



CHALMERS



Design och konstruktion av en autonom undervattensglidare

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima vetenskaper

Andreas Jonsson
Andreas Järlebratt
Benjamin Rask

Maja Sunesson
Oscar Schyum
Oskar Persson

Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2023

Design och konstruktion av en autonom undervattensglidare

ANDREAS JONSSON
ANDREAS JÄRLEBRATT
BENJAMIN RASK
MAJA SUNESSON
OSCAR SCHYUM
OSKAR PERSSON



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023

Design och konstruktion av en autonom undervattensglidare

© ANDREAS JONSSON, ANDREAS JÄRLEBRATT, BENJAMIN RASK, MAJA SUNESSON, OSCAR SCHYUM, OSKAR PERSSON, 2023.

Handledare: Ola Benderius, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper
Examinator: Ola Benderius, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2023
Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper
Avdelningen för fordonsteknik och autonoma system
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: 3D-rendering av slutgiltigt konstruktion och design av en autonom undervattensglidare.

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2023

Abstract

Underwater vehicles constitute a significant part of current research, which has gained increasing importance in recent years. Particularly notable is the accelerating pace and growing ability to automate their control systems. Among the various types of these underwater vehicles, gliders are prominently featured. The basis followed by an underwater glider, similar to a traditional submarine, is solely the Archimedes principle. Buoyancy is modified by changing the volume or mass of the glider which through the use of wings and the ability to move its center of gravity, generates propulsion. This method of propulsion is considered highly energy-efficient and enables a glider to explore the ocean for extended periods and over long distances with minimal supervision, primarily conducting various data collections.

This report explores the possibilities of analyzing, designing and manufacturing a glider that operates safely and successfully in challenging environments. The project specifically focuses on achieving good maneuverability, modularity, low weight and affordability. These aspects have been evaluated through information gathering, calculations and various types of tests. Calculations have been performed on the hull to assess its strength, leakage tests have been conducted to evaluate the glider's watertightness and detailed calculations together with simulations of the wings and fairings have been carried out to determine optimal design and geometry. Tests have been performed on all electronic components. A buoyancy engine is designed based on the Archimedes principle where volume variation controls the magnitude of the force generated by the displaced fluid, thus determining whether the glider floats or sinks.

The project has had full access to Chalmers' prototype laboratory, which has assisted in the manufacturing processes of metal parts. In addition, 3D printing has played a vital role in the manufacturing process. To realize a functional glider it is crucial that all subsystems and components work together in symbiosis, making careful planning and, above all, meticulous execution of the manufacturing process of paramount importance.

In conclusion the project has been successfully completed with a satisfactory outcome. A glider has been designed and constructed in accordance with the established requirements and goals established in the project. Furthermore the project leaves room for continued development and potential follow-up, considering the possibility of additional equipment and a review of the existing systems and components constructed in this project. Finally recommendations are presented for expanded testing of the glider to accurately assess its performance and identify any potential shortcomings.

Sammandrag

Undervattensfarkoster utgör en betydande del av den aktuella forskningen, vilken har fått ökad betydelse under de senaste åren. Särskilt märkbar är den accelererande takten och den växande förmågan att automatisera deras styrsystem. Bland flertalet av olika typer av dessa undervattensfarkoster återfinns glidare. Basisen som en undervattensglidaren följer, likt en traditionell ubåt, är i sig enbart Arkimedes princip. Flytförmågan modifieras genom en ändring av volymen alternativt massan av glidaren vilket med hjälp av vingar och förmågan att flytta sin tyngdpunkt kan generera framdrift. Denna metod att generera framdrift kan anses som mycket energieffektiv och skapar förutsättningen för en glidare att utforska havet under långa tidsperioder och över stora avstånd med minimal tillsyn, där den framförallt genomför diverse datainsamlingar.

Denna rapport utforskar möjligheterna att analysera, designa och tillverka en glidare som fungerar på ett säkert och framgångsrikt sätt i utmanande miljöer. Projektet är specifikt fokuserat på att ha en god manövrerbarhet, bra modulariserbarhet, en låg vikt och ett överkomligt pris. Dessa aspekter har utvärderats med hjälp av informationssamling, beräkningar och olika typer av tester. Beräkningar har gjorts på skrovet för att bedöma dess hållfastighet, läckagetest har genomförts för att bedöma om glidaren är tät samt noggranna beräkningar och simulationer av vingar samt kåpor för att bestämma optimal utformning och geometri. Det har genomförts tester på samtliga elektroniska komponenter. En flytkraftsmotor är designad utifrån Arkimedes princip där volymförändringen styr storleken på kraften genererad av den undantryckta vätskan och på så sätt styr huruvida glidaren flyter eller sjunker.

Projektet har haft full tillgång till Chalmers prototypplabb som har assisterat med tillverkningsprocesser av metalldelar. Utöver detta har även 3D-printing spelat en vital roll i tillverkningsprocessen. För att realisera en fungerande glidare gäller det att alla delsystem och komponenter svarar mot varandra i en symbios och det är därför av stor vikt att tillverkningen är väl planerad men framförallt väl exekverad.

Projektets avslutande konstaterar att uppdraget har framgångsrikt genomförts med ett tillfredsställande resultat. En glidare har designats och konstruerats i enlighet med de fastställda kraven och målsättningar som projektet upprättat. Dessutom lämnar projektet öppningar för fortsatt utveckling och eventuell uppföljning, där möjligheten till ytterligare bestyckning och översyn av de befintliga systemen och komponenterna som konstruerats i detta projekt beaktas. Avslutningsvis presenteras rekommendationer för utökad testning av glidaren för att noggrant kartlägga dess prestanda och eventuella brister.

Förord

Författarna vill först rikta ett tack till våra handledare Ola Benderius och Simone Sebben. Ola har under projektet alltid varit som stöd till oss och beställt en mångfald av komponenter sådant att glidaren kunde bli en verklighet. Simone har varit till hjälp med programmet Star CCM+ och försett oss med de resurser vi behövt för att påbörja CFD simuleringar. Författarna hade även velat tacka resterande anställda på Chalmers farkostlabb Revere för hjälp gällande diverse ärenden och funderingar under projektets gång.

Ett tack skall sedan riktas tre olika institutioner för deras betydande bidrag till projektet. Först och främst tackar författarna Voice of the Ocean för ett mycket givande studiebesök där möjligheten att undersöka undervattensglidaren SeaExplorer erbjöds. Vidare vill vi tacka OsloMet för att de bidragit med en mycket lärorik rapport som har varit en värdefull inspirations- och informationskälla för arbetet. Slutligen riktas ett tack till Posiedon Diving Systems i Västra Frölunda för deras vänlighet med att ge oss tillgång till deras bassäng för att genomföra tester av glidaren.

Ett stort tack skall till sist riktas till personalen på Chalmers Prototypverkstad. Specifikt hade vi velat tacka Jan Bragee, forskningsingenjör på prototypverksaden, för ett mycket trevligt bemötande och för en otroligt bra hjälp vid konstruktion av ett flertal av glidarens komponenter. Arbetspassen som vi i gruppen haft tillsammans med Bragee har varit mycket lärorika och han har alltid varit en bra person att diskutera konstruktionen samt designen av olika komponenter med. Det kan med säkerhet fastslås att glidarens utveckling ej hade nått samma framsteg utan hans betydande bistånd, för vilket vi är oerhört tacksamma.

Andreas Jonsson, Andreas Järlebratt, Benjamin Rask
Maja Sunesson, Oscar Schyum och Oskar Persson

Göteborg, Maj 2023

Lista över akronymer

Nedan är en lista i alfabetisk ordning på de akronymer som har använts genom rapporten:

| | Engelska: | Svenska: |
|-----|-------------------------------|-----------------------------|
| AUV | Autonomous Underwater Vehicle | Autonom undervattensfarkost |
| CAD | Computer Aided Design | Datorstödd konstruktion |
| CB | Center of Bouency | Flytkraftscentrum |
| CFD | Computational Fluid Dynamics | Beräkningsströmningsdynamik |
| CG | Center of Gravity | Tyngdpunkt |
| LDF | - | Längd-diameter förhållande |
| PLA | Polylactide | Polylaktid |
| FEM | Finite Element Method | Finita elementmetoden |
| SSR | Solid State Relay | Halvledarrelä |

Innehåll

| | |
|---|------------|
| Lista över Akronymer | vii |
| Lista över Figurer | ix |
| Lista över Tabeller | xi |
| 1 Inledning | 1 |
| 1.1 Syfte | 2 |
| 1.2 Målbeskrivning | 2 |
| 1.3 Avgränsningar | 2 |
| 2 Befintliga glidare | 3 |
| 3 Övergripande metod | 5 |
| 4 Skrov | 6 |
| 4.1 Initial design av skrovets geometri | 6 |
| 4.2 Cylinder | 9 |
| 4.3 Lock | 12 |
| 4.4 Tätningar | 18 |
| 4.5 Offeranoder | 22 |
| 4.6 Komplementerande framdrift | 23 |
| 4.7 Kåpor | 24 |
| 4.8 Vingar | 27 |
| 5 Flytkraftsmotor | 31 |
| 5.1 Typer av flytkraftsmotorer | 32 |
| 5.1.1 Val av flytkraftsmotor | 34 |
| 5.2 Blåsa | 35 |
| 5.3 Reservoar | 36 |
| 5.4 Pump | 38 |
| 5.5 Slutgiltig design av hydraulsystem | 39 |
| 6 Manövrering | 40 |
| 6.1 Stigning och Rullning | 40 |
| 6.2 Ballast | 43 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7 | Elektronik | 44 |
| 7.1 | Mikrokontroller | 44 |
| 7.2 | Sensorer | 45 |
| 7.3 | SSR (Solid State Relay) | 47 |
| 7.4 | Batteri | 47 |
| 7.5 | Kretssystem | 48 |
| 7.6 | Uppskattning av räckvidd | 50 |
| 7.7 | Systembeskrivning programlogik | 51 |
| | 7.7.1 Upp- och nedstigning | 51 |
| | 7.7.2 Testprogram | 51 |
| 8 | Sammansättning av delsystem | 52 |
| 9 | Tester | 55 |
| 9.1 | Flytkraftsmotorn | 55 |
| 9.2 | Manövreringssystemet | 55 |
| 9.3 | Fullständigt test | 55 |
| 10 | Resultat | 56 |
| 10.1 | Flytkraftsmotorn | 56 |
| 10.2 | Manövreringssystemet | 56 |
| 10.3 | Fullständigigt test | 57 |
| 10.4 | Kostnadsberäkning | 58 |
| 11 | Diskussion | 60 |
| 11.1 | Strukturell konstruktion av glidare | 60 |
| 11.2 | Elektronik i glidaren | 62 |
| 11.3 | Sammansättning av glidaren | 63 |
| 11.4 | Tester av glidaren | 63 |
| 12 | Slutsats | 64 |
| | Appendix | 68 |
| A | Ritning cylinder | 68 |
| B | Ritning bakre lock | 69 |
| C | Ritning främre lock | 72 |
| D | Programlogik | 73 |
| E | Komponentlista | 74 |
| F | Kostnadsberäkning exklusive moms | 75 |
| G | Kostnadsberäkning inklusive moms | 76 |
| H | Testkod | 77 |

Lista över Figurer

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Färdmönster för glidare vid olika djup | 1 |
| 4.1 | Förenklad modell av skrov | 6 |
| 4.2 | Längd och vattenmotstånd för förenklad modell | 7 |
| 4.3 | Modell vattenmotstånd | 8 |
| 4.4 | Materialval cylinder, nivå 2 | 9 |
| 4.5 | Von Mises spänningshypotes av kolfiber-cylinder | 11 |
| 4.6 | Materialval lock, nivå 2 | 13 |
| 4.7 | Första iterationen av locken | 14 |
| 4.8 | Simulering av andra iterationen av locken | 14 |
| 4.9 | Grundläggande geometri av lock | 16 |
| 4.10 | Lock med monterade O-ringar | 17 |
| 4.11 | Slutgiltiga lock med monterade komponenter | 17 |
| 4.12 | Tätning mellan cylinder och lock | 19 |
| 4.13 | Kompletterande framdrift i vatten | 23 |
| 4.14 | Segment av glidare | 24 |
| 4.15 | Mesh av främre kåpa | 25 |
| 4.16 | Hastighet och tryck | 25 |
| 4.17 | Framkåpa | 26 |
| 4.18 | Bakkåpa med motor | 26 |
| 4.19 | Tvärsnitt (NACA-0016) | 27 |
| 4.20 | Rektangulär vingform | 28 |
| 4.21 | Avsmalnad vinge | 28 |
| 4.22 | Motståndskonstant, C_d | 29 |
| 4.23 | Lyftkraftskonstant, C_l | 29 |
| 4.24 | Glidtal | 29 |
| 4.25 | 3D-skrivna vingar och tillhörande fäste | 30 |
| 4.26 | 3D-skriven fena fäst på bakre kåpan | 30 |
| 5.1 | Schematisk bild av flytkraftsprincip | 31 |
| 5.2 | Typer av flytkraftsmotorer (<i>Elkolali m. fl., 2022</i>) | 33 |
| 5.3 | Val av flytkraftsmotor | 34 |
| 5.4 | Blåsan monterad på lock | 35 |
| 5.5 | Tvärsnitt av fjäderladdad reservoar tätad med rullmembran | 36 |
| 5.6 | Tvärsnitt med kolvtätning | 37 |

Lista över Figurer

| | | |
|------|---|----|
| 5.7 | Tvärsnitt med bälg | 37 |
| 5.8 | Ändlock till reservoar | 38 |
| 5.9 | Reservoar | 38 |
| 5.10 | Schematisk bild av system | 39 |
| 5.11 | 3D-rendering av slutligt hydralsystem. | 39 |
| 6.1 | CAD modell av planetväxeln | 42 |
| 6.2 | CAD modell av manövreringsmodulen | 42 |
| 7.1 | Seriekommunikation I2C | 45 |
| 7.2 | Kopplingschema | 49 |
| 8.1 | Moduler av glidarens interna konstruktion | 52 |
| 8.2 | Utdragen bakre modul efter vattentest | 53 |
| 8.3 | Samman satt glidare | 53 |
| 8.4 | Glidaren i neutralt flytläge | 54 |
| 8.5 | Glidare med påkopplad axelrem | 54 |

Lista över Tabeller

| | | |
|------|---|----|
| 4.1 | LDF förhållande för olika glidare | 8 |
| 4.2 | Vikt av cylindrar | 10 |
| 4.3 | Mätningar av rörets innerdiameter | 12 |
| 4.4 | Resultat från simulering av lock | 15 |
| 4.5 | Indata vid beräkning av O-ringar | 20 |
| 4.6 | Resultat från beräkning av O-ringar | 21 |
| 4.7 | Motorspecifikationer | 23 |
| 4.8 | Design parametrar | 25 |
| 4.9 | Design parametrar och tillhörande motståndskonstant | 26 |
| 5.1 | Pumpspecifikationer | 38 |
| 7.1 | Komponenternas spänning | 48 |
| 10.1 | Summering av kostnadsberäkning exkluderat moms | 59 |

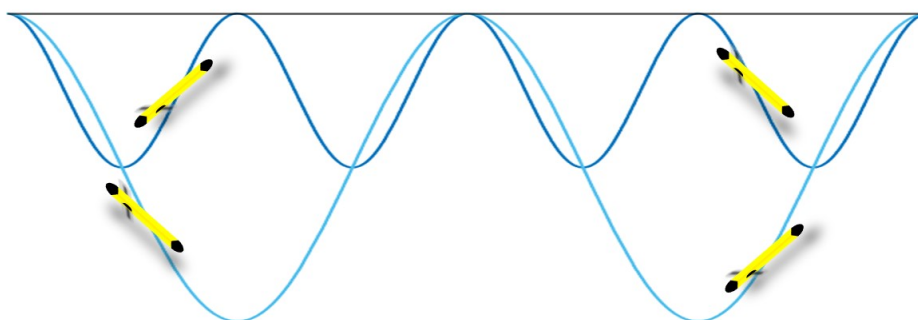
1

Inledning

Livet under vattenytan är ett område inom den moderna vetenskapen som vi vet förhållandevis lite om. Forskningsexpeditioner på världshaven, i synnerhet under ytan, är ofta dyra och tidskrävande. Att utveckla billiga obemannade undervattensgående fordon som kontinuerligt förser forskare med värdefull data, från även de mest svårtillgängliga platser, är därför viktigt för att driva forskningen framåt.

En undervattensgående glidare är en typ av autonom undervattensfarkost som kan utforska havet under långa tidsperioder och över stora avstånd med minimal tillsyn. Basisen som en undervattensglidaren följer, likt en traditionell ubåt, är i sig enbart Arkimedes princip. Flytförmågan modifieras genom en ändring av volymen alternativt massan av glidaren. Med hjälp av detta skapas förutsättningen för att styra storleken på kraften genererad av den undantryckta vätskan alternativt tyngdkraften som verkar på glidaren. För att uppnå detta brukar glidaren traditionellt använda sig av en extern elastisk blåsa som kan expanderas respektive komprimeras eller en intern ballasttank.

Till skillnad från en traditionell ubåt använder vanligtvis inte en glidare någon typ av motordriven framdrift. Istället skapas framdrift genom lyftkraften på dess vingar, likt ett glidflygplan, vilket medför att ta sig fram och kan därför köra i månader utan att byta batteri. Sedan justerar den sin riktning och lutning genom att förflytta tyngdpunkten som ger upphov till att glidarens färdmönster i vattnet efterliknar en sinuskurva, se *Figur 1.1*.



Figur 1.1: Färdmönster för glidare vid olika djup

Chalmers farkostlabb Revere tillhandahåller en rad olika farkoster till alla forskare på Chalmers Tekniska Högskola. Labbet har stor erfarenhet vad som gäller vägfor-

don, ytgående marina farkoster och även på senare tid flygande plattformar. Dock har dem ännu inte några farkoster som arbetar under ytan, vilket har lett till att de skapat detta projekt där en autonom undervattensgående glidare ska designas och byggas med fokus på låg kostnad, låg vikt och god modulariserbarhet. Under arbetets gång har farkostlabbet Revere och dess personal varit till stöd för projektet.

1.1 Syfte

Projektet syftar till att undersöka och analysera befintliga glidare, för att sedan designa och tillverka en autonom undervattensgående glidare för forskningslabbet och uppdragsgivare Revere. Projektet kommer fortlöpa under januari-juni 2023, med fokus på att den ska vara billig och enkel att tillverka. Utöver det ska glidaren ha en god navigeringsförmåga och färdhastighet för att kunna operera bland grund och strömmar som till exempel återfinns i skärgårdsmiljö. Vidare syftar projektet till att utvärdera glidarens prestanda och verifiera dess förmåga att uppfylla specificerade krav och mål, samt utvärdera potential för framtida bestyckningsmöjligheter.

1.2 Målbeskrivning

Målet med arbetet är att utveckla och producera en funktionell undervattensglidare som skall kunna vara i drift i den svenska skärgården. Mer precisa mål och krav för glidaren och arbetet är formulerade av examinator Ola Benderius. De tre krav satta på arbetet är att glidaren skall kunna klara av ett vattendjup på 100 m, att projektets budget skall ej överskrida 50 000 kr samt att glidaren maximalt får väga 20 kg. Övriga mål och kriterier, som glidaren sedan skall bedömas utefter vid projektets slut, uppvisas i listan nedan.

- God manövrerbarhet och statisk stabilitet i vertikal och horisontalplanet
- Vattentäthet vid bruk
- Smidig montering och demontering för enkelt åtkomst
- Minimal energiåtgång vid användning för ökad räckvidd
- Framtida bestyckningsmöjligheter för bland annat antenner, sensorer, batterier

1.3 Avgränsningar

Projektet kommer inneha utrustning som anses nödvändig för att nå målen, alltså kommer sensorer, pump, tank, motorer och eventuell ballast behöva monteras. Dock kommer projektet inte beröra bestyckning så som antenner och sensorer som agerar utöver grundprincipen för ett fungerande styrsystem hos glidaren. Det behöver endast finnas bestyckningsmöjligheter och plats för framtida utrustning, med hjälp av motivering i form av skiss eller CAD utifrån en lista med önskad utrustning.

2

Befintliga glidare

Under projektets gång undersöktes flertalet olika befintliga glidare och oceanografiska instrumentplattformar där informationen som insamlats har lagt grunden för hur projektets egna utformning av glidaren. De undersökta glidarna är delvis kommersiellt tillgängliga men även resultat från projekt likt detta utförda på andra universitet.

En av de få kommersiellt tillgängliga glidare som undersöktes var *Slocum G3 glider* (Teledyne Webb Research, 2023), som först introducerades av Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), men idag är ägt av Teledyne Webb Research. *Slocum* har en längd på 1.5m med en diameter på 22cm och väger runt 55-70kg, beroende på konfiguration och utrustning. Där skrovet är tillverkat i kompositer och klassad för ett djup på 1000m och använder sig av litiumbatterier som klarar ett avstånd på 700-3000km. Glidaren har även möjlighet att bli utrustad med en motordriven propeller som ökar hastigheten till 1m/s. Teledyne Webb Research tillhandahåller även en glidare *Slocum Thermal* (Webb m. fl., 2001), som utmärker sig genom att använda termisk energi från det kringliggande vattnet i systemet som ändrar volymen. Fördelen med att glidaren är kommersiellt tillgänglig var att det fanns god dokumentation om hur och vad man kan tillämpa glidaren. Trots detta fanns det väldigt begränsad dokumentation om det inre komponenterna men med en bättre tillgänglighet av principiella och schematiska ritningar att söka inspiration ifrån.

Det fanns även en upprättad kontakt med stiftelsen Voice of the Ocean som aktivt erbjuder sina glidare *SeaExplorer*, inköpta från den Franska tillverkaren ALSEMAR, till diverse forskningsprojekt. *SeaExplorer* är 2m lång med en ihopvikbar antenn på 1m, en diameter på 25cm, en vikt på 59kg och kan nå ett djup på 1000m (ALSEAMAR, 2022). Farkosten är tredelad vilket medför att den bestod av totalt sex tätningar för att hålla kroppen intakt. Dessutom använde den sig av en bälglignande reservoar som möjliggör användning av vakuum på insidan av skrovet för att flytta hydraulolja mellan den externa blåsan och den interna reservoaren. Gruppen erbjöds ett studiebesök hos Voice of the Oceans där främsta kontakten var med verksamhetschefen Olle Petersson, där det togs del av hur deras verksamhet bedrevs och olika mätningar och mätinstrument som var vanligast samt typer av komplikationer som möjligtvis kan uppstå i de områdena där deras befintliga glidare opererar. Vidare fick gruppen delta i service av en glidare där de olika ingående komponenterna presenterades. Utöver detta gavs möjligheten att medverka under en session där de ballastade och kalibrerade en glidare inför ett nytt uppdrag vilket bidrog till en ökad insikt kring hur man metodiskt bör göra detta.

Ytterligare granskades även OsloMets glidare i projektet OASYS, som under flertalet år publicerade artiklar och en slutgiltig avhandling som presenterar deras utveckling och jämförelse av ingående delar och komponenter (Elkolali M, 2022). Fokuset under deras projekt var att uppnå en kompakt glidare av låg vikt, vilket resulterade i en 1.5m lång gildare med en diameter på 10cm. Där den använder sig av en 200ml volymförändring när den väger 10kg. Utöver att endast ta del av det publicerade materialet fanns en upprättad kontakt med Alex Alcocer som var med i utvecklingen av glidaren samt översåg projektet, med stor insikt i ett såpass liknande projekt gav givande information kring problematiska moment detaljer som bör beaktas.

Sedan undersöktes även flertalet andra universitetsprojekt där glidare har tillverkats. Bland dessa återfinns *Virginia Tech Underwater Glider (VTUG)* där man använder sig av pneumatik för att reglera flytkrafts förmågan (Wolek m. fl., 2015). Vidare undersöktes Michigan Technological Universitys glidare *ROUGHIE* där man fokuserat på att tillverka en lågkostnads, grunt gående glidare med hög manövrerbarhet (Page m. fl., 2017). Dessutom undersöktes även projektet *ROBEX* glidare där man valt att undersöka pneumatiska glidare (Waldmann m. fl., 2016), dessa källor användes främst i utvecklingen av flytkraftsmotorn.

En annan glidare som från och med 2022, för vissa sammarbetsparter, var kommersiellt tillgänglig undersöktes *OceanScout* där prototyputvecklingen fokuserar på att ta fram en kompakt prisöverkomlig glidare (Ordoñez m. fl., 2020). Kongsbergs glidare *SeaGlider* var ytterligare en kommersiellt tillgänglig produkt som observerades (Kongsberg, 2023). En annan glidare som inspiration togs ifrån var *SeaFlight-Glider* som är ett open source projekt publicerat på GitHub (jdavis-codes m. fl., 2021), ifrån tidigare presenterade glidare så användes dessa som inspiration utöver hela projektet.

Slutligen undersöktes även liknande undervattens-plattformar, närmare bestämt profiling floats (jmf. Sv.: profilering flottörer). Profiling floats fungerar på ett liknande sätt som en glidare, men har inte kapaciteten att aktivt förflytta sig framåt eller ändra färdriktning. De har alltså endast förmågan att ändra sin flytkraft och därmed förflytta sig vertikalt i vattnet för att sedan driva med havsströmmar. De profiling floats som undersökts är framförallt de som utvecklats av Teledyne Webb Research, *SOLO-I*, *SOLO-II* och *Deep SOLO* (Roemmich m. fl., 2019; Davis m. fl., 2001) och återigen är det framförallt flytkraftmotorn på dessa undervattens-plattformar som vart av speciellt intresse.

3

Övergripande metod

Projektet inleddes genom att det samlades information kring hur en autonom undervattensgående glidare fungerar för att få en uppfattning om vad som krävs för att grundprinciperna ska uppfyllas. Informationssökningen har inneburit sökning på internet och inom databaser så som IEEE Xplore, DIVA, ResearchGate och ScienceDirect. Utöver det har även information anskaffats genom kontakt med personal på Chalmers Tekniska Högskola och Revere, samt via kontakt med Voice of the Ocean och OLSOMET som är två utomstående källor som arbetar inom området.

Sedan på grund av farkostens komplexitet delades projektet upp i delsystemen:

- **Skrov** - representerar de komponenter som är i kontakt med vatten.
- **Flytkraftmotor** - är en central del i glidarens färd längs vertikalaxeln.
- **Manövrering** - berör styrningen av glidaren i alla led.
- **Elektronik** - agerar bland annat som ett styrsystem utifrån extern data.

Därefter sammanställdes en planeringsrapport innehållande tidsplanering och riskanalys av projektet. Då farkosten är komplex och projektet endast ska pågå under sex månader behövdes de olika delsystemen bearbetas parallellt. Alla delsystem har i stora drag använt samma tillvägagångsätt. Vilket först innebar informationssökning av befintliga lösningar till det tillhörande delsystemet, för att sedan genomgå sökning av tillgängliga komponenter, inköp, sammansättning och individuella tester.

Pågrund av de skilda tillvägagångsätten kommer utformandet av vadera delsystem presenteras separat i de nästkommande kapitlen. Exempelvis för komponenter som kräver hållfastighet och flödesegenskaper så har utvecklingen styrts av simuleringar och beräkningar. För de elektriska komponenterna har uppkoppling mot datorenhet med hjälp av spänningsaggregat tillämpats för att genomföra tester av olika slag.

Efter att de olika delsystemen färdigställdes enskilt, så utfördes deltester för att verifiera samspelet mellan olika delsystem. Därefter monterades glidarens alla olika delsystem ihop, där ett fullständigt test utfördes i en bassäng hos Poseidon Diving Systems AB. Tillvägagångssättet för dessa tester presenteras under *Kapitel 9*.

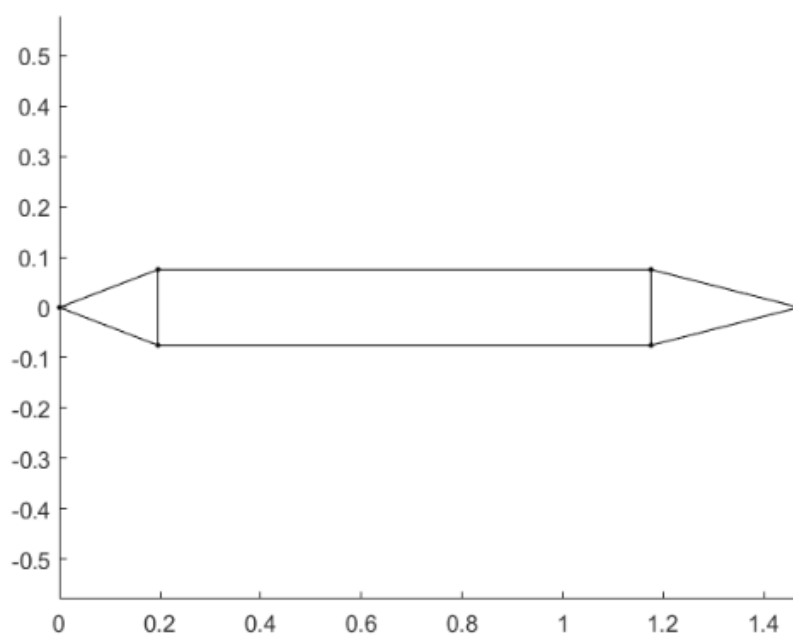
4

Skrov

Detta kapitel behandlar glidarens skrov, vilket i projektet har definieras av de komponenter som kommer i kontakt med vattnet under färd. För dessa komponenter har design och materialval präglat utvecklingen. Detta är en naturlig konsekvens av att det är dessa komponenter som ska förhindra läckage och skydda de mer bräckliga komponenterna på insidan. Även att glidaren ska kunna färdas på ett optimalt och energieffektivt sätt.

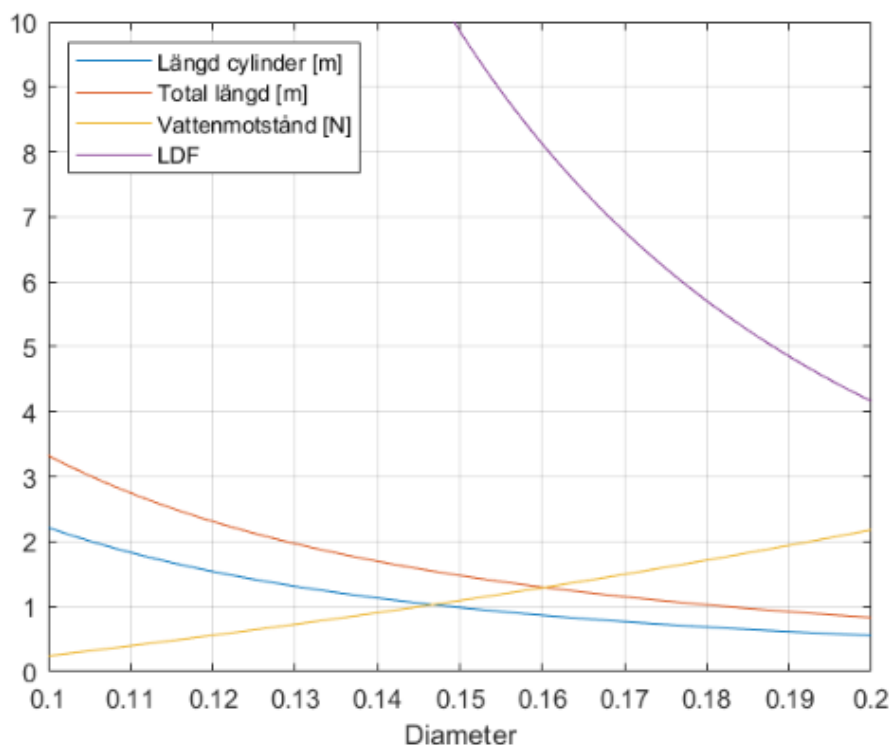
4.1 Initial design av skrovets geometri

Ett centralt moment i utvecklingsarbetet vid initieringen av projektet, var att fastställa glidarens form. Detta eftersom att geometrin påverkar både dess vattenmotstånd, totala massa men även dess utrustningskapacitet till olika komponenter. En förenklad modell av glidarens geometri användes för att utföra initiala beräkningar på dess massa, vattenmotstånd och längd. I modellen är cylindern helt solid och kåporna är till 90% fyllda med vatten och har modellerats som trianglar. I *Figur 4.1* nedan uppvisas den förenklade modellen.



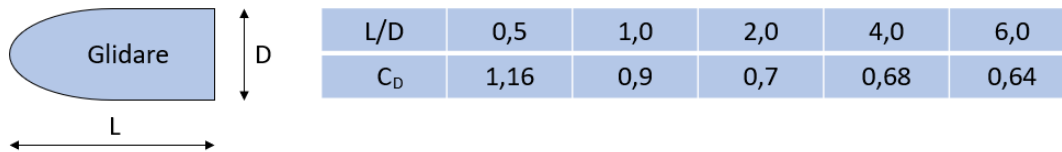
Figur 4.1: Förenklad modell av skrov

Ett av kraven för glidaren var att den maximalt fick väga 20kg, det upprättades däremot ett internt krav på 18 kg för att inkludera en 2kg säkerhetsmarginal i projektet. Anledningen för detta är densitetsvariationen som finns i olika vatten samt att den tidigare presenterade modellen ej tar hänsyn till extern bestyckning likt för en yttre blåsa eller sensorer. Med ett upprättat viktkrav på 18kg samt en måldensitet som bör vara densamma som på det undanträngda vattnet, så kunde glidarens volym härledas till cirka 18L. Givet den konstanta volymen på 18L kunde den förenklade modellen varieras genom att ändra förhållandet mellan dess diameter och längd. I *Figur 4.2* nedan uppvisas resultatet efter utförda beräkningar på den förenklade modellen där glidarens diameter är på x-axeln och vattenmotståndet, totala längd, cylinderns längd och längd-diameter förhållandet (LDF) uppvisas på y-axeln.



Figur 4.2: Längd och vattenmotstånd för förenklad modell

Beräkningen av vattenmotståndet bygger på en modell ifrån White (2016) med en uppskattad hastighet av glidaren på cirka 0.2m/s. I figur 4.3 uppvisas modellens geometri samt motståndskoefficienten C_D för olika förhållanden mellan glidarens längd och diameter (LDF). Eftersom det enbart fanns data för 5 stycken LDF så implementerades en linjär interpolation mellan datapunkterna i Matlab för att ge ett mer precist resultat. Modellen är en grov approximation av glidarens geometri, i förhållande till den som gjordes ovan för glidarens vikt, men kommer att ge en riktlinje på vad motståndskoefficienten kommer att vara. Det är även viktigt att lyfta det faktum att modellen enbart är sanningsenlig om Reynoldstalet är över 10^4 . För en hastighet på 0,2 m/s och glidarens minsta längd, i beräkningarna ovan med en längd på cirka 0,83 m, uppfylls detta krav.



Figur 4.3: Modell vattenmotstånd

Med vidare kunskap om motståndskoefficienter för olika LDF kan vattenmotståndet beräknas med *Ekvation 4.1* (White, 2016). Detta resultat uppvisades i *Figur 4.2*. Det påvisas att tvärsnittsarean A_P ökar exponentiellt och C_D ökar linjärt enligt den linjära interpolationen, då diametern ökar. Detta innebär att vattenmotståndet kommer öka exponentiellt då diametern ökar. Som uppvisat i *Figur 4.2* så är vattenmotståndet nio gånger högre då diametern är 20 cm gentemot 10 cm. Det finns således ett stort incitament för att ha en så liten diameter som möjligt.

$$D = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_P \quad (4.1)$$

Inom arbetets förundersökning av andra glidare så granskades deras LDF. Glidare som utvecklas på akademiska institut som NRCC och glidare som produceras kommersiellt av företagen Slocum och Kronsberg undersöktes (Webb m. fl., 2001; Kongsberg, 2023; Skillings, 2004). Deras förhållande för längd-diameter uppvisas i *Tabell 4.1* nedan där LDF ligger inom ett intervall mellan 6 och 10. Med vetskapen av att vattenmotståndet ökar exponentiellt med diametern togs beslutet att välja ett så högt LDF, inom det etablerade intervallet, som möjligt. Det valda LDF blev således 10 vilket resulterar i en ytterdiameter på 15cm, en cylinder-längd på 1m, en total längd på 1,4m och ett vattenmotstånd på 1,2 N för M. White's modell. Dessa mått är bestämda utefter kravet att glidarens volym skall vara 18L. Under beslutsfattandet av skrovets mått kontrollerades det även kontinuerligt om preliminära komponenter och delsystem skulle få plats.

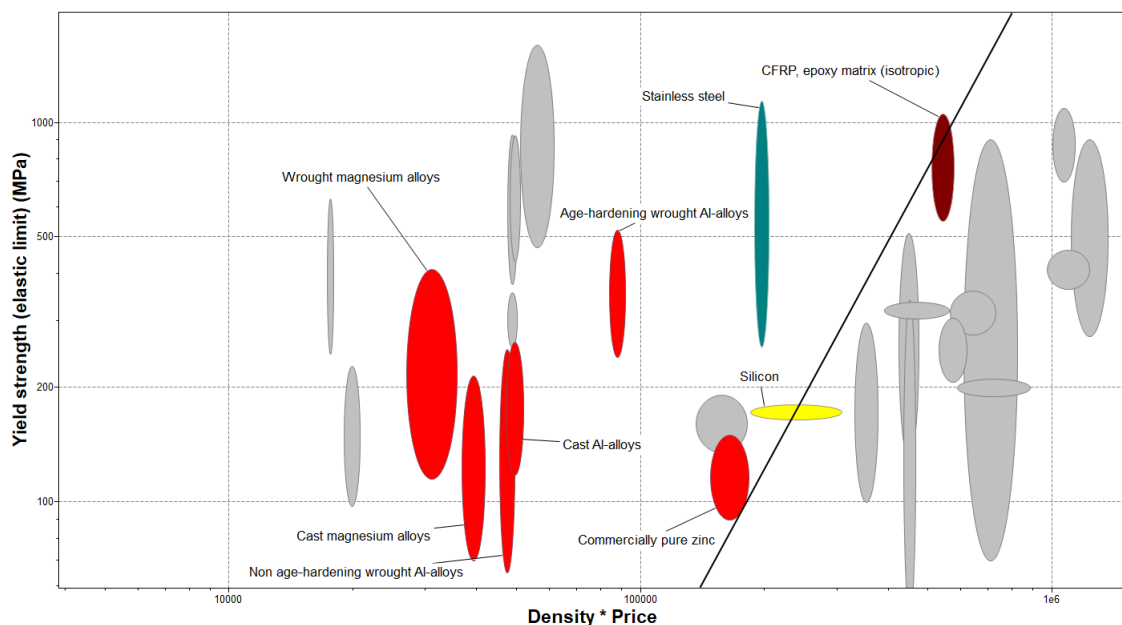
| | |
|---|------|
| Glidare | LDF |
| Slocum Thermal glider | 7,04 |
| Kronsberg | 6 |
| Canada's national research council (NRCC) | 10 |

Tabell 4.1: LDF förhållande för olika glidare

4.2 Cylinder

Cylindern är den största ingående komponenten i skrovet. Dess huvudsakliga uppgift är att motstå det vattentryck som uppstår då glidaren är verksam. Komponentens utformning är dessutom ett hölje för interna komponenter och verkar som ett stöd för dessa. En annan väsentlig faktor att betrakta för cylindern, är att minst en O-ring skall kunna sitta i kontakt med dess yta för att tätning av glidaren. Detta innebär att cylindern behöver ha en godtycklig ytfinhet och utöver detta behövs även någon form av infasning för att O-ringen, tillsammans med locken, enkelt kan glida in och tätas. En utförligare redogörelse om tätningen kommer att presenteras i *kapitel 4.4*.

Som uppvisat i *kapitel 4.1* ovan skall cylinderns mått vara 150 mm i ytterdiameter och 1 m lång. Det krävdes sedan att ett materialval görs och att innerdiametern bestäms. Materialvalet gjordes med hjälp av programmet Granta EduPack där ett materialval utfördes på nivå 2 i programmet. Material som ej var motståndiga mot sötvatten och saltvatten sällades bort eftersom glidaren skall klara av att vara under vatten under längre tidsperioder. Vidare valdes ett materialindex för att rangordna de återstående materialen i databasen där det valda lastfallet var en platta i böjning. Materialvalet optimerades utefter styvhet med avseende på densitet och pris. Detta eftersom glidaren skall klara av att motstå ett högt vattentryck samtidigt som det skall vara billigt och ha en låg densitet. Lutningen på linjen för det valda materialindexet blev således 2. Resultatet uppvisas i *Figur 4.4* nedan där de gråa materialen är de som sällats bort.



Figur 4.4: Materialval cylinder, nivå 2

Som uppvisas i figuren ovan är de utvalda materialen: Kolfiber (CFRP), silikon, rostfritt stål, kommersiellt rent zink samt smidd/gjuten aluminium eller magnesium. Till en början sällades silikon bort eftersom materialet ej är tillräckligt hållfast för den givna applikationen. Sedan återstod det ett val mellan kolfiber och ovannämnda

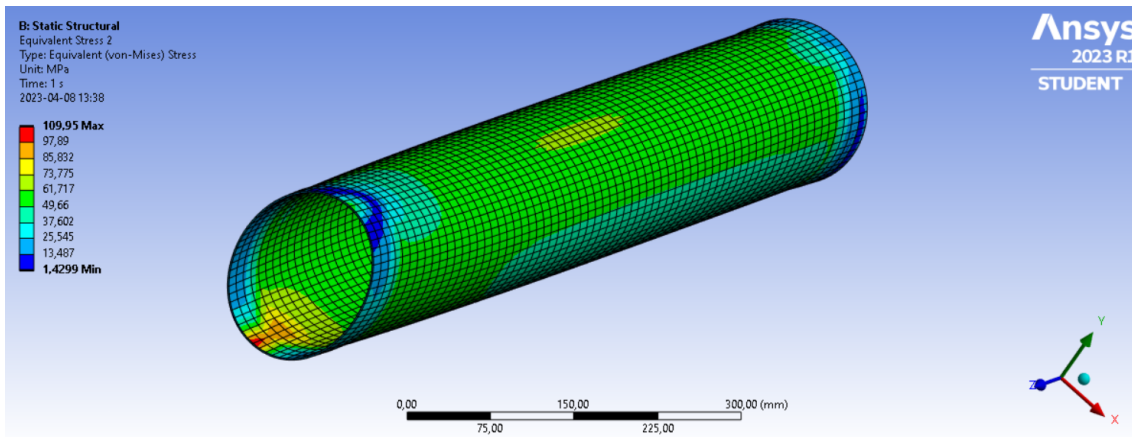
metaller. Då samtliga material ansågs vara tillräckligt hållfasta grundade sig materialvalet i pris kontra densitet. Vikten för en cylinder med de olika materialen och en vägg tjocklek på 5 mm beräknades för att göra en jämförelse. De olika cylindrarna med dess material, densitet och vikt visas i *Tabell 4.2* nedan.

| Material | Densitet [Kg/m^3] | vikt [Kg] |
|----------------|-----------------------|---------------|
| Kolfiber | 1450 | 3.3 |
| Rostfritt stål | 7900 | 17.8 |
| Aluminium | 2700 | 6.15 |
| Magnesium | 1738 | 4.0 |
| Zink | 7140 | 16.3 |

Tabell 4.2: Vikt av cylindrar

Det framgår av tabellen ovan att både rostfritt stål och zink har en vikt på 17,8 respektive 16,3 kg. Dessa rör var således för tunga i det avseendet att kunna säkerställa en möjlighet att resterande komponenter kan komma att väga åtminstone 10 kg. Trots att programmet Granta EduPack placerar magnesium som ett lämpligt materialval så valde arbetsgruppen att sälla bort materialet på grund av en högre risk för korrosion då det utsätts för saltvatten eller elektriska strömmar jämfört med resterande material. Slutligen stod valet mellan aluminium och kolfiber där cylindern konstruerad av kolfiber var cirka 50% lättare men samtidigt betydligt dyrare. I beräkningarna som uppvisas i *Tabell 4.2* ovan så antogs det att vägg tjockleken för de olika cylindrarna skulle vara samma. Detta var en förenkling för att snabbt kunna jämföra vikten av olika cylindrar av olika material. I verkligheten behöver aluminium-cylindern vara tjockare än kolfiber-cylindern då det har en lägre sträckgräns. Det visade sig av arbetsgruppens initiala prisundersökning att ett köp av en kolfiber-cylinder för den givna applikationen skulle kosta 8 till 11 tusen kr. Eftersom detta låg inom ramen för arbetets budget och var en avsevärd viktbesparing, var kolfiber ett bra material för cylindern.

Efter att ett materialval var utfört så skulle cylinderns innerdiameter bestämmas i samband med att en producent skulle väljas. En hållfasthetsanalys av ett kolfiber-rör med en vägg tjocklek på 1,5 mm utfördes i programmet Ansys Mechanical, där ett yttre övertryck på 10 bar och ett inre undertryck på 0,7 bar applicerades till cylindern. Varför ett inre undertryck är önskvärt kommer att täckas i *Kapitel 5.5*. I simuleringen användes en elementstorlek på 15 mm, ett kolfiber med en elasticitetsmodul på 290 GPa samt en fast inspänning på ena sidan av röret. Resultatet av Von Mises spänningshypotes uppvisas i *Figur 4.5* där deformationen är skalad med en faktor av 10. En slutsats som kan dras är att den högsta spänningen kommer att ske vid cylinderns ändar och att det finns en risk för knäckning. Enligt analysen kommer röret inte plasticera trots att det finns en hög grad av osäkerhet kring detta påstående. Dels på grund av den fasta inspänningen, vilket inte är verklighetstroget, och dels på grund av att fiber-strukturen i kolfibret ej definierats av arbetsgruppen. Eftersom FEM-analys av kolfiber låg utanför projektets expertis togs beslutet att konsultera med specialister. I projektets fall blev det den erfarna producenten Carbon-Composite, som efter en noggran undersökning och utvärdering ansågs vara lämp-



Figur 4.5: Von Mises spänningshypotes av kolfiber-cylinder

ligast av flertalet potentiella kandidater. Kolfiberproducenten var kapabla till att göra en infasning på rörets ändrar, något som värdesattes högt. Mer information om infasningen kommer att redovisas i *Kapitel 4.4*, men uppvisas även i detta kapitel eftersom det är en kritisk detalj på röret. Carbon-Composite assisterade, utöver tillverkning, med dimensionering av rörets väggjocklek samt att fastställa fiberstrukturen. Eftersom röret skall utsättas för ett externt vattentryck på cirka 10 bar rekommenderade bolaget en väggjocklek på 0,5 cm och en fiberstruktur med 73% av fibrerna riktade i radiell riktning och 27% av fibrerna i längsled. Med den ovan nämnda fiberstrukturen blev röret optimerat för ett externt övertryck - samtidigt som det skulle tåla lämpliga laster vid böjning och kompression i längsled. Kolfiberproducenten garanterade dessutom en säkerhetsfaktor på 2,5 med avseende på de satta kraven på hållfasthet, vilket ansågs vara acceptabelt.

Med en uppmaning av projekthandledare och examinator Ola Benderius kontaktades Jan Möller, forskningsingenjör vid institutionen Material- och beräkningsmekanik på Chalmers, för att validera designen av kolfiberröret innan den beställdes. Rörets användningsområde, geometri och fiberstruktur presenterades för Möller vilket han sedan godkände som en lämplig konstruktion givet användningsområdet. Mötet resulterade även i en diskussion om vilka möjligheter det fanns att borra i röret eller hur arbetsgruppen skulle gå tillväga för att få en finare ytfinhet. Möller beskrev att en god ytkvalitet kunde erhållas genom att lägga ett tunnt lager epoxy på rörets yta som sedan kunde slipas. Ytfinheten är viktig för att tätningen mellan kolfiberöret och locken skall fungera, något som beskrivs mer detaljerat i *Kapitel 4.4*.

Efter att röret levererats med korrekt infasning utfördes kontroller på rörets mått. Den viktigaste dimensionen som togs i beaktande var rörets innerdiameter på 140 mm. Carbon-Composite angav att toleransen för detta mått skulle vara $\pm 0,1$ mm. Måttet kontrollerades genom att mäta rörets innerdiameter 8 gånger per sida med ett skjutmått. Resultatet redovisas i *Tabell 4.3* nedan där det tydligt uppvisas att måttet avviker från den angivna toleransen. Det uppvisas dessutom att rörets diameter är oregelbundet där tvärsnittet således är icke-cirkulärt. Beslutet fattades däremot att behålla röret trots att det var utanför tolerans.

| Mätning | Sida 1 [mm] | Sida 2 [mm] |
|---------|-------------|-------------|
| 1 | 140,4 | 140,3 |
| 2 | 140,2 | 140,4 |
| 3 | 140,0 | 140,1 |
| 4 | 140,25 | 140,1 |
| 5 | 140,5 | 140,4 |
| 6 | 140,5 | 140,65 |
| 7 | 140,6 | 140,7 |
| 8 | 140,85 | 140,5 |

Tabell 4.3: Mätningar av rörets innerdiameter

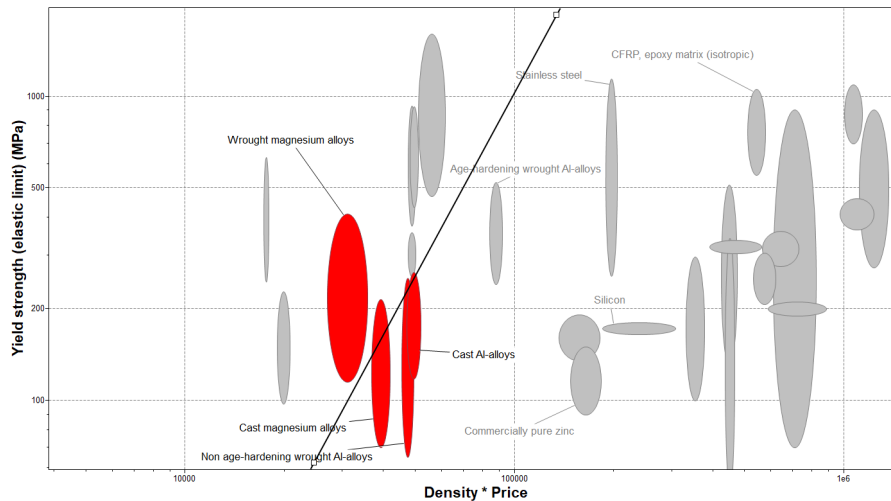
Sammanfattningsvis är den slutgiltiga konstruktionen av cylindern ett kolfiberrör med en längd på 1 m, en ytterdiameter på 150 mm och en innerdiameter på 140 mm. Infasningen befinner sig på båda sidor av cylindern med en längd på 5 mm med en 15° lutning. I Kolfiberstrukturen är 73% av fibrerna i radiell riktning och 27% riktade i längsled. Ritning av det slutgiltiga kolfiberröret uppvisas i *Appendix A* och kostnader återfinns i *Appendix F* alternativt *G*.

4.3 Lock

Syftet med detta kapitel är att ge en övergripande insikt om design och konstruktion av de lock som monteras på ändarna av cylindern i glidaren. Dessa lock ska, precis som resten av skrovet, klara av att motstå det angivna vattentrycket på 10 bar. I konstruktionen ingår två lock: ett främre och ett bakre. Spår för O-ringar i locken utgör den andra kontaktytan som tätningen kommer att pressas mot där cylindern utgör den första. Det är således avgörande att spåren för O-ringarna i locken har en godtycklig ytfinhet och är helt fria från vassa kanter där de passerar vid montering. Detta är nödvändigt för att säkerställa en korrekt och pålitlig tätning. Designen av locken ska även vara anpassad för en smidig montering och demontering. Detta är nödvändigt för att glidaren ska kunna öppnas och stängas enkelt vid användning, samt för att snabbt kunna komma åt interna komponenter vid underhåll. Alla genomförningar på skrovet skall även passera genom locken. Med detta avses genomförningar för sensorer, blåsor och kablar. Det är således även viktigt att dessa ytor har en godtycklig ytfinhet och att de är tillräckligt hållfasta för genomförningarnas skruvförband.

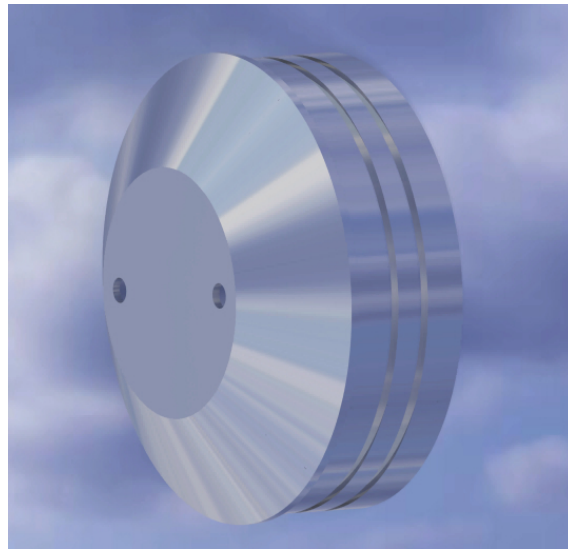
Vid designen av locken var det första steget att utföra ett materialval. Utvecklingen hade som avsikt att optimera designen utefter styvhet med avseende på pris och densitet, likt cylindern. Lastfallet tolkades även vara densamma som för cylindern: en platta under böjning, vilket innebar att samma materialdata kunde användas som uppvisades i *Figur 4.4*. Linjen för materialindexet, som hade lutningen 2, flyttades sedan för att hitta det optimala materialet, detta uppvisas i *Figur 4.6* nedan. Det framgår av materialdatan från nivå 2 i programmet Granta EduPack att aluminium och magnesium var de mest optimala materialen. Som tidigare nämnts i *Kapitel 4.2*

så ansågs det att magnesium inte vara tillräckligt korrosionsbeständigt. Det återstående materialet blev således aluminium.



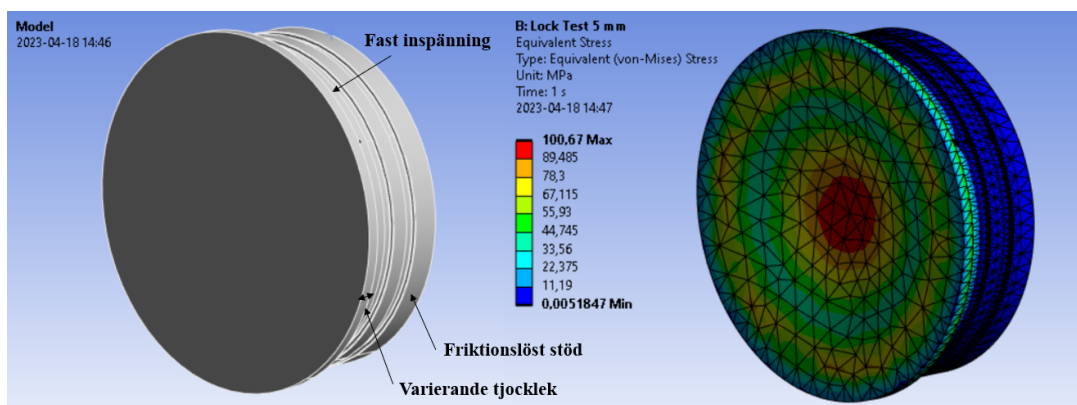
Figur 4.6: Materialval lock, nivå 2

Ett möte hölls sedan med Jan Bragee och Reine Nohlberg, forskningsingenjörer på chalmers prototypplabb, för att diskutera en initial design och materialvalet. Det framgick att materialvalet var välgrundat och att andra metaller hade varit svårare att bearbeta på labbet. Vid en diskussion av lockens design så framgick det att mindre gängor som M1, och M2 skulle undvikas eftersom det finns en högre risk för brott och deformation, jämfört med större gängor. Eftersom alla förband och gängor skall tåla godtyckliga laster och moment uteslöts M1 och M2 i designen. Det framgick även att koniska ytor skulle undvikas för att förkorta produktionstiden. Vid det angivna tillfället så ingick en konisk yta i designen, detta uppvisas i *Figur 4.7* nedan. Koniska formen av designen är fördelaktig jämfört med enbart en platt yta, eftersom det blir ett mindre böjande moment i främre delen av locket. Efter rekommendationen togs beslutet att frångå den koniska formen för att förkorta produktionstiden samt för att få plats med mer genomföringar för sensorer - Något som uppvisas i form av hål i *Figur 4.7*.



Figur 4.7: Första iterationen av locken

Beslut togs baserade på diskussioner med prototypplabbet. Primära målen var nu att vidareutveckla designen och välja en legering. För att kunna optimera lockens geometri, utfördes simuleringar i Ansys med avsikten att undersöka vilka spänningar som locken utsätts för och vilken tjocklek locken behövde ha för att kunna motstå givna laster. De laster som applicerades i simuleringen var ett externt tryck på 1,1 MPa och ett internt tryck på 0,07 MPa. I simuleringen erhöll locken stöd från både en fast och en friktionslös anslutning, vilket syftade till att uppnå en så realistisk simulering som möjligt. En elementstorlek på 5 mm användes med elasticitetsmodul 69 GPa och sträckgräns 259,2 MPa för aluminiumet. Geometrin som simulerades, stöden samt ett resultat efter genomförd simulering uppvisas i *Figur 4.8* nedan.



Figur 4.8: Simulering av andra iterationen av locken

Resultatet av simuleringen som uppvisas ovan är utfört för en främre väggjocklek på 5 mm. Det som framgår av simuleringen är att de högsta spänningarna uppstår i centrum av den främre plattan. Det är denna höga spänning som hade reducerats om en konisk geometri hade applicerats. Med målet att bestämma en optimal främre väggjocklek så utfördes det totalt 4 simuleringar med olika väggjocklekar.

För att ytterligare klargöra, är måttet som varierar markerat i *Figur 4.8* ovan som "varierande tjocklek". Resultat för den maximala spänningen enligt Von Mises spänningsteorem och den uppnådda säkerhetsmarginalen givet materialets sträckgräns presenteras i *Tabell 4.4* nedan.

| Simulering | Vägg tjocklek [mm] | Von Mises [MPa] | Säkerhetsmarginal |
|------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 5 | 100,67 | 2,6 |
| 2 | 8 | 63,36 | 4,1 |
| 3 | 10 | 44,71 | 5,8 |
| 4 | 12 | 30,81 | 8,4 |

Tabell 4.4: Resultat från simulering av lock

Det uppvisas att alla modeller klarar av de applicerade lasterna. Med den lägsta vägg tjockleken på 5 mm skulle locken ha en säkerhetsmarginal på 2,6 vilket kan tolkas som ett bra resultat då cylindern hade en säkerhetsmarginal på 2,5. Däremot så ingick inga genomförningar eller infästningar i locken vid simuleringen - något som hade gjort strukturen mindre hållfast. De säkerhetsmarginaler som presenteras i *Tabell 4.4* ovan är således högre än vad den slutgiltiga strukturen kommer att erhålla. Arbetsgruppen hade således ett incitament till att välja en högre vägg tjocklek än 5 mm. Ytterligare en anledning till att låta locken vara tjockare var för att öka glidarens basvikt. Enligt glidarens design, vid den givna tidpunkten i projektet, skulle glidaren väga för lite. Därav togs beslutet att applicera en vägg tjocklek på 12 mm och därav optimera glidarens densitet.

Då lockens design vidareutvecklats, gick arbetsprocessen vidare till att välja en lämplig legering och en leverantör av aluminiumrundstänger. Valet av legeringen var starkt beroende av vad marknaden kunde erbjuda inom en rimlig tidsram, med kravet att rundstängerna skulle vara korrosionsbeständigt och ha rätt geometri. Efter att ha undersökt ett flertal leverantörer med en mängd olika rundstänger togs beslutet att genomföra inköpen från Metallbiten. Till följd av en rekommendation från Jan Bragee köptes tre stycken rundstänger, trots att endast två behövdes, detta utifall att produktionen av ett lock skulle misslyckas. Rundstängerna hade en diameter på 150 mm och en längd på 50 mm med en längdtolerans ± 10 mm. Den omfattande längdvariationen är ytterligare en anledning till att en extra rundstäng införskaffades. Rundstängerna var av legeringen EN-AW 6082-T6 / SS-4212 som har sträckgränsen 260 MPa och brottgränsen 310 MPa. Eftersom aluminiumets sträckgräns var lika med den som använts i den tidigare simulationen, kunde datan användas vid framtida analys. Enligt (Metallbiten, 2023) uppvisar legeringen en hög grad av korrosionsbeständighet och möjliggör högkvalitativ bearbetning vid svarvning och borrar, vilket resulterar i fina ytor. Legeringen uppfyllde således de krav som var satta på korrosionsbeständighet, ytfinhet och hållfasthet. Materialet lämpade sig således mycket väl för produktion av locken.



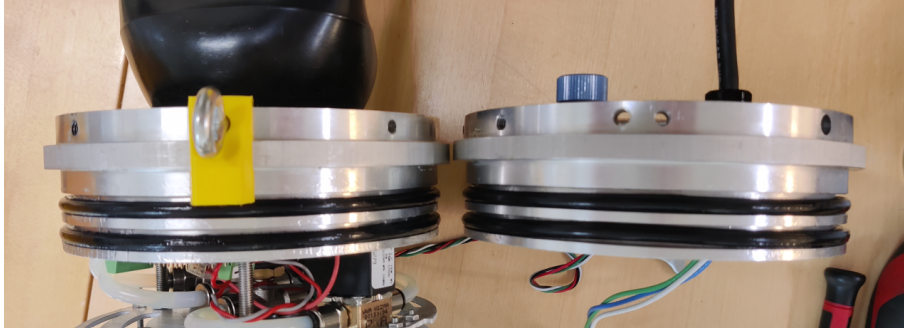
Figur 4.9: Grundläggande geometri av lock

Produktionen av locken påbörjades i Chalmers prototypplabb med handledning av Bragee. Vid detta skede så var den grundläggande geometrin för locken fastställd och arbetet kunde initieras med att maskinbearbeta. De bearbetningsmetoder som användes var borrhning, svarvning, gängning och slipning. Till en början grovsvarvades geometrin, senare genomfördes en finsvarvning för att skarpt förbättra ytfinheten. Då rundstängerna initialt inte finsvarvades, skapades det även förutsättningar för att i senare skede förändra designen. Denna initiala geometri uppvisas i *Figur 4.9* ovan. Den återstående bearbetningen utgjorde till viss del av en iterativ process som i samverkan med Bragee undersökte vad som var möjligt att producera och vad som fungerade bäst. Det som fanns kvar att bearbeta var att svarva spår för O-ringar, finsvarva locken och se till att locken fick plats i cylindern då O-ringarna var monterade.

Efter att ha rådfrågat Bragee om tätningen konstaterades det att de tänkta O-ringarna och spåren skulle vara för små. Då cylinderns innerdiameter varierade i viss mån, som uppvisades i *Kapitel 4.2*, fanns det en risk att tätningen ej skulle fungera då säkerhetsmarginalerna för tätningen var för små. De tänkta O-ringarna med en diameter på 3 mm byttes således ut till O-ringar med en diameter på 5 mm. Spårens geometri uppdaterades därefter. En motivering till val av O-ringar, spårens geometri samt en redogörelse av tätningens teori kommer att uppvisas i *Kapitel 4.4* nedan. Efter att spårens slutgiltiga geometri fastställdes så finsvarvades de med resten av lockens ytor.

Ett test av tätningens passform utfördes sedan i prototypplabbet. O-ringarna och de inre ytorna av cylindern smörjdes med armaturfett och ett tryck applicerades sedan på locket för att montera det i cylindern med O-ringarna på plats. Det uppstod ett kraftigt motstånd och locket gick ej att montera. Beslutet togs sedan att förminska spårets diameter från 134 mm till 132 mm. Detta innebar dock att det skulle uppstå ett mindre radiellt tryck i tätningen och därav att tätningsförmågan skulle försämrats. Efter att de djupare spåren svarvats utfördes det ytterligare ett

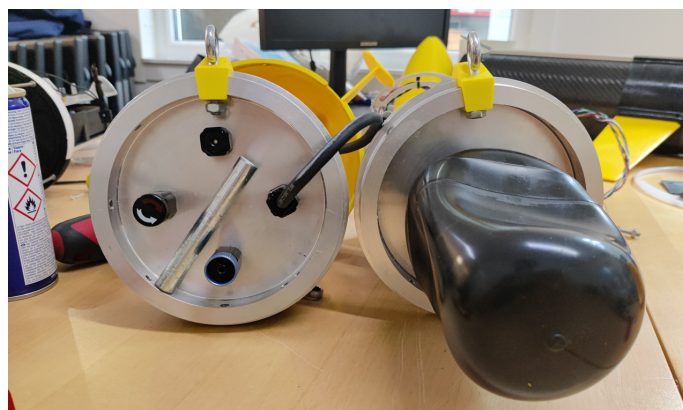
test på tätningens passform. Det visade sig att locken gick att montera då en hög kraft applicerades vid monteringen - eller då locken knackades in med gummiklubba. Locken med de monterade O-ringarna uppvisas i *Figur 4.10* nedan.



Figur 4.10: Lock med monterade O-ringar

Vidare fattades beslutet att inte ytterligare minska spårets diameter, trots att det visade sig vara svårt att montera locken. Syftet med detta var att behålla en så hög tätningsförmåga som möjligt. Däremot fanns det ett behov av att skapa en funktion för att underlätta demontering av locken, då de inte kunde knackas ut med en gummihammare eller dras ut för hand. Det som utvecklades och producerades var två mässingsstänger som kunde monteras på locken vid behov. Stängerna, som i fortsättningen kommer att benämnas monteringsstänger, svarvades och två hål borrades i varje lock så att de kunde fästas i lockets yttre ram. Användaren av glidaren kunde sedan enkelt slå på stängerna med en gummihammare för att demontera locken.

Under fortsatt utveckling av glidaren implementerades ytterligare funktioner på locken. Arbetsgruppen bearbetade hål med gängor för följande komponenter och funktioner: externa offeranoder, en skruvögla samt en intern infästning för pumpsystemet och ballasten. Skruvöglorna på locken ska kunna monteras säkert med hjälp av en säkerhetslina under glidarens tester. De slutgiltiga locken, komplett utrustade med samtliga monterade komponenter uppvisas i *Figur 4.11* nedan. Ritningarna på locken visas i *Appendix B & C*.



Figur 4.11: Slutgiltiga lock med monterade komponenter

4.4 Tätningar

I detta avsnitt skall glidarens tätningar presenteras, med tillhörande teori, där huvudsyftet är att behandla utvecklingen av tätningen mellan cylindern och locken - eftersom det är denna tätning som utvecklingslaget själva producerat. Glidarens tätningar utför den kritiska funktionen i att motstå det yttre vattentrycket och att bevara det inre undertrycket. Tätningarna skall kunna utföra detta med en godtycklig säkerhetsmarginal och utan läckage. För att repetera de tryck som tätningarna skall utsättas för, så kommer det vara ett externt övertreck på 10 bar (vid 100m vattendjup) och ett internt undertryck på 0,7 bar. Som uppvisats i tidigare kapitel så valdes O-ringen för glidarens samtliga tätningar på grund av dess kostnadseffektivitet, återanvändbarhet, lättanvändbarhet samt dess förmåga att fungera över en stor variation av temperaturer och toleranser.

Det första steget vid utvecklingen av tätningen mellan cylindern och locken var materialvalet. De material som ej var vattenmotståndiga sållades först bort. Resterande material som frekvent är använda för O-ringar uppvisas nedan med presenterade materialegenskaper enligt (Klinger, 2015).

- **Buna-N / Nitril**

Nitril är den vanligaste typen av elastomer som används inom industrin. Den används inom flera olika branscher såsom försvarsindustrin, bilindustrin samt vid marina applikationer. Nitril är känd för sin förmåga att motstå flera typer av oljor samt vatten. Dessutom besitter den goda fysikaliska egenskaper såsom låg sättning, hög draghållfasthet och en hög nötningsbeständighet. Vid montering kan en O-ring i nitril sträckas 10% och kan stukas 3-4% då den är monterad. Dess nackdelar är att materialet är känsligt för direkt solljus och ozonexponering.

- **Nitril, hydrerad**

En elastomer som är främst använd vid oljeresistent applikationer. Den hydrerade nitrilen har överlag en högre hållfasthet gentemot den vanliga nitrilen men är mindre elastisk vid lägre temperaturer. Den hydrerade nitrilen är även känslig för direkt solljus och ozonexponering.

- **Flourcarbon**

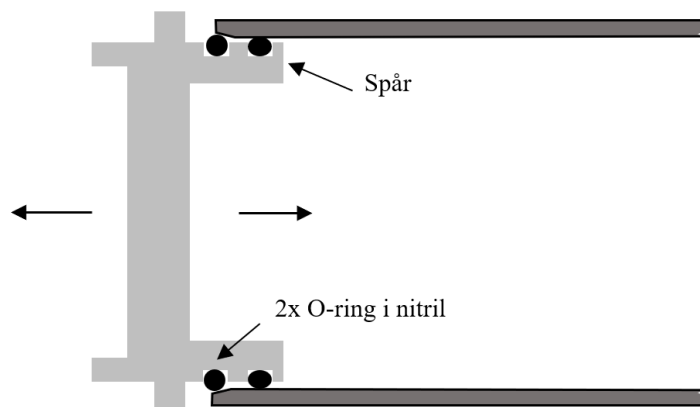
Elastomeren kan ses som ett överlag bra materialval enligt (Klinger, 2015). Flourcarbon har en oöverträffad kemikaliebeständighet och används för flyg, bilar och andra mekaniska applikationer. Tätningar gjorda av flourcarbon är även mycket lämpliga vid användning av vakuum. Nackdelen med elastomeren är att det presterar sämre vid marina applikationer gentemot resterande material som undersökts.

- **Neopren**

Neopren är främst använd vid transportsystem och har en mycket god vattenmotståndighet. Elastomeren är även beständig mot solljus, ozon och syreåldring. Neopren har dock inte lika goda funktionsegenskaper eller är ej lika billig som nitril. Elastomeren har därmed bytts ut till nitril i den flesta applikationer.

Av analysen ovan kan slutsatsen dras att alla undersökta elastomerer hade kunnat användas för glidarens tätningar då de är tillräckligt hållfasta och är vattenmotståndiga. Alla elastomerer har dessutom sina presenterade fördelar och nackdelar. Flourcarbon har den goda egenskapen att den hade upprätthållit vakuomet i glidaren mycket väl. Däremot var denna elastomer sämre lämpad för marina applikationer gentemot övriga elastomerer och sållades därmed bort. Valet stod sedan mellan nitril, hydrerad nitril och neopren. Fördelen med neopren är att materialet var motståndigt mot både solljus och ozon. Detta medförde att risken för uttorkning av materialet, vid användning av glidaren, var låg. Arbetsgruppen valde dock att sålla bort materialet eftersom den höga hållfastheten av nitril eller hydrerad nitril var mer lämpad för den givna applikationen. Glidaren skall även kunna vara i drift vid lägre temperaturer, vilket medför att nitril är ett lämligare materialval gentemot hydrerad nitril. Den valda elastomeren blev således nitril med anmärkningen att O-ringen ej skall utsättas för solljus. Hårdheten för nitrilen valdes till 70 RHI istället för 90 RHI för att underlätta vid montering av locken samt för att tillåta en bättre tätning vid kolfiberrörets ojämna yta.

Efter att ett materialval var utfört så vidareutvecklades tätningens design. För tätningen mellan locken och cylindern så skall O-ringen användas som en statisk kolv-tätning med radiell montering. Enligt (Norelem, 2023) så skall en sådan tätning i regel kunna täta ett betydligt högre tryck än 10 MPa eller 100 bar. Detta innebär att tätningen i glidaren har en säkerhetsmarginal på åtminstone 10. Dock fattade arbetsgruppen beslutet att använda två O-ringar per tätning. Detta var på grund av den potentiellt ojämna ytfinheten i kolfiberröret. Ett tvärsnitt av den valda tätningen med locket och cylindern uppvisas i *Figur 4.12* nedan.



Figur 4.12: Tätning mellan cylinder och lock

Geometrin av de spår som O-ringarna sitter i beräknades via programmet "O-ring calculator" skapad av Trelleborg Sealing Solutions. Programmet beräknade O-ringens radiella kompression, dess sträckning samt det upptagna tätningsutrymmet enligt standarden ISO 3601-2. De angivna riktlinjerna som följdes var att den radiella kompressionen skulle vara i intervallet 10-35%, sträckningen skulle maximalt vara 2-5% och att O-ringen maximalt skulle uppta 85% av tätningsutrymmet. Programmet tog även hänsyn till angivna toleranser där cylinderns interna diametertolerans grundar sig i de mätningar som uppvisats i *Tabell 4.3* och resterande toleranser följde programmets standard. Som uppvisats i *Kapitel 4.3* var valet av O-ringar en iterativ process med mycket prövningar och justeringar där O-ringens diameter byttes från 3 mm till 5 mm. Efter prövning justerades även spårdiametern från 134 mm till 132 mm. I kommande del skall endast beräkningarna av den slutgiltiga tätningen presenteras där den slutgiltiga tätningen bestod av en O-ring med interna diametern 130 mm och en tvärsnittsdiаметer på 5 mm samt ett spår med diametern 132 mm. I tabellen nedan uppvisas indatan, eller tätningens geometri, som överfördes till programmet för beräkning. Spaltnmättet, skillnaden mellan cylindern och kolven/lockets radie, blev 0,1 mm och grundar sig i anvisningar enligt (Norelem, 2023).

| Parametrar [mm] | Nominell storlek | Standard | Min. Avvikelse | Max. Avvikelse | Min. Längd | Max. Längd |
|--------------------|------------------|------------|----------------|----------------|------------|------------|
| Cylinder-Ø | 140.0 | Anpassad | 0.0 | 1.0 | 140.0 | 141.0 |
| Kolv-Ø | 139.8 | h9* | -0.1 | 0.0 | 139.7 | 139.8 |
| Spår-Ø | 134.0 | h9* | -0.1 | 0.0 | 133.9 | 132.0 |
| Spårbredd | 7.0 | Föreslaget | 0.0 | 0.25 | 7.0 | 7.25 |
| Spårradie | 0.3 | Föreslaget | -0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.4 |
| O-ring, inre-Ø | 130.0 | ISO-B | -1.03 | 1.03 | 128.97 | 131.03 |
| O-ring, Tjocklek-Ø | 5.0 | ISO-B | -0.13 | 0.13 | 4.87 | 5.13 |

Tabell 4.5: Indata vid beräkning av O-ringar

Resultatet efter utförda beräkningar uppvisas i *Tabell 4.6* nedan. Det visas att både sträckningen och spårutfyllnaden hamnar i det accepterade intervallet. Den maximala radiella kompressionen ligger även inom det givna intervallet med 11.28 procentheters marginal till intervallets under gräns. Dock ligger den minimala radiella kompressionen utanför intervallet - den är för liten. Enligt beräkningarna finns det således en viss osäkerhet kring hur väl tätningen kommer att prestera, beroende på den slutgiltiga geometrin och dess toleranser. Utifrån prövningar av tätningens montering, som beskrivits i *Kapitel 4.3*, uppvisades det dock att det uppstod ett högt motstånd vid montering. Därav kan slutsatsen dras att även den radiella kompressionen i tätningen är hög och inom det rekommenderade intervallet. Baserat på detta resonemang och dess slutsatser, upplevde arbetsgruppen en hög grad av förtroende för att tätningen kommer att prestera väl med den angivna säkerhetsmarginalen på åtminstone 10.

| [%] | Min. | Max. | Rekomenderade värden |
|---------------------|-------|-------|----------------------|
| Radiell kompression | 4.74 | 21.28 | 10 - 35 |
| Sträckning | 0.66 | 2.35 | 2 - 8 |
| Spårutfyllnad | 55.42 | 71 | < 85 |

Tabell 4.6: Resultat från beräkning av O-ringar

Då spårets geometri samt O-ringen bestämts fanns det ytterligare två faktorer som påverkat tätningen samt utformningen av både locken och cylindern. Den första faktorn är tätningens infastning, detta illustreras i *Figur 4.12* och är den lutning som uppvisas vid cylinderns ändar. Infastningen är konstruerad sådant att locket kan monteras utan att O-ringarna skadas av cylinderns yttre kant. Lutningen på infastningen skall enligt (Tekniska anvisningar för O-ringar) vara mellan 15° och 20° . Den valda infastningen hade en lutning på 15° och en infastningslängd på 5 mm; Infastningen producerades av kolfiberrörets producent. Den andra faktorn är ytfinheten av tätningens ytor. Med detta menas de ytor som O-ringen ligger mot då den är monterad. Dessa ytor är: cylinderns interna yta, spårbasen och spårflankerna. Enligt (Tekniska anvisningar) skall dessa ytor ha ytfinheten $Ra < 1,6\mu m$. En anmärkning är att ingen av dessa ytors ytfinheter har kontrollerats då arbetsgruppen ej haft tillgång till mätinstrument. Däremot har prover påvisat att tätningen fungerar utan läckage. En slutsats kan således dras att ytorna har en godtycklig ytfinhet.

Resterande externa tätningar är som beskrivits även konstruerade av O-ringar och spår, där hela tätningarna varit inköpta lösningar tillhörande en produkt. Dessa produkter har varit producerade av Bluerobotics och avser de genomförningar som sitter på locken. Någoting som råder för både de inköpta tätningarna samt den egenproducerade tätningen är metodiken vid montering. Enligt (Shapiro, 2018) skall alla tätningssytor rengöras sådant att damm och smuts avlägsnas. Ett smörjmedel skall sedan användas för att underlätta monteringen. Det smörjmedel som använts för glidarens tätningar har varit ett silikonfett producerats av CRC.

4.5 Offeranoder

Syftet med att ha offeranoder på glidaren är att skydda locken och genomförningar mot korrosion. Som beskrivits i *Kapitel 4.3* skall locken vara godtyckligt korrosionsbeständiga. Dock skall glidaren klara av att vara i vatten med olika sorters salthalt under längre tidsperioder med risken för galvanisk korrosion som en följd av interna strömkällor. Användningen av offeranoder var således välgrundat. Det beslutades att offeranoder skulle vara på båda sidor av glidaren och att de enkelt skulle kunna monteras samt demonteras.

De faktorer som togs i hänsyn vid val av offeranoden är: ädelheten av katod- samt anodytan, vilken elektrolyt som glidaren utsätts för samt om det finns några elektriska strömmar. Att den elektrokemiska cellen utsätts för någon ström går ej att påvisa utan prövning. Vid design av glidaren skall detta dock förebyggts i den mån det går genom att isolera alla elektriska ledningar. Gällande allmän korrosion är elektrolyten antingen: sötvatten, bräckt vatten eller saltvatten. Den elektrolyt som glidaren främst skall utsättas för är dock saltvatten eftersom den huvudsakligen skall användas på västkusten. Katod-materialet var aluminium av legeringen EN-AW 6082-T6 / SS-4212 som påvisats i *kapitel 4.3*.

Eftersom glidaren framförallt skall vara verksam i saltvatten så valdes materialet för offeranoden med avseende på detta. Det valda materialet blev följaktligen Zink, vilket enligt *Boat Zincs (2010)* skulle vara det mest optimala materialet gentemot aluminium eller magnesium. Det påvisas dock av *Performance Metals (2023)* att zink-anoden slutar fungera vid sötvatten eller bräckt vatten. Detta är på grund av att det bildas en tunn ytbeläggning som resulterar i att anoden isoleras. Därav skall zink-anoden enbart användas i saltvatten för att undvika att anoden ytbeläggs, vilket sedan hade behövts slipas bort före användning.

Geometrin som valdes var en anod-penna. Med detta menas en anod formad som en cylinder med en M6 skruv på ena ändan. Med anledning av detta skulle anoden enkelt kunna monteras och demonteras i lockets ram. Detta tillåter användaren att byta till en anod av ett mer fördelaktigt material då glidaren utsätt för en annan elektrolyt. För projektet fattades dock beslutet att enbart beställa anoder av materialet zink eftersom anoder i andra material ej behövdes för att utveckla glidaren. Det beställdes således tre stycken anod-pennor i zink av producenten Cathwells. Anoderna monterade på locken uppvisas i *Figur 4.11*.

4.6 Komplementerande framdrift

Av alla tidigare undersökta befintliga glidare i *kapitel 2* finns det en sak gemensamt, alla rör sig ytterst långsamt. Detta hänger samman med den fysikaliska fundamentet för glidare, samt möjligheten att öka upplösningen på insamlad testdata, vilket kan vara av intresse. Nackdelen med detta blir att manövrering och kursändring måste ske över stora sträckor samt att det kan uppstå problematik vid starka motströmmar och höga salthaltsgradients (O.Petersson, personlig kommunikation, 20 februari, 2023).

Det finns glidare som till exempel *Slocum G3 glider* som implementerat en passiv komplementerande framdrift som kan aktiveras vid behov för att förbättra dess manövrerbarhet och hastighet i horisontalplanet. Uppdragsgivaren Revere uttryckte en önskan om att den glidare som utvecklades inom projektet även skulle ha en form av komplementär framdrift. Projektet undersökte därav huruvida man skulle kunna implementera detta. Första alternativet som undersöktes var en motor på insidan av skovet och med en axelgenomföring driva en propeller på utsidan. Det konstaterades däremot snabbt att en dynamisk axelgenomföring skulle kunna bli problematiskt vid höga tryck och skapa onödig osäkerhet kring vattentätethet.

Den alternativa lösningen som i stället antogs som den slutgiltiga var att använda sig av en extern motor och propeller och endast ha en sladdgenomförning i locket. Den här lösningen gör så att det inte behövs någon dynamisk genomföring vilket leder till en betydligt enklare och mer pålitlig tätning. Problemet bestod dock nu i att finna en motor som kan klara det externa trycket. Efter sökande hittades den externa motorn T200 hos återförsäljaren JM Robotics som klarade upp till 500 meters djup, se övriga specifikationer i *Tabell 4.7* och motorn i drift i *Figur 4.13*.

| Gränser | Ström [A] | Spänning [V] | Effekt [W] | Drivkraft [kg] |
|----------|-----------|--------------|------------|----------------|
| Nominell | 24 | 7 | 390 | 5.25 |
| Maximum | 32 | 20 | 645 | 6.7 |

Tabell 4.7: Motorspecifikationer



Figur 4.13: Kompletterande framdrift i vatten

4.7 Kåpor

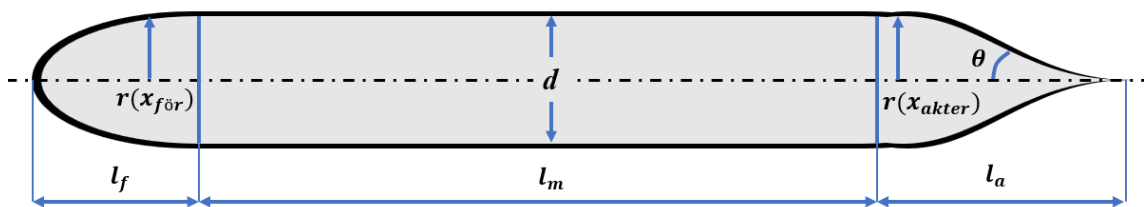
Detta kapitel avhandlar designen och konstruktionen av kåpor. Teoretiskt sett fungerar glidaren fullständigt utan kåpor, men för att förbättra dess strömningsegenskaper så används de på båda sidor av glidaren. Dock förutsätter detta att både den främre och bakre kåpan är öppna mot vattnet och tillåter vatten att flöda in och ut. När glidaren ligger i vattnet är kåpor således helt vattenfyllda, ett resultat av detta är att dom inte utsätts för någon tryckdifferens och behöver därav inte konstrueras med samma hållfasthetskrav som resterande delar av skrovet. Vidare utan några högre hållfasthetskrav på kåpor så togs beslutet att 3D-skriva dem, detta då denna metod erbjuder relativt enkelt och billigt framtagande av olika design.

Det finns flertalet olika modeller för att bestämma kåporas utformning men det är tre stycken som är de mest kända enligt Elkolali M (2022), dessa är Myring modellen (Myring, 1976), DREA - modellen (Defense Research Establishment Atlantic - Modellen)(Mackay och Atlantic, 2003) och Hull Envelope modellen (Thornton, 1994). Valet gjordes sedan att använda Myring modellen då det är den modell som är mest passande för utformning för mindre fordon (Gao m. fl., 2016).

Modellen delar in fordonet, i dethär fallet glidaren, i fyra distinkta segment; fören, mitten, aktern och framdriften. I projektets fall gör en förenkling av detta och framdrifts-segmentet bortses. Detta för att framdriften är densamma för alla olika kåpor och eftersom detta endast är en jämförelse av olika former på kåpor är det inte en kritisk faktor att beakta. De olika segmenten visualiseras i *Figur 4.14* och ekvationerna presenterade i Myring modellen återfinns i ekvation (3.2) och (3.3).

$$r(x_{f\ddot{o}r}) = 0.5 \cdot d \left[1 - \left(\frac{x_{f\ddot{o}r} - l_f}{l_f} \right)^2 \right]^{1/n} \quad (4.2)$$

$$r(x_{ak\ddot{t}er}) = 0.5 \cdot d - \left[\left(\frac{3d}{2l_a^2} - \frac{\tan(\theta)}{l_a} \right) \cdot x_{ak\ddot{t}er}^2 \right] + \left[\left(\frac{d}{l_a^3} - \frac{\tan(\theta)}{l_a^2} \right) \cdot x_{ak\ddot{t}er}^3 \right] \quad (4.3)$$



Figur 4.14: Segment av glidare

I designprocessen var diametern (d) redan förbestämd till 15 cm då detta var diametern på röret som kommer att utgöra mitten segmentet (l_m). Vidare påvisar Sousa m. fl. (2014) i sin analys att det optimala värdena på konstanterna n och θ är 1 respektive 20° . Därav kommer de olika designerna av kåpor utgå från detta

med viss avvikelse för att bekräfta resultatet. Vidare är även variablerna l_b och l_s begränsade då det måste rymmas till exempel en blåsa och annan elektronik i dom. Beslutet togs att utföra simuleringar för fyra olika konfigurationer av parametrarna, de olika kombinationerna presenteras i *Tabell 4.8*

| Test | n | θ [°] | l_f [cm] | l_a [cm] | L [cm] |
|------|-----|--------------|------------|------------|--------|
| 1 | 0.6 | 20 | 25 | 35 | 1.6 |
| 2 | 1 | 20 | 25 | 35 | 1.6 |
| 3 | 1.5 | 20 | 25 | 35 | 1.6 |
| 4 | 1 | 20 | 25 | 25 | 1.6 |

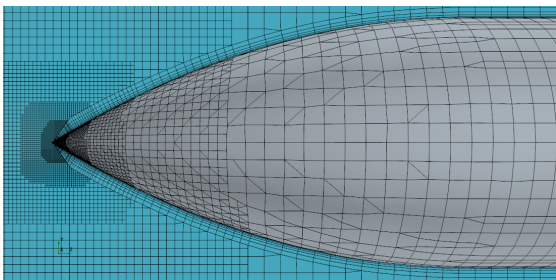
Tabell 4.8: Design parametrar

För de fyra olika testerna utfördes CFD (Computational Fluid Dynamic, jmf. Sv.: beräkningsströmmingsdynamik) simuleringar i programmet STAR CCM+. För beräkningarna användes följande modeller:

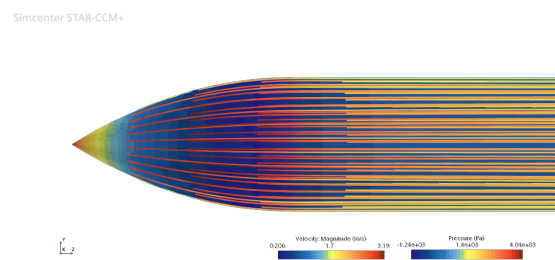
- All $y+$ Wall treatment
- Wall distance
- SST (Menter) K-Omega
- K-Omega Turbulence
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes
- Turbulence
- Steady
- Constant Density
- Gradients
- Segregated Flow
- Liquid
- Three Dimensional

Vidare för meshen över glidaren användes följande grundparametrar, se även resultatet i *Figur 4.15*:

- Trimmed Cell Mesher
- Prism Layer Mesher
- Automatic Surface Repair
- Surface Remesher



Figur 4.15: Mesh av främre kåpa



Figur 4.16: Hastighet och tryck

Därefter utfördes beräkningarna för följande fysiska parametrar:

| | |
|-----------------------------|---|
| Vattnets densitet: | $\rho = 997.561 \text{ kg/m}^3$ |
| Dynamisk viskositet: | $\mu = 0.001067421 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |
| Flödes hastighet: | $v = 3.046 \text{ m/s}$ |
| Reynolds nummer | $Re = 12.4 \cdot 10^6$ |

Beräkningarna resulterade i följande motståndskonstant för de olika parameterkombinationerna. Se även *Figur 4.16* för utsatta tryckområden och strömlinjer:

$$C_1 = 0.121815$$

$$C_2 = 0.122635$$

$$C_3 = 0.123998$$

$$C_4 = 0.121386$$

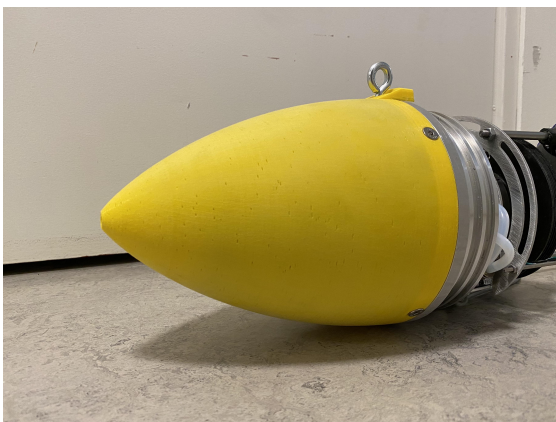
Ur beräkningarna går det att konstatera att det fjärde alternativet (C_4) har lägst motståndskonstant och är därav det önskvärda valet att arbeta vidare med, se *Tabell 4.9* för tillhörande designparametrar.

| Test | n | θ [°] | l_f [cm] | l_a [cm] | L [cm] | C_d |
|------|-----|--------------|------------|------------|--------|----------|
| 1 | 0.6 | 20 | 25 | 35 | 1.6 | 0.121815 |
| 2 | 1 | 20 | 25 | 35 | 1.6 | 0.122635 |
| 3 | 1.5 | 20 | 25 | 35 | 1.6 | 0.123998 |
| 4 | 1 | 20 | 25 | 25 | 1.6 | 0.121386 |

Tabell 4.9: Design parametrar och tillhörande motståndskonstant

Med bestämda designparametrar var nästa steg att påbörja tillverkningen av kåpor-na. Som tidigare påtalat bestämdes det att kåpor-na skulle 3D-skrivas, detta för att det är en relativt snabb och ekonomisk tillverkningsmetod som erbjuder flexibilitet för ändringar utan större kostnad i tid och pengar. En nackdel med att 3D-skriva är dock att de ger upphov till en relativt grov ytfinhet, något som inte är önskvärt sett till flödesmotstånd, för att åtgärda detta användes sprut- och finspackel på kåpor-na som sedan sandpapprades ner till en högre ytfinhet.

Vidare utifrån grundgeometrin givna av parametrarna *Tabell 4.9* gjordes en öppning i nosen på framkåpan för att tillåta vatten att flöda in och ut. På bakkåpan gjordes även en utskärning för ett vatteninsläpp samt för montering av motorn. Utöver detta monterades även en vertikal fena på den bakre kåpan för ge ökad stabilitet, mer om detta i nästkommande kapitel. Resultaten av de två kåpor-na återfinns i *Figur 4.17* och *Figur 4.18*.



Figur 4.17:
Framkåpa



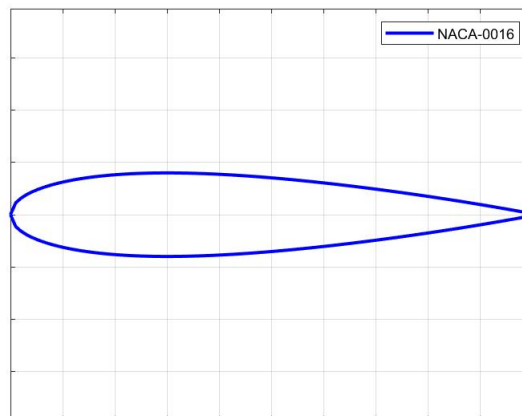
Figur 4.18:
Bakkåpa med motor

4.8 Vingar

Vingarnas uppgift är att hjälpa till med styrningen samt att generera lyftkraft till glidaren. Utöver detta bidrar dem med att stabilisera glidaren under färd och motverkar onödig och oönskad rörelse. De glidare som har undersökts är bland annat SLOCUM, Seaglider och OLSOMET OASYS glidare (Wood, 2009; Davis m. fl., 2002; Elkolali M, 2022), där alla har både horisontellt placerade vingor och vertikalt placerade fenor. De vertikala fenorna stabiliserar mot yaw och sway (jmf.Sv.: gir och svaj) rörelser, medans de horisontella vingarna stabiliserar mot pitch, roll och heave (jmf.Sv.: nig, rull, häv) rörelser.

En annan aspekt som var gemensamt mellan de nämnda gildarna är deras vingprofil. Där alla valt att använda sig av NACA-0016. För en undervattensglidare med en låg hastighet har NACA-0016 den högsta hydrodynamiska effektiviteten samt högsta stallvinkeln. Profilen är dessutom symmetrisk och bidrar med samma egenskaper när glidaren färdas upp och ner genom vattnet vilket ger en jämn sinusformad kurva under en längre sträcka (Elkolali m. fl., 2020).

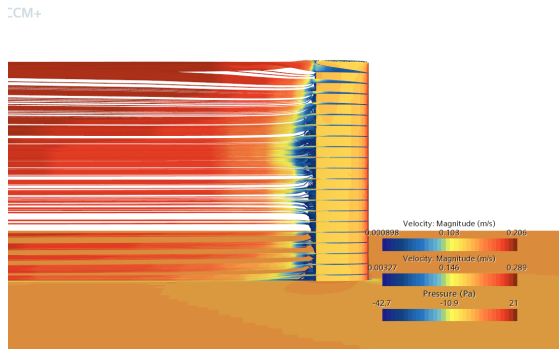
NACA-0016 profilen är en del av den fyrsiffriga serien av vingprofiler som togs fram av The National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) (Suckow, 2009). Där de första två siffrorna beskriver dess välvningslinje i procent utav kordans längd (anståndet mellan framkant och bakkant på profilen), vilket i detta fall är två nollor som indikerar på ett symmetriskt tvärsnitt. De två sista siffrorna beskriver den maximala tjockleken i procent av kordans längd, vilket i detta fallet är 16%. *Figur 4.19* visualiserar hur den valda vingprofilen ser ut.



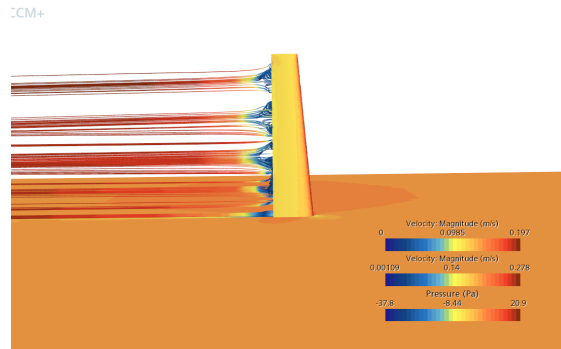
Figur 4.19: Tvärsnitt (NACA-0016)

För att sedan bestämma vingarnas geometri valdes det att utvärdera en rektangulär eller en avsmalnande form, genom att använda CFD simuleringar i programmet STAR CCM+, se *Figur 4.20* och *Figur 4.21*. Denna analys var inte till för att definiera dess area eller storlek, utan bara för att analysera den bästa geometrin. Vingarna i simuleringarna var inte vinklade i förhållande till kroppen i en så kallad "pilvinge",

som är en teknisk lösning för snabbflygande flyplan (Nationalencyklopedin, 2023). Denna typ av vingar har en förmånlig effekt på dragkraften men ger en avgörande nackdel på den genererade lyftkraften (Elkolali m. fl., 2020), vilket är anledningen till att den inte utvärderades. Däremot hade vingarna samma längd och utöver detta konstaterade Elkolali m. fl. att den optimala avsmalningsfaktorn mellan största och minsta delen på en avsmalnande vinge är 0.65, vilket därav användes.



Figur 4.20:
Rektangulär vingform



Figur 4.21:
Avsmalnad vinge

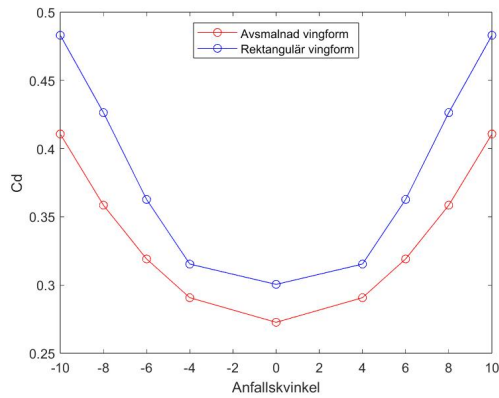
Likt simuleringarna för kåporna användes följande inställningar för simuleringarna:

- All $y+$ Wall treatment
- Wall distance
- SST (Menter) K-Omega
- K-Omega Turbulence
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes
- Turbulence
- Steady
- Constant Density
- Gradients
- Segregated Flow
- Liquid
- Three Dimensional

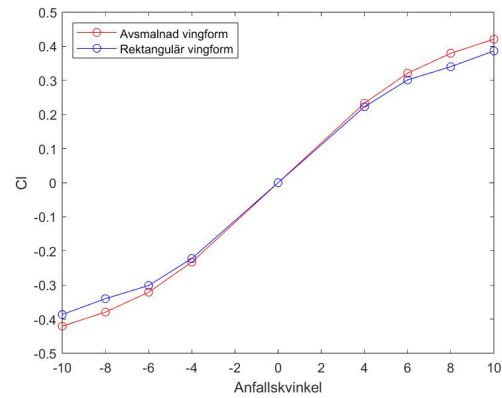
Med tillhörande inställningar för meshen:

- Trimmed Cell Mesher
- Prism Layer Mesher
- Automatic Surface Repair
- Surface Remesher

Vattenflödet sattes till en hastighet på 0.25 m/s med ett Reynoldsnummer på $0.5 \cdot 10^3$, detta då det är den hastighet som glidaren är avsedd att färdas med. Samma förutsättningar användes för de olika simuleringarna, detta för att enkelt kunna jämföra resultaten mellan de två designerna. Resultatet av intresse utifrån simuleringarna var att beräkna motståndskonstanten, C_d , och lyftkraftskonstanten, C_l samt lyft- och motståndskraft, för att sedan jämföra dessa och avgöra vilken form som är lämpligast. En lämplig design bör ha en låg motståndskraft och motståndskonstant och samtidigt generera en hög lyftkraft och lyftkraftskonstant.

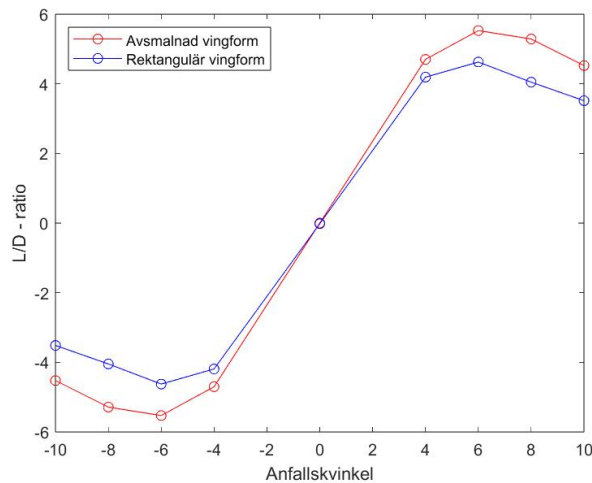


Figur 4.22:
Motståndskonstant, C_d



Figur 4.23:
Lyftkraftskonstant, C_l

Figur 4.22 och Figur 4.23 visar resultatet från simuleringarna för olika anfallsvinklar, där man kan konstatera att en rektangulär vingform ger ett större vattenmotstånd och att en avsmalnade vingform ger högre lyftkraft. För att tydligare visualisera resultatet beräknades även glidtalet, vilket visas i Figur 4.24.



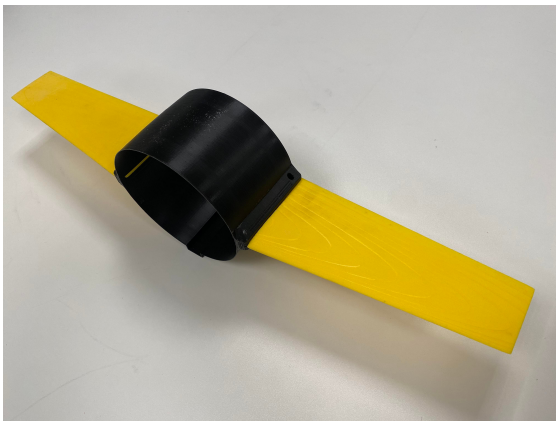
Figur 4.24: Glidtal

Slutsatsen utifrån simuleringar och beräkningar, liksom Elkolali m. fl., är att föredra en avsmalnad vingform framför en rektangulär då även glidtalet visar på ett mer önskvärt förhållande mellan lyft och drag.

Fenan designades med NACA-0016, samma profil som för vingarna, med en form som var inspirerad av SLOCUM glidarens roder. Dock använder detta projekt inte ett roder eftersom det inte är väsentligt för att uppfylla grundprincipen hos glidaren. Utan en fast fena monteras på den bakre kåpan för att tillhandahålla de stabilitetsegenskaper som tidigare påtalats.

Tillverkningen av vingarna och fenan valdes att göras genom 3D-skrivning, då likt kåporna i tidigare kapitel, har vingarna inget större hållfasthetskrav och kommer inte utsättas för något relativt trycklast. Dessutom är det ett relativt enkelt och billigt framtagande för att ge möjlighet att testa olika storlekar, då det erbjöds tillgång till 3D-labbet i Fysikhuset på Chalmers Tekniska Högskola. Det material som användes vid utskrivningen var PLA (Polylaktid) som är en termoplast och initialt valdes att tillverka vingar med en längd på 240mm och en fena som är 100mm hög, då det är ungefär de proportioner som används hos de undersökta befintliga glidarna.

Fästet till vingarna valdes att tillverkas på samma sätt, med en enkel design som omsluter cylindern och skruvas fast i den aluminiumprofil som sitter längs med glidaren. Vingarna beslutades att inte vara integrerade i cylindern, dels för att undgå mer komplexitet men även fördelen att ett fäste möjliggör att vingarnas form och storlek kan ändras utan att påverka övriga komponenter. I designen av fästet valdes även att implementera håligheter för att kunna placera stålstänger för ytterligare ballast hos glidaren. *Figur 4.25 och 4.26* visar hur de 3D-skrivna vingarna med fäste same fenan ser ut.



Figur 4.25:
3D-skrivna vingar och tillhörande fäste



Figur 4.26:
3D-skriven fena fäst på bakre kåpan

5

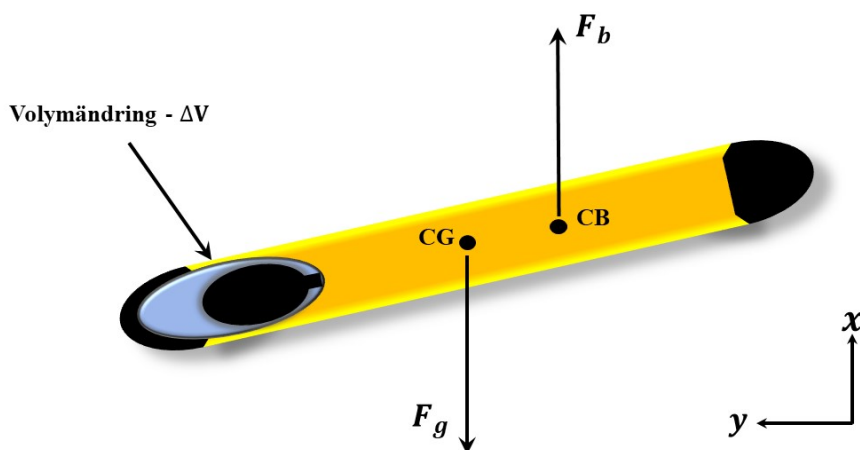
Flytkraftsmotor

Detta kapitel introducerar flytkraftsmotorn, vilket är det delsystem som möjliggör en volym- eller massändring av glidaren. Vid ändring av volymen kan man styra storleken på kraften genererad av den undantryckta vätskan som verkar mot glidaren, därav är det även den som reglerar huruvida glidaren flyter eller sjunker. Vid ändring av massan styr man istället tyngdkraften som verkar på glidaren. Flytkraftsmotorn grundar sig i Arkimedes princip och sambandet för nedsänkta undervattensobjekts flytkraftsförmåga går att härleda till följande (T. I. Fossen, 2011; Saksvik, 2022):

$$F_g = (m + \Delta m)g_x \quad (5.1)$$

$$F_b = \rho g_x (V + \Delta V) \quad (5.2)$$

Där tyngdkraften (F_g) angriper masscentrum på glidaren och flytkraften (F_b) i respektive lyftkraftscentrum och illustreras i *Figur 5.1*. Notationen ρ är densiteten av vattnet och ΔV är volymändringen av glidaren relativt volymen vid neutral flytkraft V . Respektive är Δm massändringen relativt massan vid neutral flytkraft m , alltså när glidaren är i jämvikt ($F_g = F_b$). De olika metoderna för att ändra volymen och massan beskrivs mer i detalj under *Kapitel 5.1*.



Figur 5.1: Schematisk bild av flytkraftsprincip

Flytkraftsmotorn är en av de mest kritiska delarna av glider konstruktionen och oriktig funktion kan leda till att hela glidaren går förlorad, det är alltså centralt att systemet som tillverkas är robust och konstrueras för att minimera felrisken. Vidare är effektivitet av flytkraftsmotorn en av de styrande faktorerna för hur systemet kan utformas, detta då glidarna är tänkta att operera under långa perioder med begränsad batteriladdning. Forsättningsvis i detta projektet är några av de önskvärda målen att minimera kostnader samt att framtaget koncept ska vara portabel och enkel att transportera på land. Detta kommer begränsa storleken på glidaren vilket i sin tur begränsar utrymmet flytkraftsmotorn kan uppta och på grund av kostnader vilka komponenter som kommer kunna införskaffas.

5.1 Typer av flytkraftsmotorer

Elkolali m. fl. (2022) skriver i sin jämförelse av olika flytkraftsmotorer att det i dagsläget inte finns några standarder för hur flytkraftsmotorer utformas, det finns däremot två olika principer som man kan använda; konstant massa med volymändring eller konstant volym med massändring. För det förstnämnda alternativet brukar man använda sig av en extern blåsa som kan expandera/krympa, för det senare alternativet använder man sig av en intern ballast tank som man kan fylla och tömma på vatten från utsidan och därigenom ändra massan av glidaren. Vidare hänvisar Elkolali m. fl. till fyra olika typer av flytkraftsmotorer, (se även *figur 5.2*):

1. Hydraulcylindrar

Denna metod bygger på man använder en hydraulcylindern som ballasttank som styrs med hjälp av en gängstång, två redan befintliga gliders som används sig av denna metod är *OceanScout* och *ROUGHIE* (Ordoñez m. fl., 2020; Page m. fl., 2017). Fördelarna som presenteras av Elkolali m. fl. med dessa gliders är att massändringen går snabbt samt att man utan svårighet kan uppnå precision i mängden vatten som tas in alternativt släpps ut, därutöver är det även fåtal komplicerade komponenter vilket kan leda till billig produktion. Nackdelen med dessa är dock att dom inte klarar större djup samt att intag av saltvatten tenderar att leda till korrosion på vissa av gliderns komponenter. Det finns dock koncept som kringgår detta genom att använda ett membran som avskiljer insidan av glidaren mot vattnet på utsida (Skillings, 2004).

2. Värmeväxlare

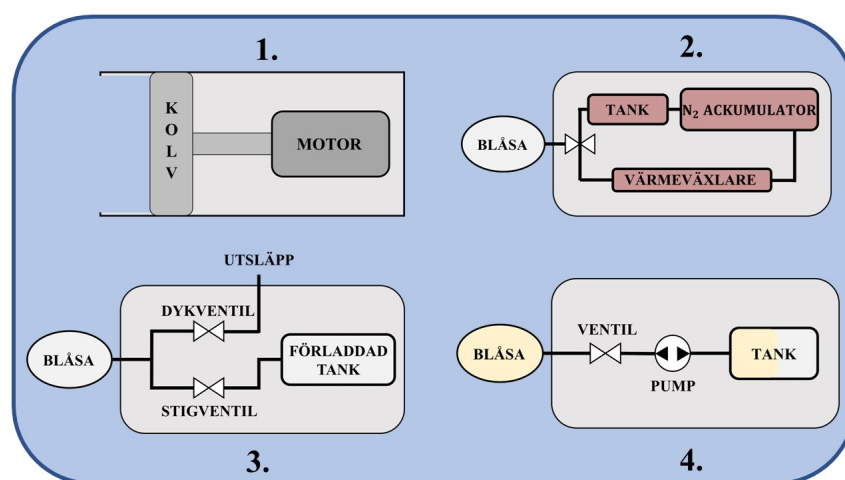
En metod som används av *Slocum Thermal* är en värmeväxlare som med hjälp av omgivningens temperaturskillnader kan spara upp mekanisk energi i en kvävefylld ackumulator som i sin tur kan genomföra en volymändring i form av att expandera en extern blåsa (Davis m. fl., 2002; Wood, 2009). Denna lösning är av hög komplexitet men i jämförelsen gjort av Elkolali m. fl. konstaterar han att räckvidden på dessa glidare kan vara upp till fyra gånger längre än batterimotsvarigheten. Vidare förutsätter värmeväxlaren att det är minst 10°C temperaturskillnad i omgivande vattnet vilket det ofta inte är på större djup.

3. Förladdad trycktank

Detta alternativa metod använder sig av en förladdad trycktank med gas, denna principen är en av de första patenterade lösningarna som framtoogs redan i början av 1960-talet av Franklyn E. Farris och Woodford M. Rand (1964). Fördelen med denna metod är att man kan helt mekaniskt automatisera dyk och stig processen genom att använda sig av en fjäderladdad ventil som öppnas och stängs vid ett visst tryck. När Franklyn E. Farris och Woodford M. Rand först presenterade konceptet använde man sig av en öppen ballasttank som tömdes med hjälp av gasen. Detta har på de mer moderna glidare likt *The Virginia Tech Underwater Glider* och den samutvecklade glidaren från University of Bremen med projektet ROBEX valt att frångå (Wolek m. fl., 2015; Waldmann m. fl., 2016). Dessa valde istället att använda sig av en blåsa som med hjälp av gasen expandera, detta för att undvika direkt intag av vatten. Fördelen med detta är att man som tidigare nämnt; kan automatisera systemt mekaniskt vilket minskar risken för fel. Däremot på grund av att man använder sig av en förladdad tank har man en begränsad mängd dykningar som kan genomföras, mycket färre än om man använder någon av de andra presenterade metoderna, samt att massan på glidaren ändras efter varje dyk (Elkolali m. fl.).

4. Hydraulsystem

Ett av det vanligaste alternativet är att man använder sig av ett slutet hydraulsystem som drivs av en pump som i sin tur kan styra om man vill expandera eller komprimera en extern blåsa. Denna metod används sedan innan av profiling floats (jmf. Sv.: profilering flottörer) likt *SOLO-I*, *SOLO-II* och *Deep SOLO* (Roemmich m. fl., 2019; Davis m. fl., 2001) men har även implementerats i bland annat glidaren OsloMets glidare (Saksvik, 2022). Hur hydraulsystemet utformas varierar beroende på användning och säkerhetsåtgärder. Elkolali m. fl. presenterar en sammanställning av de olika systemen och utifrån det kan slutsatsen dras att hydraulsystemen kan ofta utformas till att vara både kompakta och enkla men även klara av stora djup.

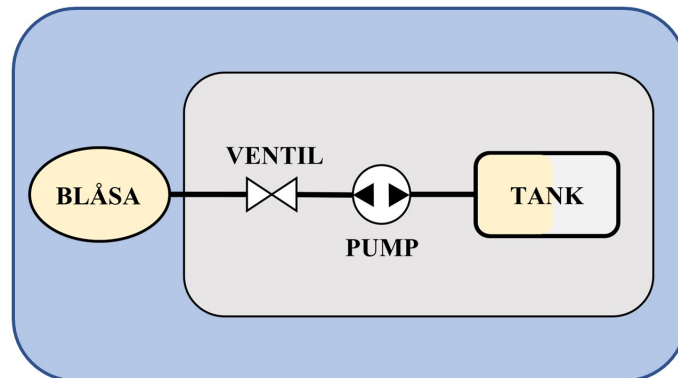


Figur 5.2: Typer av flytkraftsmotorer
(Elkolali m. fl., 2022)

5.1.1 Val av flytkraftsmotor

Utav de tidigare presenterade typerna av flytkraftsmotorerna ställdes alternativen mot varandra. Det konstaterades tidigt att använda en värmväxlare (alternativ 2) skulle bli för komplicerat och kostsamt sett till både projektets kunskapsbas, tid men även pengar. Vidare uteslöts användningen av en förladdad trycktank (alternativ 3) på grund av det begränsade antalet dyk glidaren skulle kunna genomföra. Ett alternativ skulle vara att ha en stor trycktank för att utöka antalet dyk men detta skulle bli svårt då en sådan tank skulle bli både tung och kräva för mycket utrymme. I slutändan uteslöts även alternativet att använda en hydraulcylinder (alternativ 1) då det ofta kräver robusta in-fästningar samt att konstruktioner tar upp mycket plats.

Den valda flytkraftsmotors baseras alltså på ett hydralsystem (alternativ 4), se *Figur 5.3*. Det var vid dethär laget fortfarande inte helt bestämt hur systemet skulle utformas i detalj, men det skulle innehålla en tank/reservoar som innehåller olja på insidan, en extern blåsa som kan ändra volym, en pump som kan driva olja mellan reservoaren och den externa blåsan samt någon typ av styrventiler för ytterligare reglering. Den slutgiltiga designen av systemet skulle få styras av vilken typ av ingående komponenter som fanns tillgängliga, alternativt möjlighet att tillverka.



Figur 5.3: Val av flytkraftsmotor

5.2 Blåsa

Blåsan är den komponent i flytkraftsmotorn som framförallt styr hur stor volymändring som kan genomföras, alltså hur snabbt den kommer sjunka, vilket indirekt styr hastigheten framåt. Slutsatsen kan även dras att det i teorin inte finns någon undre begränsningar till hur liten blåsan kan vara. En mindre blåsa innebär att glidaren kommer röra sig långsammare vilket i gynnsamma förhållanden kan fungera och till och med vara önskvärt vid insamling av diverse mätvärden enligt O. Petersson på Voice Of The Ocean (personlig kommunikation, 20 februari, 2023). En för liten blåsa kan dock sätta begränsningar om det är till exempel strömt i vattnet, glidaren blir även känsligare för olika densitetsgradienter i vattnet. Resonemanget som kan föras kring detta är att det är önskvärt att ha en så stor blåsa som möjligt och sedan själv styra förändringen i volym med hjälp av pumpen (A. Alcocer, personlig kommunikation, 9 februari, 2023). Storleken av blåsan begränsas även utav andra faktorer; det måste till exempel finnas lika mycket plats på insidan av glidaren för reservoaren.

Elkolali m. fl. presenterar i sin sammanställning av olika gliders och profiling floats att den maximala volymändringen som används i samma storleksordning som projektets glidare ligger på ett ungefär mellan 0.35 och 1.2 liter. När det kommer till val själva blåsan finns det ett par olika alternativ, i ett idealfall med lägre begränsningar av tid och pengar skulle man optimalt tillverka blåsan in-house (jmf. Sv: intern produktion), om detta är fallet kan man i större mån kunna styra utformningen och andra egenskaper av blåsan. I projektet var detta ingen alternativ utan likt andra glidare som till exempel OsloMets använder man sig av en ackumulatorblåsa. I projektets fall togs beslutet att köpa in en ackumulatorblåsa från ett reservdelssortiment, blåsan kom att ha en extern volym på 1 liter och en ungefärlig intern volym på 0.75 liter, samt ett working pressure (jmf Sv: arbetstryck) på 350 bar. Blåsan kom sedan att monteras direkt i glidaren lock där den sedan fästs med en ventil på insidan, se *figur 5.4*.



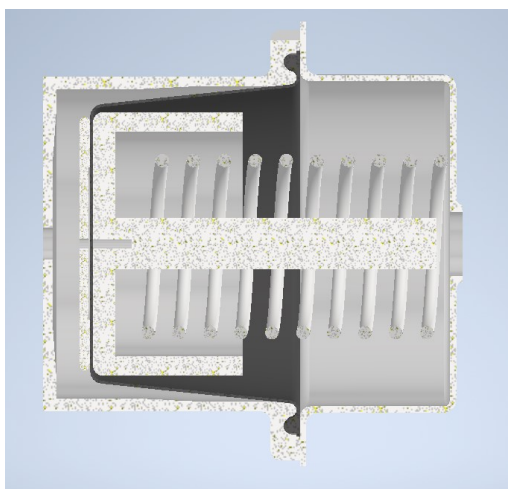
Figur 5.4: Blåsan monterad på lock

5.3 Reservoar

Reservoaren är som tidigare beskrivet på insidan av glidaren och växelvärcar med blåsan på utsidan för att justera volymen. Reservoaren måste kunna ändra volym för att säkerställa att pumpen alltid förses med hydragolja medans den kör, och att den inte suger luft, detta för att förhindra skador på pumpen. Dessutom används också ofta reservoarens expansion för att ge återkoppling om flytkraftssystemets tillstånd. Vid undersökning av olika lösningar för reservoaren hittades tre metoder som var vanligast. Det två första alternativet var att använda sig av en fjäderbelastad hydraulcylinder, problemet är dock att hålla tätt mellan kolv och cylindervägg. En lösning som OsloMet presenterar för att lösa detta är användingen av ett membran som avskiljning (Elkolali m. fl., 2022). Ett annat alternativ som *SeaFlightGlider* använder sig av är en kolvtätning (jdavis-codes m. fl., 2021). Det sista alternativet, som identifierades under ett studiebesök på Voice Of The Ocean, är att man använder sig av en bälg som reservoar. Nedan beskrivs de tre alternativen mer i detalj.

1. Membran

Användningen av ett membran i reservoaren var ett av de första alternativen som granskades. Reservoar tanken skulle då vara tvådelad där man sedan klämmer fast membranet mellan de två delarna och på så sätt avgränsa och täta mellan cylindern och olja och därav även täta mot läckage, se *Figur 5.5*. Denna metod för att avgränsa återfinns hos bland annat, som tidigare nämnt, hos OsloMets glidare men även i ett liknande koncept presenterad av Skillings (2004) i hans promemoria och i Asakawa m. fl. (2016) i sin artikel om utveckling av en flytkraftsmotor. En av de eventuella nackdelarna som diskuterades inom gruppen var hurvida det kan komma att uppstå slitage efter flertalet cyklar då membranet är av gummi och resterande del reservoaren skulle vara i metall med eventuellt vissa vassa kanter. Vidare upptäcktes det att utbudet av försäljare men även storlek var begränsat för färdiga standardprodukter. Ett alternativ för att kringgå detta var att specialbeställa önskad storlek, detta skulle dock resultera i höga kostnader och långa leveranstider.



Figur 5.5: Tvärsnitt av fjäderladdad reservoar tätad med rullmembran

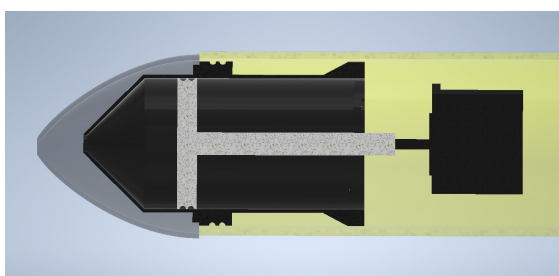
2. Kolvtätningar

Det andra alternativet som granskades var användningen av en kolvtätning. Kolvtätningen kläms fast runtom kolven och tätar mellan reservoarens kanter och kolven. Förslutningen förhindrar på så sätt att olja läcker igenom, se *Figur 5.6*. Detta är en metod som används av tidigare presenterade *SeaFlightGlider*. Fördelen med detta är att konstruktionen blir robust och i princip mindre komplicerad att tillverka dock krävs höga toleranser på diverse passningar. Nackdelen som upptäcktes med kolvtätningarna var likt membranerna det begränsade utbudet av både olika typer samt storleksutformningen.

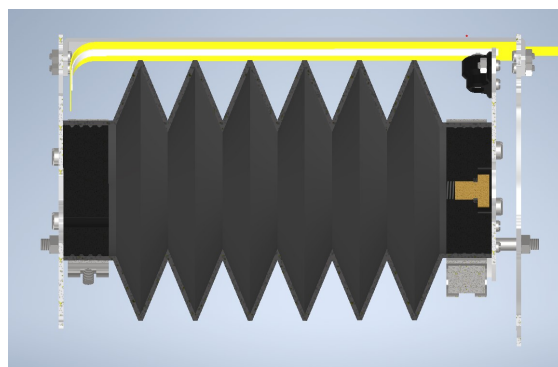
3. Bälga

Det sista alternativet som undersöktes var användning av en elastisk gummi-bälga som reservoar, se *Figur 5.7*. Att använda en elastisk reservoar har gjorts innan av bland annat tidigare nämnda Voice Of The Oceans glidare *SeaExplorer* och beskrivningen gjord av Franklin Jensen (2009) där han presenterar olika typer av flytkraftsmotorer. Utöver detta använder även OsloMets glidare ett liknande koncept, dock med en ackumulator blåsa. Fördelen med att använda en helt elastisk blåsa är att man kan använda sig av vakuum på insidan av skrovet för att tömma den externa blåsan, och på så sätt spara energi. En av nackdelarna är dock att det kan vara svårt att mäta exakt hur mycket olja som har pumpats in och ut ur blåsan.

Av de tidigare presenterade alternativen valdes alternativ 3, bälga, som den grundläggande princip att bygga vidare på. Anledningen av detta var delvis lättillgängligheten i flera olika dimensioner samt möjligheten att använda vakuum för att tömma den externa blåsan.



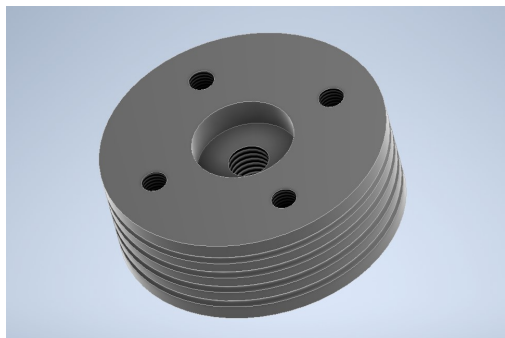
Figur 5.6:
Tvärsnitt med kolvtätning



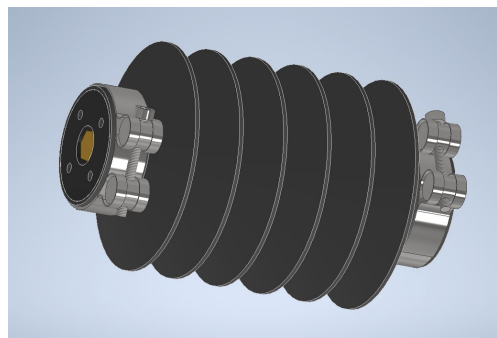
Figur 5.7:
Tvärsnitt med bälga

Vidare för att försluta bälgens ändar tillverkades två ändlock, se *Figur 5.8*. På det främre av ändlocken monterades en T-koppling för möjliggöring anslutning till resterande delar av hydraulsystemet. På den bakre monterades en skruvkork, det är via denna som pumpsystemet kan fyllas på eller tömmas av olja vid service. Utöver detta tillverkades en ställning som hjälper bälgen att hålla sin form samt

två rundstavar som hjälper bälgen att komprimeras och expandera rakt utan att böjas, se *Figur 5.9*. För att åtgärda ett av de tidigare påtalade problemen med bälgen, nämligen svårigheten att veta hur mycket olja som finns kvar, installerades även en linjär potentiometer som läser av hur mycket bälgen komprimerats. Med kunskap om hur lång bälgen är och hur mycket den rymmer så kan man beräkna en procentuell uppskattning av hur mycket som finns kvar.



Figur 5.8:
Ändlock till reservoar



Figur 5.9:
Reservoar

5.4 Pump

Vid val av pump fanns det en del krav och önskvärda faktorer att uppfylla. Då vi har valt att ha en extern blåsa sätter det ett krav på att pumpen måste kunna fylla denna på 100 meters djup, vilket motsvarar ett tryck på cirka 11 bar. Utöver detta kan det vara önskvärt att ha en säkerhetsfaktor. Vidare är pumpens effekt viktig då glidaren endast har en viss batterikapacitet och glidaren ska kunna operera under långa perioder. Det är även önskvärt att pumpen är av liten vikt och volym för att själva enklare kunna reglera glidarens masscentrum.

Elkolali m. fl. presenterar i sin jämförelse av flytkraftsmototrer även olika typer av pumpar som använts. Han konstaterar att det som verkar vara det bästa alternativet för en flytkraftsmotor är en kugghjulspump och i brist av tid valde gruppen att inte undersöka andra alternativ förlitade sig på detta resultat. Med detta bestämt påbörjades en sökning hos diverse återförsäljare efter en pump som mötte tidigare presenterade krav. Den pump som i slutändan valdes var modellen MGD-1000P hos återförsäljaren TCS-Micropump vars specifikationer presenteras i *Tabell 5.1*.

| Gränser | Spänning [V] | Effekt [W] | Flöde [ml/min] |
|---------|--------------|------------|----------------|
| Minimum | 12 | 30-35 | 100 |
| Maximum | 30 | 52 | 450 |

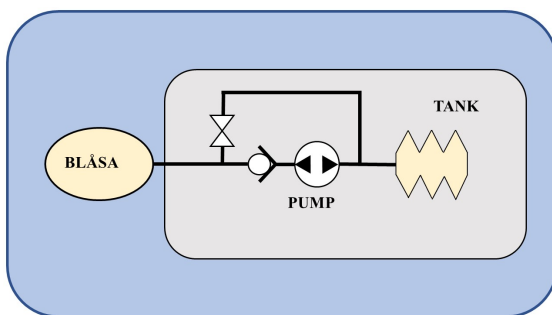
Tabell 5.1: Pumpspecifikationer

Utöver detta så hade pumpen ett rekommenderat arbetstryck på 12 bar, dock ett maximalt arbetstryck på 25 bar. Vidare har pumpen en vikt på 125 gram och en uppskattad aktiv livslängd på 10 000 timmar enligt tillverkarna.

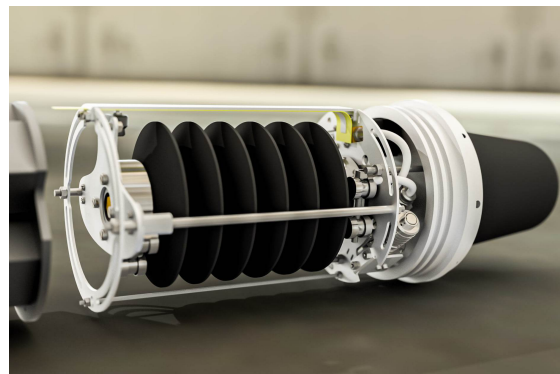
5.5 Slutgiltig design av hydraulsystem

När alla ingående huvudkomponenters utformning i hydralsystemet var bestämda var nästa steg att koppla samman dem, samt att få de att fungera på önskvärd sätt. Grunddesignen utgår från det tidigare presenterade valet i delkapitel 5.1.1 med vissa tillägg, se *Figur 5.10*. Då lösningen med en bälg avser att använda sig av vakuum på insidan av skrovet kommer det alltid vara ett undertryck som vill suga tillbaka oljan från den externa blåsan. Därav gjordes ett val att installera en envägsventil efter pumpen, detta för att pumpen själv inte är tillräckligt tillförlitlig i sin förmåga att stoppa ett tillbakaflöde när den inte är påslagen. Envägsventilen tillåter alltså endast pumpen att tömma olja från den interna reservoaren till den externa blåsan.

Vidare installerades en solenoid magnetventil i en koppling över pumpen utöver envägsventilen. Magnetventilen är vanligtvis stängd tills dess att en viss spänning läggs över den, detta görs när den externa blåsan ska tömmas. När magnetventilen öppnas gör vakuumet på insidan av skrovet och övertrycket på utsidan att oljan töms från den externa blåsan och förs tillbaka till den interna reservoaren. I *Figur 5.11* visar resultatet av hur hydralsystemet avser att utformas efter tillverkning.



Figur 5.10:
Schematisk bild av system



Figur 5.11:
3D-rendering av slutligt hydralsystem.

6

Manövrering

Detta kapitel kommer att hantera glidarens manövrering, därav det som får glidaren att ändra riktning och svänga under färd. Främst uppnås manövrering genom ändring av glidarens masscentrum. Detta åstadkoms från förflyttning av batterierna i form av translation och rotation samt volymväxling mellan en intern- och extern blåsa.

6.1 Stigning och Rullning

Glidaren har inga roder för att styra sin riktning eller vertikala lutning. Istället styrs dessa genom intern förflyttning av masscentrum. Roder kan användas på undervattensfarkoster, men då krävs en tryckbeständig rörlig genomföring i skrovet och det bedömdes vara en risk för vattentätheten. Den här glidaren har en stegmotor som istället flyttar batterierna fram och tillbaka, och en som roterar batterierna runt skrovets centrumlinje. Med hjälp av vingarnas lyftkraft kan på så sätt lutning, rullning och riktning styras. För att justera riktning vid propeller-driven förflyttning på konstant djup måste glidaren åka med en nollskild lutning och förskjuten flytkraftsjämvikt, för att fortsatt ge vingarna lyftkraft.

Motorerna som används för manövreringen måste vara precisa, ha stort vridmoment och helst även vara små och lätta. Precision är vitalt för rätt överföring av motor rotation till förflyttning av batterierna. På grund av att stegmotorer drivs genom steg kan hög precision uppnås (Ashby, 2012). Valet att använda stegmotorer grundades således på behovet av att motorerna skulle ha tillräckligt högt vridmoment för att kunna hantera belastningen från batterierna och förflytta dem, samtidigt som hög rotationshastighet inte var en avgörande faktor.

Translation av batteriet sker genom att stegmotorn roterar en kulskruv som förflyttar en kulmutter fäst i batteripaketet fram och tillbaka. Det krävs mer vridmoment ju brantare vinkel glidaren befinner sig i. Under antagandet att glidarens centralaxel är parallell med gravitationskraften krävs en stegmotor med vridmoment:

$$T_t = \frac{sm_t g}{2\pi}, \quad (6.1)$$

Där s är kulskruvens delning (avståndet mellan två gängtoppar), m_t är batteripaketets massa och g är tyngdaccelerationen på jordens yta. Med en delning av $s = 4$ mm och en batterimassa av $m_t = 2,8$ kg erhålls ekvationen nedan:

$$T_t = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 9,82}{2\pi} \approx 0,019 \text{ Nm.} \quad (6.2)$$

För rotation av batteripaketet kommer även translationsstegmotorn och kulskraven behöva roteras. Maximalt vridmoment krävs då rotationspaketets masscentrum befinner sig i höjd med glidarens rotationsaxel. Vridmomentet som krävs för att motverka gravitationskraften vid detta läge är:

$$T_r = m_r r_{mc} g, \quad (6.3)$$

Där m_r är rotationspaketets massa och r_{mc} är avståndet mellan paketets masscentrum och rotationsaxeln. Med en massa av $m_r = 3$ kg och avstånd till masscentrum av $r_{mc} = 4$ cm framgår följande ekvation:

$$T_r = 3 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 9,82 \approx 1,18 \text{ Nm.} \quad (6.4)$$

För translation av batteripaketet valdes en stegmotor med ett hållmoment på 0,22 Nm. Av praktiska skäl valdes samma motor att användas för rotationen också. För att få 1,18 Nm krävs en nedväxling av 6:1 eller mer. Nedväxlingssystemet designades specifikt för glidaren för att utnyttja hela skrovets radie och minimera dess djup. För att få en hög utväxling utan seriekoppling valdes att tillverka en planetväxel. För att en planetväxel med jämnt fördelade planethjul ska fungera utan interferens krävs uppfyllnad av kugghjulsförhållandet:

$$\frac{N_s + N_r}{n_p} = A, \quad (6.5)$$

Där N_s och N_r är antalet kugor hos kugghjulet i mitten respektive ringen runt planeterna, n_p är antalet planeter och A är ett jämnt tal. Utväxlingen härleds från de angivna ekvationerna nedan:

$$\begin{aligned} N_s \omega_s + N_p \omega_p - (N_s + N_p) \omega_c &= 0 \\ N_r \omega_r - N_p \omega_p - (N_r - N_p) \omega_c &= 0 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Där N_s , N_p och N_r är antalet kugor hos solen, planeterna och ringen, och ω_s , ω_p , ω_r och ω_c är vinkelhastigheterna hos solen, planeterna, ringen och planeternas bärare (M.Mart, Maskinelement, 2017). För det valda förhållandet som uppvisas i ekvationen nedan:

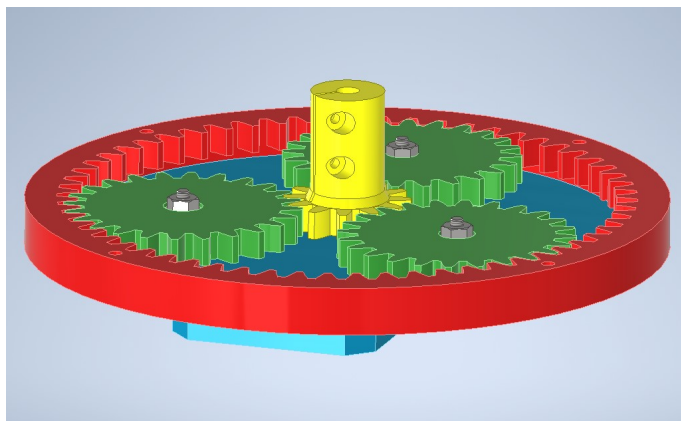
$$N_r = N_s + 2N_p \quad (6.7)$$

Kan den slutgiltiga ekvationen härledas:

$$n\omega_s + (2 + n)\omega_r - 2(1 + n)\omega_c = 0, \quad (6.8)$$

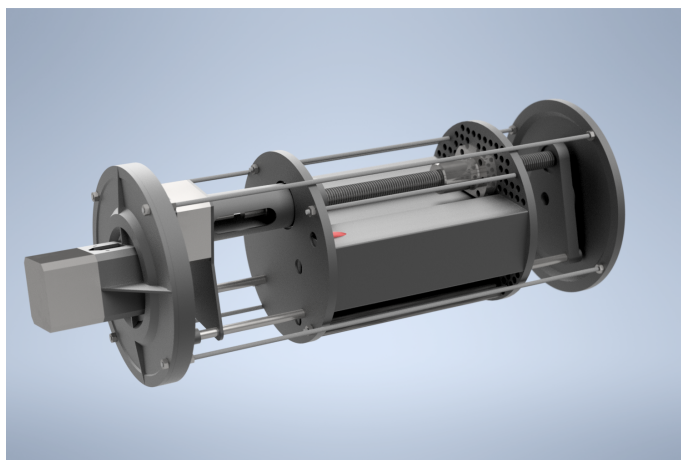
Där $n = N_s/N_p$. För att kunna 3D-skriva kugghjul med godtagbara toleranser, samt för att utnyttja hela skrovets innerradie valdes en ytterring med 120 kugor av modul 2. Från ekvation (6.7) och ekvation (6.5) fås en möjlig planetväxel med ett solhjul med 12 kugor och tre planethjul som har 24 kugor vardera, se *figur*

6.1. Vid operation driver motorn solhjulet och batteripaketet sitter i planetjulens bärare. Från ekvation (6.8) fås en nedväxling från solhjulet till planetbäraren av 1:6. Som ett resultat av detta behövs en kraft på 0,19 Nm för att rotera batterierna, och en stegmotor med en kraft på 0,22 Nm bör vara tillräcklig. I *Figur 6.1* ses solhjulet i gult som fäster direkt på stegmotorn med friktionsfäste samt hållaren för translationsstegmotorn, i ljusblått, monterad på bäraren längst ner i figuren.



Figur 6.1: CAD modell av planetväxeln

Stegmotorerna har begränsad kapacitet att hantera den axiella kraft som krävs för att lyfta upp batteripaketet vid betydande lutning. Detta löses genom att ett kullager som klarar kraften är inbäddade i 3D-printade skivor i ändarna, som hålls på plats av gängade stänger från planetväxeln. Vikten hamnar då på framlocket till växellåda (till vänster i *figur 6.2*), vilket i sin tur sitter fast i elektronikmonteringsplattorna som sitter i skrovets baklock. I *Figur 6.2* ses från vänster till höger; stegmotorn för rotation, planetväxelhuset, stegmotor för translation, batteripaket och främre upphängningssystemet.



Figur 6.2: CAD modell av manövreringsmodulen

6.2 Ballast

För att tillåta maximal manövrerbarhet bör glidarens horisontella jämviktsläge och rotation sammanfalla med batteripaketets centrala position och rotation. Dessutom bör farkostens gravitationskraft vara lika med dess lyftkraft i vatten av den densitet som den ska användas i då blåsan är fylld till hälften. För att uppnå detta behöver viktfordelning justeras noggrant med hjälp av ballast. Vikter kan placeras på olika platser i och utanpå glidaren och flytblock kan placeras i kåporna. Flytkraftsmodulen har inbyggda fästspår för att placera gängstänger med 5 mm diameter och batteripaketet har förborrade hål för rundstavar med samma diameter. Vingfästena har fickor för 12 stycken 9 grams vikter. Utöver det finns det ett 200 mm långt tomrum med 140 mm radie mellan manövreringsmodulen och flytkraftsmodulen som kan användas för ballast om den inte fyllts med bestyckning, extra batterier eller annan last. Dessutom kan aluminiumprofilen på ovansidan av glidaren användas för att smidigt fästa och justera position på vikter, även efter glidaren är slutet och redo att användas. Viktjustering utförs genom att först uppnå beräknad totalvikt och ungefärligt masscentrum på land och sedan göra noggrannare justeringar i vatten med hjälp av ett hängstativ och en dynamometer i varje lock. Vilket kommer ge olika resultat beroende på i vilken vattenmiljö glidaren ska färdas i.

7

Elektronik

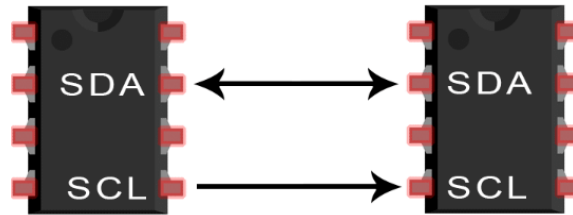
Detta kapitel fokuserar på de elektriska komponenterna, då samverkan mellan flera olika elektriska komponenter är nödvändigt för tillverkningen av en funktionell glidare. Under projektet har flera komponenter initialt testats och kalibrerats individuellt för att fullständigt förstå kapaciteten av dess användningsområde. Samspelet i elektroniken kommer undersökas för att utveckla ett fungerande och säkert system som optimeras efter glidarens syfte.

Tester av olika elektriska komponenter har skett med ett 20 volt aggregat. Trots att den verkliga volt förseelsen från batterierna kommer uppgå till 33,6 volt så valdes det att avgränsa testerna till de tillgängliga aggregaten utan något krafttag att få tag i ett 33,6 volt aggregat. En del sensorer som skulle kunna vara intressant att implementera i glidaren har avvisats på grund av olika ekonomiska samt tidsmässiga skäl. Det valdes också att utnyttja platsen i glidaren till andra delar för att uppnå målet av funktionalitet.

7.1 Mikrokontroller

Tidigare nämnt är utrymmet inuti glidaren begränsad, vilket medför att det är av vikt att använda så minimalistisk hårdvara som möjligt. Ett mål med projektet är att hålla ner strömåtgången, för att främja energibesparingar och därav möjliggöra längre operationsperioder. För att åstadkomma detta krävs en dator med funktionaliteten att styra och driva olika typer av komponenter. Ett arduino mikrokontroller-kort fastställdes som det bästa alternativet i projektet, delvis för sin kompakta design men framförallt för möjligheten att använda det färdigutvecklade mjukvarustödet för programmering av styrsystemet. Specifikt valdes en Arduino UNO Rev 3 som dator för systemet, det är en liten enkrets dator med 14 stycken digitala in/utgångar. Av dessa 14 stycken är sex stycken av utgångarna kapabla för pulsbreddsmodulering, vilket kan vara mycket fördelaktigt för ett styrsystem som ska hantera elmotorer (Manias, 2017). Arduino anses dessutom vara förhållandevis enkel att använda för kommunikation mellan komponenter. Mikrokontrollern har möjlighet att kommunicera med andra komponenter genom I2C, vilket är fördelaktigt vid hanteringen av parallellt arbete med flera mindre komponenter. Den praktiska innebörden av I2C är att huvudenheten sammankopplas med en mindre komponent genom en tvåvägskommunikation, serial data line (SDA) och serial clock line (SCL). Datasignalen skickas i serie mellan de två komponenterna i samförstånd med klocksignalen som styrs av huvudenheten. I *Figur 7.1* syns den principiella tvåvägskommunikationen

för I2C där den vänstra komponenten skall betraktas som huvudenhet.



Figur 7.1: Seriekommunikation I2C

Den ursprungliga planen var att använda en Arduino UNO till att kontrollera alla komponenterna men på grund av det höga kravet av antal in och utgångar till de elektriska motorerna och sensorerna var detta ett problem. För att åtgärda detta påtalade problem togs beslutet att använda två datorer, då detta skulle krävas för att driva all elektronik. En ytterligare fördel med detta är möjligheten att dela in elektroniken i delsystem. Genom att dela upp systemen uppstår möjligheten att skriva två olika program till respektive dator och på så sätt effektivisera datainsamlingen och elektroniska kommandon till de delar som behöver vara aktiva vid rätt tillfälle. Pump och ventil kommer vara de huvudsakliga komponenterna som styrs av den ena datorn och den andra kontrollerar motorerna och förflyttningen av batterierna.

7.2 Sensorer

Under vattenytan kan glidaren ej styras manuellt, istället används sensorer för autonom manövrering av glidaren. Valen av sensorerna är viktiga för att rätt och relevant data kan användas av glidaren vid drift. Vad som anses relevant data baseras på vilka fysiska eller mekaniska variabler som styrsystemet ska baseras på. I sökandet efter rätt sensorer var det av stor vikt att det fanns någon form av kommunikationskontakt, I2C är att föredra då det gör sensorn kompatibel med Arduino. Resonemanget kring vilka sensorer som ska användas har bedrivits ur en ekonomisk och en funktionell aspekt. Ur en funktionell synvinkel är det av största vikt att sensorerna fungerar felfritt då det som tidigare nämnts ska användas för att autonomt manövrera hela glidaren. Sensorerna måste vara robusta och tåliga i utmanande miljöer och samtidigt bibehålla ett minimalt fel i dataavläsningen. Utifrån den funktionella aspekten och förutsatt att det levdes upp till var det sedan ur en ekonomisk synvinkel som resulterade i beslut om vilka sensorer som används. Nedanför presenteras det sensorer som kom att användas för styrning och reglering av glidaren.

1. BNO055 Absolut Orienteringssensor

BNO055 är en orienteringssensor med inbyggt gyroskop, accelometer och magnetometer med datagenerering i x, y och z ledet. Orienteringssensorns uppgift är att glidaren ska ha rätt vinkel vid upp och nedgång samt läsa av hastighet och rotation. BNO055 är direkt kompatibel med Arduino genom I2C och har även inbyggda huvudfiler som direkt kopplar upp kommunikationen mellan sensorn och programmet samt användbara kalibreringsfiler. Tester har

genomförts både för korrekt dataavläsning samt kalibreringsmöjligheter. Det förstnämnda genomfördes med hjälp av existerande testkod hämtat ur ett Arduino bibliotek. Datan visades vara konsekvent och resulterade i beslutet att löda ihop sensorn med mikrokontrollern och sedan permanent fästa på elektronikplattan. Kalibreringsmetoden hämtades från tillverkarens hemsida och testades med hjälp av ett testprogram hämtat från Adafruits Arduino bibliotek. Det visade sig finnas en del utmaningar för att få en korrekt kalibrering av gyroskopet, accelometern och magnetometern. Genom olika rörelsemönster kalibrerades sensorn korrekt.

2. SOS-sensor

För snabb respons i fallet av läckage använder vi SOS-sensorn. Sensorn fungerar genom sina svampar som upptäcker fukt. Med genomtänkta placerade ställen upptäcks läckage snabbt. För att testa funktionen på läckagesensorn kopplades den upp ihop med Arduinon och den testades genom provisorisk kod som skickade ut mätdata. När svamparna blötlades informerade sensorn om läcka. Resultatet tyder på att sensorn ger snabb och korrekt respons och den löddes fast på elektronikplattan. I projektet är SOS-sensorn tänkt att fungera som säkerhetsåtgärd utifall att någon tätning skulle havrera. I nuläget fungerar den som informationsgivare som meddelar att läckage är ett faktum.

3. Trycksensor

Trycksensorn ger data för atmosfärtryck och havsdjupet i meter. Med hjälp av denna data kan beslut för färd uppåt eller nedåt tas genom konsekventa avläsningar. I detta fallet fanns det ingen inbyggd kommunikationskontakt och således var det nödvändigt att införskaffa en I2C-omvandlare som konverterar datan till formatet som krävs för att mikrokontrollern ska kunna tyda informationen. Trycksensorns data är väsentlig för båda Arduinos, därav kommer I2C-omvandlaren att parallellkopplas med styrdatorn för pump och ventil samt styrdatorn för motorerna. Således kan datan läsas in från trycksensorn av de två datorerna samtidigt.

4. Potentiometer

Volymen av olja som pumpas mellan blåsan och reservoaren läses av med potentiometern. I samband med att datan används i koden går det enkelt att beskriva hur mycket olja finns blåsan för att dyka i avsedd hastighet och på samma sätt hur mycket olja det finns i behållaren för att stiga i avsedd hastighet. Det är viktigt att potentiometern monteras på ett sätt så att datan kan avläsas korrekt.

7.3 SSR (Solid State Relay)

Glidaren är ej åtkomlig för manuella ändringar under drift. Flödet av oljan genom pumpen och ventiler är tänkt att ske både aktivt och passivt. Det aktiva flödet regleras genom att pumpen får ström och driver ut oljan genom backventilen och sedan blåsan. Det passiva flödet innebär att oljan pressas tillbaka genom den tidigare presenterade elektrisktstyrda ventilen, in i reservoaren enbart genom en strömtilförseln till ventilen och sedan utnyttjan av tryckskillnaden mellan ut och insida. Två stycken SSR kopplades in i 24V kretsen som lösning för detta problem. Med hjälp av att utnyttja Arduinos möjlighet att kontrollera individuella in och utgångar kan SSR:erna styra strömtilförseln i denna delen av kretsen. Det går sedan med enkel kod bestämma när dessa pinnar ska aktiveras eller deaktiveras och på så sätt styra oljeflödet. Den ena SSR styr strömtilförseln till pumpen och den andra till den elektriska ventilen.

7.4 Batteri

Batteriets uppgift är att förse alla elektriska komponenter med energi. Det behöver vara effektivt och energisnålt för att kunna drivas länge och kunna förse tillräckligt med spänning till komponenterna. Valet av batteriet utifrån dessa kriterier ihop med möjligheten att kunna få plats med så mycket batterikapacitet som möjligt, geometri och formmässigt, resulterade i att LiPo-batterier valdes. LiPo-batteriet följer en urladdningskurva vilket innebär att spänningen från batteriet inte är konstant från start till slut. Intervallet för en enskild cell är $3V(\text{Urladdat}) \rightarrow 4,2V(\text{Fulladdat})$.

Tack vare sin urladdningskurva behöver batteriet kunna förse komponenterna i alla skeden av sin urladdning. Mer specifikt valdes ett batteri med 14,8V, 7200mAh och 100C. Detta batteri har fyra celler med nominell spänning 3.7V vardera. Utifrån urladdningskurvan av LiPo-batterier varierar spänningen mellan 12V och 16.8V.

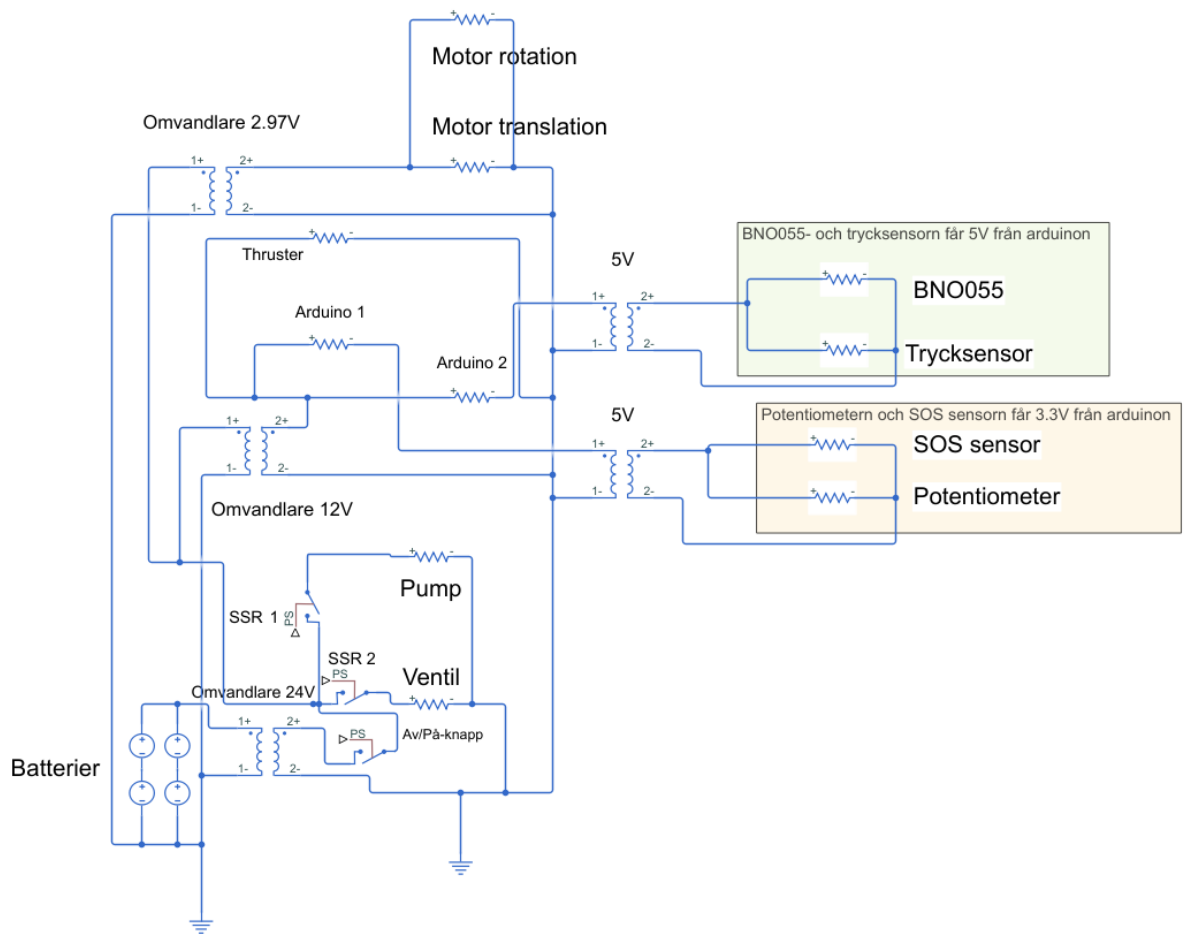
7.5 Kretssystem

Elektriska komponenterna kräver olika spänningar för att kunna drivas. Detta innebär att de behöver sina egna kretsar. Batteripaketet består av fyra stycken batterier. Batterierna är seriekopplade två och två med varandra och dessa par är parallellkopplade. Detta resulterar i att batteripaketet har en nominellspänning på 29,6V med 14,2 amperetimmar. Kretsen förses med 29.6V nominell spänning och den varierar mellan 24V upptill 33.6V utifrån LiPo-batteriernas urladdningskurva. I *Tabell 7.1* beskrivs spänningarna som komponenterna valdes att drivas på i kretsen. Valet grundades i komponenternas krav på spänning och utifrån om de kunde drivas på 24V, 12V, 5V eller 2.97V. Denna uppdelning av komponenterna är viktig för valet av omvandlarna.

| Komponenter | Spänning |
|--|----------|
| Av/På-knapp | 24V |
| Pump | 24V |
| Ventil | 24V |
| Thruster | 12V |
| Arduino Uno Rev R3 | 12V |
| Orienteringssensor | 5V |
| SOS-sensor | 5V |
| Potentiometer | 5V |
| Stegmotor kontroller | 5V |
| Spänningskonverterare 3.3V → 5V för trycksensorn | 5V |
| Trycksensor | 3.3V |
| Stegmotor för rotation | 2.8V |
| Stegmotor för translation | 2.8V |

Tabell 7.1: Komponenternas spänning

Batteriernas spänningvarians mellan 24V → 33.6V resulterar i vikten av omvandlare i kretsen. Omvandlarnas funktion är att ge ett konstant flöde av spänning och rätt spänning för att undvika att komponenterna går sönder. Komponenterna med 24V, 12V och 2.97V kopplas in efter spänningsomvandlarna i sin egen spänningskrets. Arduinon förses komponenterna med 5V. Valet att använda likströmsomvandlare direkt från batterikällan ut till komponenterna gjordes med väl grundad eftertanke. Detta är för att undvika eventuella störningar i kretsen mellan till exempel resistorer eller liknande komponenter som hade behövt användas om kretsen byggs utifrån en enda källpunkt (A.Grauers, personlig kommunikation, 28 Mars, 2023). *Figur 7.2* beskriver kopplingschemat på kretsen inuti glidaren, systemets programlogik återfinns även *Appendix D*.



Figur 7.2:
Kopplingschema

I kretsen kopplades kontakter in för en enklare ihopsättning när glidaren ska sättas i drift. Kontakterna underlättar även vid demontering av glidaren alltså bidrar till en bättre modulariserbarhet i form av möjligheten för elektriska komponenter att bytas ut eller felsöka vid behov.

Kretsen testades genom inkoppling av en spänningskälla som uppnådde 20V. Skillnaden i spänningen mellan batterierna och spänningskällan har ingen inverkan på testets utfall eftersom omvandlarna klarar högre spänningar än batterierna ger ut. Därefter mättes de olika spänningsfallen och strömmarna från omvandlarna samt till komponenterna med en multimeter och konstaterades stämma.

7.6 Uppskattning av räckvidd

Uppskattning av räckvidd för glidaren görs utifrån batteripaketets specifikationer och elektriskakomponenternas energiförsörjning under en dykning samt uppstigning.

När glidaren dyker eller återgår till ytan uppskattas det att den håller 20° tills ett djup på 100m är uppnått.

$$A1_t = \frac{100}{\sin(20)} \approx 292 \text{ m}, \quad (7.1)$$

Glidaren uppskattas ha hastigheten 0,5 m/s. Total tid för en dykning och uppstigning på 100m

$$T_t = \frac{292 \cdot 2}{0,5} \approx 1168 \text{ s} \approx 3,24 \text{ h}, \quad (7.2)$$

Båda stegmotorerna, sensorerna, två Arduino och omvandlarna uppnådde en ström runt cirka en ampere. Dessa komponenter antas vara i drift under hela förloppet.

$$I1_t = 3,25 \text{ Ah}, \quad (7.3)$$

Pumpen och ventilen kommer uppskattningsvis vara igång två minuter vardera. Pumpen drar 2 ampere och ventilen 0,3 ampere.

$$I2_t = \frac{2,3 \cdot 2 + 0,3 \cdot 2}{60} \approx 0,8 \text{ Ah}, \quad (7.4)$$

Totalt kommer en dykning och uppstigning dra cirka 4 ampere timmar vid ett djup på 100m. Detta med ett batteripaketet på 14,2 ampere timmar betyder det att glidaren uppskattningsvis kan göra 3,5 upp och nedgångar.

Mätningarna gjordes på ett aggregat som endast uppgår till 20V, detta innebär att amperen kommer gå ned när batterierna används tack vare den högre spänningen. Vi uppskattar därför att glidaren kommer kunna göra max 5 rundgångar.

Avstånd framåt vid dykning och uppstigning

$$A2_t = \cos(20) \cdot 292 \cdot 2 \approx 548 \text{ m}, \quad (7.5)$$

Glidaren tar sig 548 m varje runda vilket innebär att den tar sig 2740 m på 5 rundgångar innan den behöver laddas. Glidaren kan drivas 16,2 timmar från dessa uppskattningar och funktionscykel. Den externa motorn räknades inte in i detta fall då den inte används vid detta djup. Potentiometern är försumbar.

7.7 Systembeskrivning programlogik

Under vattenytan är det svårt att skicka signaler till glidaren och ge kommandon under drift. Detta beror på en rad komplikationer. Enligt Gussen m. fl., 2016 fungerar radiovågor bra vid hög datasändning på korta avstånd. Optiska signaler kräver positioner och akustiska signaler men har längst räckvid, dock är datasändningen väldigt låg och långsam. Glidaren åker både djupt och långt under en längre tid så de ovanstående alternativen fungerar ej. Till följd från utmaningarna med undervattenskommunikation behöver glidaren autonomt styras under vattnet.

7.7.1 Upp- och nedstigning

Detta är glidarens huvudprogram som reglerar batteripaketets position och volymen av olja mellan den externa blåsan och interna tanken. Programmet startar pumpen när maxdjup avläses från trycksensorn och glidaren börjar pumpa olja tills potentiometern läser av minimumvolym i den interna tanken och uppstigning påbörjas. När minimumdjup är uppnått öppnas den elektriska ventilen och olja flödar tillbaka till den interna tanken tills potentiometern läser av maxvolym och nedstigning påbörjas.

Under upp- och nedgång läses data från orienteringssensorn och utifrån glidarens position i vattnet korrigeras rotationen och pitchen till rätt gradantal genom förflyttning av batteripaketet.

Läckage och spänning kollas kontinuerligt och om en läcka inträffar eller batterinivån är låg initieras en uppstigning. Se appendix x för beskrivning av programlogiken och hur sensorernas data används av glidaren under drift.

7.7.2 Testprogram

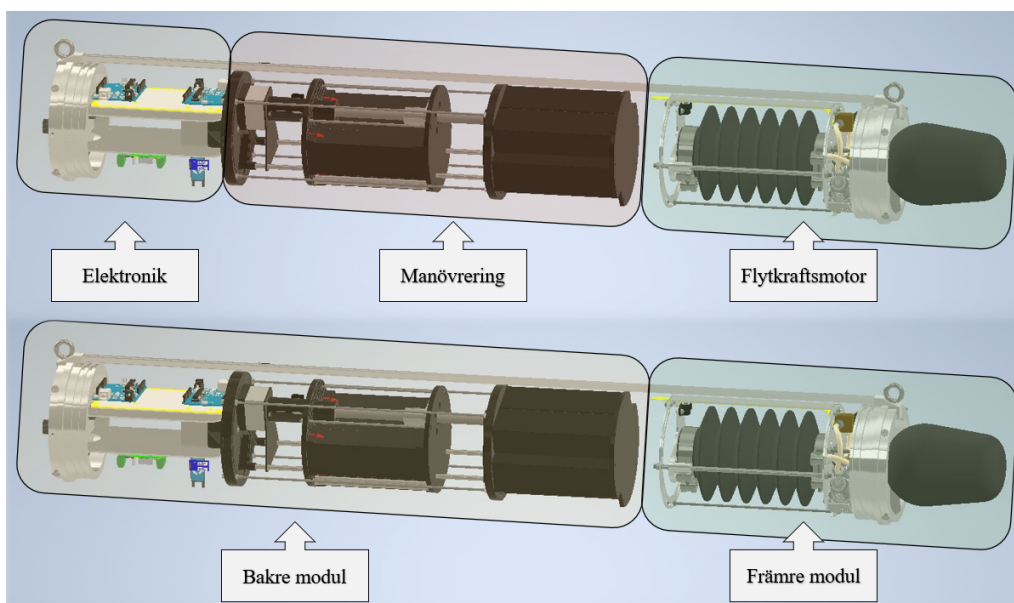
För att testa de olika delsystemen upprätthålldes ett testprogram. Genom bluetooth (jmf. Sv: blåtand) enheten skickas kommandon för start och stop av pumpen, ventilen, stegmotorerna och propellern till glidaren.

8

Sammansättning av delsystem

I kapitlet sammansättning av delsystem presenteras hur de olika delsystemen monterats tillsammans, som i sig motsvarar resultatet av design och konstruktion av glidaren. Det fanns nu tre stycken delsystem som skulle integreras på insidan av det fjärde externa delsystemet skorvet. För att möjliggöra enkel montering och demontering gjordes detta i två stycken moduler, dessa återfinns visualiserade i *Figur 8.1* där de är namngivna som bakre och främre modul, vidare i övre halvan av figuren återfinns respektive ingående delsystem namngivna.

I den bakre modulen återfinns delsystemen elektronik och manövrering. De två delsystemen är nu monterade i varandra med hjälp av gängstänger tillsammans med det bakre locket. Detta möjliggör för en användare att dra ut hela bakre modulen tillsammans med locket och därav få åtkomst till både elektroniken och manövreringssystemet. Samma princip gäller för den främre modulen som egentligen endast består av flytkraftsmotorn, en användare behöver här endast dra ut det främre locket och med följer då även motorn. Mellan de två modulerna går en sladd med endast en kontakt som kopplar samman flytkraftsmotorn med den bakre modulen och förser den med både signal och spänning för att möjliggöra att den kan köra.



Figur 8.1: Moduler av glidarens interna konstruktion

8. Sammansättning av delsystem

De interna modulerna placeras sedan på insidan av skrovet där lockens o-ringar medför tätning mot det omgivande vattnet. Vakuumpumpas sedan genom det bakre locket för att säkerställa tillförlitlig montering av locken samt för att tillåta flytkraftmotorernas drift. Därefter sätts även strömtillförlsen på genom det bakre locket och till slut täcks ändlocken med fram- respektive bakkåpa. De flertalet ingående komponenterna för hela glidaren presenteras i detalj under *Appendix E* tillsammans med återförsäljare, värt att notera är att filament för 3D-skrivning samt mindre komponenter som skruvar och muttrar inte är inkluderat.

I *Figur 8.2* återfinns den utdragna bakre modulen från skrovet, vidare i *Figur 8.3* visas den sammansatta glidaren.



Figur 8.2: Utdragen bakre modul efter vattentest



Figur 8.3: Sammansatt glidare

Den sammansatta glidaren resulterade i en totalvikt, om den är ballastad för sötvatten, är cirka 19.5 kg och en volym på 19.6 liter om blåsan är fylld. Med Manövreringsmodulen i neutralt läge, alltså batterierna i mitten och ej vinklade, så flyter glidaren rakt i vattnet med cirka 5 % av sitt skrov över ytan. Vidare om blåsan töms och volymen minskar så sjunker glidaren. I *Figur 8.4*



Figur 8.4: Glidaren i neutralt flytläge

Vidare utrustades även glidaren med två krokar i vadera lock, detta delvis för att möjliggöra infästning av dynamometrar för kalibrering men även för att enkelt kunna fästa en axelrem för att underlätta förflyttning av glidaren på land. I *Figur 8.5* återfinns glidaren med monterad axelrem och demonstrerar hur den kan bli buren av en person.



Figur 8.5: Glidare med påkopplad axelrem

9

Tester

I detta kapitel presenteras tester som utfördes för att verifiera glidarens olika funktioner. Först genomfördes två deltester, för att säkerställa samverkan mellan elektronik och flytkraftmotor, samt elektronik och manövreringen. Sedan genomfördes ett fullständigt test i vatten för att verifiera slutgiltiga funktioner och prestanda.

9.1 Flytkraftsmotorn

Detta test utformades för att undersöka samverkan mellan pumpen, ventilen och potentiometern. När olja flödar mellan externa blåsan och interna tanken skall potentiometern visa rätt utslag för volymskillnaden. Vid test av flytkraftssystemet kopplades ventilen, pumpen och arduinon ihop med batterierna och potentiometern var kopplad till Arduinon. Kommandon skickades sedan till bluetooth enheten för att starta och stoppa pumpen eller att öppna och stänga ventilen.

9.2 Manövreringssystemet

Manövreringssystemets syfte är att reglera rotation och pitch genom förflyttning av batteripaketet utefter data från orienteringssensorn. Detta testades genom att koppla in båda stegmotorerna och Arduinon till batterierna. Orienteringssensorn var kopplad till Arduinon och önskade grader för rotation och pitch angavs. Förflyttning av manövreringssystemet i z, y och x led gjordes fysiskt och det undersöktes sedan ifall korrigeringarna av batteripaketet var korrekt då manövreringssystemet översteg intervallet för önskade gradtal.

9.3 Fullständigt test

Syftet med det fullständiga testet var att undersöka samverkan av de olika delsystemen samt för att utvärdera hur väl glidaren fungerar i sin helhet. Det fullständiga testet utfördes i en bassäng där glidaren först placerades i vattnet för att utvärdera dess vikt i förhållande till flytförmåga i neutralt läge, med neutralt läge menas att blåsan är halvfull och batteripaketet centrerat. Utefter det omplacerades ballasten så att tyngpunkten är centralt placerad, för att vidare tester analyseras utifrån korrekt utgångsläge. Därefter kördes de testprogram som konstruerats med hjälp av Bluetooth för att utvärdera ifall glidaren kunde utföra dyk och stigning tillsammans med pitch och roll.

10

Resultat

I följande kapitel presenteras den slutgiltiga glidarens prestanda, utifrån de tester som utfördes och en kostnadsberäkning. Fokuset är att återkoppla till de mål och krav som presenterades i *Kapitel 1.2* samt de tester beskrivna i föregående *Kapitel 9*.

10.1 Flytkraftsmotorn

Prövningen påvisade att blåsan fylldes med olja som väntat. Bälgens position uppmättes dessutom korrekt med hjälp av den installerade potentiometern. Slutligen tömdes även bälgen som väntat där det interna vakuumet sög tillbaka oljan då backventilen öppnats. Det uppvisades att det tog cirka 3 minuter att fylla blåsan medans det tog cirka 5 minuter att tömma den. Då blåsan rymmer 0,75 L internt innebär detta att flytkraftsmotorn kan förändra glidarens flytkraft med cirka 7,4 N i sötvatten.

10.2 Manövreringsystemet

Vid test av manövrerings-systemet uppvisades det att batteripaketet förflyttades i både translation och rotation som väntat. Återkopplingstiden för orienteringssensorn var mycket låg då stegmotorerna reagerade snabbt efter att lutningen på sensorn justerats. Batteripaketets rotationshastighet uppmättes till 180°/min vilket innebär att det tar en halv minut att luta batteriet till sitt maximala läge på $\pm 90^\circ$. Som uppvisat i *kapitel 6* bidrar batteripaketet med 1,18 Nm för glidarens roll då den är positionerad vid den maximala lutningen. Batteripaketets hastighet i translation uppmättes till 7,2 cm/min vilket innebär att det tar cirka en minut att förflytta batteriet till sitt maximala läge på ± 8 cm från det neutrala läget i mitten av manövreringsystemet. Då batteripaketet förflyttas från det neutrala läget resulterar det i ett förändrat moment för glidarens pitch på 2,36 Nm .

10.3 Fullständig test

Det fullständiga testet utfördes på Poseidon diving systems. Prövningen uppvisade hur väl glidaren presterar med avseende på roll, pitch, vattentäthet och montering. Den uppvisar dessutom övriga aspekter av glidaren som noterats under testet.

1. Roll

Glidarens roll undersöktes genom att köra det angivna programmet för att rotera batterierna, se *appendix H*. Lutningen undersöktes först då glidaren hade en mindre positiv flytkraft och därav låg på ytan. Det uppvisades att en 45° rotation av batteripacketet resulterade i att glidaren roterades cirka 20°. Denna lutning ansågs vara godtycklig och skall klara av att styra glidaren då den färdas långa distanser. För att undersöka hur väl glidaren styrs av en 20° roll tömdes blåsan och glidaren sjönk till botten av bassängen. Det framgick tydligt att glidarens färdriktning justerats och glidaren åkte i riktningen som den lutade. På grund av en brist på mätutrustning går det dock inte att fastställa hur mycket färdriktningen justerats beroende på rollen.

2. Pitch

Vid prövning av glidarens pitch användes programmet som uppvisas i *Appendix H* för att justera batteripacketet fram och tillbaka. Prövningen uppvisade att glidaren låg plant på ytan då batteripacketet var positionerat i sitt centrala läge. Detta påvisar att både ballasten och delsystemet manövrering är korrekt positionerat och fungerande. Vid ytterligare prövning, då glidaren hade en mindre positiv flytkraft, visades det att förflyttning av batteripacketet bidrog med ett mindre roll. Lutningen var liten eftersom glidarens positiva flytkraft motverkade dess rörelse. Testet uppvisade dock att systemet fungerade som det skulle samt att pitchen kunde kontrolleras vid vattenytan. Vid prövning med en negativ flytkraft sjönk glidaren med en dykningsvinkel på 45° gentemot vattenytan då batteripacketet fortfarande var i sitt centrala läge. På grund av en tidsbrist utfördes det ej fler undersökningar. Dock går dock att påstå att glidarens roll skall kunna uppnå den optimala dykningsvinkeln på 20° ifall batteripacketet flyttats till den bakre positionen.

3. Vattentäthet

Under testet påvisades inga indikationer på förekomst av läckage eller en minskning av det upprätthållna vakuumet efter att glidaren hade placerats på botten av bassängen, där vattnets djup uppgick till 3 meter. Värt att notera är att projektet inte haft tillgång till tryckkammare eller en bassäng djupare än detta och därav inte kunnat validera kravet på 100m med absolut säkerhet. Det bör dock noteras att beräkningarna på tätningarna och skrovet visar att den teoretiskt klarar en dykning på minst 100 meters djup. Kravet tolkas därav som uppfyllt trots brist på fysiska prövningar.

4. Montering och demontering

Vid utförande av det fullständiga testet monterades och demonterades glidaren ett flertal gånger. Det framgick av detta att glidaren var lätt att öppna upp och sedan stänga där detta approximativt tog 2 minuter. Glidarens modulariserbarhet, som presenterats i *Kapitel 8*, underlättar således glidarens montering samt åtkomsten av glidarens delsystem. Ett observerat utfall var dock att olika kablar lätt kunde bli klämda under monteringsprocessen och därigenom bli utsatta för onödigt slitage där de vid ett fåtal tillfällen lossnat från dess kontakt. Detta är något som ledde till en tidskrävande felsökningsprocess.

5. Övrigt

En prövning av glidarens komplementerande framdrift utfördes då glidaren var nedsänkt under vatten. Motorn kördes på 40% kapacitet med spänningen 12V vilket resulterade i att glidaren fick en hastighet på 1,5 m/s. För övrigt kan det nämnas att steppermotorerna blev väldigt varma vid det fullständiga testet. Detta är ett resultat av att de kontinuerligt håller batteripaketet låst i dess avsedda position. Slutligen skall det nämnas att bluetooth-enheten ej fungerade felfritt. Det var ett ständigt problem att få uppkoppling, vilket förlorades relativt frekvent.

10.4 Kostnadsberäkning

En kostnadsberäkning genomfördes för att undersöka kostnaden för hela projektet samt för glidaren. Den kommer därefter användas för att utvärdera om arbetsgruppen har hållit sig inom den tilldelade budgeten på totalt 50 000 kr. I Appendix *Appendix F* uppvisas kostnadsberäkningen exkluderat moms, medan *Appendix G* presenteras med inkluderad moms. I kostnadsberäkningarna presenteras alla inköp med dess: totala kostnad, direkta kostnad och indirekta kostnad. Med direkt kostnad menas de kostnader som kan direkt hänföras till prototypen medan indirekta kostnader innebär utvecklingskostnader samt komponenter eller material som ej använts i den slutgiltiga produkten. I kostnadsberäkningen är köp utförda med utländska valutor konverterade till svenska kronor (SEK). En summering av kostnadsberäkningen exkluderat moms med avseende på kostnaden per delsystem uppvisas i *Tabell 10.1* nedan.

10. Resultat

| Delsystem | Total kostnad | Direkt kostnad | Indirekt kostnad |
|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Elektronik | 10 217 | 9 715 | 502 |
| Flytkraftsmotor | 11 843 | 8 527 | 3 316 |
| Manövrering ballast | 1 962 | 1 720 | 242 |
| Skrov | 15 282 | 13 773 | 1 548 |
| Intern ställning | 1 067 | 293 | 774 |
| Skötsel | 674 | 602 | 72 |
| Övrigt | 994 | 0 | 994 |
| Summa | 42 038 | 34 589 | 5 901 |

Tabell 10.1: Summering av kostnadsberäkning exkluderat moms

Det visas att projektet klarat det satta kravet på budgeten samt att de tre mest kostsamma delsystemen var: elektroniken, flytkraftsmotorn och skrovet. Totala kostnaden för att skapa en likadan glidare blev således 34 589 kr och kostnaden för projektet i sin helhet blev 42 038 kr exkluderat moms. Det visas även att de indirekta kostnaderna varit relativt låga jämfört med de direkta. Detta medför att arbetsgruppen lyckats hålla utvecklingskostnaderna låga, vilket främst har varit ett resultat av den digitala prototypframställningen som genomförts.

11

Diskussion

I följande kapitel presenteras och analyseras resultaten från det genomförda projektet. Diskussionen syftar till att undersöka och tolka de erhållna resultaten, jämföra dem med tidigare uppskattningar, samt utforska implikationerna och betydelsen av dessa resultat och lämpliga åtgärder i framtiden. Genom en kritisk granskning och reflektion på resultatens styrkor och svagheter strävar detta kapitel efter att ge en djupare insikt och en helhetsbild av de förklaringar och möjliga samband som kan bidra till en ökad förståelse av det fenomen eller den problematik som uppstått under testning. Diskussionen syftar även till att identifiera eventuella begränsningar och utmaningar i projektet och möjliga vägar för fortsatt utveckling inom framtagning av glidare. Diskussionen kommer även återkoppla till problematik kring den strukturella konstruktionen av glidare samt den elektroniska aspekten, för de båda fallen förs även resonemang kring utvecklingspotential.

11.1 Strukturell konstruktion av glidare

Genom projektets gång har det funnits en del utgångspunkter som varit grundpelare i många beslut som har tagits. Bland dessa återfinns till exempel modulariserbarhet eller bestyckningsmöjligheter som är av högsta prioritet då man enkelt bör kunna felsöka, undersöka eller byta ut komponenter som åldrats eller av dylik anledning försämrats. Bestyckningsmöjligheterna på en glidare är en utmaning i den aspekten att vattentäthet vid stora tryckpåfrestningar är vital. Ett aktivt beslut som tog var då att begränsa antalet genomföringar i skorvet och därav minimera riskerna för läckage, således kan till exempel endast locken på vadera sida av glidaren plockas av. En vidare konsekvens av detta är att kolfiberkroppen ej kan bestyckas, även om detta alternativ påtalades, och åtkomsten av interna komponenter skulle underlättas så konstaterades medförda risker högre än nyttan.

Vingarna valdes att konstrueras med ett standardiserat fäste vilket medför att det i framtiden finns goda möjligheter att genomföra byten, utan större påfrestning, för att exempelvis testa en annan utformning. Vingarna fäster sedan som tidigare presenterats i en aluminiumprofil, som är monterad längsmed skrovet, och kläms sedan fast runt skrovet. Beslutet att tillämpa denna typ av fästmekanisk baserades framförallt, likt tidigare påtalat, strävan att minimera genomföringar i kolfiberkroppen. Dessvärre sker detta på en viss bekostnad av glidaren hydrodynamiska egenskaper samt robustheten i infästningen. Resultatet av detta bidrar däremot till en ökad modulariserbarhet då vingarna enkelt kan förflyttas längs med kroppen och posi-

tionen skulle kunna anpassas efter syfte med aktuellt uppdrag. Projektet lämnar här möjlighet för vidare optimering av den i nuläget 3D-skrivna infästningen, det finns både möjlighet för att utforma ett mer hydrodynamiskt fäste men även annat materialval för att minska tjockleken.

Manövreringsmodulen med batterier och tillhörande komponenter som presenteras i *kapitel 6* är i dagsläget till stor del 3D-skriven och sedan monterad samman med 3mm metallstänger. Det konstaterades däremot att det finns en risk att dessa stänger är underdimensionerade och att det skulle kunna resultera i en viss instabilitet vilket i sin tur skulle eventuellt resultera i oönskat slitage och i ett ogynnsamt scenario haveri. Projektet identifierar här utrymme för vidareutveckling, lösningen som tagits fram fungerar bra men behöver försäkras. Detta skulle till exempel kunna göras genom att använda mer robusta stänger men även annat materialval av de i nuläget 3D-skrivna delarna.

Vidare har den 3D-skrivna PLA:n en glassomvanling på cirka 60°C (Suder m. fl., 2021) och nuläget saknas det information om vilka temperaturer som kan uppstå på insidan av glidaren. Det uppmärksammades däremot att vissa komponenter blev varma under användning vid testning. Detta faktum tillsammans med att det är vakuum på insidan kan eventuellt orsaka problem vid längre driftsperioder, därav för att vidta åtgärder i förebyggande syfte tillverkades anslutningar av aluminium mellan de komponenter som tenderade att generera värme och locken som har direkt kontakt med kringliggande vattnet. Mellan dessa komponenter och metallen installerades även thermal pads (jmf. Sv: Termiska dynor) för att vidare främja värmeöverföringen. I fall av fortsatt uppföljning av projektet skulle det vara av intresse att närmare undersöka temperaturlinjen inuti glidare, både för att identifiera om detta faktiskt är ett problem eller, i motsats, bör implementeras ytterligare åtgärder.

En annan viktig aspekt som tagits i beaktning vid flertalet beslut är vikten, som delvis inneburit viktfordelningen i glidaren men även att maxvikten för neutral flytkraft inte överskrids. Ett mål med tillverkningen har därav varit att bibehålla en låg vikt av alla komponenter för att lämna utrymme åt ytterligare utrustning i glidaren, till exempel större datorer, fler sensorer och mer batterier. Dock resulterade detta i att glidarens totala vikt blev relativt låg och behövde ballastas med cirka 8 kg, som kan anses överdrivet då påtalad utrustning troligtvis inte kommer väga så mycket. Ett exempel på en lösning av detta är att tillverka de 3D-skrivna komponenterna i förslagsvis stål, vilket skulle leda till en tyngre men även en mer robust konstruktion.

11.2 Elektronik i glidaren

Beslutet om implementationen av elektronik och styrsystem bestämdes tidigt i projektet. Att använda Arduino var något som rekommenderades av både handledare för projektet och kunnig personal på Revere, eftersom det är ett enkelt sätt att skriva programlogik i form av kod för att styra olika delar simultant och beroende på data. En annan viktig aspekt i valet att använda Arduino är hur väl kontrollerna klarar av att arbeta ihop med olika typer av sensorer och andra styrkomponenter, något som är av absolut största vikt vid ett tid och resursbegränsat projekt. Om mer tid och resurser hade varit tillgängligt skulle ett optimalt sätt att driva styrsystemet för glidaren varit att bygga ett kretskort som hade varit kompakt, välanpassat, snabbare och inte ha några begränsningar i sina in och utgångar. Fundamentalt för att skapa ett kretskort är att planen för hur elektroniken ska drivas och kopplas är helt och hållet klart från början, något som i projektets fall inte var möjligt. För framtida utveckling av glidaren är detta en stor möjlighet som finns att arbeta på.

Som tidigare nämnts under *Kapitel 7* så grundade sig valet av sensorer främst i vilken data som behövs för att manövrera och styra glidaren på ett säkert och stabilt vis. Potentialen för vidare implementation av sensorer av forskningsvärde är stor och är något som varit i åtanke under skapandet av glidaren, genom att lämna plats för dessa.

I nuläget finns även en säkerhetsåtgärd i form av en läckagesensor, dock existerar inte någon aktiv åtgärd vid utslag av sensorn mer än att oljan pumpas ut och maximerar lyftkraften. För vidare utveckling anses att någon mer form av säkerhetsrutin kan installeras. Ett exempel på detta skulle kunna vara att en vikt skjuts ut ur glidaren vid utslag från läckagesensorn för att snabbt förändrar flytkraften hos glidaren som för den till ytan.

Räckvidden är en central betydelse för glidaren. För närvarande uppskattas det att glidaren kan färdas 2740m och drivas 16,2 timmar med ett fulladdat batteri. I jämförelse med kommersiella undervattensglidare är dessa siffror bristfälliga och kräver förbättring och optimering, då kommersiella glidare färdas lång tid över stora distanser och djup. En utvecklingsmöjlighet för projektets glidare hade varit att inkludera fler batterier, för att ge en ökad kapacitet. En lösning hade varit att konstruera ett batteripaketet bestående av enskilda celler, vilket skulle medföra mer optimerad användning av plats. Vidare hade glidaren kunnat utvecklas genom att optimera batterianvändningen, något som projektet inte lagt några resurser på. Majoriteten av batterikapaciteten går i nuläget till motorerna, då dem alltid är aktiva under drift, som inte är nödvändigt. Samtidigt kan sensorernas energiförbrukning optimeras, till exempel genom insamling av data och regleringar i intervaller. Tillsammans möjliggör det att glidaren kan vara avstängd däremellan och på så sätt spara batterikapacitet. Implementeras batteripaketets förbättringar och optimeringarna av programlogiken bidrar det till längre räckvidd.

11.3 Sammansättning av glidaren

Sammansättning av glidaren är i dagsläget relativt enkelt gjort, de bör dock noteras att de två modulerna kan monteras i olika rotation i förhållande till varandra vilket inte är önskvärt. Vidare för att både skydda O-ringar och underlätta monteringen av locken bör en generös mängd av smörjmedel appliceras både på O-ringarna men även insidan av kolfiberröret. Vid montering blir även den tidigare påtalade instabiliteten av framförallt den bakre modulen påtaglig, man bör här säkerställa att man har en arbetsyta, eller en annan person, som kan hjälpa och stödja modulen när den förs in i kolfiberröret.

Vidare för kostnadsberäkningen av glidaren så är ej tillverkningskostnader inkluderade. Med detta avses de kostnader som uppstår vid egen tillverkning och montering av delsystem eller komponenter. En tillverkningskostnad som uppskattas vara förhållandevis hög är produktionen av locken, vilket har krävt över 20 timmars bearbetning av rundstängerna för att få fram den slutgiltiga designen. Vidare är inte kostnader för efterforskning och fakta samling inkluderat då det i projektet inte vart av intresse att kartlägga detta.

En annan viktig aspekt att beakta är inköp av diverse verktyg och material som genomförts av farkostslabbet Revere. Dessa inköp har haft en central roll i utvecklingen och framställningen av glidaren, men har inte inkluderats i kostnadsberäkningen eftersom även Revere varit i behov av dessa verktyg och således stått för kostnaderna. Till exempel införskaffades en pool för att kunna testa glidaren samt en laddare för batterier.

11.4 Tester av glidaren

Som tidigare påtalat i resultatet har ännu inget verkligt test av glidaren genomförts, detta är något som bör göras. Den i nuläget teoretiskt grundade räckvidden bygger på diverse ideala förhållanden och bortser från flertalet faktorer som kan påverka resultatet. Vidare finns det en stor potential för i fortsatt arbete vidare förlänga räckvidden av glidaren, vilket som diskuteras i föregående *Kapitel 11.2*.

Tillförlitligheten ur ett hållfasthetsperspektiv är i dagsläget endast baserat på numeriska beräkningar i relativt ideala fall. Designen och konstruktionen är dock gjorda med en säkerhetsfaktor för att ta hänsyn till diverse avvikelser. I fortsättningen är det dock av intresse att testa konstruktionen i verkligheten, till exempelvis i en tryckkammaren, för att fastställa ett autentiskt maxtryck. Det finns även andra faktorer som skulle vara av intresse att ta i beaktning, förslagsvis hur temperatur påverkar både material och tätningar, tillväxt på skrov men även i vilken grad vatten resulterar i svällningar av kolfiberröret.

12

Slutsats

Slutsatsen av projektet är att en, relativt autonom, undervattensglidare framgångsrikt har designats och konstruerats. Glidaren visar sig vara funktionsduglig, med det finns fortfarande utrymme för förbättring och utveckling, speciellt inom elektroniken. I nuläget skulle glidaren kunna operera i ideala förhållanden, med en stor frihet i djup och utan annan extern påverkan. Däremot på grund av avsaknad i implementering av vissa sensorer samt ickegenerell programlogik skulle glidaren troligtvis inte klara av en mer dynamisk miljö. Dock baserat på ett flertal tester kan det konstateras att glidaren uppfyller de uppsatta målen och kraven för just detta projektet.

För att helt besvara målsättningarna och kraven i projektet kan det först konstateras att glidaren är vattentät ner till ett djup på 3 m, däremot bör den i teorin klara ett vattendjup på 100 m enligt numeriska beräkningar. Vidare kunde rätt vikt uppnås med hjälp av ballast, som tillsammans med den slutgiltiga designen ger möjlighet att implementera ytterligare utrustning hos glidaren. Designen medför även enkel montering och demontering för att få åtkomst till de inre komponenterna. Dessutom visar de genomförda testerna att glidaren klarar av att manövreras, där pitch och roll uppnås genom förflyttning av batteripaketet. Energianvändningen framstår för närvarande som en svag punkt, men det finns här utrymme för framtida förbättringar. Slutligen så landade konstaden för den tillverkade glidaren inom den budget som sattes hos projektet.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att projektet framgångsrikt har uppnått sina mål och krav, samtidigt som det öppnar upp för fortsatta förbättringar och vidareutveckling av den tillverkade glidaren.

Litteratur

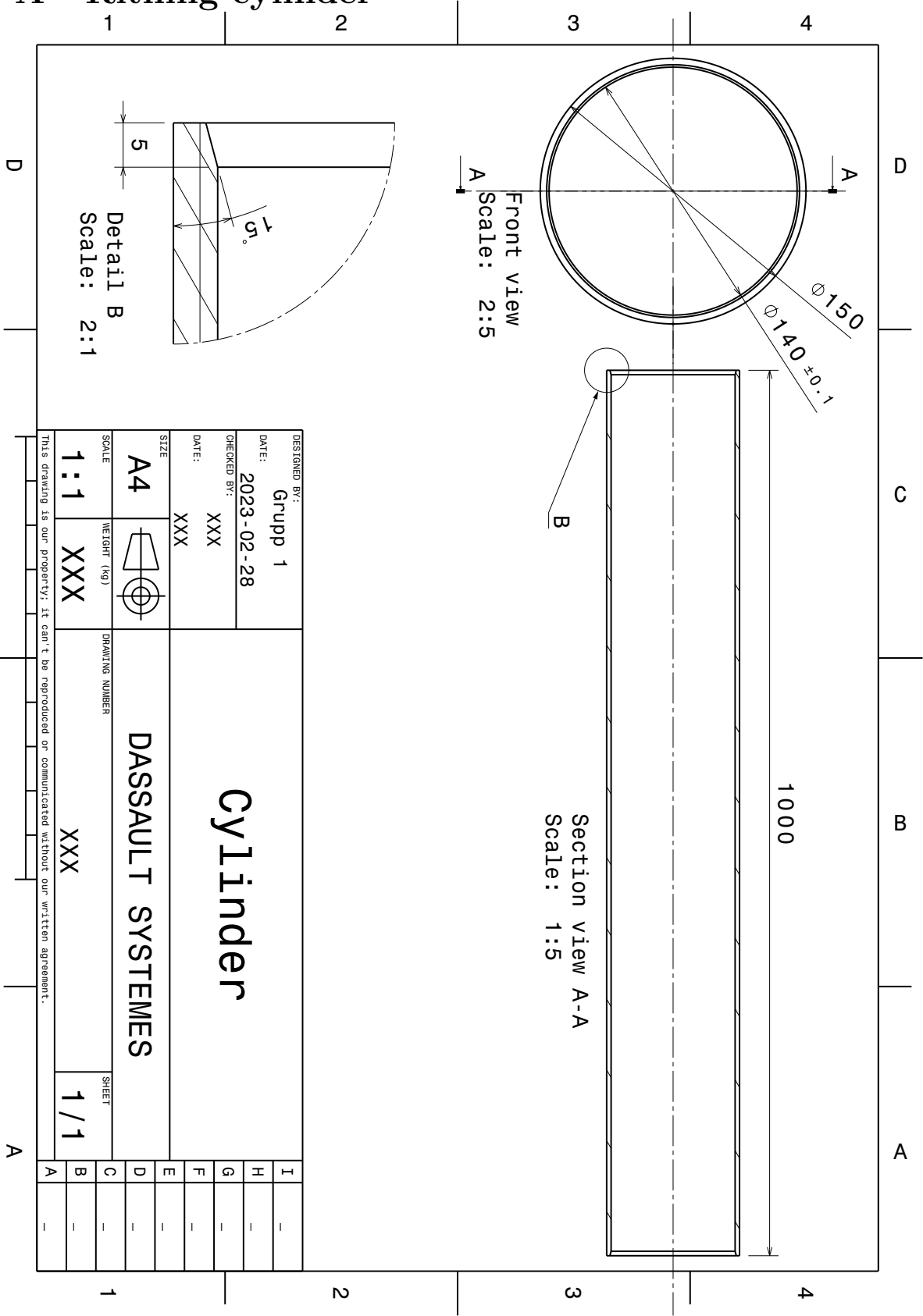
- ALSEAMAR. (2022). SEAEXPLORER X2 - Multi-mission underwater glider. https://www.alseamar-alcen.com/sites/alseamar-alcen/files/products/pdf/ALSEAMAR-SEA_EXPLORER-2022-Web.pdf
- Asakawa, K., Watari, K., Ohuchi, H., Nakamura, M., Hyakudome, T., & Ishihara, Y. (2016). Buoyancy engine developed for underwater gliders. *Advanced Robotics*, 30(1), 41–49. <https://doi.org/10.1080/01691864.2015.1102647>
- Ashby, D. (2012). Chapter 4 - The Real World. I D. Ashby (Red.), *Electrical Engineering 101 (Third Edition)* (Third Edition, s. 133–187). Newnes. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386001-9.00004-0>
- Boat Zincs. (2010). Which Shaft Anodes Should I Use? https://boatzincs.com/pdfs/Chart_B-Which_Anodes_Should_I_Use.pdf?fbclid=IwAR00xahoknaOf5IEY0xWsS7eHvq
- Davis, R. E., Sherman, J. T., & Dufour, J. (2001). Profiling ALACEs and Other Advances in Autonomous Subsurface Floats. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(6), 982–993. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0982:PAAOAI>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0982:PAAOAI>2.0.CO;2)
- Davis, R. E., Eriksen, C. C., & Jones, C. (2002). Autonomous Buoyancy-Driven Underwater Gliders, 37–58.
- Elkolali, M., Al-Tawil, A., & Alcocer, A. (2022). Design and Testing of a Miniature Variable Buoyancy System for Underwater Vehicles. *IEEE Access*, 10, 42297–42308. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3167833>
- Elkolali, M., Splawski, W. A., Carella, A., & Alcocer, A. (2020). Hydrodynamic parameter optimization for miniature underwater glider wings. *Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF38699.2020.9389187>
- Elkolali M. (2022). *Development of a deep miniature underwater glider [Opublikerad licentiatavhandling]* (tekn. rapport). Oslo Metropolitan University. Oslo.
- Franklin Jensen, H. (2009). *Variable Buoyancy System Metric* (doktorsavhandling). MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Columbia.
- Franklyn E. Farris & Woodford M. Rand. (1964). Underwater glider (US3157145A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/022118715/publication/US3157145A?q=pn%3DUS3157145A>
- Gao, T., Wang, Y., Pang, Y., & Cao, J. (2016). Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10, 601–609. <https://doi.org/10.1080/19942060.2016.1224735>
- Gussen, C., Diniz, P., Campos, M., Martins, W., Costa, F., & Gois, J. (2016). A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies. *Journal of*

- Communication and Information Systems*, 31, 242–255. <https://doi.org/10.14209/jcis.2016.22>
- jdavis-codes, J Paulus & Ian Black. (2021). SeaFlight Glider - Open Source underwater glider for the science community. <https://github.com/SeaFlightGlider>
- Klinger. (2015). Materialvalsguide.
- Kongsberg. (2023). SEAGLIDER. https://doi.org/https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/documents/seaglider{_}product{_}specification.pdf
- Mackay, M., & Atlantic, D. R. C. .-. (2003). *The Standard Submarine Model : a Survey of Static Hydrodynamic Experiments and Semiempirical Predictions*. Defence R&D Canada - Atlantic. <https://books.google.se/books?id=5MePNAEACAAJ>
- Manias, S. N. (2017). 9 - PWM or Switched Mode Rectifiers. I S. N. Manias (Red.), *Power Electronics and Motor Drive Systems* (s. 657–694). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811798-9.00009-3>
- Metallbiten. (2023). Aluminium 50mm EN-AW-6082-T6.
- Myring, D. F. (1976). A Theoretical Study of Body Drag in Subcritical Axisymmetric Flow (2016/06/07). *Aeronautical Quarterly*, 27(3), 186–194. <https://doi.org/DOI:10.1017/S000192590000768X>
- Nationalencyklopedin. (2023). Pilvinge. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/pilvinge>
- Norelem. (2023). Tekniska anvisningar för O-ringar.
- Ordoñez, C. E., Wang, H., Curtiss, E., Nesheim, A., Thoresen, T. O., Lampoudi, S., & Craig, R. (2020). OceanScout - Developing a compact, affordable, fleet-capable autonomous glider. *Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast*, 1–6.
- Page, B. R., Ziaeeafard, S., Pinar, A. J., & Mahmoudian, N. (2017). Highly Maneuverable Low-Cost Underwater Glider: Design and Development. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2, 344–349.
- Performance Metals. (2023). How Can an Aluminium Anode Protect an Aluminium Boat? https://performancemetals.com/pages/how-can-an-aluminum-anode-protect-an-aluminum-boat?fbclid=IwAR08OcozlSTHdlvjAygjCw_0gGvx3wcKsNUkN_QQMmqM50ViyBk9JaRIFU
- Roemmich, D., Sherman, J. T., Davis, R. E., Grindley, K., McClune, M., Parker, C. J., Black, D. N., Zilberman, N., Purkey, S. G., Sutton, P. J. H., & Gilson, J. (2019). Deep SOLO: A Full-Depth Profiling Float for the Argo Program. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(10), 1967–1981. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0066.1>
- Saksvik, I. B. (2022). *Topics in guidance, navigation & control of underwater gliders* (doktorsavhandling). OsloMet - storbyuniversitetet. Oslo. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/11250/3018012>
- Shapiro, J. (2018). Everything you need to know for easy O-ring installation. https://www.ipcol.com/blog/everything-you-need-to-know-for-easy-o-ring-installation/?fbclid=IwAR0_eq9opeAaPyvK_D4hZhxAUdz57nkqC1nWB9zaSEBq9ucYWz

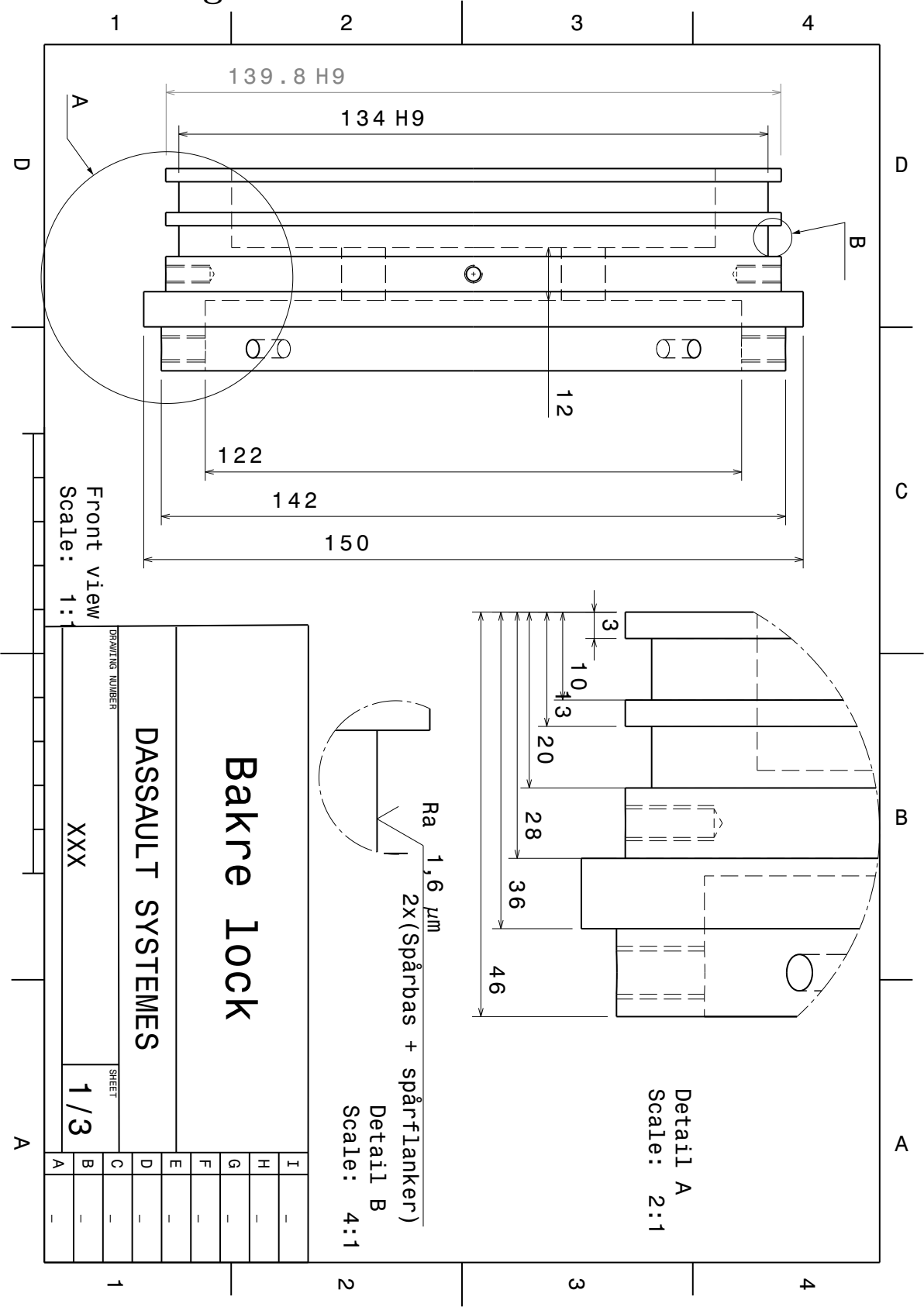
- Skillings, B. (2004). *Buoyancy engine construction and design for an underwater glider* (tekn. rapport). St. John's, Newfoundland, Canada, National Research Council of Canada. Institute for Ocean Technology. <https://doi.org/10.4224/8895331>
- Sousa, J., MACEDO, A., Amorim Jr, W., & Lima, A. (2014). Numerical Analysis of Turbulent Fluid Flow and Drag Coefficient for Optimizing the AUV Hull Design. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 04, 263–277. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2014.43020>
- Suckow, E. (2009). History overview. <https://history.nasa.gov/naca/overview.html>
- Suder, J., Bobovský, Z., Mlotek, J., Vocetka, M., Zeman, Z., & Safar, M. (2021). EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TEMPERATURE RESISTANCE OF 3D PRINTED PLA COMPONENTS. *MM Science Journal*, 2021, 4322–4327. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021{_}03{_}2021004
- T. I. Fossen. (2011). Hydrostatics. I *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control* (s. 59–80). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119994138.ch4>
- Teledyne Webb Research. (2023). Slocum G3 Glider - System Overview. https://www.oceanografialitoral.com/wp-content/uploads/teledyne_webb_research_g3_brochure_2020-final.pdf
- Thornton, G. (1994). A Design Tool for the Evaluation of Atmosphere Independent Propulsion in Submarines.
- Waldmann, C., Kier, T. M., Kirkwood, W. S., & Meckel, S. (2016). Performance data of a pneumatic variable buoyancy engine for a newly designed underwater glider. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761225>
- Webb, D. C., Simonetti, P. J., & Jones, C. P. (2001). SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26(4), 447–452. <https://doi.org/10.1109/48.972077>
- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, SI version* (8. utg.). McGraw-Hill Higher.
- Wolek, A., Gode, T., Woolsey, C. A., Quenzer, J., & Morgansen, K. A. (2015). Testing a pneumatic underwater glider in shallow water. *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, 1–8. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2015.7401980>
- Wood, S. (2009). Autonomous Underwater Gliders. I A. V. Inzartsev (Red.), *Underwater Vehicles*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/6718>

Appendix

A Ritning cylinder



B Ritning bakre lock



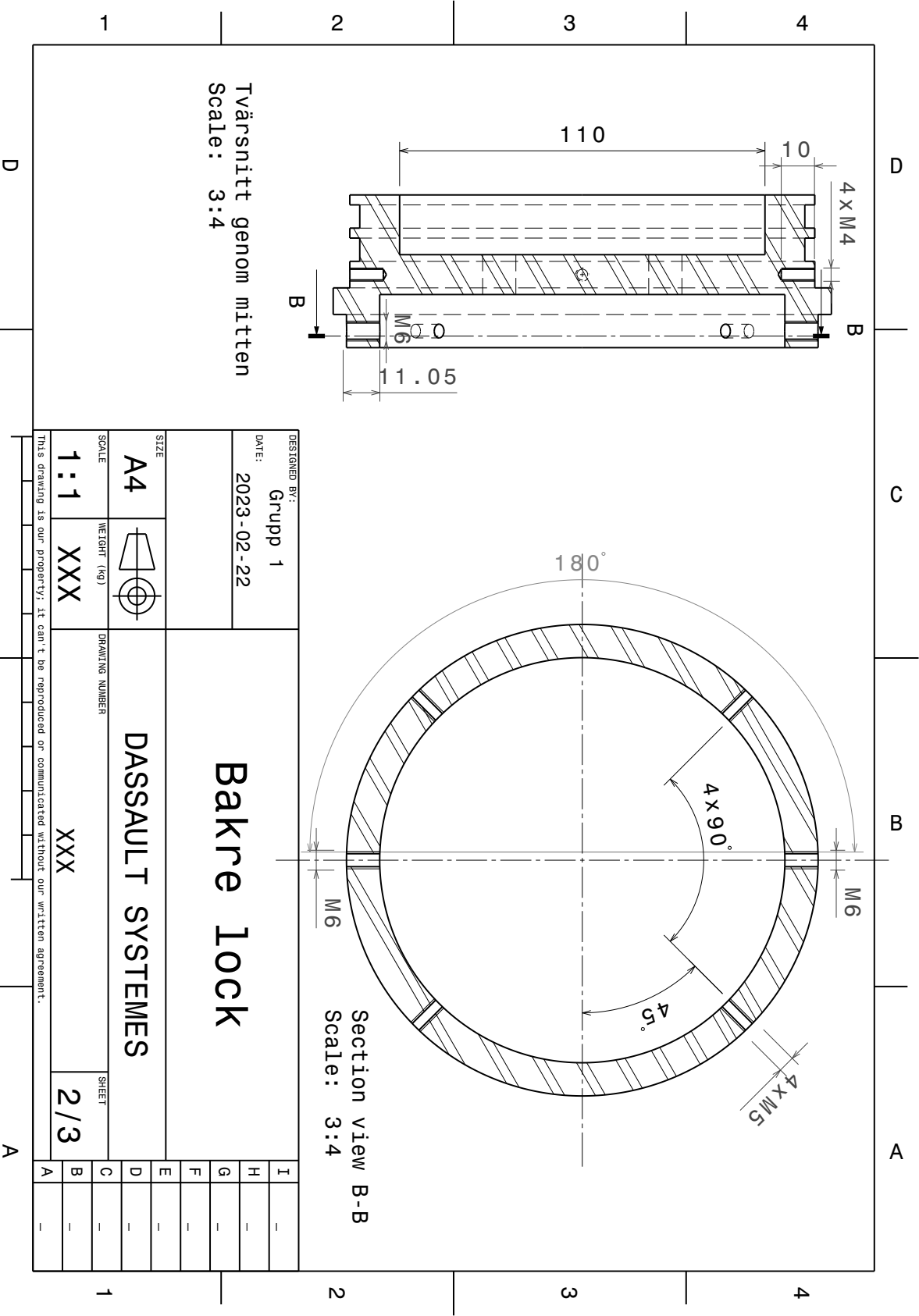
Bakre Lock

DASSAULT SYSTEMES

DRAWING NUMBER: XXX

SHEET: 1/3

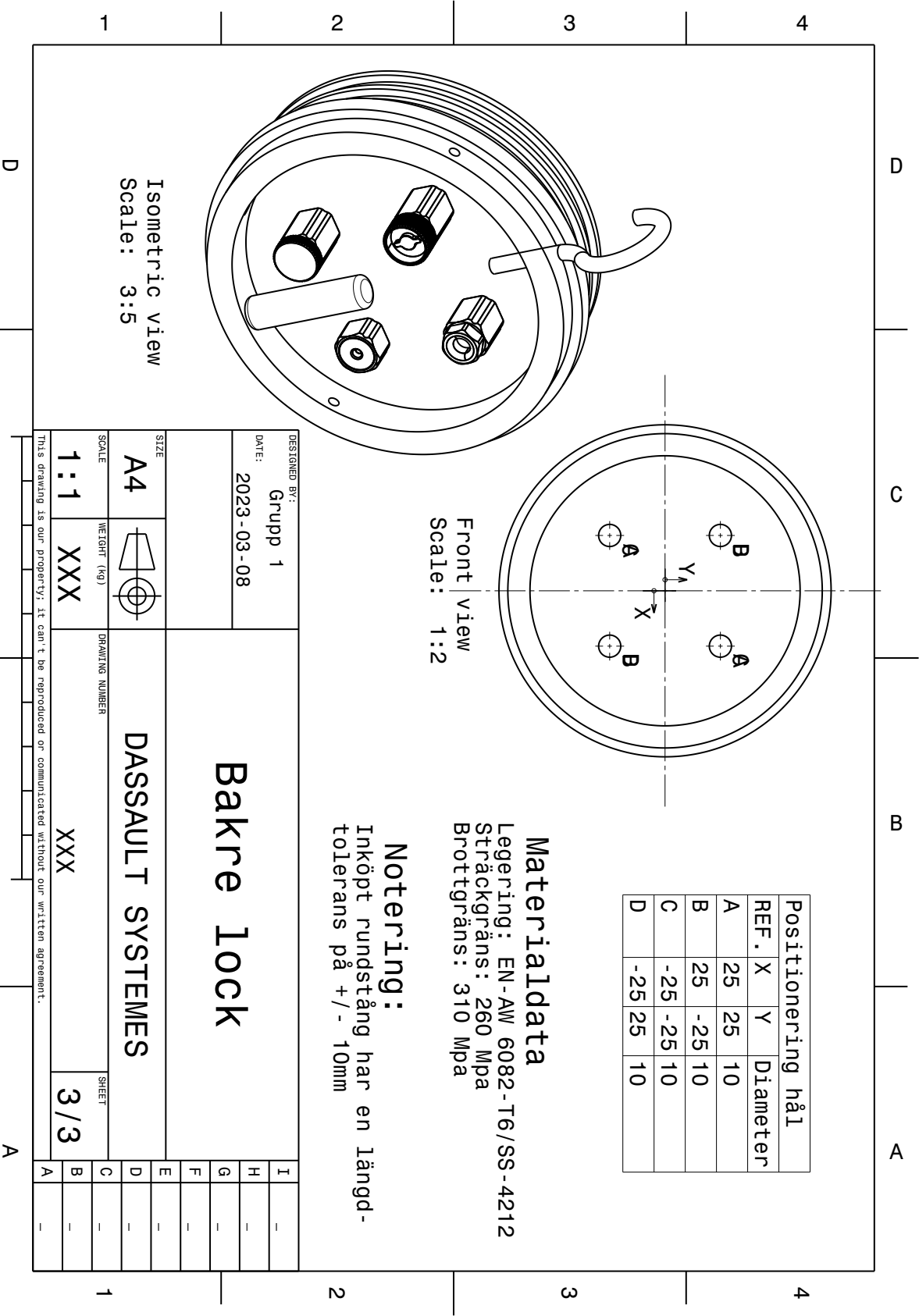
| | |
|---|---|
| I | - |
| H | - |
| G | - |
| F | - |
| E | - |
| D | - |
| C | - |
| B | - |
| A | - |



Tvärsnitt genom mitten
Scale: 3:4

Section view B-B
Scale: 3:4

| | | | | | | | |
|---|--|---------------------|--|------------------------|--|-----------------------|--------------|
| DESIGNED BY: Grupp 1 | | DATE: 2023-02-22 | | Bakre Lock | | I | - |
| SIZE A4 | | WEIGHT (kg) XXX | | | | DRAWING NUMBER XXX | SHEET 2/3 |
| SCALE 1:1 | | DASSAULT SYSTEMES | | DRAFTING NUMBER XXX | | H | - |
| This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement. | | | | | | G | - |
| | | | | | | F | - |
| | | | | | | E | - |
| | | | | | | D | - |
| | | | | | | C | - |
| | | | | | | B | - |
| | | | | | | A | - |



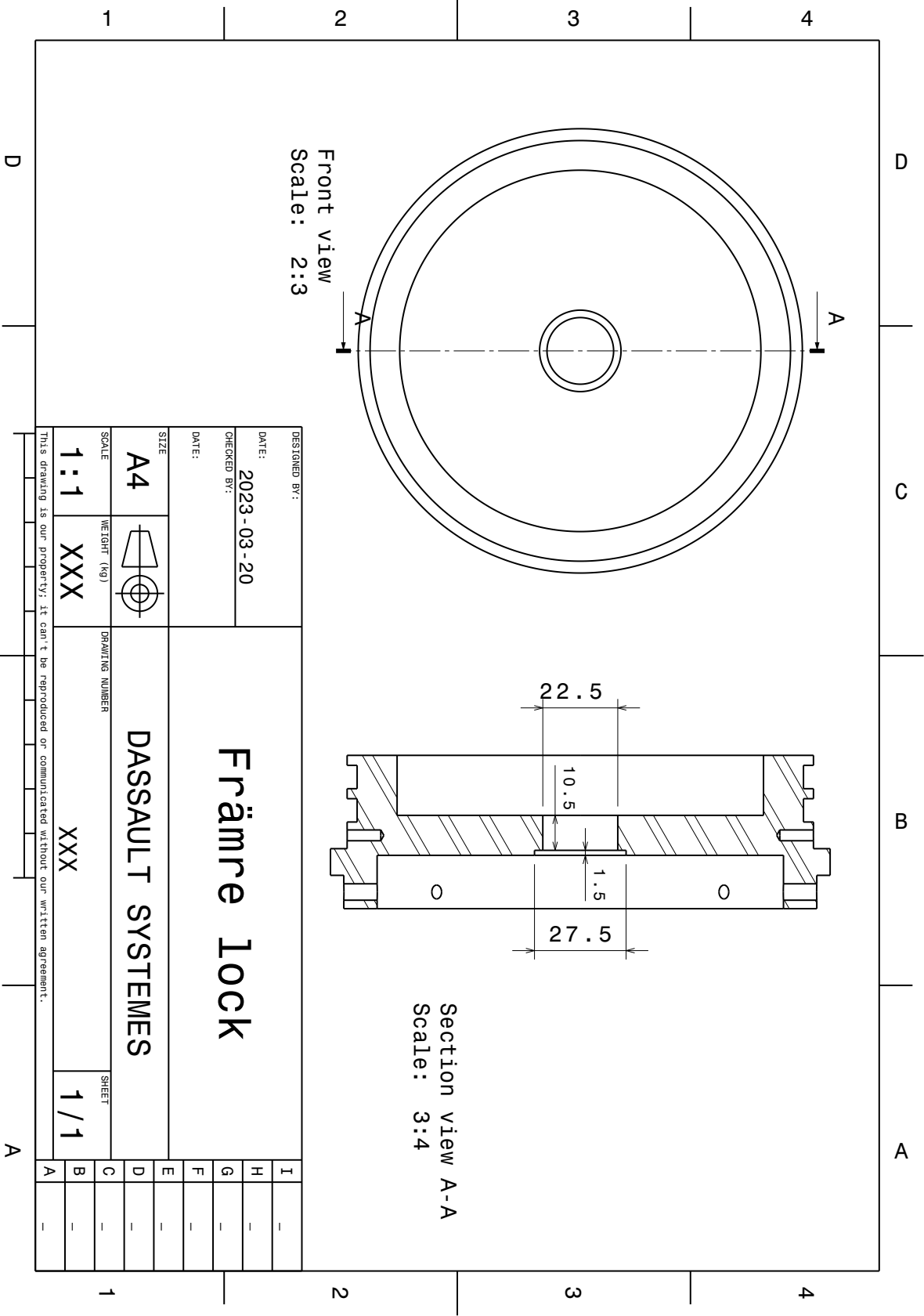
| Positionering hål | | | |
|-------------------|-----|-----|----------|
| REF. | X | Y | Diameter |
| A | 25 | 25 | 10 |
| B | 25 | -25 | 10 |
| C | -25 | -25 | 10 |
| D | -25 | 25 | 10 |

Materialdata
 Legering: EN-AW 6082-T6/SS-4212
 Sträckgräns: 260 Mpa
 Brottgräns: 310 Mpa

Notering:
 Inköpt rundstång har en längd-
 tolerans på +/- 10mm

| | | | | | | | |
|---|--|--|--|---------------------------|---|---|---|
| DESIGNED BY: Grupp 1 | | Bakre Lock | | I | - | | |
| DATE: 2023-03-08 | | | | H | - | | |
| SIZE A4 | | DRAWING NUMBER DASSAULT SYSTEMES | | G | - | | |
| | | | | SCALE 1:1 | | F | - |
| | | | | WEIGHT (kg) XXX | | E | - |
| DRAWING NUMBER XXX | | SHEET 3/3 | | D | - | | |
| This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement. | | | | C | - | | |
| | | | | B | - | | |
| | | | | A | - | | |

C Ritning främre lock

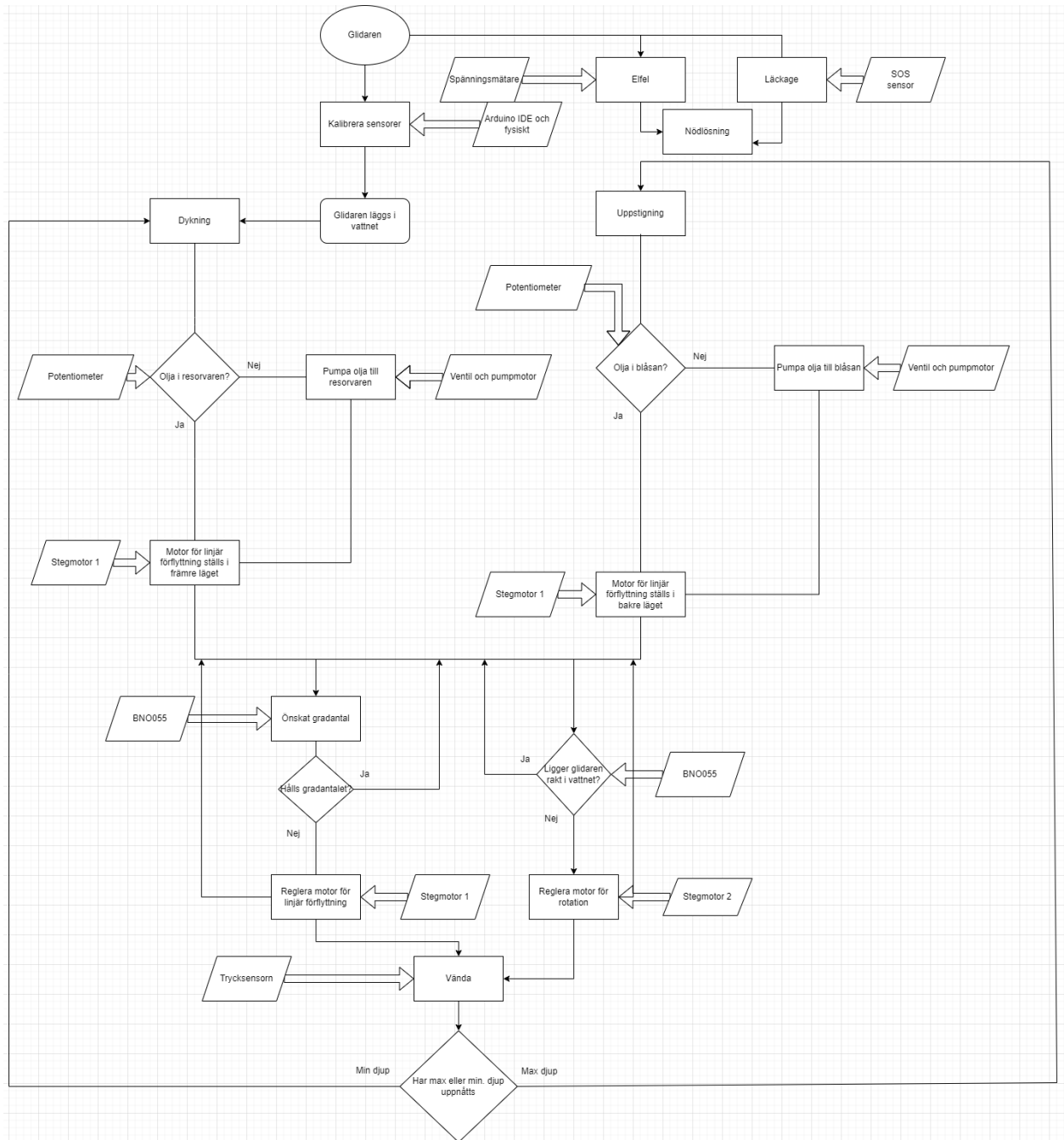


Front view
Scale: 2:3

Section view A-A
Scale: 3:4

| | | | | | | | |
|---|--|---------------------|--|--------------------|---|---|---|
| DESIGNED BY: | | DATE: 2023-03-20 | | Främre lock | | I | - |
| CHECKED BY: | | DATE: | | | | H | - |
| SIZE: A4 | | WEIGHT (kg): XXX | | DASSAULT SYSTEMES | | G | - |
| SCALE: 1:1 | | DRAWING NUMBER: XXX | | | | F | - |
| DRAWING NUMBER: XXX | | SHEET: 1/1 | | E | - | D | - |
| This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement. | | | | C | - | B | - |
| | | | | A | - | A | - |

D Programlogik



E Komponentlista

| Beskrivning | Antal | Delsystem | Återförsäljare |
|---|-------|------------------|--------------------|
| Kopplingstråd, flera färger | 1 | Elektronik | Elektro:kit |
| 2448 - Anslutningskort för DC/stegmotorsdrivare, Adafruit | 2 | Elektronik | Elfa |
| Arduino Uno | 2 | Elektronik | Elfa |
| 12 v Omvandlare | 1 | Elektronik | Elfa |
| 2,8V Omvandlare | 1 | Elektronik | Elfa |
| 9 DOF arduino | 1 | Elektronik | Elfa |
| DC/DC-Omvandlare 24 V | 1 | Elektronik | Elfa |
| BAR30-SENSOR-R2-RP | 1 | Elektronik | JM robotics |
| I2C Level converter | 1 | Elektronik | JM robotics |
| Pressure Relief Valve Backfill Adapter | 1 | Elektronik | JM robotics |
| PRV-M10-ASM-R1-RP | 1 | Elektronik | JM robotics |
| SOS-SET-R1-RP | 1 | Elektronik | JM robotics |
| SWITCH-M10-5A-R1-RP | 1 | Elektronik | JM robotics |
| ECS KONTAKT 5 MM | 4 | Elektronik | Kullagergrossisten |
| Vant 14,8V batteri | 4 | Elektronik | Reservdels-RC |
| Molex Micro 3.0 Femal 3m | 3 | Elektronik | Rs |
| Molex Micro 3.0 Male 3 m | 3 | Elektronik | Rs |
| SSR | 2 | Elektronik | Rs |
| Rubber disc bellow - CSM | 1 | Flytkraftsmotor | BeTech |
| Potentiometer 200mm – SoftPot | 1 | Flytkraftsmotor | Elektro:kit |
| Spets för SoftPot M6 | 1 | Flytkraftsmotor | Elektro:kit |
| Reservblåsa till 10845601125 | 1 | Flytkraftsmotor | Hydraulkompaniet |
| Extreme-Temperature Hard Plastic Tubing for Chemicals | 2 | Flytkraftsmotor | Mc Master-Carr |
| Universal-Thread Push-to-Connect Tube Fitting, Air and Water, Stainless Steel, 90 Degree Elbow, 6mm OD, 1/8 Pipe Size | 2 | Flytkraftsmotor | Mc Master-Carr |
| M5 to 6 mm tube fitting | 2 | Flytkraftsmotor | Rs |
| Tee Threaded Adaptor, Push In 6 mm to Push In 6 mm | 2 | Flytkraftsmotor | Rs |
| Alternativ solenoid 2-way valve | 1 | Flytkraftsmotor | Rs |
| Check Valve | 1 | Flytkraftsmotor | Rs |
| Hydralolja | 1 | Flytkraftsmotor | Rs |
| Legris Stainless Steel Single Non Return Valve, G 3/8in, 40 bar | 1 | Flytkraftsmotor | Rs |
| MGD1000P-PK-V-EQi High Pressure, FKM seals, Waterproof, EQi driver | 1 | Flytkraftsmotor | TCS Micropumps |
| Ballnut assembly | 1 | Manövrering | Amazon |
| Loctite gänglåsning | 1 | Manövrering | Elfa |
| Kullager 3 mm ID | 4 | Manövrering | Rs |
| 0.22 Nm Steppermotor | 2 | Manövrering | Rs |
| Bearing ID 10 mm | 2 | Manövrering | Rs |
| Gängade stänger M3 | 2 | Manövrering | Rs |
| Bearing ID 8 mm | 1 | Manövrering | Rs |
| M5 threaded rod 1m | 5 | Intern ställning | Rs |
| Skruvögla M6 x 69 mm, 5st | 2 | Skrov | Biltema |
| Kolfiberrör | 1 | Skrov | Carbon-composite |
| Zinc offeranod M6 | 2 | Skrov | Cathwell |
| Finspackel plastic padding | 1 | Skrov | Claes Ohlsson |
| Spray-Filler Plastic Padding | 1 | Skrov | Claes Ohlsson |
| T200 | 1 | Skrov | JM robotics |
| T200 controller: Basic ESC | 1 | Skrov | JM robotics |
| ALUMINIUM 150mm EN-AW 6082-T6 | 2 | Skrov | Metallbiten |
| Färg | 1 | Skrov | Paint Pro |
| O-ringar 134mm Bore, 140mm OD | 4 | Skrov | Rs |

F Kostnadsberäkning exklusive moms

| Beskrivning: | Antal | Använda | Användningsgrad | Total kostnad (ex moms) | Direkta kostnad (ex moms) | Indirekta kostnader (ex moms) |
|---|-------|---------|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Elektronik: | | | | | | |
| Vant 14,8V batteri | 4 | 4 | 100% | 4 464 kr | 4 464 kr | - kr |
| ECS KONTAKT 5 MM | 6 | 4 | 67% | 160 kr | 107 kr | 53 kr |
| Molex Micro 3.0 Femal 3m | 3 | 3 | 100% | 234 kr | 234 kr | - kr |
| Molex Micro 3.0 Male 3 m | 3 | 3 | 100% | 231 kr | 231 kr | - kr |
| 2448 - Anslutningskort för DC/stegmotorsdrivare, Adafruit | 3 | 2 | 67% | 223 kr | 148 kr | 74 kr |
| Arduino Uno | 2 | 2 | 100% | 430 kr | 430 kr | - kr |
| SSR | 3 | 2 | 67% | 127 kr | 85 kr | 42 kr |
| 12 v Omvandlare | 2 | 1 | 50% | 228 kr | 114 kr | 114 kr |
| 2,8V Omvandlare | 1 | 1 | 100% | 310 kr | 310 kr | - kr |
| 9 DOF arduino | 1 | 1 | 100% | 506 kr | 506 kr | - kr |
| BAR30-SENSOR-R2-RP | 1 | 1 | 100% | 693 kr | 693 kr | - kr |
| DC/DC-Omvandlare 24 V | 1 | 1 | 100% | 1 273 kr | 1 273 kr | - kr |
| I2C Level converter | 1 | 1 | 100% | 200 kr | 200 kr | - kr |
| Kopplingsstråd, flera färger | 1 | 1 | 100% | 148 kr | 148 kr | - kr |
| Pressure Relief Valve Backfill Adapter | 1 | 1 | 100% | 88 kr | 88 kr | - kr |
| PRV-M10-ASM-R1-RP | 1 | 1 | 100% | 228 kr | 228 kr | - kr |
| SOS-SET-R1-RP | 1 | 1 | 100% | 280 kr | 280 kr | - kr |
| SWITCH-M10-SA-R1-RP | 1 | 1 | 100% | 176 kr | 176 kr | - kr |
| Breadboard | 1 | 0 | 0% | 27 kr | - kr | 27 kr |
| Breadboard (Mindre) | 6 | 0 | 0% | 113 kr | - kr | 113 kr |
| Breadboard (Större) | 2 | 0 | 0% | 54 kr | - kr | 54 kr |
| Kopplingsdäck | 1 | 0 | 0% | 24 kr | - kr | 24 kr |
| Summa elektronik: | | | | 10 217 kr | 9 715 kr | 502 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 10 217 kr | 9 715 kr | 502 kr |
| Flytkraftsmotor: | | | | | | |
| Extreme-Temperature Hard Plastic Tubing for Chemicals | 7 | 2 | 29% | 434 kr | 124 kr | 310 kr |
| M5 to 6 mm tube fitting | 10 | 2 | 20% | 270 kr | 54 kr | 216 kr |
| Tee Threaded Adaptor, Push In 6 mm to Push In 6 mm | 10 | 2 | 20% | 620 kr | 124 kr | 496 kr |
| Tube Fitting, 90 Degree Elbow, 6mm OD, 1/8 Pipe Size | 2 | 2 | 100% | 616 kr | 616 kr | - kr |
| Alternativ solenoid 2-way valve | 1 | 1 | 100% | 554 kr | 554 kr | - kr |
| Check Valve | 1 | 1 | 100% | 170 kr | 170 kr | - kr |
| Hydralolja | 1 | 1 | 100% | 324 kr | 324 kr | - kr |
| Non Return Valve, G 3/8in, 40 bar | 1 | 1 | 100% | 1 144 kr | 1 144 kr | - kr |
| MGD1000P-PK-V-EQJ High Pressure, EQJ driver | 1 | 1 | 100% | 3 208 kr | 3 208 kr | - kr |
| Potentiometer 200mm - SoftPot | 1 | 1 | 100% | 199 kr | 199 kr | - kr |
| Reservblåsa till 10845601125 | 1 | 1 | 100% | 1 375 kr | 1 375 kr | - kr |
| Rubber disc bellow - CSM | 4 | 1 | 25% | 2 251 kr | 563 kr | 1 688 kr |
| Spets för SoftPot M6 | 1 | 1 | 100% | 72 kr | 72 kr | - kr |
| Push-in Fitting, G 3/8 Male to Push in 6 mm | 10 | 0 | 0% | 306 kr | - kr | 306 kr |
| Tube Fitting, Straight, for 6mm OD, 1/4 Pipe Size | 2 | 0 | 0% | 300 kr | - kr | 300 kr |
| Summa elektronik: | | | | 11 843 kr | 8 527 kr | 3 316 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 22 060 kr | 18 241 kr | 3 819 kr |
| Manövrering | | | | | | |
| Kullager 3 mm ID | 6 | 4 | 67% | 162 kr | 108 kr | 54 kr |
| 0.22 Nm Steppermotor | 2 | 2 | 100% | 942 kr | 942 kr | - kr |
| Bearing ID 10 mm | 2 | 2 | 100% | 71 kr | 71 kr | - kr |
| Gängade stänger M3 | 5 | 2 | 40% | 262 kr | 105 kr | 157 kr |
| Loctite gänglåsning | 1 | 1 | 100% | 155 kr | 155 kr | - kr |
| Ballnut assembly | 1 | 1 | 100% | 312 kr | 312 kr | - kr |
| Bearing ID 8 mm | 1 | 1 | 100% | 27 kr | 27 kr | - kr |
| Kullager 5 mm ID | 1 | 0 | 0% | 31 kr | - kr | 31 kr |
| Summa manövrering: | | | | 1 962 kr | 1 720 kr | 242 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 24 021 kr | 19 961 kr | 4 061 kr |
| Skrov | | | | | | |
| O-ringar 134mm Bore, 140mm OD | 5 | 4 | 80% | 37 kr | 30 kr | 7 kr |
| ALUMINIUM 150mm EN-AW 6082-T6 | 3 | 2 | 67% | 1 740 kr | 1 160 kr | 580 kr |
| Skruvögla M6 x 69 mm, 5st | 5 | 2 | 40% | 34 kr | 14 kr | 21 kr |
| Zinc offeranod M6 | 3 | 2 | 67% | 1 871 kr | 1 247 kr | 624 kr |
| Finspackel plastic padding | 1 | 1 | 100% | 104 kr | 104 kr | - kr |
| Färg | 2 | 1 | 50% | 252 kr | 126 kr | 126 kr |
| Kolfiberrör | 1 | 1 | 100% | 8 958 kr | 8 958 kr | - kr |
| T200 | 1 | 1 | 100% | 1 700 kr | 1 700 kr | - kr |
| T200 controller: Basic ESC | 1 | 1 | 100% | 291 kr | 291 kr | - kr |
| Spray-Filler Plastic Padding | 1 | 1 | 100% | 104 kr | 104 kr | - kr |
| O-ringar 130mm Bore, 140mm OD | 10 | 0 | 0% | 154 kr | - kr | 154 kr |
| O-ringar 134mm Bore, 140mm OD | 5 | 0 | 0% | 37 kr | - kr | 37 kr |
| Summa skrov: | | | | 15 282 kr | 13 733 kr | 1 548 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 39 303 kr | 33 694 kr | 5 609 kr |
| Intern ställning | | | | | | |
| M5 threaded rod 1m | 5 | 5 | 100% | 293 kr | 293 kr | - kr |
| M5 threaded rod 1m | 5 | 0 | 0% | 293 kr | - kr | 293 kr |
| RS pro stainless steel rod 5mm 1,5m | 10 | 0 | 0% | 481 kr | - kr | 481 kr |
| Summa modul: | | | | 1 067 kr | 293 kr | 774 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 40 370 kr | 33 987 kr | 4 835 kr |
| Skötsel | | | | | | |
| Armaturfett | 1 | 1 | 100% | 40 kr | 40 kr | - kr |
| Silican gel sachel (100 pack) | 1 | 1 | 100% | 371 kr | 371 kr | - kr |
| Smörjningsmedel | 1 | 1 | 100% | 191 kr | 191 kr | - kr |
| Rostolja WD-40, 200ml | 1 | 0 | 0% | 72 kr | - kr | 72 kr |
| Summa skötsel | | | | 674 kr | 602 kr | 72 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 41 044 kr | 34 589 kr | 4 907 kr |
| Övrigt | | | | | | |
| Karbinhake skruvlåsning 6 MM | 2 | 2 | 100% | 56 kr | - kr | 56 kr |
| RS pro male USB A to male USB B cable, USB 2.0, 1m | 2 | 2 | 100% | 69 kr | - kr | 69 kr |
| Studsfri hammare | 2 | 2 | 100% | 206 kr | - kr | 206 kr |
| Badhandduk, mörkblå | 1 | 1 | 100% | 80 kr | - kr | 80 kr |
| Nitrilhandskar | 1 | 1 | 100% | 103 kr | - kr | 103 kr |
| RS PRO Sanding blocks | 1 | 1 | 100% | 84 kr | - kr | 84 kr |
| Spackelset Cocraft | 1 | 1 | 100% | 48 kr | - kr | 48 kr |
| Vätservetter, kraftiga, 40 st | 1 | 1 | 100% | 64 kr | - kr | 64 kr |
| Vikt 20g 20g | 1 | 1 | 100% | 20 kr | - kr | 20 kr |
| Vikt 20g 50g | 1 | 1 | 100% | 24 kr | - kr | 24 kr |
| Dynamometer 1N | 2 | 2 | 100% | 160 kr | - kr | 160 kr |
| Andningskydd FFP2 NR, 5-pack | 1 | 0 | 0% | 80 kr | - kr | 80 kr |
| Summa övrigt | | | | 994 kr | - kr | 994 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 42 038 kr | 34 589 kr | 5 901 kr |

* För köp ifrån uttändet redovisar kostnaden i sek utifrån växlingskursen på beställningsdagen.

G Kostnadsberäkning inklusive moms

| Beskrivning: | Antal | Använda | Användningsgrad | Total kostnad (ink moms) | Direkta kostnad (ink moms) | Indirekta kostnader (ink moms) |
|---|-------|---------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Elektronik: | | | | | | |
| Vant 14,8V batteri | 4 | 4 | 100% | 5 580 kr | 5 580 kr | - kr |
| ECS KONTAKT 5 MM | 6 | 4 | 67% | 200 kr | 133 kr | 67 kr |
| Molex Micro 3.0 Femal 3m | 3 | 3 | 100% | 293 kr | 293 kr | - kr |
| Molex Micro 3.0 Male 3 m | 3 | 3 | 100% | 289 kr | 289 kr | - kr |
| 2448 - Anslutningskort för DC/stegmotorsdrivare, Adafruit | 3 | 2 | 67% | 278 kr | 186 kr | 93 kr |
| Arduino Uno | 2 | 2 | 100% | 538 kr | 538 kr | - kr |
| SSR | 3 | 2 | 67% | 159 kr | 106 kr | 53 kr |
| 12 v Omvandlare | 2 | 1 | 50% | 285 kr | 143 kr | 143 kr |
| 2,8V Omvandlare | 1 | 1 | 100% | 388 kr | 388 kr | - kr |
| 9 DOF arduino | 1 | 1 | 100% | 633 kr | 633 kr | - kr |
| BAR30-SENSOR-R2-RP | 1 | 1 | 100% | 866 kr | 866 kr | - kr |
| DC/DC-Omvandlare 24 V | 1 | 1 | 100% | 1 591 kr | 1 591 kr | - kr |
| IZC Level converter | 1 | 1 | 100% | 250 kr | 250 kr | - kr |
| Kopplingsråd, flera färger | 1 | 1 | 100% | 185 kr | 185 kr | - kr |
| Pressure Relief Valve Backfill Adapter | 1 | 1 | 100% | 110 kr | 110 kr | - kr |
| PRV-M10-ASM-R1-RP | 1 | 1 | 100% | 285 kr | 285 kr | - kr |
| SQS-SET-R1-RP | 1 | 1 | 100% | 350 kr | 350 kr | - kr |
| SWITCH-M10-5A-R1-RP | 1 | 1 | 100% | 220 kr | 220 kr | - kr |
| Breadboard | 1 | 0 | 0% | 34 kr | - kr | 34 kr |
| Breadboard (Mindre) | 6 | 0 | 0% | 142 kr | - kr | 142 kr |
| Breadboard (Större) | 2 | 0 | 0% | 67 kr | - kr | 67 kr |
| Kopplingsdäck | 1 | 0 | 0% | 30 kr | - kr | 30 kr |
| Summa elektronik: | | | | 12 771 kr | 12 143 kr | 628 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 12 771 kr | 12 143 kr | 628 kr |
| Flytkraftsmotor: | | | | | | |
| Extreme-Temperature Hard Plastic Tubing for Chemicals | 7 | 2 | 29% | 543 kr | 155 kr | 388 kr |
| M5 to 6 mm tube fitting | 10 | 2 | 20% | 338 kr | 68 kr | 270 kr |
| Tee Threaded Adaptor, Push In 6 mm to Push In 6 mm | 10 | 2 | 20% | 775 kr | 155 kr | 620 kr |
| Tube Fitting, 90 Degree Elbow, 6mm OD, 1/8 Pipe Size | 2 | 2 | 100% | 770 kr | 770 kr | - kr |
| Alternativ solenoid 2-way valve | 1 | 1 | 100% | 693 kr | 693 kr | - kr |
| Check Valve | 1 | 1 | 100% | 213 kr | 213 kr | - kr |
| Hydralojja | 1 | 1 | 100% | 405 kr | 405 kr | - kr |
| Non Return Valve, G 3/8in, 40 bar | 1 | 1 | 100% | 1 430 kr | 1 430 kr | - kr |
| MGD1000P-PK-V-EQ High Pressure, EQ driver | 1 | 1 | 100% | 4 010 kr | 4 010 kr | - kr |
| Potentiometer 200mm - SoftPot | 1 | 1 | 100% | 249 kr | 249 kr | - kr |
| Reservblåsa till 10845601125 | 1 | 1 | 100% | 1 719 kr | 1 719 kr | - kr |
| Rubber disc bellow - CSM | 4 | 1 | 25% | 2 814 kr | 703 kr | 2 110 kr |
| Spets för SoftPot M6 | 1 | 1 | 100% | 90 kr | 90 kr | - kr |
| Push-in Fitting, G 3/8 Male to Push In 6 mm | 10 | 0 | 0% | 383 kr | - kr | 383 kr |
| Tube Fitting, Straight, for 6mm OD, 1/4 Pipe Size | 2 | 0 | 0% | 375 kr | - kr | 375 kr |
| Summa elektronik: | | | | 14 804 kr | 10 658 kr | 4 145 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 27 574 kr | 22 801 kr | 4 773 kr |
| Manövrering | | | | | | |
| Kullager 3 mm ID | 6 | 4 | 67% | 203 kr | 135 kr | 68 kr |
| 0.22 Nm Steppermotor | 2 | 2 | 100% | 1 178 kr | 1 178 kr | - kr |
| Bearing ID 10 mm | 2 | 2 | 100% | 89 kr | 89 kr | - kr |
| Gängade stänger M3 | 5 | 2 | 40% | 328 kr | 131 kr | 197 kr |
| Loctite gänglåsning | 1 | 1 | 100% | 194 kr | 194 kr | - kr |
| Ballnut assembly | 1 | 1 | 100% | 390 kr | 390 kr | - kr |
| Bearing ID 8 mm | 1 | 1 | 100% | 33 kr | 33 kr | - kr |
| Kullager 5 mm ID | 1 | 0 | 0% | 39 kr | - kr | 39 kr |
| Summa manövrering: | | | | 2 452 kr | 2 149 kr | 303 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 30 027 kr | 24 951 kr | 5 076 kr |
| Skrov | | | | | | |
| O-ringar 134mm Bore, 140mm OD | 5 | 4 | 80% | 46 kr | 37 kr | 9 kr |
| ALUMINIUM 150mm EN-AW 6082-T6 | 3 | 2 | 67% | 2 175 kr | 1 450 kr | 725 kr |
| Skruvögla M6 x 69 mm, 5st | 5 | 2 | 40% | 43 kr | 17 kr | 26 kr |
| Zinc offeranod M6 | 3 | 2 | 67% | 2 339 kr | 1 559 kr | 780 kr |
| Finspackel plastic padding | 1 | 1 | 100% | 130 kr | 130 kr | - kr |
| Färg | 2 | 1 | 50% | 315 kr | 158 kr | 158 kr |
| Kolfiberrör | 1 | 1 | 100% | 11 197 kr | 11 197 kr | - kr |
| T200 | 1 | 1 | 100% | 2 125 kr | 2 125 kr | - kr |
| T200 controller: Basic ESC | 1 | 1 | 100% | 364 kr | 364 kr | - kr |
| Spray-Filler Plastic Padding | 1 | 1 | 100% | 130 kr | 130 kr | - kr |
| O-ringar 130mm Bore, 140mm OD | 10 | 0 | 0% | 192 kr | - kr | 192 kr |
| O-ringar 134mm Bore, 140mm OD | 5 | 0 | 0% | 46 kr | - kr | 46 kr |
| Summa skrov: | | | | 19 102 kr | 17 167 kr | 1 935 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 49 129 kr | 42 118 kr | 7 011 kr |
| Intern ställning | | | | | | |
| M5 threaded rod 1m | 5 | 5 | 100% | 366 kr | 366 kr | - kr |
| M5 threaded rod 1m | 5 | 0 | 0% | 366 kr | - kr | 366 kr |
| RS pro stainless steel rod 5mm 1,5m | 10 | 0 | 0% | 601 kr | - kr | 601 kr |
| Summa modul: | | | | 1 334 kr | 366 kr | 968 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 50 463 kr | 42 484 kr | 6 044 kr |
| Skötsel | | | | | | |
| Armaturfett | 1 | 1 | 100% | 50 kr | 50 kr | - kr |
| Silican gel sachet (100 pack) | 1 | 1 | 100% | 464 kr | 464 kr | - kr |
| Smörjningsmedel | 1 | 1 | 100% | 239 kr | 239 kr | - kr |
| Rostolja WD-40, 200ml | 1 | 0 | 0% | 90 kr | - kr | 90 kr |
| Summa skötsel: | | | | 842 kr | 752 kr | 90 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 51 305 kr | 43 236 kr | 6 134 kr |
| Övrigt | | | | | | |
| Karbinhake skruvlåsning 6 MM | 2 | 2 | 100% | 70 kr | - kr | 70 kr |
| RS pro male USB A to male USB B cable, USB 2.0, 1m | 2 | 2 | 100% | 87 kr | - kr | 87 kr |
| Studsfri hammare | 2 | 2 | 100% | 258 kr | - kr | 258 kr |
| Badhandduk, mörkblå | 1 | 1 | 100% | 100 kr | - kr | 100 kr |
| Nitrilhandskar | 1 | 1 | 100% | 129 kr | - kr | 129 kr |
| RS PRO Sanding blocks | 1 | 1 | 100% | 105 kr | - kr | 105 kr |
| Spackelset Cocraft | 1 | 1 | 100% | 60 kr | - kr | 60 kr |
| Våtservetter, kraftiga, 40 st | 1 | 1 | 100% | 80 kr | - kr | 80 kr |
| Vikt 20g 20g | 1 | 1 | 100% | 25 kr | - kr | 25 kr |
| Vikt 20g 50g | 1 | 1 | 100% | 30 kr | - kr | 30 kr |
| Dynamometer 1N | 2 | 2 | 100% | 200 kr | - kr | 200 kr |
| Ändringsskydd FFP2 NR, 5-pack | 1 | 0 | 0% | 100 kr | - kr | 100 kr |
| Summa övrigt | | | | 1 243 kr | - kr | 1 243 kr |
| Akkumulerade kostnader: | | | | 52 548 kr | 43 236 kr | 7 317 kr |

* För köp från utlandet redovisar kostnaden i sek utifrån växelkursen på beställningsdagen

H Testkod

```
1 #include <Wire.h>
2 #include <Stepper.h>
3 #include <SoftwareSerial.h>
4 #include <Servo.h>
5
6 byte servoPin = A3;
7 Servo servo;
8
9 //Initiate pump and ventil
10 int pumpPin = 4;
11 int ventilPin = 3;
12 int minVolume = 12.4;
13 int maxVolume = 2.5;
14 //Change //Change, not under 24V
15 //Start value of leak indicator
16 /* Delay between fresh samples */
17 //Change
18 int rotationSpeed = 10;
19 int translationSpeed = 60;
20 int nrOfSteps = 10;
21
22 // Number of steps per revolution for our motor
23 const int stepsPerRevolution = 200;
24
25 // Initiate stepper motor for rotation and translation
26 Stepper stepperRotation(stepsPerRevolution, 5, 6, 7, 8);
27 Stepper stepperTranslation(stepsPerRevolution, 2, 9, 10, 13);
28
29 int state = 0;
30 SoftwareSerial bt(11, 12);
31
32 void setup() {
33     bt.begin(9600);
34     Serial.begin(9600);
35
36     servo.attach(servoPin);
37     servo.writeMicroseconds(1500); // send "stop" signal to ESC.
38     delay(5000);
39
40     //Setup for pump and ventil
41     pinMode(ventilPin, OUTPUT); //Ventil
42     digitalWrite(ventilPin, LOW); //Closed
43     pinMode(pumpPin, OUTPUT); //Pump
44     digitalWrite(pumpPin, LOW); //Closed //Initiate the SOS-sensor
45 }
46 void loop() {
47
```

```
48 | if (bt.available()) /* If data is available on serial port */
49 | {
50 |     // Reads the data from the serial port
51 |     state = bt.read();
52 | }
53 | if (state == 'A') {
54 |     stepperRotation.setSpeed(rotationSpeed);
55 |     stepperRotation.step(nrOfSteps);
56 |     state = 0;
57 | } else if (state == 'B') {
58 |     stepperRotation.setSpeed(rotationSpeed);
59 |     stepperRotation.step(-nrOfSteps);
60 |     state = 0;
61 | } else if (state == 'C') {
62 |     stepperTranslation.setSpeed(translationSpeed);
63 |     stepperTranslation.step(nrOfSteps);
64 |     state = 0;
65 | } else if (state == 'D') {
66 |     stepperTranslation.setSpeed(translationSpeed);
67 |     stepperTranslation.step(-nrOfSteps);
68 |     state = 0;
69 | } else if (state == 'E') {
70 |     digitalWrite(ventilPin, LOW);
71 |     state = 0;
72 | } else if (state == 'F') {
73 |     digitalWrite(ventilPin, HIGH);
74 |     state = 0;
75 | } else if (state == 'G') {
76 |     digitalWrite(pumpPin, LOW);
77 |     state = 0;
78 | } else if (state == 'H') {
79 |     digitalWrite(pumpPin, HIGH);
80 |     state = 0;
81 | } else if (state == 'K') {
82 |     servo.writeMicroseconds(1364);
83 |     state = 0;
84 | } else if (state == 'Y') {
85 |     servo.writeMicroseconds(1500);
86 |     state = 0;
87 | }
88 | }
```

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige

www.chalmers.se



CHALMERS