks}	17,968	Nm
Utregnet bøyemoment	M_b	17,514	Nm

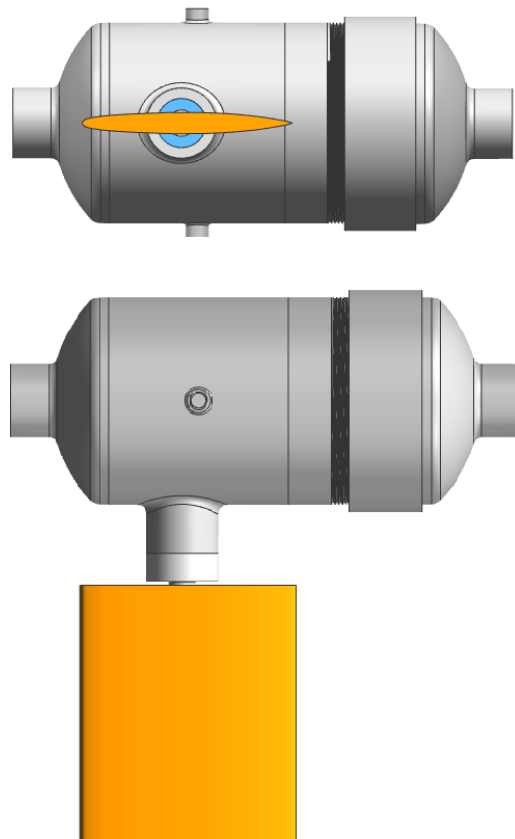
Figur 62: Beregnet vingebredden

Bærbarhet og beskyttelse av utstyr under løft ble prioritert høyt av brukerprofilen. Derfor må vingene kunne kobles fra enkelt, da både de og lager/aksel er utsatt for skade under håndtering og transport.



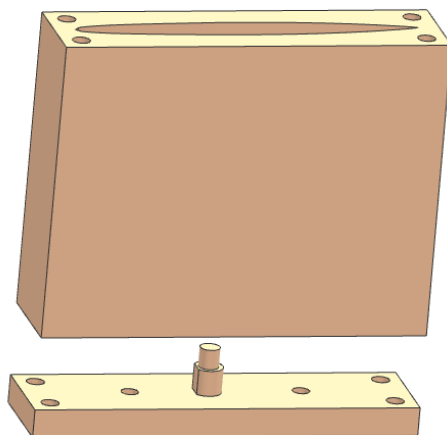
Figur 63: Modellert vinge.

Som vist i Figur 63, kan vingen settes rett på aksel og festes med en M6 bolt. Det brukes da samme unbrakobolter som er tenkt å gå igjen på de fleste innfestningene på ROV-en, og en får en lett tilgjengelig bolt en kan montere og demontere med ett verktøy. Dreiemomentet overføres med hjelp fra et D-spor. Figur 64 viser 3D-modell av vingen montert på en snekkemodul.



Figur 64: Modellert snekkemodul med vinge.

Støpeformen ble 3D-printet i to deler. Den ene delen er hydrofoilprofilen som settes opp på en plate der akselformen med fresespolet stikker ut. En stuss på $\text{\O}7\text{mm}$ stikker opp av akselbiten for å fungere som et pilothull til senere gjennom boring. Modellen av støpeformen er vist i Figur 65



Figur 65: Modell av støpeform for vinge.

Polyuretan-støpemassen som blir brukt er SG2000, som har to komponenter. Komponent A er en resin, og komponent B er en herder. Ved romtemperatur har komponent A oppgitt en massetetthet på $\rho_A = 1,02g/cm^3$, komponent B har oppgitt $\rho_B = 1,14g/cm^3$, og blandet 1:1 i vekt er massetettheten oppgitt som $\rho_{PUR} = 1,1g/cm^3$. Vingen sitt volum er målt i 3D-modellen, i tillegg kommer volumet av de to $\varnothing 6mm$ hullene for å kunne slå ut støpen av formen med dor etter herding til $V_v = 143 + \frac{\pi \cdot 0,6^2}{2} \cdot 1 \cdot 2 = 144cm^3$. Vekten til vingen blir da som vist i Ligning 21.

$$m_v = \rho_{PUR} \cdot V_v = 1,1 \cdot 144 = 158,5g \quad (21)$$

Siden komponentene skal blandes likt i vekt, finner en hvor mange gram som skal blandes av hver komponent med Ligning 22.

$$m_v = \rho_{PUR} \cdot \frac{m_A}{\rho_A} + \rho_{PUR} \cdot \frac{m_B}{\rho_B} \quad (22)$$

$$m_A = m_B = \frac{m_v}{\frac{\rho_{PUR}}{\rho_A} + \frac{\rho_{PUR}}{\rho_B}} = \frac{158,5}{\frac{1,1}{1,02} + \frac{1,1}{1,14}} = 77,5g$$

Ved å være nøyaktig når en blander og fyller støpemassen vil en oppnå riktig vingebredde uten materialsløs, og beger som brukes til å blande i kan brukes igjen.

En smører slippmiddel over alle flater av støpeformen som kommer i kontakt med støpemassen. Et tettemiddel som ikke limer, for eksempel akrylfugemasse, påføres mellom støpeform-delene før de boltes sammen. Dor-hullene tettes med maskeringstape. En blander sammen A og B komponentene av støpemassen og heller over i støpeformen. Vingen skal være ferdig herdet etter en time. En kan slå ut vingen fra formen med hammer og dor.

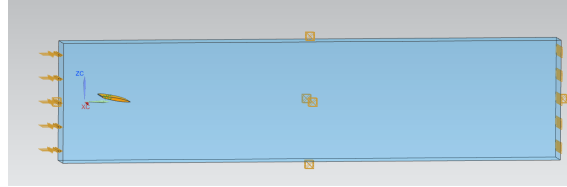
3.6.4 Ermetorør

Ermetorørene som kobles mellom motormodulene bestemmer lengden og bredden av ROV-en. Rørdimensjonene er bestemt å være lett serie 22mm (22L). 22mm er den utvendige diameteren, og med en godstykkelse på 2mm blir den indre diameteren 18mm. 18mm var den minste diameteren som var komfortabelt å trekke aktuelle kabler gjennom.

Det er utstyret som skal kobles på som i stor grad avgjør lengden og bredden på ROV-en, og brukeren kan selv kappe rør til en passende størrelse. I denne oppgaven blir lengden av rørene

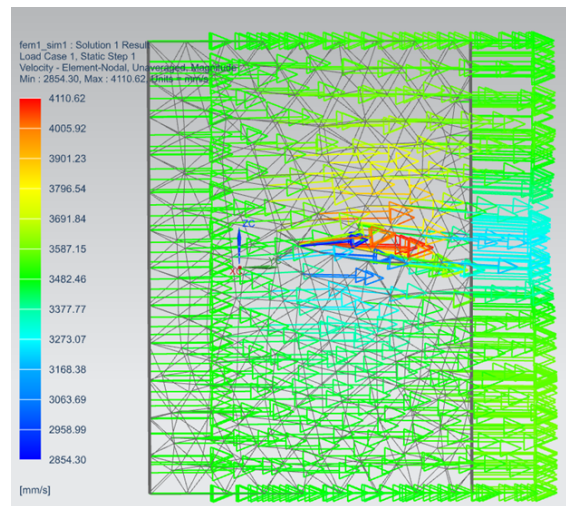
avgjort av en egnet avstand mellom vingene framme og bak.

En enkel CFD-analyse, (*computational fluid dynamics*, numerisk fluiddynamikk) ble gjort i Siemens NX for å anslå strømmingen bak en vinge for å begrunne en avstand til ny vinge. Det ble modellert en kasse som vingen ble plassert inn i. Vingen og kassen var montert med en vinkel på 10° i forhold til hverandre som vist i Figur 66. Kassen ble definert som vann med en hastighet på 3,5m/s. Fronten av kassen ble definert som innløp, og baksiden som en åpning.



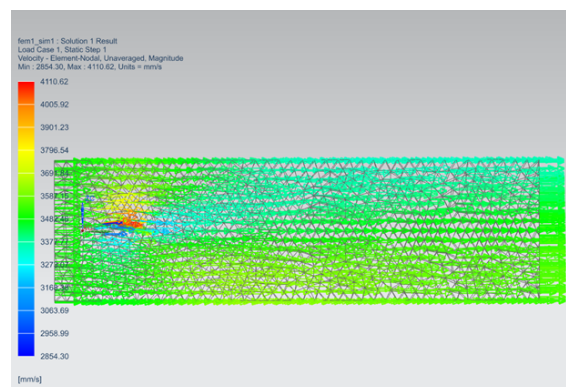
Figur 66: Vingen plassert inne i en kasse.

I resultatet ser man en hastighetsøkning på oversiden av vingen, og en redusert hastighet på undersiden som gir trykkforskjellene som skaper løft-kraften, vist i Figur 67.



Figur 67: Hastighetsforskjeller over og under vinge.

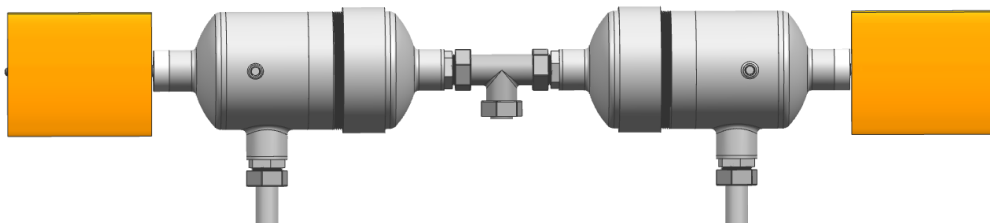
Etter vingen kan en se en hale med redusert hastighet som har retning oppover. Etter en senteravstand fra vingen på 1,5m har hastigheten normalisert seg ved høydeplanet vingen er i, som vist i Figur 68.



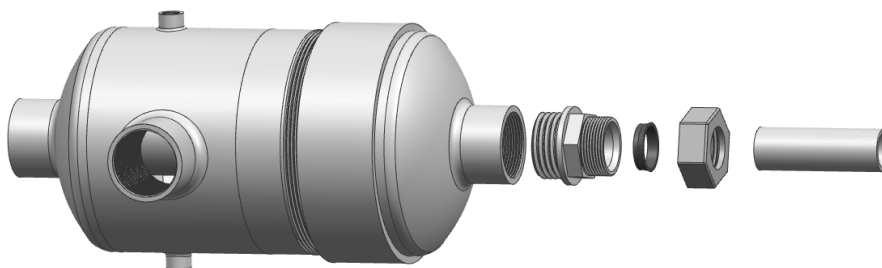
Figur 68: Hale med redusert hastighet.

En lengde på 1,5m er håndterlig under løft for to personer gjennom dører, opp og ned trapper, og lignende.

For et mest mulig energieffektivt slep, og en mest mulig avstivet konstruksjon, kobles motormodulene tett sammen på hver side. Avstanden mellom to planetmoduler avgjøres av en T-kobling som vist i Figur 69. Avstand fra vingespiss til vingespiss er her 950mm. T-koblingen kan brukes til kabelgjennomføring, utstyr til å jevne ut trykk, og lignende. Flere slike T-koblinger kan monteres langs med ermetorørene der en ønsker.

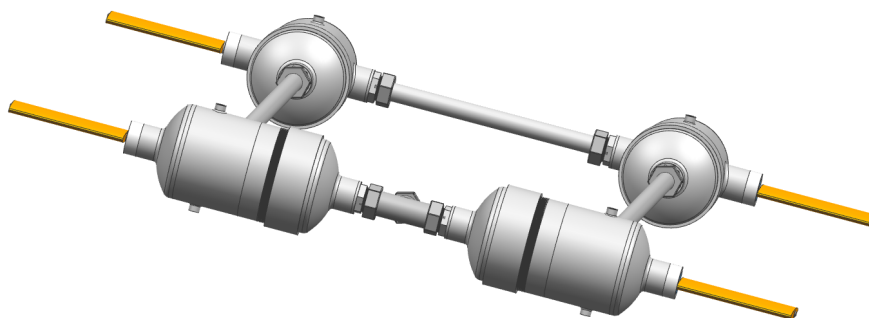


Figur 69: T-kobling mellom to planetmoduler.

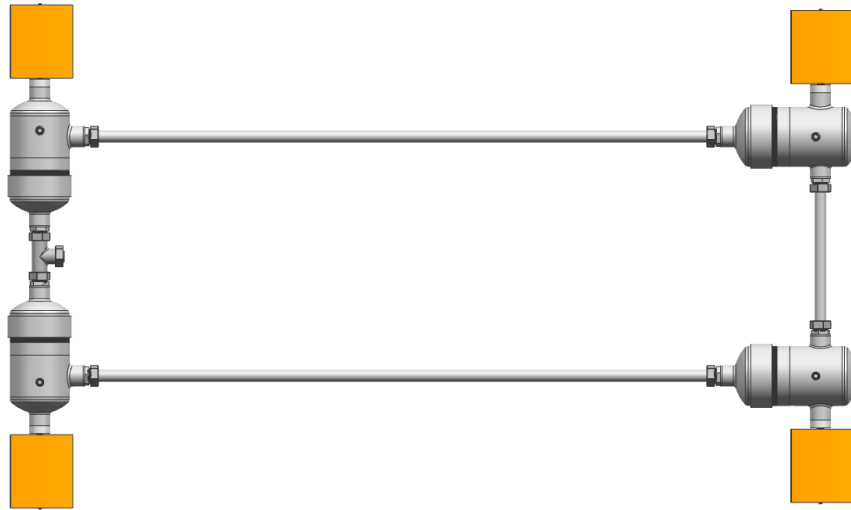


Figur 70: GE, snittring og mutter.

Som vist i Figur 70, skrues en overgang fra 1"-BSP til M30 utvendige gjenger (GE-1"-22mm) inn i muffen. En snittring med tettekon plasseres i konen på GE-en. Kobberpasta eller lignende antirivning-middel påføres de utvendige M30-gjengene. Så skrur en mutteren på løst for hånd, og trer inn rør. Mutteren strammes til med fastnøkkel til en kjenner en sterk motstand. Mutteren løsnes igjen, og en inspiserer om snittringen har skjært seg inn i røret. Deretter kan en montere på nytt. Ferdig monterte ermetorør på to planetmoduler i front, og to snekkemoduler bak vises i Figur 71 og Figur 72.



Figur 71: Monterte ermetorør.

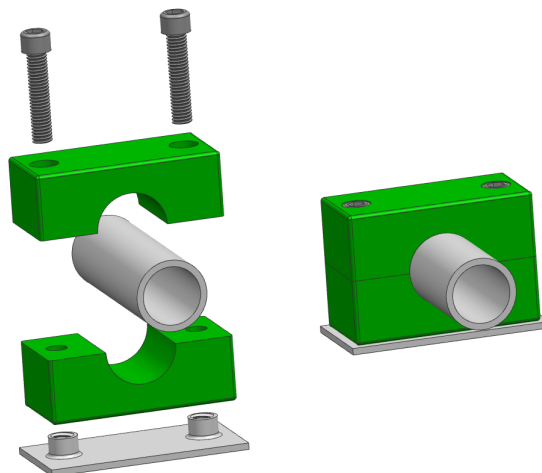


Figur 72: Monterte ermetorør.

3.7 Plate og festeanlegg

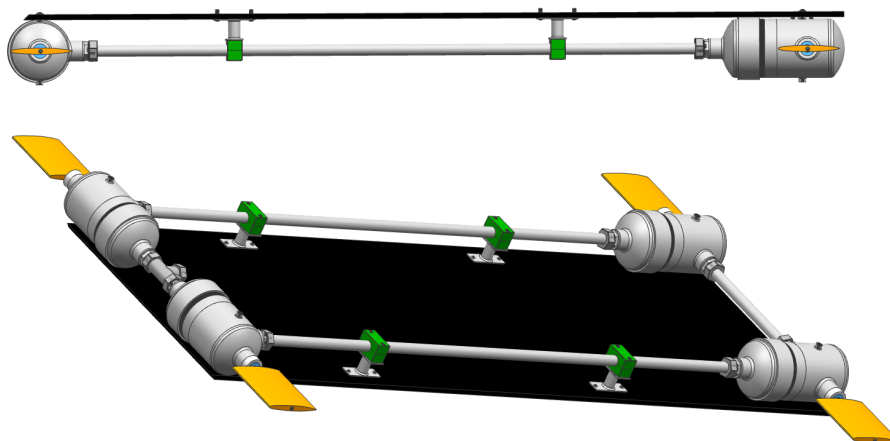
Platen som skal monteres over ROV-en for festeanlegg er valgt å være av polyetylen. Polyetylen, eller PE-plast, er et lett tilgjengelig materiale som både er maskinerbart og sveisbart. PE-plast er mer motstandsdyktig mot slag og vridning enn andre tilgjengelige plasttyper som akryl og PVC. Massetettheten på $910-965\text{kg}/\text{m}^3$ er lav i forhold til andre materialer med like egenskaper.

Platen i denne versjonen monteres opp på modulene. Å ha platen opp på modulene vil ødelegge noe for symmetrien og vannstrømningen, men en slipper å arbeidet med å gjøre platen flukt. En kan også benytte seg av de gjengede hullene på modulene når en fester platen på modulene. Fronten av platen fases i vinkel for å forbedre strømmingene. Plastikklammer med sveiseplater tilpasses mellom ermetorør og platen for å avstive konstruksjonen.



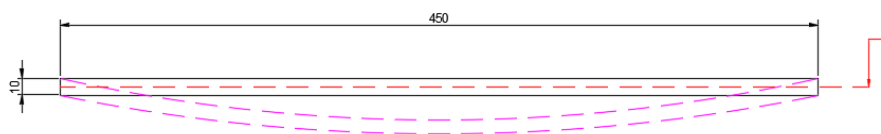
Figur 73: Rørklammer med sveiseplate.

Figur 73 viser klammerene som skal festes mellom plate og ermetorør. En sveiser en rørlengde fra en egnet brakett i platen til klammeret sin sveiseplate. Det er i denne prototypen valgt å bruke to klammerfeste på hvert rør. Montert plate er vist i Figur 74.



Figur 74: Monterert plate.

Platetykkelsen er valgt å være $t=10\text{mm}$, siden dette er en godtykkelse som gir tilstrekkelig styrke på innvendige gjenger i PE-materialet. Det finnes per idag ingen oversikt over mengde utstyr eller vekten på det som skal monteres på platen. En kan finne nedbøyningen i senter av platen som skjer på grunn av platen sin egenvekt. Tverrkontraksjonstallet til PE-plast er satt til $\nu = 0,5$, og elastisitetsmodulen $E = 900\text{N/mm}^2$. Platen sin lengde er over tre ganger så lang som bredden, og kan derfor bli sett på som en enveis-plate (NTNU udatert). Nedbøyningen vil skje om platetverrsnittet sin x-akse, og vil være størst i senter av platebredden B som vist i Figur 75.



Figur 75: Nedbøyning i platen.

Platestivheten D finner en med Ligning 23.

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{900 \cdot 10^3}{12 \cdot (1 - 0,5^2)} = 10000\text{Nmm} \quad (23)$$

Den jevnt fordelte lasten q fra platen sin egenvekt finner en med Ligning 24.

$$q = \rho_{PE} \cdot t \cdot g = 965 \cdot 0,01 \cdot 9,81 = 95\text{N/m}^2 = 9,5 \cdot 10^{-5}\text{N/mm}^2 \quad (24)$$

En finner så nedbøyningen f med Ligning 25.

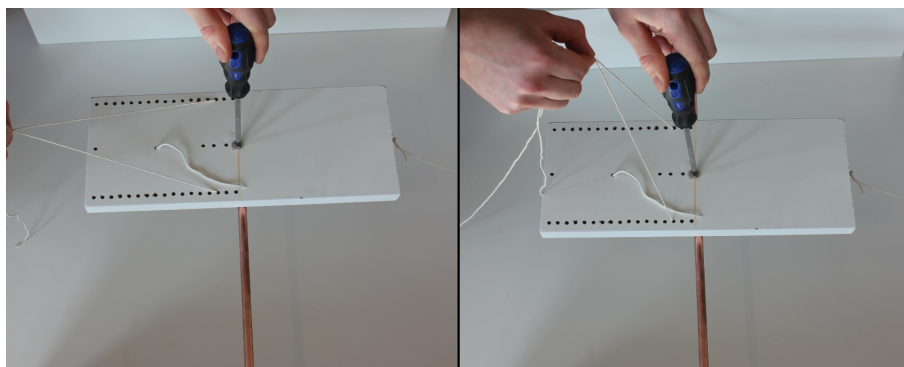
$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot B^4}{D} = \frac{5}{384} \cdot \frac{9,5 \cdot 10^{-5} \cdot 450^4}{100000} = 0,5\text{mm} \quad (25)$$

Dette gir en rett plastikkplate å montere utstyr på uten støtter inn mot senter. Samme ligning viser at nedbøyningen øker med omtrent 1mm for hvert kg/m^2 som legges til.

3.8 Slepepunkt

Det ble bestemt å bruke tauverk i slepepunktene. Det er enkelt å justere lengder på tauverk, og det kan bli brukt materialer som tåler sjøvann over tid.

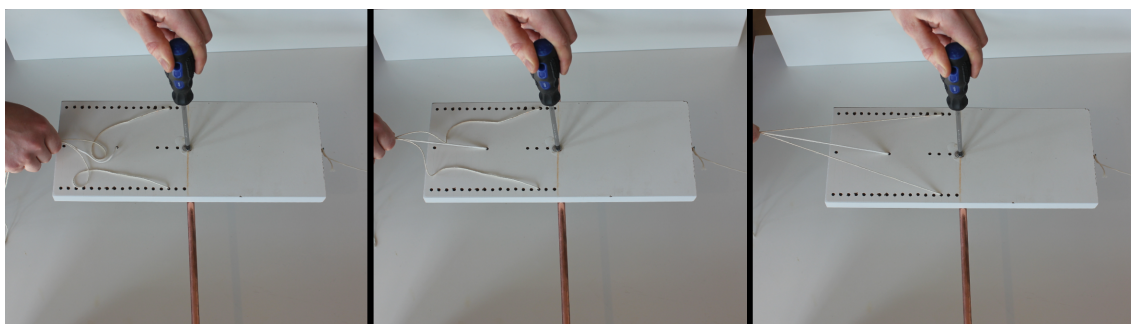
For å få mest mulig motstand mot rotasjon i yaw-vinkel, lages det til to festepunkt så bredt som mulig i ROV-en sin bredderetning. Det ble kappet en sponplate i samme bredde- og lengdeforhold som ROV-en, og forskjellige festepunkt ble testet. En treskrue ble skrudd gjennom senter av sponplaten og inn i et kobberør slik at en kunne kjenne motstand mot rotasjon ved forskjellige slepevinkler med et skrujern. Kobberøret kunne rotere fritt. Oppsettet vises i Figur 76.



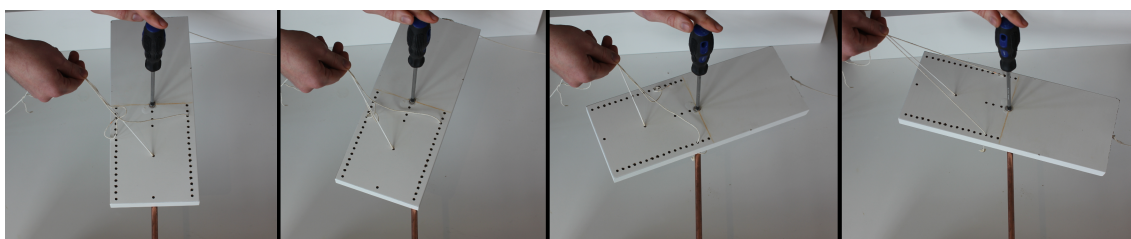
Figur 76: Oppsett for test av kabelfestepunkt.

Ved å ha festepunkt i senter i lengderetning er det lite motstand mot rotasjon i pitchvinkel. Festepunktet som både ga størst motstand mot rotasjon i yaw- og pitchvinkel var 2/5 inn i lengderetning.

Ved å bruke en elastisk strikk lengre fremme og i senter på platen, fikk man en dempet start i slepet, og platen ble rotert til riktig retning. Vist i 77 og Figur 78.



Figur 77: Elastisk igangsettelse av bevegelse.

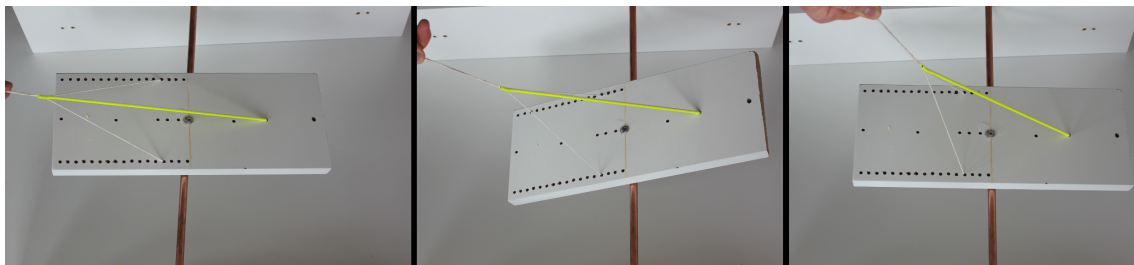


Figur 78: Utretting mot sleperetning.

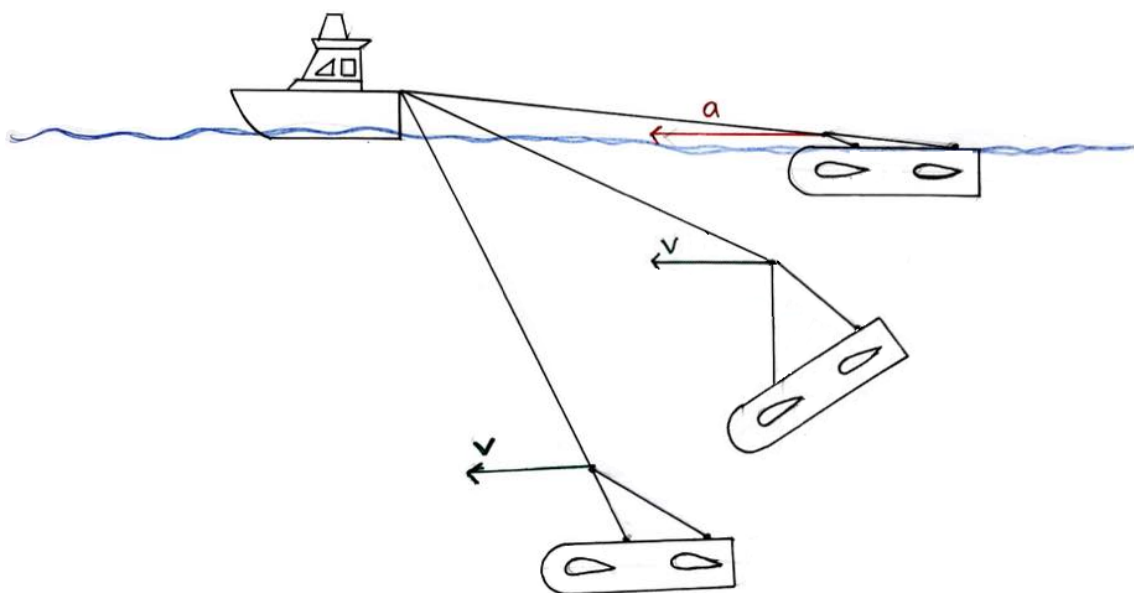
Et problem med denne festemetoden var at platefronten vinklet seg opp etterhvert som slepevinkelen ble brattere, noe som hadde gjort at de bakerste vingene måtte ha kompensert mye for å rette ut ROV-en.

Den valgte festemetoden ble å bruke et elastisk tau bak, og to hovedfester ute i bredden 2/5 lengde inn på ROV-en. Dette festeanlegget gjorde at ved bratte vinkler ville det elastiske tauet bidra med å rette ut platen. Den elastiske egenskapen gjorde at det var et spillerom som de bakerste

vingene kunne opperer i, og at hovedfestene alltid er strekt ut og tar opp det meste av kreftene. Idet slepet starter er det det elastiske tauet som drar først, noe som demper igangsettelsen av bevegelsen. Dersom vinkelen til kabelen ved starten av slepet er veldig rett mot båt, vil fronten av ROV-en duppe nedover. Og etterhvert som ROV-en synker, vil kabelvinkelen føre til at den retter seg ut igjen, og holdes stabil med hjelp av det elastiske tauet. En kan på denne måten slippe ut en kabellengde ved slepe-start som gir en ønsket dybde ved en ønsket slepevinkel. Vinkelen til ROV-en bidrar til å synke ned til ønsket dybde før den stabiliserer seg, og en bruker vingene til videre styring. Oppsettet er vist i Figur 79, og virkemåten er illustrert i Figur 80.

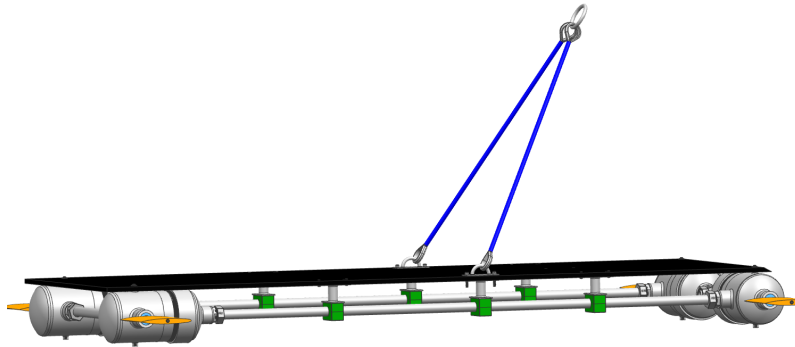


Figur 79: Valgt festemetode.



Figur 80: Tenkt virkemåte av slepefeste.

De to hovedfestene er bøylor på platen som blir forsterket med klamring i ermetorørene som vist i Figur 81. Tauene fra hovedfestene festes til en ring i senter av ROV-en, med en lengde frem til senter av rørene i front. Dette er den lengste praktiske lengden med tanke på løft og håndtering på land.

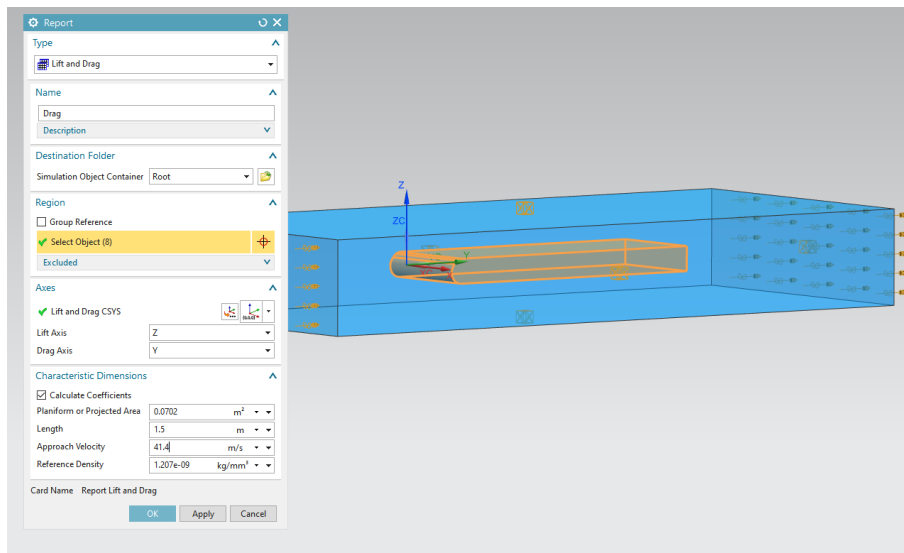


Figur 81: Bøyler og ring til taufeste.

Det er ønskelig å utnytte det meste av forlengelsen av det elastiske tauet for dempingen sin skyld, så plasseringen må beregnes. For å finne motstanden i slep ble det gjort en CFD-analyse i Siemens NX for å finne dragkoeffisienten. En forenklet modell av ROV-formen ble modellert. Da det var avansert å definere som sjøvann, ble fluiden definert som luft med standard innstillinger som vist i Figur 82. Det ble gitt en hastighet som ga det samme reynolds-tallet som ved sjøvann med en hastighet på 3,5m/s. Utregningen vises i Ligning 26 og Ligning 27.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L_k}{\mu_d} = \frac{1025 \cdot 3,5 \cdot 1,71}{1,22 \cdot 10^{-3}} = 5028381 \quad (26)$$

$$v_{luft} = \frac{Re \cdot \mu_{d-luft}}{\rho_{luft} \cdot L_k} = \frac{5028381 \cdot 18,2 \cdot 10^{-6}}{1,293 \cdot 1,71} = 41,4m/s \quad (27)$$

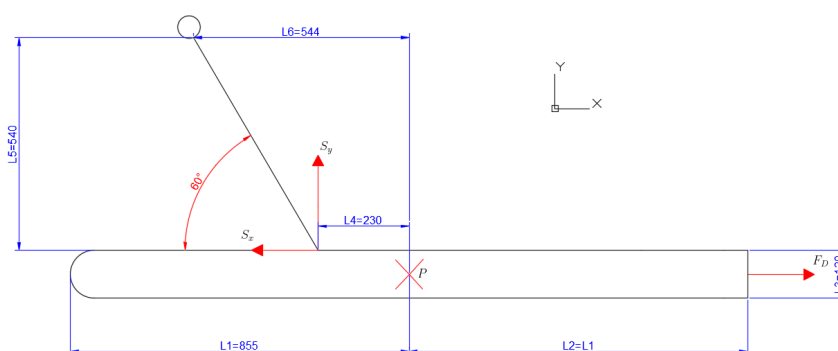


Figur 82: Analyse av drag-kraft

Fra analysen ble det beregnet frem en drag-koeffisient $C_D = 0,897$ som gir en drag-kraft ved 3,5m/s som vist i Ligning 28. Arealet A er det projiserte arealet.

$$F_D = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \cdot C_D = \frac{1025}{2} \cdot 3,5^2 \cdot 0,0702 \cdot 0,897 = 395N \quad (28)$$

En slepevinkel på 60° er valgt fordi det er en vinkel der slepekabelen skal kunne ta opp krefter i x-retning, samtidig som en får utnyttet en god del av kabel-lengden i dybden. Ved konstant hastighet på 3,5m/s, og en oppdrift lik tyngden får en et fritt-legeme-diagram som vist i Figur 83, og en kan finne en plassering og lengde for et elastisk tau som jobber mot momentet skapt av snordraget S.



Figur 83: Fritt-legeme-diagram uten elastisk tau.

En finner kreftene i x-retning med Ligning 29.

$$\sum F_x = 0$$

$$F_D - S_x = 0 \quad (29)$$

$$F_D = S_x = 395N$$

En finner S_y -kraften med Ligning 30.

$$S = \frac{S_x}{\cos(60^\circ)} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{S_x^2}{\cos^2(60^\circ)} - S_x^2} = 684N \quad (30)$$

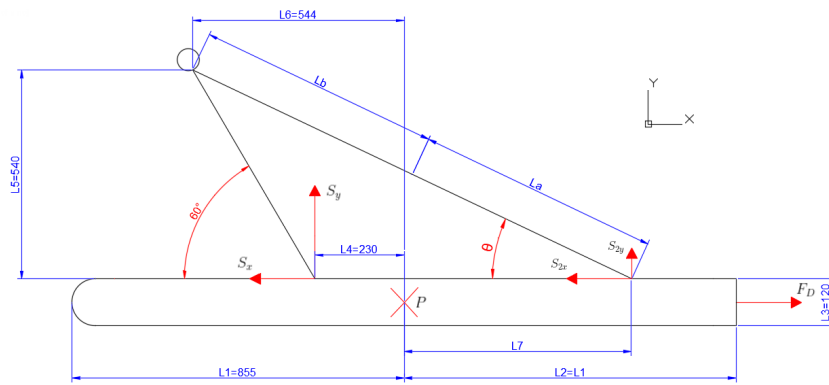
I tillegg til kreftene og lengdene i Figur 83, skal det innføres enda et snordrag som vist i Figur 85.

Det ble kjøpt inn en $\varnothing 8$ mm shock cord, som er en gummiline overtrukket av polyester. Det ble gjort enkle forsøk på gummilinen for å se hvilken forlengelse den fikk ved ulike laster. Ulike lengder ble hengt opp, og det ble lagt til vekt, og forlengelsen ble målt. Resultat av testen vises i Figur 84

Opprinnelig lengde	Lengde ved +1kg	Lengde ved +2kg	Lengde ved +3kg	Lengde ved +4kg	Fullt utstrek lengde
L_0 [mm]	L_{1kg} [mm]	L_{2kg} [mm]	L_{3kg} [mm]	L_{4kg} [mm]	L_{max} [mm]
376	420	500	612	690	749
500	550	670	829	940	1000
610	693	825	1014	1148	1197
900	990	1200	1470	1665	X
Opprinnelig lengde	Forlengelse +1kg	Forlengelse +2kg	Forlengelse +3kg	Forlengelse +4kg	Fullt utstrek forlengelse
L_0 [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]	x_3 [mm]	x_4 [mm]	x_{max}
376	44	124	236	314	373
500	50	170	329	440	500
610	83	215	404	538	587
900	90	300	570	765	X
Opprinnelig lengde	Forlengelse +1kg	Forlengelse +2kg	Forlengelse +3kg	Forlengelse +4kg	Maksimal forlengelse
L_0 [mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
376	12	33	63	84	99
500	10	34	66	88	100
610	14	35	66	88	96
900	10	33	63	85	X
Opprinnelig lengde	Fjærkonstant +1kg	Fjærkonstant +2kg	Fjærkonstant +3kg	Fjærkonstant +4kg	X
L_0 [mm]	k_1 [N/m]	k_2 [N/m]	k_3 [N/m]	k_4 [N/m]	X
376	223,0	158,2	124,7	125,0	X
500	196,2	115,4	89,5	89,2	X
610	118,2	91,3	72,8	72,9	X
900	109,0	65,4	51,6	51,3	X

Figur 84: Test av gummilene sin forlengelse.

Som en kan se fra resultatet av testen, blir alle lengdene strekt ut likt prosentvis ved lik last. Den maksimale forlengelsen er 100% og et sted mellom 30% og 60% forlengelse får en lik fjærkonstant og hooks lov er gjeldende. Ved nærmere undersøkelser med mindre vekter ble det funnet at fjærkonstanten var tilnærmet lik fra en last på 3kg og oppover på alle fire lengdene. Ved lasten 3kg er gjennomsnittforlengelsen på 64,5% . Et free body-diagram, vist i Figur 85, settes opp. Det skal beregnes en plassering og lengde på en Ø8mm gummilene som gir et snordrag S_2 som vil lette på momentet skap av snordraget S fra slepekabelen. L_a er gummilinen sin opprinnelige lengde, og L_b er lengden den strekkes ut.



Figur 85: Free body-diagram med elastisk tau.

Følgende gjelder:

- $L_b < L_a$ Når slepekabel har 60° vinkel.
- $L_a + L_b = \sqrt{L_5^2 + (L_6 + L_7)^2}$ Når slepekabel har 60° vinkel.
- $L_b = L_a$ når $L_b + L_a = L_7 + L_4 + \frac{L_5}{\sin(60^\circ)}$ Maksimal utstrekking når slepekabel står vannrett.
- $L_7 \leq L_2$
- $k = \frac{3 \cdot 9,81}{L_a \cdot 0,645}$ Fra 64,5% forlengelse og oppover.
- $S_2 = k \cdot L_b = \sqrt{S_{2x}^2 + S_{2y}^2} = \frac{S_{2x}}{\cos(\theta)} = \frac{S_{2y}}{\sin(\theta)}$
- $\sum M_P = S_y \cdot L_4 - S_x \cdot \frac{L_3}{2} - S_{2x} \cdot \frac{L_3}{2} - S_{2y} \cdot L_7$

Det ble laget et regneark for å finne en passende plassering og lengde på gummilinen, vist i Figur 86.

L_1	855	mm	F_d	395	N
L_2	855	mm	S_x	395	N
L_3	120	mm	S_y	684	N
L_4	230	mm	k	61	N/m
L_5	540	mm	S_2	34	N
L_6	544	mm	S_{2x}	31	N
L_7	639,7	mm	S_{2y}	14	N
θ	24,5	°	$\sum M_P$	123	Nm
L_a	746,6	mm			
L_b	554,4	mm			
Forlengelse	74	%			

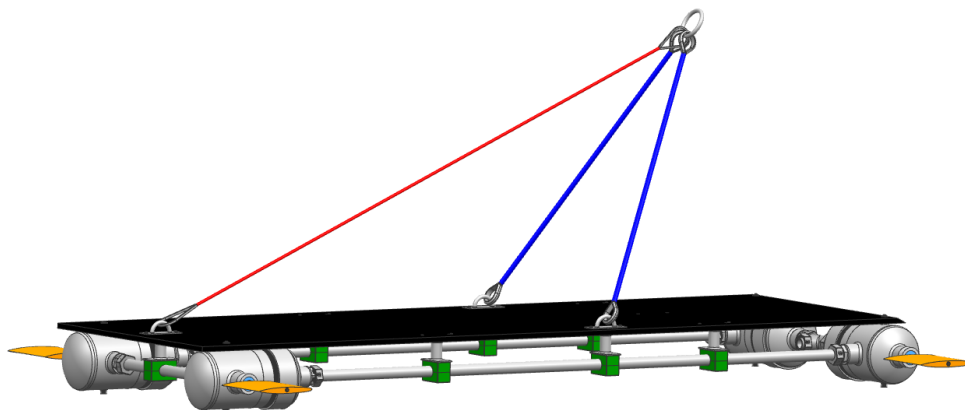
Figur 86: Regneark for elastisk snor.

Det ble justert på avstanden L_7 festet til gummisnoren har i forholdet til punktet P momentberegningene ble gjort om. Jo lengre denne lengden var, jo mer skapte den et moment som jobbet mot momentet skapt av S_y -kraften. Det ble valgt en lengde på 639,7mm siden en da kan forsterke festet på samme måte som hovedfestene. Denne gummiline-lengden bidrar med et moment på 11Nm. For utligne momentet på 123Nm må de bakerste vingene til sammen vinkle seg som vist i Ligning 31. Lengden s er avstanden fra vingen sitt volumsenter til punktet P.

$$\frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \cdot C_L \cdot s = \frac{\sum M_P}{2}$$

$$C_L = \frac{\sum M_P}{\rho \cdot v^2 \cdot A \cdot s} = \frac{123}{1025 \cdot 3,5^2 \cdot 0,034 \cdot 0,635} = 0,45 \quad (31)$$

En løftkoeffisient $C_L = 0,45$ gir en vingeinkel på 4° som vist i Figur 61 på side 46. Figur 87 viser alle tauene montert på ROV-en.



Figur 87: ROV med alle tau montert.

Tauene fra hovedfestene som ikke skal være elastiske, velges å være $\varnothing 10$ mm treslått nylontau. Nylontau tåler sjøvann over tid og trekker ikke til seg vann. $\varnothing 10$ mm nylontau har en høy bruddstyrke på over 1500kg. Treslått fordi da behøver en ikke merlespiker for å spleise inn øyespleis. Med treslått får en brukt enkle spleisemetoder uten at begge endene på tauet trenger å være fri. En slår inn to kauser i ringen og en i hver festebøyle. Så spleiser en øyespleis over kausene. En får ikke spleiset i gummilinen, og siden den strekker kan en ikke bruke kause. I testene holdt pålestikken godt i gummilinen, så en kan tre inn en beskyttende tøyhylse som en lager sticket rundt.

3.9 Oppdrift

Netto oppdrift av ROV-en som den er blitt designet til nå ble beregnet i et regneark. En ferdigmontert planetmodul ble veid, og de andre delene ble definert som tenkt materiale i Siemens NX, slik at vekten kunne bli hentet ut fra 3D-modellene. I sammenstillingen av 3D-modellene ble det målt nøyaktig hvor mye av hver del som fortrenger sjøvann. Det utvendige og innvendige volumet av de lengdene som fortrenger sjøvann av hver del ble målt fra 3D-modellene. En kan fylle ROV-en med en inkompressibel olje for å bidra med å håndtere trykk, jevne ut trykk og hindre at vann trenger inn. Rapsolje er ikke giftig for dyreliv, og har en massetetthet på 910 kg/m^3 . Vekten av det ledige innvendige volumet av motormodulene, og det innvendige volumet av ermetorørene fylt opp med rapsolje ble beregnet. Resultatet av beregningene viser en netto oppdrift på $-77,8\text{N}$ uten

olje, og -158N med olje som vist i Figur 88. Negativ betyr at den totale tyngden er større enn den totale oppdriften.

Mengde	Enhet	Del	Material	m pr enhet [g]	m _{tot} [g]	Fortrengt V pr. enhet [mm ³]	Fortrengt V _{tot} [mm ³]	Netto F _o pr. enhet [N]	Netto F _{tot} [N]
2 stk.		Planetmodul	316, Alu++	3632	7264	2225793	4451586	-13,2	-26,5
2 stk.		Snekkemodul	316, Alu++	3702	7404	2225793	4451586	-13,9	-27,9
1 stk.		Plate	PE	7794	7794	8565823	8565823	9,7	9,7
2637	mm	Rør 22x2	316	1	2637	380	1002060	0,0	-15,8
6 stk.		Ermetomutter	316	51	306	15569	93414	-0,3	-2,1
6 stk.		Snittring	316	3	18	0	0	0,0	0
1 stk.		Ermeto T-stykke	316	440	440	96253	96253	-3,3	-3,3
7 stk.		Klammerfeste	316	191	1337	23951	167657	-1,6	-11,4
14 stk.		Klammerhalvdel	PA	24	336	26381	369334	0,0	0,4
27 stk.		M6X25 unbrako bolt	316	19	513	0	0	0,0	0
4 stk.		Vinge	PUR	143	572	149057	596228	0,1	0,4
3 stk.		Bøylefeste	316	48	144	6037	18111	-0,4	-1,2

Sum masse	28,8 kg
Sum netto oppdrift	-77,8 N
Ledig innvendig volum	0,0084 m ³
Sum masse med rapsolje	36,4 kg
Netto oppdrift med rapsolje	-158 N

Figur 88: Regneark med beregnet netto oppdrift.

3.10 Kostnad

Det ble gjort et kostnadsestimert på alle delene og materialene som blir brukt i byggingen av ROV-en som den er blitt designet til nå. Motor, rørdeler, aksler, kulerlager og akseltetting er de faktiske prisene som det har kommet pristilbud på. De andre prisene er hentet ut fra nettsøk på aktuelle produkt. Figur 89 viser et regneark med prisestimert.

Mengde	Enhet	Del	Pris pr. enhet	Tot. Pris [NOK]
2	stk	Motor med planetgirskasse	245	490
2	stk	Motor med snekkeveksel	252	504
2,64	m	22x2 316 rør	215	568
1	stk	T ermeto 22L	420	420
6	stk	Mutter ermeto 22L	64	384
6	stk	Snittring ermeto 22	29	174
8	stk	GE 22L	234	1872
14	stk	Klammerhalvdel 22	6	84
7	stk	Sveiseplate gruppe 3	61	427
0,32	m	114,3x2 316 rør	422	135
8	stk	Endebunn 316 114,3x3	96	768
2	stk	Muffe 316 4"BSP	936	1872
4	stk	Sveisestuss 316 4"BSP	651	2604
12	stk	Muffe 316 1"BSP	82	984
0,36	m	Ø16 316 aksel	96	35
0,26	m	Ø40 ALU aksel	167	43
8	stk	Kulerlager 61901-2RS	60	480
4	stk	12x24 akseltetting	67	268
0,32	kg	SG2000 Komp.A og Komp.B	402	129
2	m	3-slått Ø10 nylontau	7	14
1,8	m	Gummiline Ø8	8,4	15
0,85	m ²	PE-plate t=10	372	316
		Div. materiell (bakgass, festemat., PLA..) ≈		1000

Sum byggekostnad	kr 13 586
------------------	-----------

Figur 89: Regneark med kostnadsestimert.

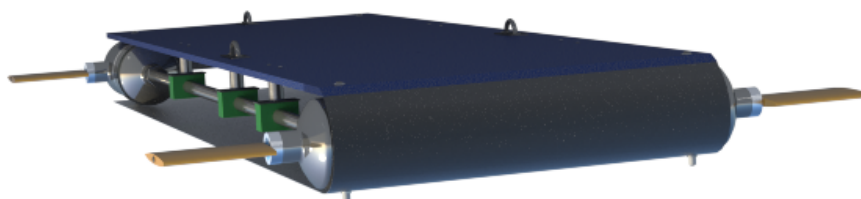
4 Resultat

Det ble ikke bygget en ferdig prototype, og derfor ble det ikke gjort en sjøtest av ROV-en. Sjøtester hadde sannsynligvis ført til flere forandringer i designet.

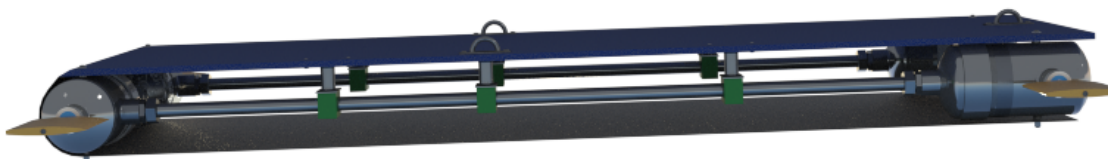
Det ble bygget en planetmodul med motor og akselsystem. Med alle deler tilgjengelig, skal en som er erfaren innen maskinering og sveising kunne lage en ferdig motormodul på en arbeidsdag. Etter å ha bygget en modul for første gang, skal man kunne bygge tre til fire moduler på en arbeidsdag.

4.1 Valg av konsept

Figur 90 og Figur 91 viser 3D-modeller av ROV-en med fiberduk og ben. Dette er et eksempel på hva en kan sette sammen med de ulike modulene.



Figur 90: Fiberduk trekt over ROV-en sin underside, og ben med gummiknotter skrudd til akslene som senterer motorbrakett.



Figur 91: Fiberduk trekt over ROV-en sin underside, og ben med gummiknotter skrudd til akslene som senterer motorbrakett.

4.2 Elektronikkmodul

Det ble ikke prioritert å lage prototyper for elektronikkmodul. Vi mottok ingen oversikt over komponenter og nødvendige løsninger for en slik modul i tide til å lage prototype. Automasjonsdelen av slepeROV-prosjektet så også på andre løsninger for elektronikkomponenter enn en permanent løsning som har blitt sett på i denne oppgaven.

4.3 Aksel og akselgjennomføring

Akselen ble maskinert som planlagt med noen unntak i omdreiningstall og skjærehastighet. Dette skyldes at det ikke var tilgjengelig kjølevæske på maskinene. Sprayflasker med skjærevæske er ikke optimalt ved maskinering av syrefast da det kan oppstå herding. Enten bruker en utregnet hastighet og har en konstant strøm med kjølevæske, eller bruker en ingen kjølevæske og reduserer hastighetene. I dreiearbeidet ble det brukt et turtall på 950 r/min, og 350 r/min ved boringen.

Toleransene ble sannsynligvis ikke nøyaktige da det ikke var tilgjengelig måleutstyr som målte tusendels millimeter. Det var også bare skjærestål med 1,2mm neseradius. Dette skjærestålet ble

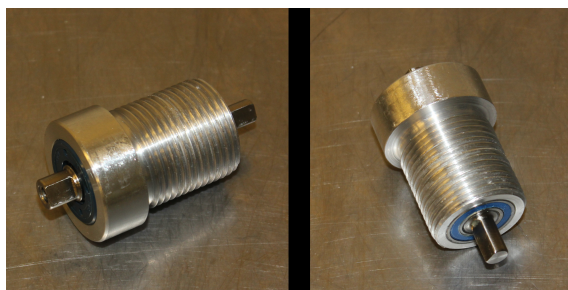
derfor brukt ved både grov- og findreining. Det ble gått over med 320 smergelpapir, noe som økte kvaliteten på overflateruheten. Utstyr for å måle ruhet var heller ikke tilgjengelig på verksted. Til tross for manglende måleutstyr og riktige skjære-verktøy ble det et resultat som ga en press-pasning mellom aksel og lager.

Det ble også gjort unntak ved valg av turtall på akselgjennomføringen. For boringen av det gjennomgående hullet ble det også valgt 350 r/min. Dette ble gjort for å unngå kast i akselen.

Det manglet også utstyr for å måle de indre toleransene i hullet. Her ble det brukt digitalt skyvelære som målte hundredels millimeter. På samme måte som med akslingen, ble det maskinert til presspasning mellom lager og boring. Figur 92 og 93 viser det ferdige resultatet av motorakselen og akselgjennomføring, samt lager og akseltetning.



Figur 92: Resultat av motoraksel og akselgjennomføring



Figur 93: Resultat av montert motoraksel og akselgjennomføring

Det var større motstand mot rotasjon i akselen på det ferdige akselsystemet i denne utgaven enn det var i akselsystemet fra mekatronikkprosjektet. Det var mer friksjon i kulelagerene som ble kjøpt inn til denne utgaven enn mekatronikkprosjektet. Lagerene brukt i denne prototypen var også rimeligere enn mekatronikkprosjektet. Det kjentes ut som om det ikke var avgradet godt nok innvendig i lageret etter produksjon.

Det var avvik på målene på motorakselen forhold til det som var oppgitt fra leverandør. Dette førte til en slark i den PUR-støpte adapteren. Motoraksel må måles før en setter i gang dreiearbeidet så en får en skikkelig pasning i koblingen.

Når sjøsidelageret presses vil det bli tvunget noe luft mellom de to lagerene. Noe som løser dette problemet er at sjøsidelageret har bare en tetning som fjernes ved pressing. Etter pressing fylles lageret med grease, og platen monteres tilbake på plass.

Motor må kobles opp, og en må gjøre tester for å se hvor stort effekttap akselsystemet gir.

4.4 Motormodul

Det ble ikke brukt bakgass under sveisingen. Det var ikke tilgjengelig argonflaske med to uttak. Løsningen ville vært å ta bakgass fra en gassflaske som tilhørte en annen maskin, men det var flere andre prosjekt på verkstedet med behov for sveising da det åpnet for studenter igjen etter nedstenging. Innvendig er derfor baksveisen skarp og korrodert. På grunn av manglende bakgass har sveisen tapt seg i styrke og holdbarhet, men fungerer som prototype. Modulene ble heller ikke syrevasket utvendig etter sveising, men pusset ned med en roterende stålbørste. Dette gjør det mer sannsynlig at det utvikler seg overflaterust på modulen etter bruk i sjøvann.

Ved punktering av motorbraketten til planetmodulen ble det behov for MIG-apparat for å nå inn til festet. Hadde det vært tilgjengelig korte elektrodehetter hadde en nådd fram med TIG-pistolen. Ved bygging av en snekkemodul vil ikke dette problemet oppstå.

Den planlagte byggerekkefølgen, materialbruken og metodene førte til at en fikk motor plassert med riktig avstand til vingegaksele uten spenninger. Ferdigbygd planetmodul vises i Figur 94 og Figur 95.



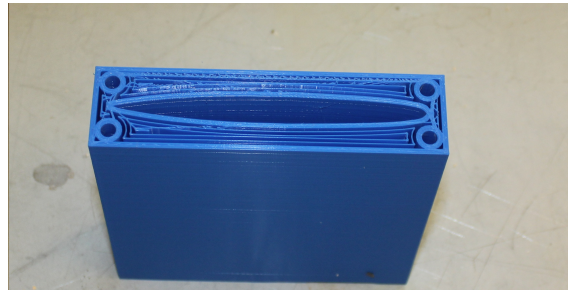
Figur 94: Resultat planetmodul uten påskrudd muffe.



Figur 95: Resultat planetmodul med påskrudd muffe.

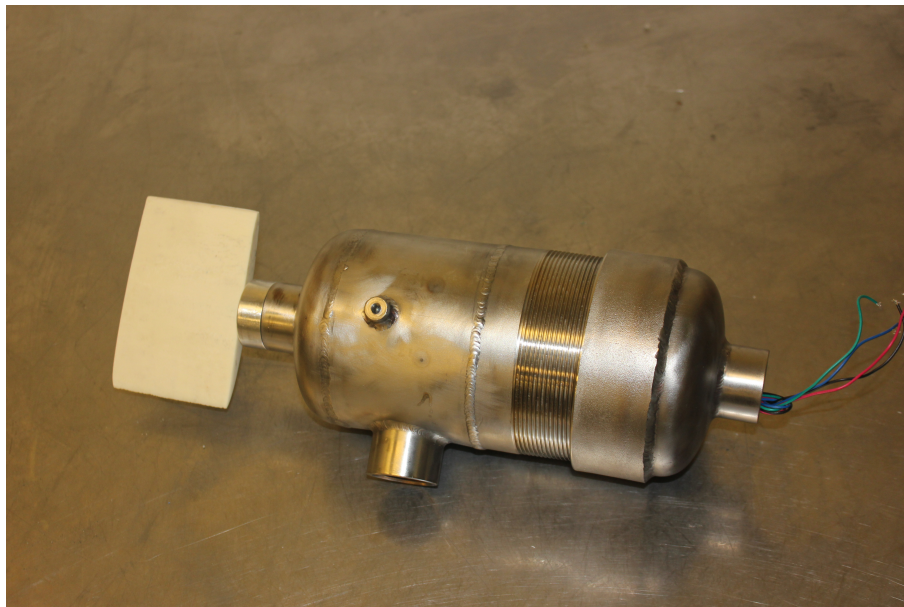
4.5 Vinger

Det ble forsøkt å 3D-printe en støpeform for vingene flere ganger. Ingen av forsøkene ga gode resultater. Tilstanden på printerene ved NTNU i Ålesund var preget av uforsiktig bruk og manglende vedlikehold. For å teste støpeformen ble det brukt en print som ble avsluttet for tidlig, vist i Figur 96. Det manglet 10mm av vingebredden.



Figur 96: Resultat av støpeform til vinge

Vingen ble ødelagt da den ble slått ut av formen. Til tross for rikelig med slippmiddel ble arealet som vingen skulle gli ut av for stort. D-profilen av støpeformen knakk inn i vingen, og forsøkene med å få dette ut resulterte i mer ødeleggelser. De ødelagte partiene fra vingene ble trimmet av i en båndsg. Det ble boret hull i vingen så den kunne bli tredd over akselen for syns skyld. Resultatet er vist i Figur 97.



Figur 97: Resultat av motormodul med vinge.

4.6 Slepepunkt

Det ble gjort en test om beregningene av gummilinen stemte. Beregningene viste at en lengde på 746,6mm ville strekke seg med 554,4mm til en ny lengde på 1301mm med en last på 34N. I testen ble det brukt to vekter på til sammen 3,5kg. Med denne vekten skal den utstrakte lengden i følge det samme regnearket bli 1457,7mm fra en opprinnelig lengde på 831,8. Snoren ble tredd gjennom vektene og festet med en pålestikk. Enden av stikket og lengden 831,8mm ble merket med tusj som vist i Figur 98.



Figur 98: Oppsett for test av forlengelse.



Figur 99: Test av forlengelse av gummline.

Gummisnoren ble tredd inn bak en dør, og 831,8mm merket stakk rett ut fra dørsprekken som vist i Figur 99. Den nye lengden ned til pålestikkmerket stemte med beregningen.

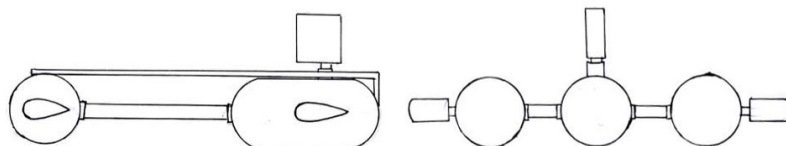
4.7 Oppdrift

ROV-en vil synke slik som den er designet til nå, uten påmontert utstyr. Om den ikke fylles med olje veier den 28,8 kg, og har en negativ netto oppdrift på 77,8N. Om den fylles med olje veier den 36,4kg og har en negativ netto oppdrift på 158N.

5 Diskusjon og videre arbeid

5.1 Design

Det valgte konseptet skal gi en mer forutsigbar styring enn tidligere prototyper siden formen er mer hydrodynamisk tilpasset, og en kan plassere vinger slik en ønsker for å tilpasse styringen i forhold til situasjon. En snekkemodul kan også plasseres som et rør så en får styring i yaw-vinkel som vist i Figur 71. Ermetorør med svivelmuttere gjør det enkelt å forandre på lengder, tre kabler, legge til utstyr, og å feste utstyr.



Figur 100: ROV med rør.

Lav høyde i forhold til bredde og lengde vil gjøre det mer utfordrende å stabilisere ROV-en med tanke på oppdrift og tyngde.

Siden dette konseptet i stor grad er bygget opp av koblinger og kjøpte deler, er det mer kostbart i forhold til de andre konseptene og de tidligere prototypene. Byggingen av konseptet krever at konstruktøren har erfaringer innen dreining, fresing og sveising, eller har tilsyn og oppfølging fra noen med slike erfaringer. På en annen side er det enklere og mindre tidskrevende å komme til, demontere og montere utstyr. Konstruksjonen er sterkere enn tidligere utgaver med tanke på material og form.

Konseptet innfrir prioriteringene til brukerprofilen. Konseptet er fleksibelt, og gir flere muligheter for å tilpasse en ROV etter behov.

5.2 Motormodul

Det var fokus på enkel tilvirkning i designet. Det er mulig å lage moduler som utnytter den innvendige plassen bedre ved å lage jigger for hullplasseringer og delplasseringer for punkting og sammenstilling. En mer kompakt modul vil føre til en mindre oppdrift, og det er ikke sikkert det vil gi hydrodynamiske fordeler. På en annen side vil en mer kompakt modul føre til en lavere byggevekstkostnad.

Motorer med ferdig påmonterte girkasser som kan rotere i hele omdreininger er en forbedring fra tidligere løsninger. For det første er ikke den roterende bevegelsen begrenset av slaglengden til en lineæraktuator. For det andre får en en mer kompakt løsning med tilstrekkelig dreiemoment og omdreiningstall enn det som er verdt å bruke tid på å lage selv.

5.3 Vinge

Dersom en ønsker å PUR-støpe vinger bør det brukes en støpeform av CS25 silikongummi eller lignende. En 3D-printer vingen, plasserer den i en beholder, og heller over silikongummi. Silikongummi er elastisk, men holder formen sin. Polyuretan fester seg ikke til silikongummi.

5.4 Slepepunkt

Beregningene av plassering av nylontau og gummiline er forenklet, og er bare ment som et utgangspunkt å starte fysiske sjøtester med. Når det blir påmontert utstyr på ROV-en kan tyngdepunkt

og utvendig form forandre seg. Slepevinkel vil også variere underveis i et slep. CFD-analysene som er gjort i denne oppgaven er gjort uten tidligere erfaringer, og uten tilsyn fra mer kyndige. Mer avanserte simuleringer og fysiske tester må gjøres for å finne en fungerende måte å gjør slepet på.

5.5 Oppdrift og trykkutjevning

Alt utstyr og deler som skal monteres på ROV-en må veies, og volum bør måles slik at det er kontroll på oppdriften. Da kan en plassere delene på ROV-en på best mulig måte med tanke på stabilisasjon, og en får justert til et brukbart oppdrift-tyngdeforhold før en sjøsetter. Det er vanskelig å si noe om utgangspunktet på negativ netto oppdrift på 78N da vi ikke har fått oversikt eller tilgang til utstyret som skal monteres.

Den negative netto oppdriften på 78N fra utgangspunktet i denne oppgaven er forholdsvis lav. Å legge til 78N oppdrift skal være uproblematisk med egnede flyteelementer. Disse elementene bør monteres på undersiden av platen så det ikke går ut over de hydrodynamiske egenskapene. Det må også finnes ut fra sjøtester om det er fordelaktig med lett negativ, lett positiv eller nøytral netto oppdrift.

I fremdriftsmøter ble det diskutert metoder for å utjevne det innvendige trykket på ROV-en slik at det blir likt med vannsøyletrykket utenfor. De ulike delene i motorene og girkassene er montert sammen med tetninger, og de har rektangulære deksler. Det må bli sett på om motor-løsningene tåler slike trykkforskjeller, eller om en kan åpne opp for at trykket jevnes ut i motor og gir også. Ved trykkutjevning vil det være fordelaktig å fylle det innvendige volumet med en inkompressibel olje. Konseptet gjør det enkelt å montere løsninger for olje fylling/tapping og trykkutjevning. Uten påmontert utstyr må en kompensere med dobbelt så mye oppdrift om en fyller ROV-en med olje, enn med bare luft.

5.6 CFD-analyse

CFD-analysene ble gjort uten tidligere erfaringer. Det er usikkert om det ble brukt riktige innstillinger, som å bestemme oppløsninger og grensebetingelser. Begrunningen av avstanden mellom vingene i lengderetning ble gjort på bakgrunn av hastigheten til sjøvannet visualisert med fargede piler i forskjellige retninger. Det lyktes ikke i å få et bilde av turbulenser. Drag-koeffisienten til ROV-formen på 0,897 virker noe høy sammenlignet med erfaringstall på lignende former.

Det må bli gjort bedre og mer avanserte simuleringer om det er ønskelig med et mer sikkert bilde av de hydrodynamiske egenskapene til en slik ROV.

6 Konklusjon

Det var ønskelig med en praktisk tilnærming til denne oppgaven. Utbrudd av covid 19 begrenset tilgangen til fasiliteter hos NTNU i Ålesund. Dette medvirket til at det ikke ble tid til å ferdigstille en prototype av en slepe-ROV som kunne testes i sjø. Forvirring rundt tilgjengelige midler, hvilke egenskaper som skulle prioriteres, og bestilling av deler, bidro til en sen igangsetting av byggingen. Dette skyldes i stor grad av digital kommunikasjon og at innkjøp måtte gå gjennom flere ledd.

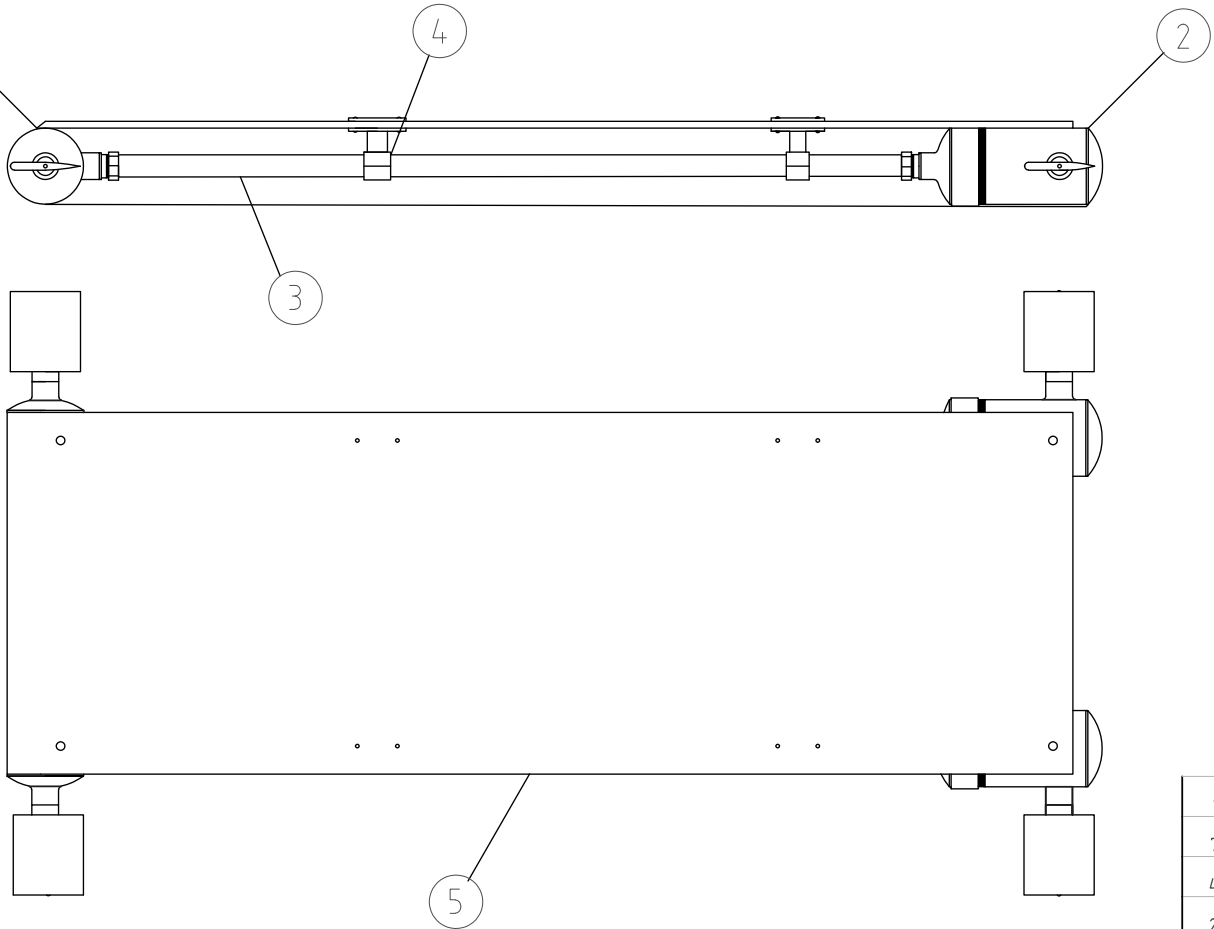
Slep under havoverflaten med dybdestyring er komplisert. Analyser og beregninger gjort i oppgaven er forenklet og ment som et utgangspunkt for sjøtester. Det gjenstår fortsatt arbeid som ferdigstilling av en testklar prototype, og videreutvikling av tekniske løsninger.

Det valgte konseptet er fleksibelt og innfrir de fleste ønskene til brukerprofilen. Konseptet krever at konstruktør har erfaringer innen sveising og maskinering, eller får oppfølging av noen med slike erfaringer. Det valgte konseptet fører til større materialkostnader enn de andre konseptene og de tidligere prototypene. Materialvalgene gjør at konstruksjonen skal håndtere slag, trykk og korrosive miljøer.

Bibliography

- Airfoiltools (2021). *NACA 0010-65*. URL: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca001065-il> (sjekket 12. mai 2021).
- Chang, P. K. (1970). «Separation of flow». I: *Pergamon press* 1, s. 1–8.
- Dahlvig, G. og G Christensen S. Strømsnes (2002). *Konstruksjonselementer*. Gyldendal.
- Fiskeridirektoratet (2021). *Spøkelsesfiske*. URL: <https://www.fiskeridir.no/Sjoeareal/Marin-forsoepling/Spoekelsesfiske> (sjekket 15. mai 2021).
- Haram, H. I. L., B. M. Tennfjord og R. S. Thorholm (2019). «Towed ROV». I: *NTNU open* 1, s. 1–111.
- Hartvigsen, Hartvig. mfl. (2002). *Verkstedhåndboka*. Gyldendal.
- Homdrom, K. S. mfl. (2018). «Towed ROV». I: *NTNU open* 1, s. 1–123.
- Johannessen, J. (2002). *Tekniske tabeller*. Cappelen.
- Kongsberg (2021). *Pulsar*. URL: <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/pulsar-high-resolution-side-scan-sonar2> (sjekket 11. mai 2021).
- NTNU (udatert). *Klassisk tynnplateteori*. Laster ned PDF. URL: <https://www.ntnu.no/wiki/download/attachments/98076114/13-Plateteori.pdf?version=1&modificationDate=1481531124000&api=v2>.
- Pedersen, S.E og O. Olsen Gustavsen J. S. Kaasa (2017). *Teknisk formelsamling med tabeller 7. utgave*. Gyldendal.
- Pipelife (2007). *Rørhåndboka*. Pipelife.
- Ringdal, J., J. Halle og D. E. Myhre (2020). «Towed ROV». I: *NTNU, IHB* 1, s. 1–53.
- Sea Sciences INC (2021). *Why the Acrobat*. URL: <https://www.seasciences.com/why-the-acrobat/> (sjekket 11. mai 2021).
- Stepperonline (2021). *Nema 17 Stepper Motor Bipolar L=48mm w/ Gear Ratio 100:1 Planetary Gearbox*. URL: <https://www.omc-stepperonline.com/economy-planetary-gearbox/nema-17-stepper-motor-bipolar-l48mm-w-gear-raio-1001-planetary-gearbox-17hs19-1684s-pg100.html?mfp=16o-ship-from%5B60%2C71%2C61%5D%2C161-motor-nema-size%5BNema%2011%2CNema%2014%2CNema%2016%2CNema%2017%2CNema%2023%5D> (sjekket 17. mai 2021).

Appendix

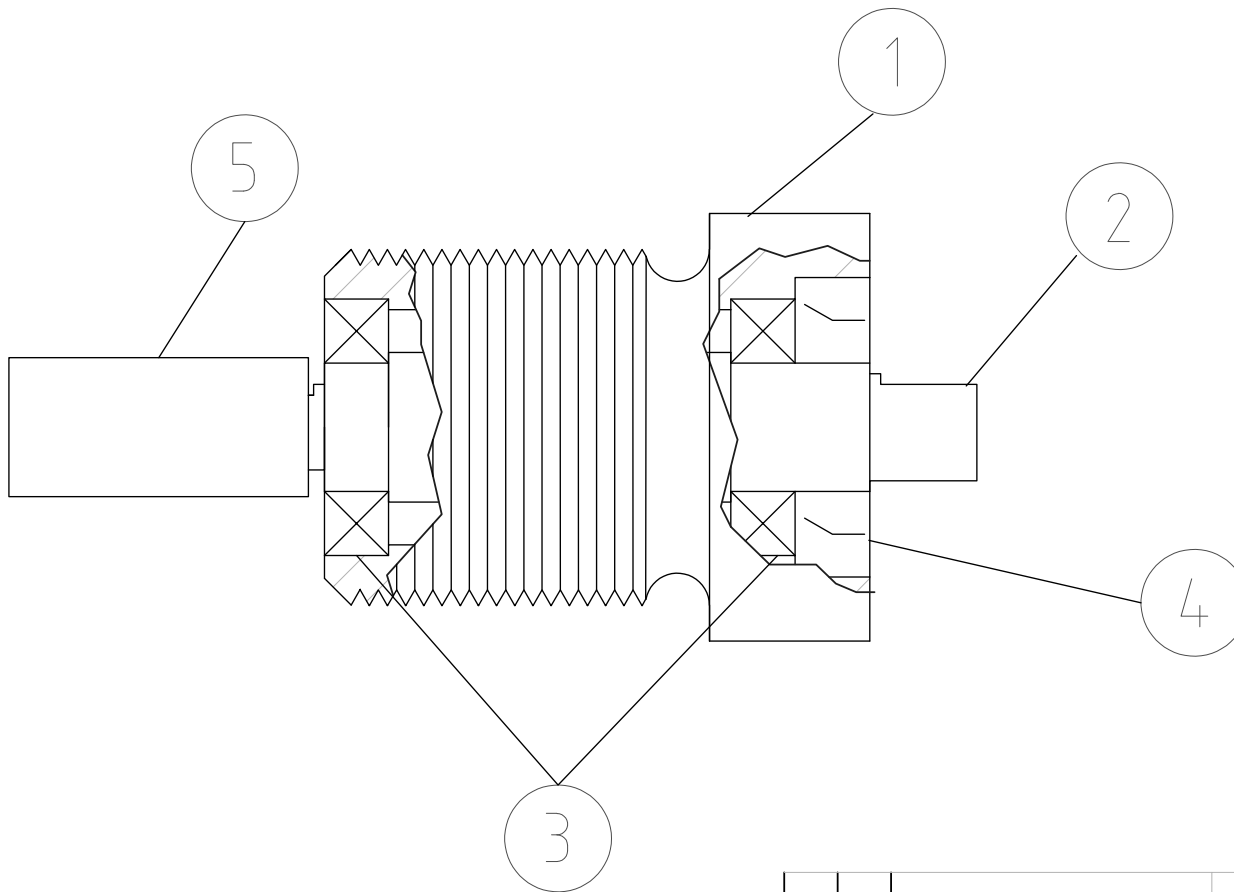


Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon	Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke
1	5	Plate		PE		Tilpasses
7	4	Plastikk-klammer Ø22 m/brakett				Tilpasses
4	3	Ø22x2 Rør		316		
2	2	Snekke-modul	1003		3.7kg	
2	1	Planet-modul	1002		3.6kg	

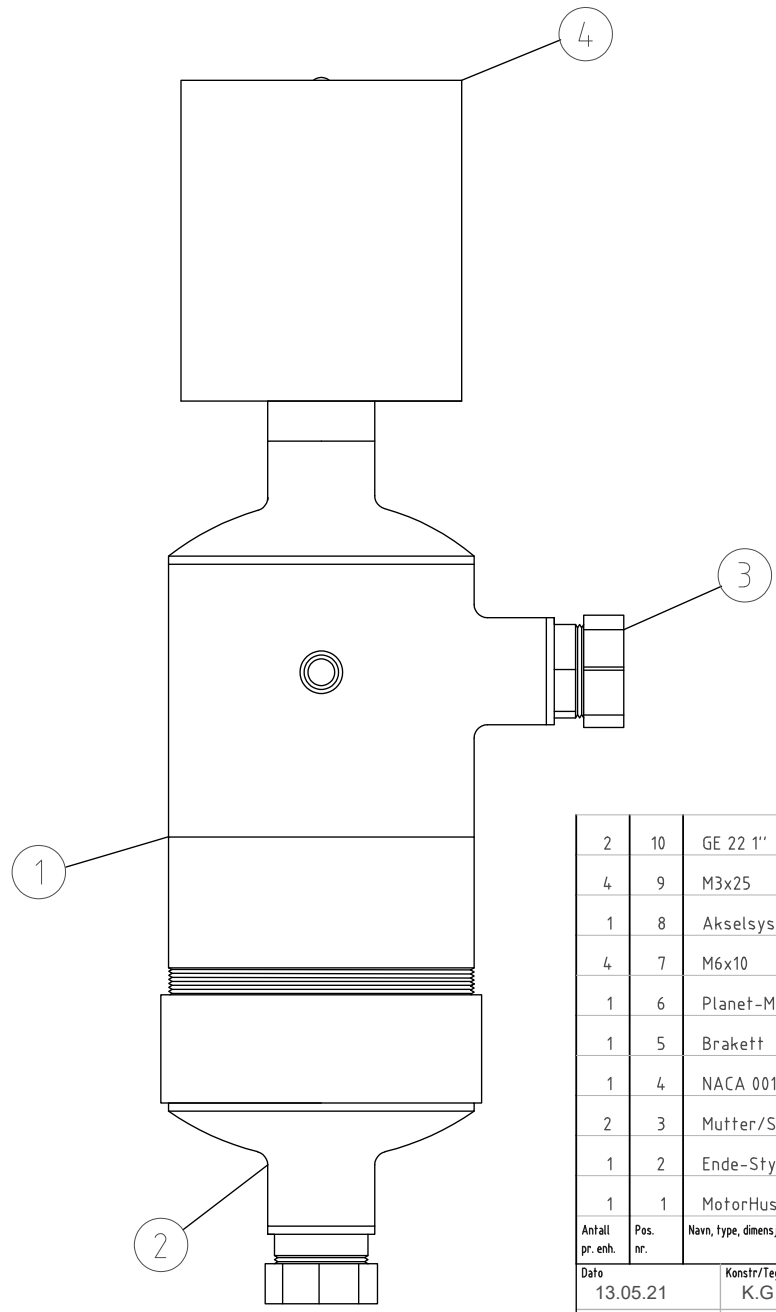
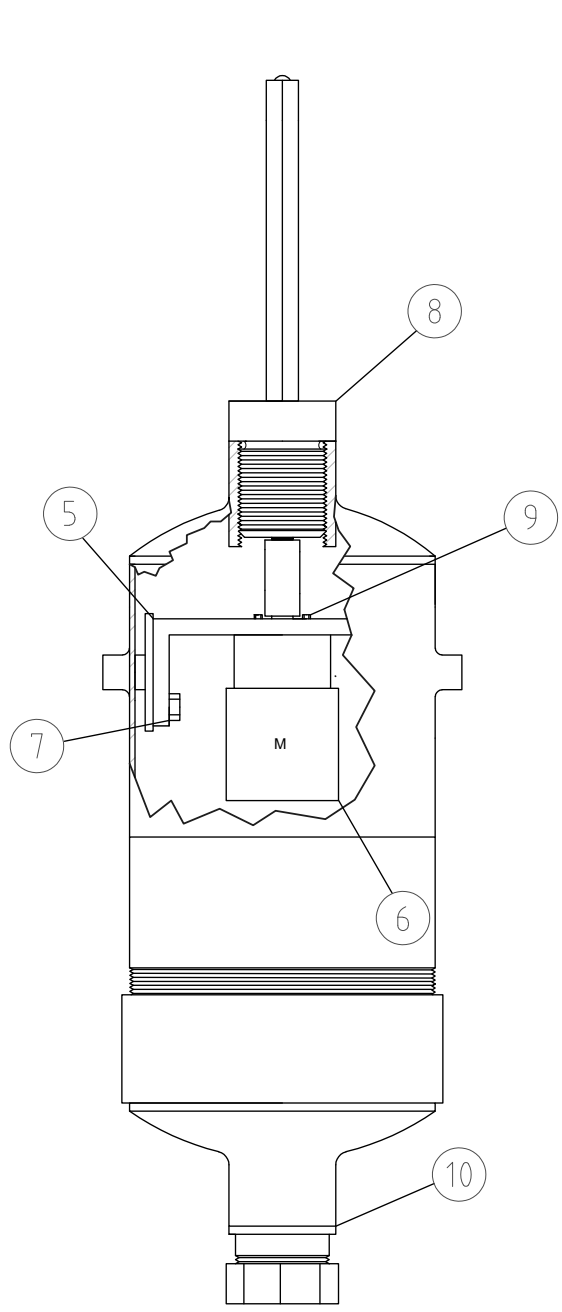
Dato	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod
14.05.21	K.G		1 : 8	
Kontroll	Stand.kontr.	Godkjent	Prosjeksjonsmetode	

Slepe-ROV Sammenstilling	Erstatning for:	Erstattet av:
	1004	

Henvising	Beregning	Gruppe
-----------	-----------	--------



1	5	Adapter		PUR		Støpedel
1	4	Akselretning 12/28/7	ISO	NBR		Bestillingsvare
2	3	Kulelager 61901-2RS 12/24/6	ISO	304		Bestillingsvare
1	2	Aksel	ISO	AISI 316 syrefast		
1	1	Akselgjennomføring	ISO	ALU		
Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon	Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke
Dato	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod		
12.05.21	K.G		2 : 1			
Kontroll	Stand.kontr.	Godkjent	Prosjeksjonsmetode	Erstatning for:		
Akselsystem Sammenstilling				Erstattet av:		
				1001		
Henvisning		Beregning	Gruppe			

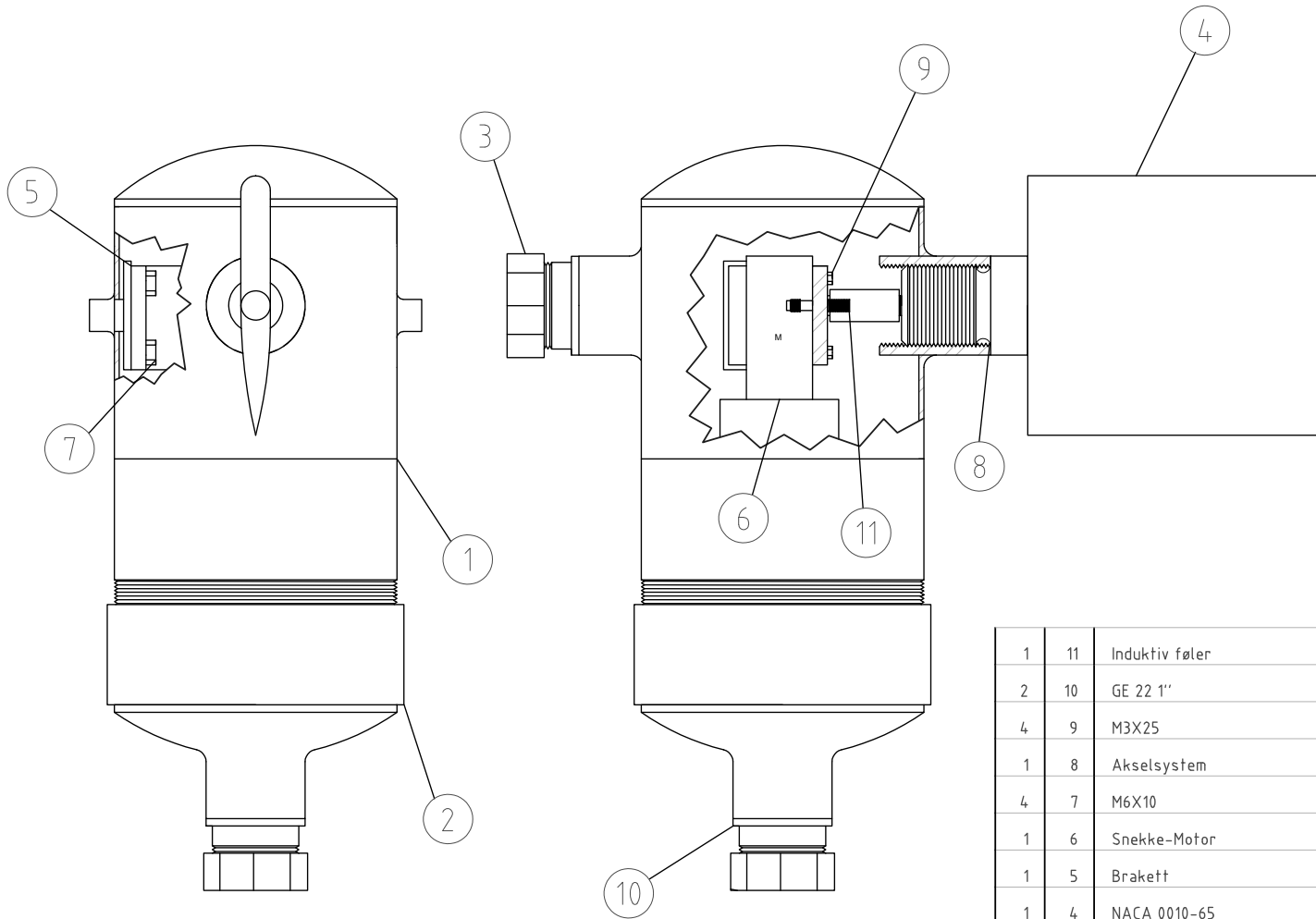


2	10	GE 22 1"			316		Bestilles
4	9	M3x25			316		Lager
1	8	Akselsystem	1001				Sammenstilling
4	7	M6x10			316		Lager
1	6	Planet-Motor					Bestilles
1	5	Brakett	3001	ALU			
1	4	NACA 0010-65		PUR			Støpedel
2	3	Mutter/Snittring M30,Ø22					Bestilles
1	2	Ende-Stykke	2003	316			
1	1	MotorHus-Planet	2001	316			
Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon	Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke	

Dato	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod
13.05.21	K.G		1:2	
Kontroll	Stand.kontr.	Godkjent	Prosjeksjonsmetode	

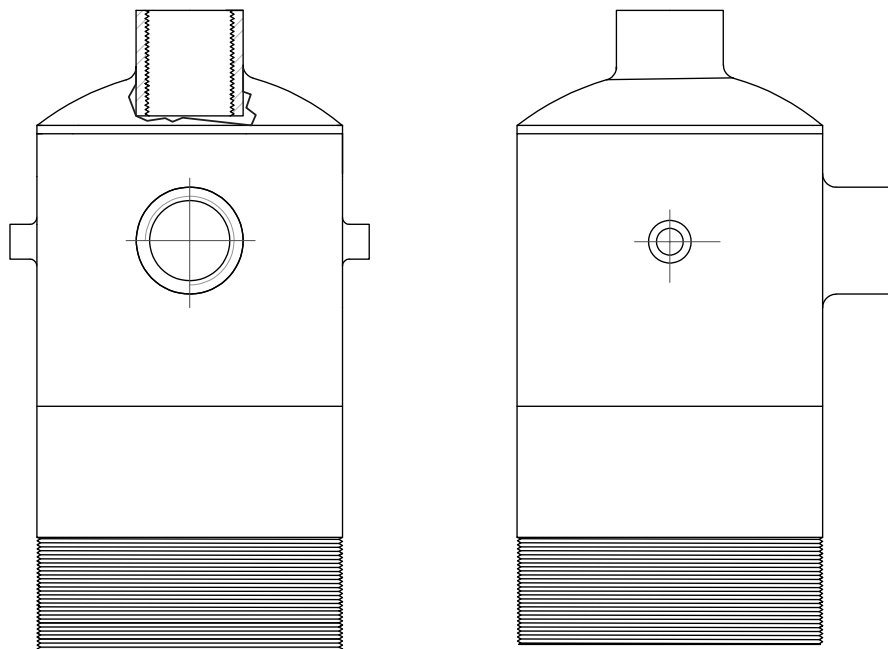
Planet-modul Sammenstilling			Erstatning for:	Erstattet av:
			1002	

Henvising	Beregning	Gruppe
-----------	-----------	--------

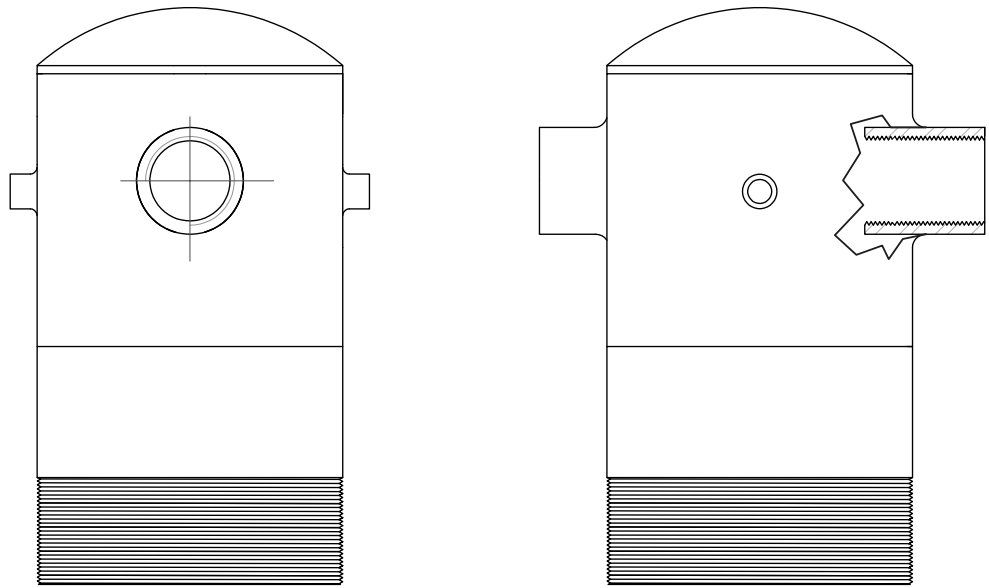


1	11	Induktiv føler			316		
2	10	GE 22 1"			316		Bestilles
4	9	M3X25			316		Lager
1	8	Akselsystem	1001				Sammenstilling
4	7	M6X10			316		Lager
1	6	Snekke-Motor					Bestilles
1	5	Brakett	3002		ALU		
1	4	NACA 0010-65			PUR		Støpedel
2	3	Mutter/Snittring M30,Ø22					Bestilles
1	2	Endestykke	2003		316		
1	1	MotorHus-Snekke	2002		316		
Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon	Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke	

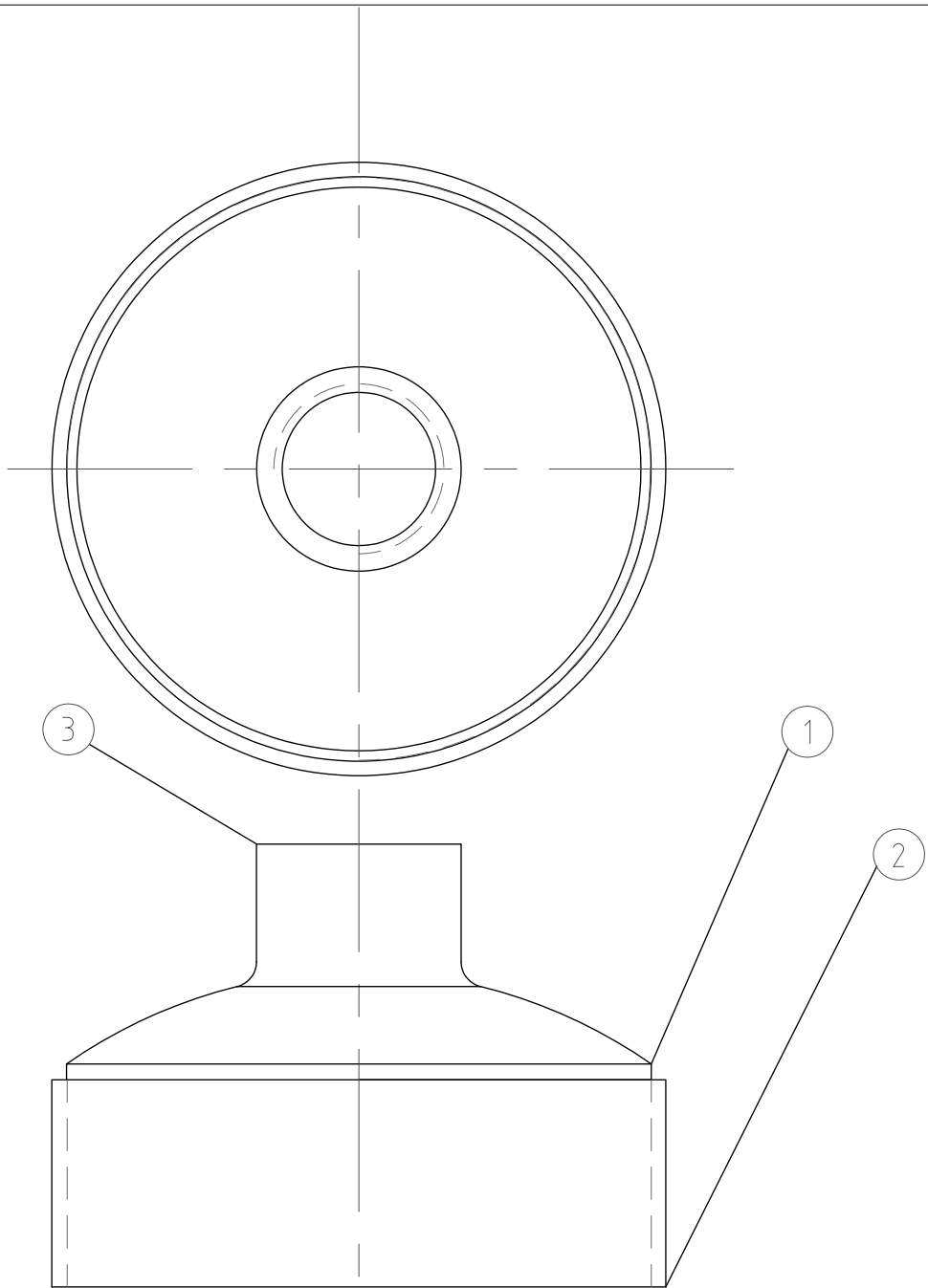
Dato	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod
13.05.21	K.G		1:2	
Kontroll	Stand.kontr.	Godkjent	Prosjeksjonsmetode	
Snekke-Modul Sammenstilling				Erstattet for:
				Erstattet av:
				1003
Henvising	Beregning	Gruppe		



1							
Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon		Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke
Dato	05.05.21	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod		
Kontroll		K.G		1:2			
		Stand.kontr.	Godkjent	Prosjeksjonsmetode	Erstatning for:		Erstattet av:
Motor-Hus Planet					2001		
Henvising			Beregning	Gruppe			



Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon			Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke
Dato	05.05.21	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod			
Kontroll		Stand.kontr.	Godkjent	Prosjeksjonsmetode				
MotorHus Snekke								
2002					Henvvisning	Beregning	Gruppe	

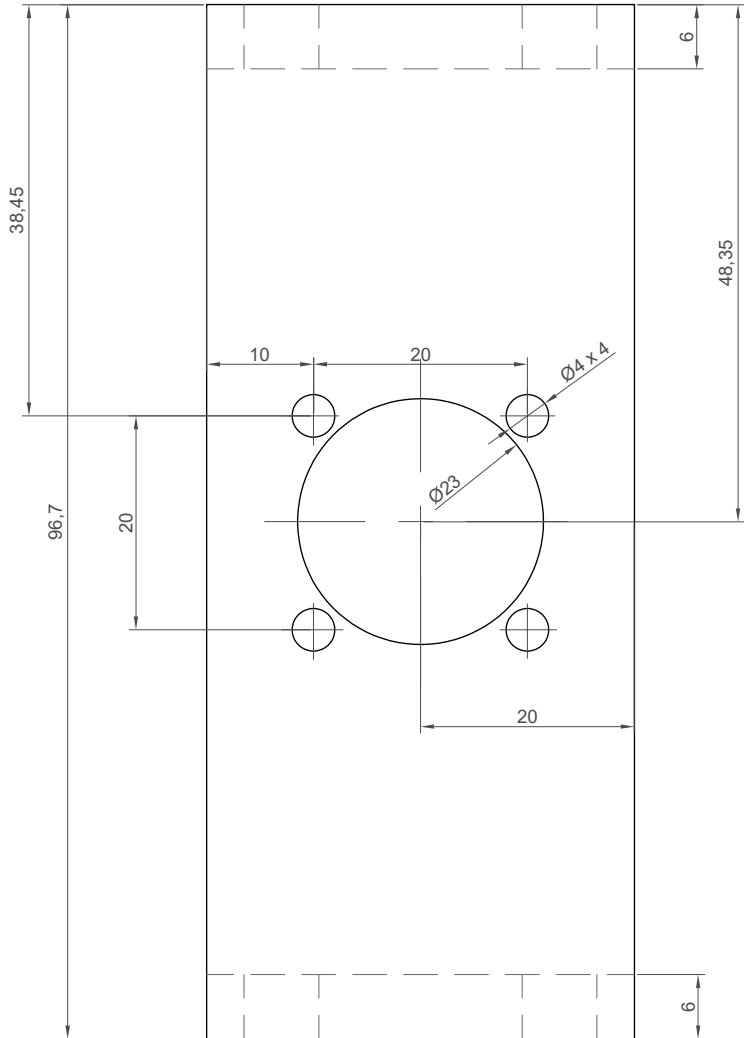
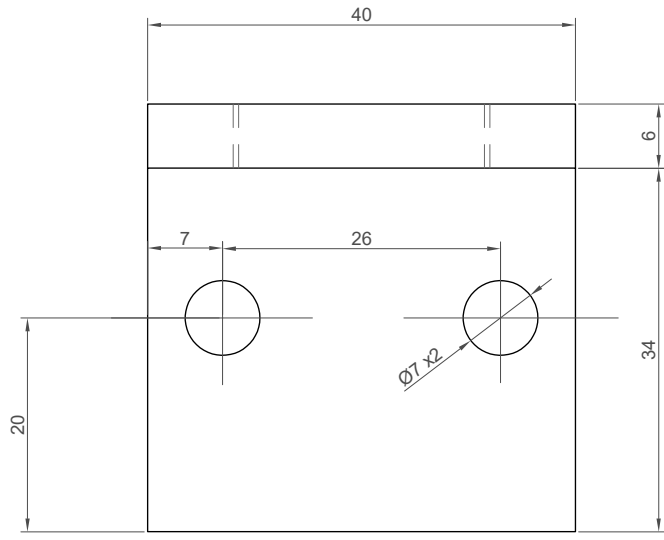


1	3	Muffe 1"		316		Bestilles
1	2	Muffe 4" BSP		316		Bestilles
1	1	Endebunn 114,3x3		316		Bestilles
Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon	Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke

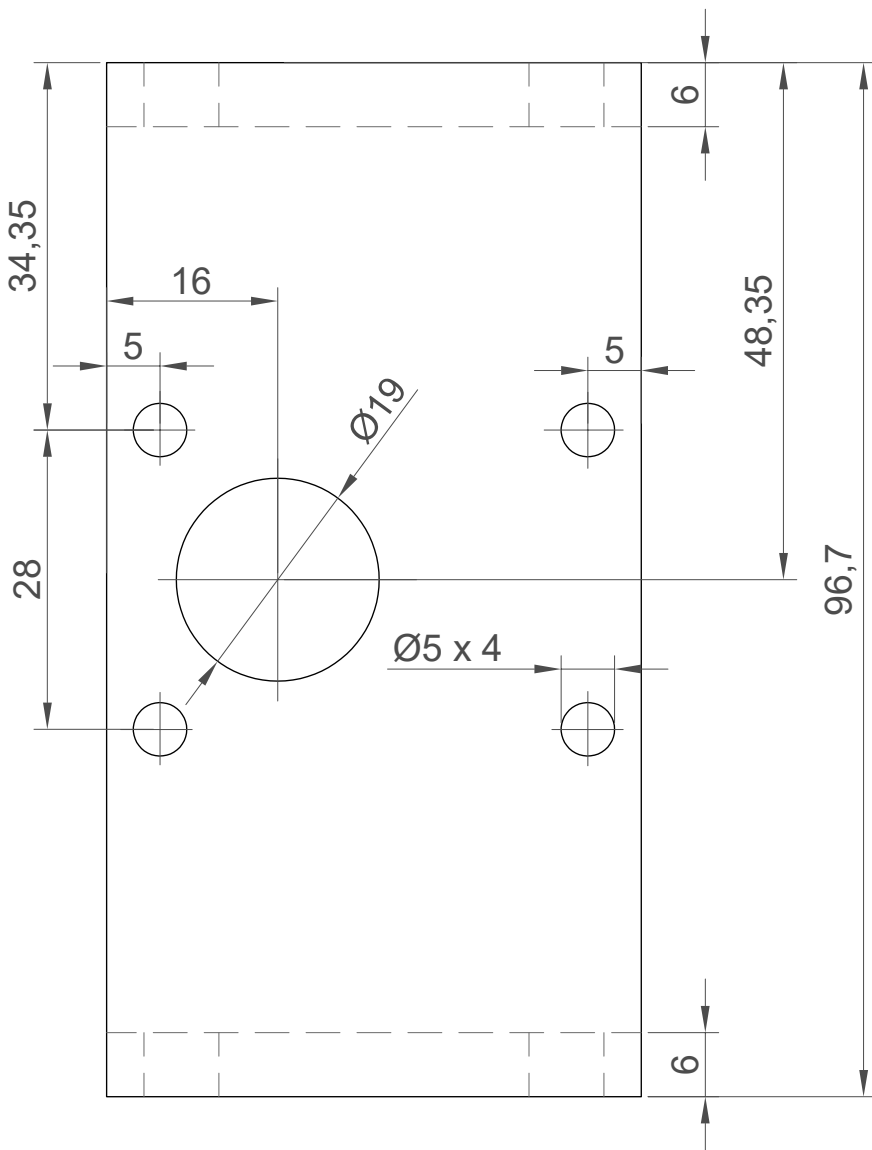
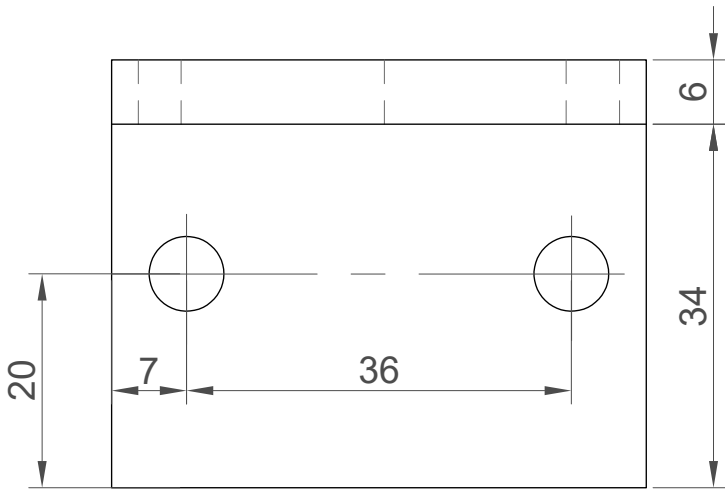
Dato	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod
04.05.21	E.M		1:3	
Kontroll	Stand.kontr.	Godkjent	Prosjeksjonsmetode	

Ende-stykke	Erstatning for:	Erstattet av:
	2003	

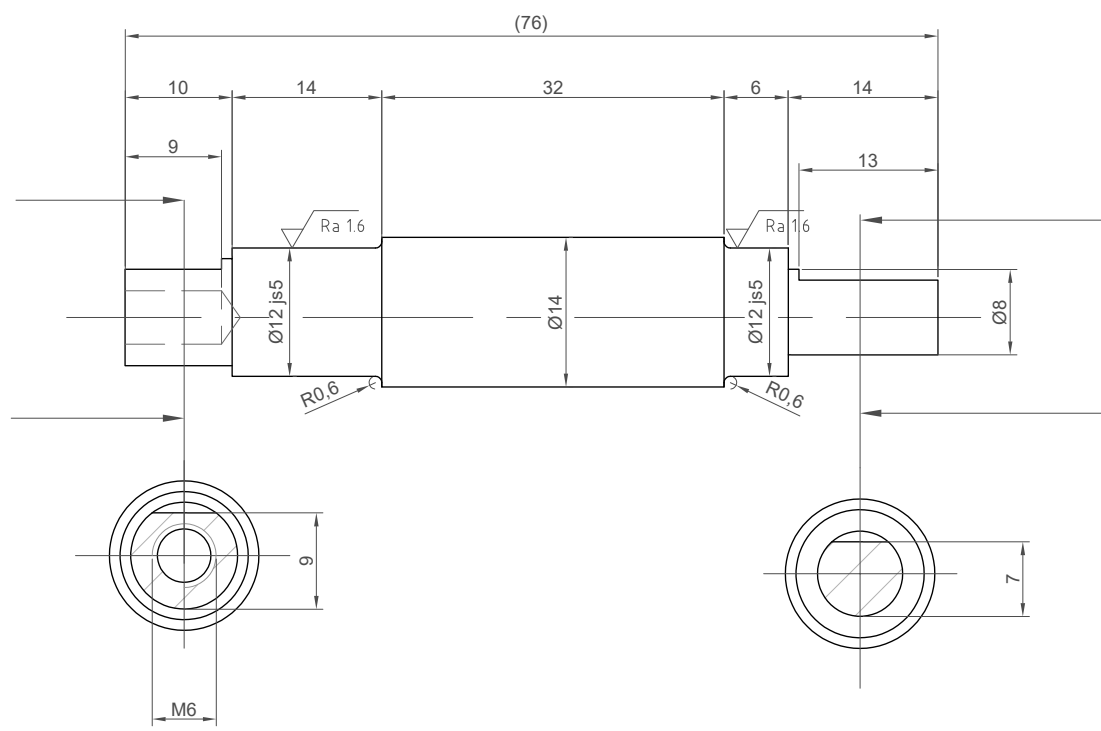
Henvising	Beregning	Gruppe
-----------	-----------	--------



1	5	Brakett	ISO	ALU		
Antall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon	Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke
Dato	26.04.21	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod	
Kontroll		K.G	Godkjent	2 : 1		
				Projeksjonsmetode	Erstatning for:	
Brakett				Erstattet av:		
Planet-modul				3001		
Henvising		Beregning		Gruppe		

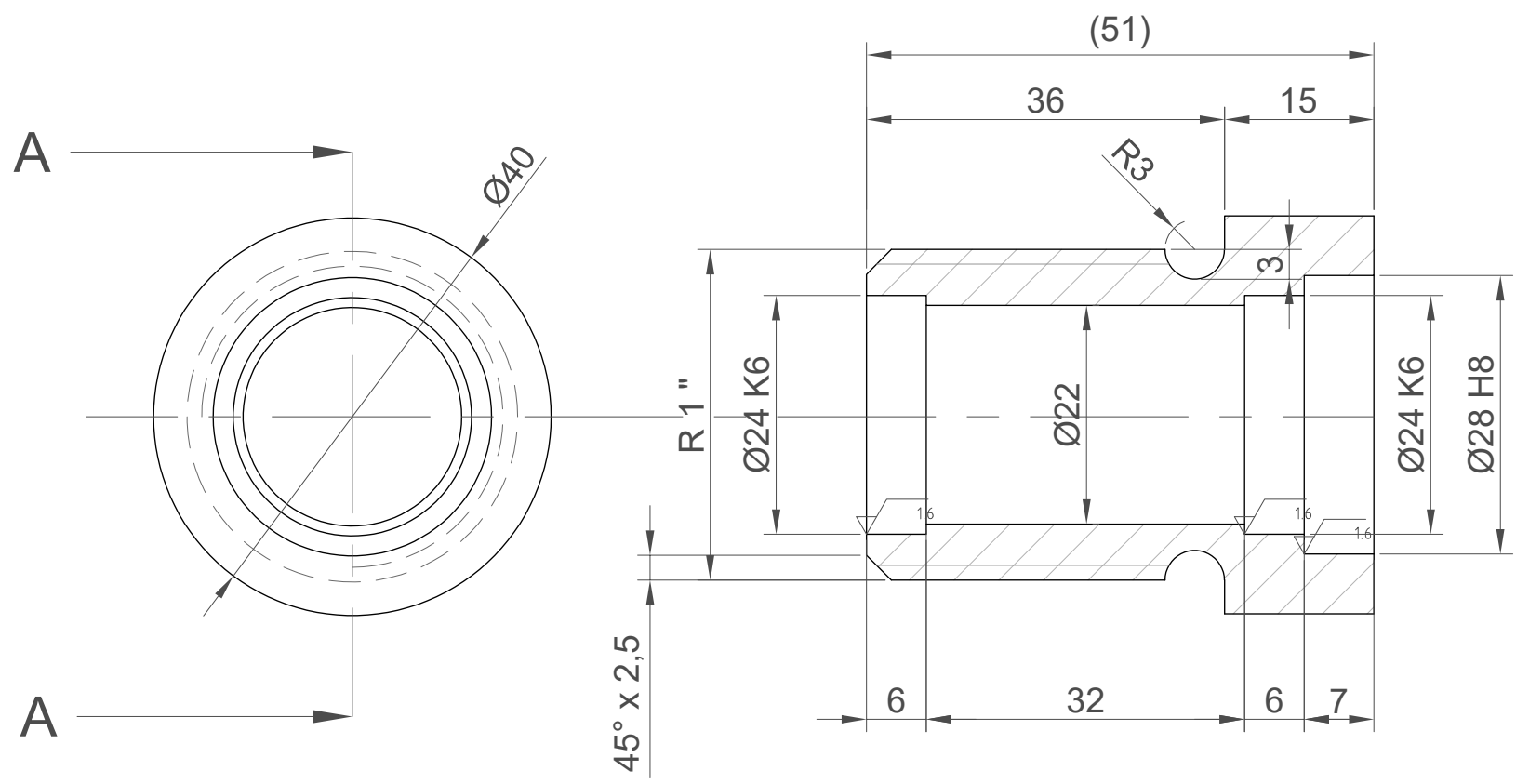


1	5	Brakett	ISO	ALU				
Dato 26.04.21		Konstr./Tegnet K.G	Tracet	Målestokk 2:1	NTNU Pod			
Kontroll		Stand.kontr.	Godkjent	Prosjeksjonsmetode				
Brakket Snekke-modul					Erstatning for:		Erstattet av:	
					3002			
Henvisning			Beregning			Gruppe		



Dreining
3.2

4	2	Aksel	ISO	AISI 316 syrefast		
Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon	Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke
Dato	28.03.21	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU Pod	
Kontroll		Stand.kontr.	Godkjent	Projeksjonsmetode		
Aksel				Erstatning for:	Erstattet av:	
				4001		
Henvvisning		Beregning		Gruppe		



Dreining
3.2

1	1	Akselgjennomføring	ISO	ALU		
Anfall pr. enh.	Pos. nr.	Navn, type, dimensjon	Tegning Produktstd.	Materiale	kg pr. stk.	Kjennemerke
Dato	28.03.21	Konstr/Tegnet	Tracet	Målestokk	NTNU	
Kontroll		Stand.kontr.	Godkjent	Projeksjonsmetode	Pod	
Akselgjennomføring					Erstatning for:	Erstattet av:
					4002	
Henvising	Beregning			Gruppe		

