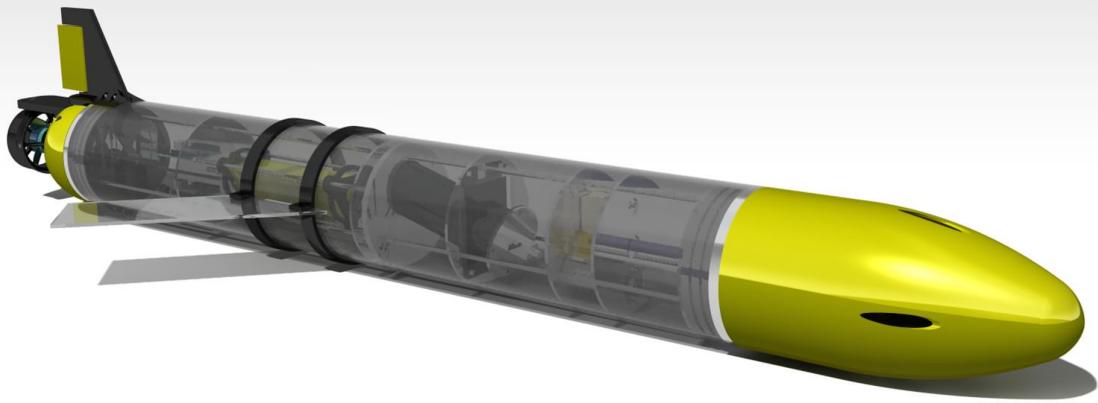




CHALMERS

REVERE  
RESOURCE FOR VEHICLE  
RESEARCH AT CHALMERS



# Konstruktion av marin glider för oceanografiska mätningar

Kandidatarbete vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper på uppdrag av labbet *REVERE*.

Filip Bergqvist  
Petrus Dahlqvist  
Jonatan Haraldsson

Jonathan Cederquist  
Jonathan Ekdahl  
Fredrik Nygren

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

## Sammandrag

Mot bakgrunden av att fordonslaboratoriet *REVERE* (Resource for Vehicle Research at Chalmers) i framtiden önskar att bedriva verksamhet även under vattenytan, har en prototyp för en marin glider, anpassad för insamling av data till havs, designats och konstruerats. En marin glider är en energisnål undervattensfarkost med lång räckvidd och varierbar flytförmåga, vilken vanligen bestyckas med diverse mätutrustning. Glidern som konstruerats i detta projekt har en vikt på 20 kg och vidare har gliderns komponenter dimensionerats för att klara vattentrycket vid 100 m djup. På utsidan av gliderns rörformade skrov i akrylplast finns vingar som möjliggör den glidande rörelsen, ett roder för manövrering i horisontalplanet och en trycksensor för att kunna beräkna gliderns momentana djup. Innanför skrovet finns en flytkraftsmotor som reglerar gliderns flytförmåga genom att öka och minska gliderns volym, en pitchmotor som styr gliderns anfallsinkel mot horisontalplanet (pitchvinkel) samt en servomotor som styr rodrets vinkel. För att ytterligare öka gliderns manövrerbarhet försågs även glidern med en extern propeller. Ett styrsystem för segelflygplanets elektroniska komponenter realiseras med två mikrokontroller (*Arduino Uno*) och mjukvaran möjliggör styrning med en extern manöverkontroll. Sammantaget uppgick kostnaden för gliderns komponenter till 24 139 kr, vilket är inom projektets maximala budget på 50 000 kr. Inför framtidens utveckling av prototypen föreslås en uppgradering av gliderns flytkraftsmotor samt att säkerhetssystem integreras.

*Nyckelord:* Marin glider, kartläggning till havs, oceanografi, AUV

## Abstract

The vehicle laboratory *REVERE* (Resource for Vehicle Research at Chalmers) has, with the aim of establishing operations below the water surface, put together a bachelor project to construct a prototype for a simple marine glider adapted for gathering data at sea. A marine glider is an energy-efficient and long-range underwater vehicle, usually equipped with measuring instruments. The glider prototype constructed in this project weighs 20 kg and the components have been designed to resist pressures at depths up to 100 m. The glider's hull is equipped with acrylic plastic wings which enables a forward gliding motion, an aft rudder for steering and a pressure sensor that measures depth. The hull contains a buoyancy engine that adjusts the volume of the glider, a pitch motor which alters pitch angle (angle of attack) and a servo motor that controls the aft rudder. To further increase manoeuvrability, the glider was fitted with a thruster at the stern. A control system for the glider's electronic components was realized with two microcontrollers (*Arduino Uno*) and the software enables control with an external operating control. Overall, the cost for all components reached 24 139 kr, which is well below the maximum budget of 50 000 kr. Suggestions for future developments are an upgraded buoyancy engine and an integrated safety system.

*Key words:* Underwater glider, surveillance at sea, oceanography, AUV

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>1</b>
1.1	Syfte och avgränsningar . . . . .	2
1.2	Samhälliga och etiska aspekter . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teori för delsystem i en glider</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Design och dimensionering av prototypens delsystem</b>	<b>5</b>
3.1	Kravspecifikation . . . . .	5
3.2	Hölje och modularitet . . . . .	5
3.2.1	Materialval . . . . .	5
3.2.2	Skrov . . . . .	6
3.2.3	Modularitet och intern struktur . . . . .	14
3.2.4	Vingar . . . . .	17
3.2.5	Hölje och modularitet - Resultat . . . . .	18
3.3	Flytkraftsmotor . . . . .	18
3.3.1	Kolv-cylinder baserad flytkraftsmotor . . . . .	18
3.3.2	Oljebaserad flytkraftmotor . . . . .	19
3.3.3	Flytkraft och oljemängd . . . . .	20
3.3.4	Pump och dimensionering . . . . .	21
3.3.5	Pumpstyrning . . . . .	21
3.3.6	Blåsor, rörsystem och kopplingar . . . . .	21
3.3.7	Ventil . . . . .	22
3.3.8	Gliderns flytkraftsmotor - Resultat . . . . .	22
3.4	Styrning och sensorer . . . . .	26
3.4.1	Styrning och sensorer - Resultat . . . . .	27
3.5	Pitchkontroll . . . . .	27
3.5.1	Pitchkontroll - Resultat . . . . .	28
3.6	Arduinoprogram och kontroller . . . . .	30
3.7	Batterier . . . . .	31
3.8	Manövrering i horisontalplanet och design av akter . . . . .	32
3.8.1	Design av akterroder och kraftöverföring . . . . .	33
3.8.2	Propeller . . . . .	36
3.8.3	Gliderns akter, roder och propeller - Resultat . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>41</b>
4.1	Resultat av hela glidern . . . . .	41
4.2	Kostnad . . . . .	41
4.3	Tester, utvärdering och funktioner hos prototypen . . . . .	42
4.4	Kravuppfyllelse . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Framtida arbete</b>	<b>44</b>

5.1	Batteri . . . . .	44
5.2	Flytkraftsmotor . . . . .	44
5.3	Styrning och automation . . . . .	44
5.4	Säkerhetssystem . . . . .	45
<b>A</b>	<b>Kravspecifikation</b>	<b>50</b>
<b>B</b>	<b>Komponenter och kostnader</b>	<b>51</b>
<b>C</b>	<b>Beräkningar av o-ringar</b>	<b>52</b>
<b>D</b>	<b>Estimering av blåsstorlek och vertikal hastighet</b>	<b>53</b>
D.1	Källkod i Python för grafer till vertikal hastighet och volym på blåsa . . . . .	55
<b>E</b>	<b>Analys av krafter på roder</b>	<b>56</b>
<b>F</b>	<b>Kopplingschema för pitchmotor</b>	<b>58</b>
<b>G</b>	<b>Källkod Arduino</b>	<b>59</b>
G.1	Kod för styrning av pitch <i>Arduino</i> . . . . .	59
G.2	Kod för styrning av roder <i>Arduino</i> . . . . .	59
G.3	Kod för styrning av pump <i>Arduino</i> . . . . .	60
G.4	Kod för styrning av propeller <i>Arduino</i> . . . . .	60

# Introduktion

Havet är djupt och den svåråtkomliga värld som döljs under ytan har historiskt varit tämligen utforskad av människan. Då haven täcker övervägande del av jordens yta, är forskning inom oceanografi viktigt för att förstå jordens nuvarande klimat och för att kunna förutspå dess framtida utveckling. Ett stort steg inom oceanografi togs 1957, då forskare vid University of Washington konstruerade den första obemannade undervattensfarkosten (AUV<sup>1</sup>) för insamling av data till havs (Gafurov & Klochkov, 2015). Utvecklingen av nya sorters obemannade undervattensfarkoster tog fart och 1965 fick Ewan S. Fallon ett patent för en undervattensfarkost med vingar och varierbar flytförmåga (Fallon, 1965). Tillsammans möjliggjorde de två komponenterna att farkosten kunde glida framåt samtidigt som den förflyttades vertikalt och Fallon kallade således sin design för *Hydroglider*. En konsekvens av att en glider endast nyttjar en flytkraftsmotor för framåtdrift är att den får låg energiförbrukning. Marina gliders är idag vanliga inom oceanografisk forskning, främst eftersom gliderns energisnåla framåtdrift och långa räckvidd möjliggör insamling av data på ställen tidigare svåra att nå.

Det primära syftet med en glider är att samla in olika typer av data, som exempelvis salthalt, temperatur, klorofyll och syrenivå (National Oceanography Centre (NOC), 2023). Salthalt och temperatur är två viktiga komponenter för att bestämma vattnets densitet. Densitetsvariationer på olika djup påverkar havsströmmar och är därav en bidragande faktor till att näringssämnen sprids (National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), u. å.). Vidare tenderar ökad salthalt att ha en negativ effekt på havsisarnas utbredning och därfor är mätning av salthalt viktigt för att förstå klimatförändringar (Olson m. fl., 2022). De övriga två parametrarna, klorofyll och syrenivå, är viktiga för att kartlägga och följa upp övergödning (European Environmental Agency, 2022-08-05).

I dagsläget finns flera företag som tillverkar marina gliders kommersiellt och ofta utvecklas gliders för långa uppdrag på stora hav och djup ner till 1000 m (Barker, 2012). Vidare har de flesta gliders utrymme att bli bestyckade med olika typer av mätutrustning beroende på vad som är av intresse för användaren. Sammantaget gör detta att kommersiella gliders vanligen har en hög prislapp och följaktligen är det idag till största del myndigheter, stater och stiftelser som har de ekonomiska medlen för att använda gliders. Ett större utbud av billigare och mindre avancerade marina gliders skulle således kunna göra att fler aktörer ges möjligheten att bedriva forskning och kartläggning till havs.

Fordonslabbet *REVERE* (Resource for Vehicle Research at Chalmers), uppdragsgivare tillika kandidatsarbetets främsta intressent, önskar att utöka sin verksamhet och i framtiden bedriva forskning under ytan. Vidare finns intressenter från Göteborgs Universitet och RISE (Research Institutes of Sweden) som också har anknytningar till *REVERE*. Även stiftelsen Voice of the Ocean (VOTO), som idag samlar in data till havs med gliders, kan betraktas som intressent. Sammanfattningsvis redogör denna rapport för utvecklingsprocess, designval och tillvägagångssätt för konstruktion av en billig och enkel marin glider, vilken avses att slutgiltigt användas för insamling av data till havs.

---

<sup>1</sup> Autonomous Underwater Vehicle

## 1.1 Syfte och avgränsningar

Kandidatarbetet ska mynna ut i en prototyp för en billig marin glider, som har möjlighet att bestyckas med mätutrustning och vars design ger god manövrerbarhet på ett djup ner till 100 m. Vidare förväntas gliderns vikt inte överstiga 20 kg och dess design ska möjliggöra en farkost helt frikopplad från land. Syftet med detta projekt att den marina glidern ska kunna komplettera *REVERE*:s bas av fordon och på sikt ge labbet möjlighet att även bedriva forskning under vattnet.

Då kandidatarbetet genomförs under en begränsad tidsperiod har projektgruppen inte tillverkat en prototyp med modularitet för bestyckning av mätutrustning. Kandidatgruppens begränsade kunskaper inom tillverkning, avsaknad av maskinlicenser samt bristande tillgänglighet på verktyg utgör också begränsningar, vilka till stor del undviks genom användandet av 3D-utskrivna komponenter. Eftersom prototypen tillverkningen är gränsad av en budget på 50 000 kr, utesluter det att köpa många färdiga lösningar från entreprenörer eller konsulter som har större expertis i området. Vid ett tidigt skede i projektet togs beslutet att använda mikrokontrollern *Arduino Uno* för att styra glidern på grund av dess användarvänlighet. Detta medför dock vissa begränsningar då en Arduino har begränsad möjlighet att anslutas till komponenter med den kunskap om detta som projektgruppen har att tillgå. Då Arduinos inte heller kan lagra data kommer även denna funktion att lämnas till det fortsatta arbetet som behöver göras för att färdigställa glidern.

## 1.2 Samhälliga och etiska aspekter

Då slutproduktens syfte är att genomföra mätningar under vattnet — på stället avlägsna från samhället — kommer gliderns fysiska kontakt med samhället vara liten. Däremot kommer den data som samlas in av glidern kunna ge en större förståelse för havens ekosystem och insamlad data kan vidare tänkas utgöra underlag för framtida klimatprognosser. Projektet kan också sprida information om samt väcka intresse för forskning inom oceanografi.

Andra viktiga etiska aspekter att beakta är gliderns påverkan på det marina djur- och växtlivet samt att gliders skulle kunna användas i militära syften. Risken att glidern stör den marina omgivningen bedöms liten, eftersom gliderns långsamma framåtdrift dels sker utan någon typ av utsläpp och dels sker tämligen ljudlöst. Vid händelse av ett haveri, exempelvis oljeläckage eller att glidern på annat sätt inte lyckas stiga, finns dock risk att djur- och växtliv påverkas negativt. Vidare gör gliders långa räckvidd att den amerikanska flottan använder gliders inom marin krigsföring; främst genom kartläggning av minor och ubåtar (Grinter, 2021-08-05). Eftersom detta projekts intressenter primärt är ett forskningslabb drivet av Chalmers, bedöms risken att glidern används i militära syften som avlägsen.

# Teori för delsystem i en glider

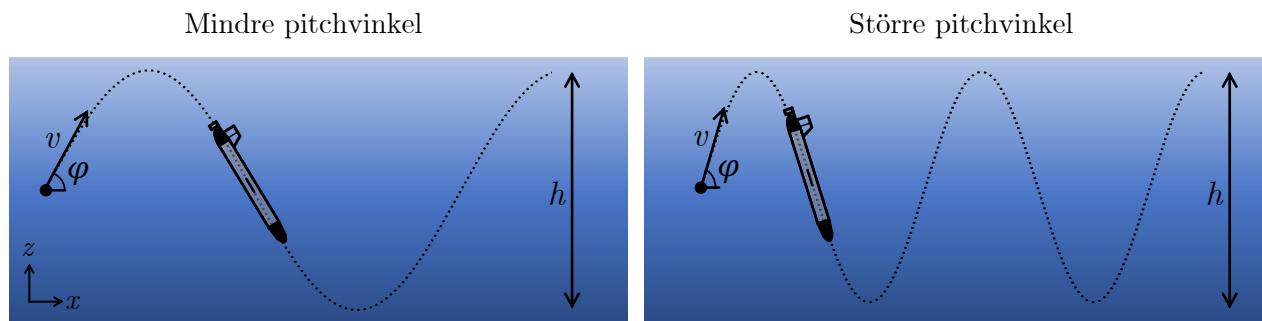
Även om olika marina gliders varierar i dess uppbyggnad och sammansättning, finns några kritiska delsystem som utgör stommen. Dessa delsystem och ett typiskt utseende för en glider presenteras i figur xx.

Flytkraftsmotorn är oftast det viktigaste delsystemet i en marin glider. Denna används för att manipulera gliderns undantryckta volym,  $V$ , i vattnet, oftast genom att flytta olja från en inre till en yttre reservoar. Enligt Arkimedes princip ges lyftkraften  $F_L$  för volymen  $V = V_{\text{glider}} \pm \Delta V$  av

$$F_L = \rho g V = \rho g (V_{\text{glider}} \pm \Delta V), \quad (2.1)$$

där  $\rho$  är vattnets densitet och  $g \approx 9,82 \text{ m s}^{-2}$  är tyngdaccelerationen (Lantmäteriet, u. å). Om inga externa krafter verkar på glidern och neutralt med volym undantrycks,  $\Delta V = 0$ , ges kraftsumman av  $\Sigma F = F_L - mg = 0$ . Med en flytkraftsmotor varieras den undantryckta volymen med  $\Delta V$  kring en jämviktsvolym,  $V_{\text{glider}}$ , då glidern har neutral flytkraft. Sammantaget ger en förändring i  $\Delta V$  att den resulterade kraften  $\Sigma F$  ändrar tecken och det får glidern att sjunka eller stiga.

För att möjliggöra framåtdrift då glidern rör sig i vertikalled används vingar samt en pitchmotor, som förflyttar gliderns tyngdpunkt och därmed reglerar gliderns pitchvinkel (anfallsinkel) gentemot horisontalplanet,  $\varphi$ . Hur gliderns hastighet,  $\vec{v} = v(\cos(\varphi)\hat{x} + \sin(\varphi)\hat{z})$ , ändras med pitchvinkeln,  $\varphi$ , visas i figur 2.1. Då det vid varje vändpunkt krävs energi är det energimässigt gynnsamt att hålla en låg pitchvinkel. Det är också energimässigt fördelaktigt att använda glidern på stora djup,  $h$  i figur 2.1, då det även gör att glidtiden blir längre. Låg pitchvinkel och stort djup möjliggör alltså längre mätserier, eftersom livslängden hos gliderns batterier förlängs. Större djup medför dock ett ökat hydrostatiskt tryck, vilket bidrar till ökade påfrestningar på gliderns skrov.



Figur 2.1: Skiss över gliderns sinusformade rörelse som belyser att storleken på pitchvinkeln,  $\varphi$ , och djupet,  $h$ , påverkar hur ofta glidern behöver ändra sin flytförstånd.

Skrovet för en glider behöver dimensioneras för att klara mekaniska laster, som uppkommer på grund av det hydrostatiska trycket vid stora djup. På ett djup  $z$  ges det hydrostatiska

trycket av

$$p(z) = \rho g z, \quad (2.2)$$

där densiteten  $\rho \approx 1000 \text{ kg m}^{-3}$  för vatten. I detta projekt ska glidern klara djupet  $z = 100 \text{ m}$  och enligt ekvation 2.2 ges då trycket av  $p = 1 \text{ MPa}$ . Havet som arbetsmiljö innehåller ytterligare utmaningar som exempelvis korrosion, stormar, potentiella kollisioner och byggande biologiskt material. Skrovets utformning påverkar även faktorer som manöverbarhet, vikt, hydrodynamik och stabilitet.

En gliders elektroniska komponenter försörjs vanligtvis av ett eller flera batterier som driver ett likströmssystem och komponenter väljs på en enhetlig spänningsnivå. Vid användning av uppladdningsbara batterier används även ett BMS - Battery Management System för att erhålla större möjligheter för styrning och kommunikation. För en helt autonom glider sker vanligen all typ av kommunikation – överföring av mätdata och styrning – via satellitnätverk, exempelvis Iridium (National Oceanography Centre (NOC), [2023](#)). Det är främst på grund av att satellitkommunikation är trådlös och tillgänglig på avlägsna platser. Då vatten har en starkt dämpande effekt av elektromagnetiska vågor krävs att glidern befinner sig vid vattenytan för att den ska kunna kommunicera. Inför ett dyk skickas instruktioner för hur dyket ska genomföras och en kompass på glidern hjälper den navigera.

# Design och dimensionering av prototypens delsystem

I följande avsnitt presenteras kravspecifikationen för glidern samt en beskrivning av designprocessen för glider-prototypens olika delsystem och komponenter, från metod till slutgiltiga utformningar. De delsystem som huvudsakligen presenteras är – i följande ordning – hölje och modularitet, flytkraftsmotor, styrning och sensorer samt manövrering i horisontalplanet och design av akter.

## 3.1 Kravspecifikation

För skapa en tydlig bild och struktur av de krav som ställs på farkosten upprättades en kravspecifikation. De krav och önskemål som formulerats består utav en kombination av uppdragsgivarens krav och projektgruppens egna ambitioner. Vänligen se bilaga A för en fullständig kravspecifikation.

Vid utvecklingen av glidern låg fokus på att alla delsystem skulle uppfylla kravspecifikationen till fullo. När vissa problem uppstod gjordes dock ibland avvägningar över vilka krav som var mer kritiska och vilka som kunde överges till förmån för möjligheten att få en fungerande glider inom projektets tidsplan.

## 3.2 Hölje och modularitet

I följande avsnitt behandlas hur farkostens yttre hölje har designats och konstruerats. Vidare berörs även farkostens modularitet, alltså det ramverk som används för att koppla samman olika delsystem och komponenter.

### 3.2.1 Materialval

För att undersöka möjliga material till skrovet användes mjukvaran *Ansys Granta EduPack*. En lista med materialkrav togs fram och presenteras i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Tabell över materialkrav

Krav	Värde
Sötvatten	Utmärkt
Saltvatten	Utmärkt
Transparens	Optisk kvalitet
Maximal användningstemperatur	30°C
Minsta användningstemperatur	-5°C

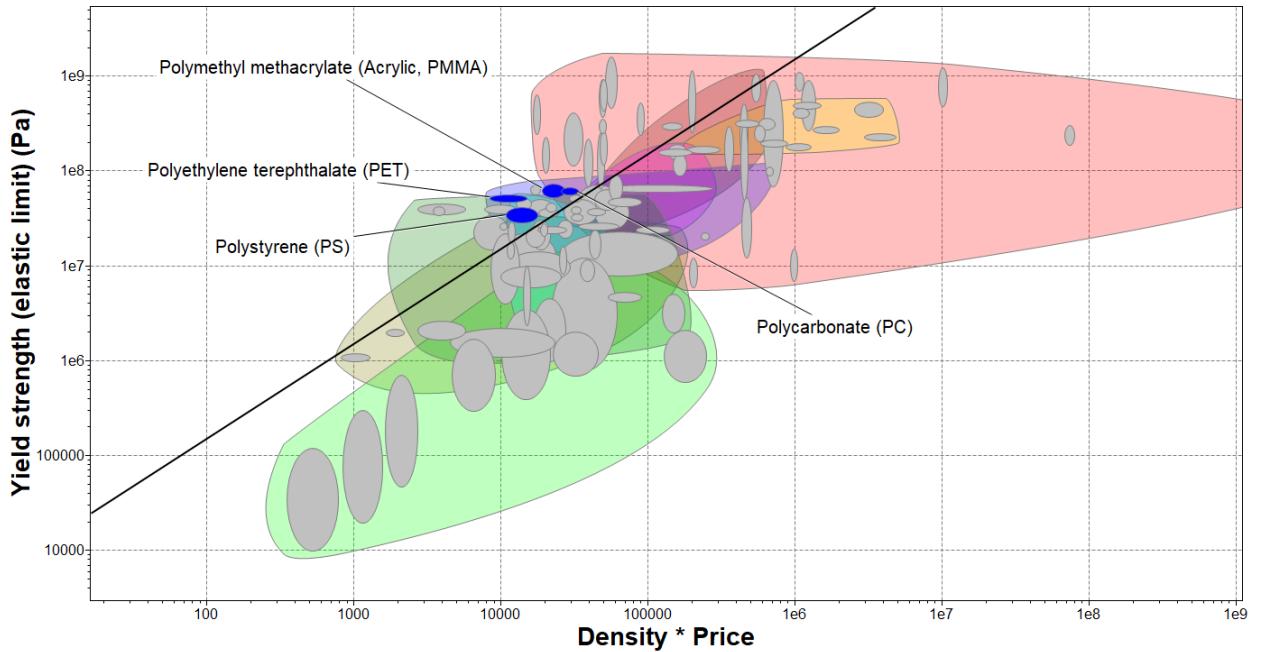
Kravet på att skrovet ska klara sötvatten och saltvatten beror på den undervattensmiljö som glidern ska användas i. Kravet på transparens med optiskt kvalitet, som innebär att materialet är transparent, baserades på att projektgruppen ville ha ett skrov där de inre delsystemen är synliga under testning. Detta för att det ska bli enklare att se om något inte fungerar innanför skrovet eller för att se om ett läckage uppstår. Användningstemperaturen baserades på havstemperaturen (med en säkerhetsmarginal) runt Sverige, som glidern ska användas i (SMHI, 2023-04-17).

Därefter infördes ett materialindex (Ansys, u. å), för en cylinder utsatt av internt tryck givet maximal sträckgräns till lägsta kostnad, för att få fram ett optimerat material tillsammans med materialkraven. Detta materialindex ansågs motsvara en cylinder som utsätts av ett ytter hydrostatiskt tryck. Indexet  $M$  ges av

$$M = \frac{\sigma_y}{\rho C_m}, \quad (3.1)$$

där  $\sigma_y$  är elasticitetsmodulen,  $\rho$  är densiteten och  $C_m$  är kostnaden per kilo.

En rak linje med lutningen  $k = 1$ , vilken beräknades genom att logaritmera materialindexet, infördes för att visualisera vilket material som var mest optimerat efter indexet, se figur 3.1. De material som fanns kvar efter sällningen var polymethyl methacrylate (PMMA), polystyrene (PS), polycarbonate (PC) och Polyethylene terephthalate (PET).



Figur 3.1: Materialval i Granta EduPack i databas level 2.

### 3.2.2 Skrov

Inledningsvis undersöktes flera olika typer av skrov dels för att hämta inspiration och dels för att skapa en bild av hur olika typer av autonoma marina gliders ser ut idag. Det kon-

staterades att gliders vanligtvis består av en avlång kropp, tillsammans med en kon-formad struktur fram respektive bak (Barker, 2012).

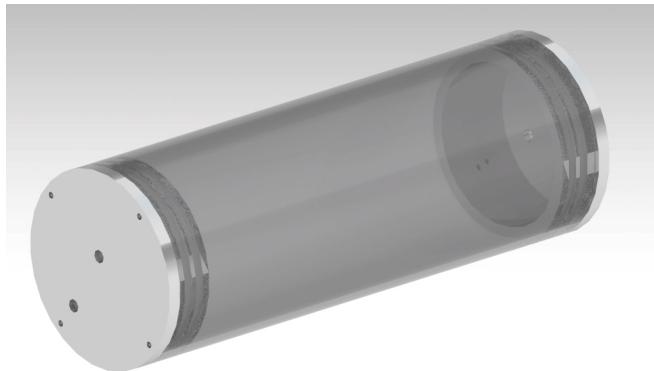
Projektgruppen beslutade att använda ett symmetriskt rör med en ändkåpa vid respektive ända av röret. Se figur 3.2.

Ett viktigt krav som REVERE angivit i uppgiftsbeskrivningen och som krävde mycket arbete var att skrovet – rör och ändkåpor – skulle kunna motstå vattentrycket vid 100 m djup. Se kravspecifikation under bilaga A. Utöver dimensionering mot tryck behövde även skrovet tåla den marina miljön med saltvatten, beväxtlighet och temperaturskillnader.

I följande delavsnitt behandlas design- och konstruktionsprocessen av skrovens två huvudsakliga komponenter, röret och ändkåporna. I tabell 3.2 ges en översikt över de material som togs fram med *Granta EduPack* i avsnitt 3.2.1. Materialet för respektive del undersöks vidare i samband med följande delavsnitt.

Tabell 3.2: Ett urval av material framtagna med Granta EduPack.

Material	PMMA-plast	Silica glas	Polystyrene (PS)	Polycarbonate (PC)	Polyethylene terephthalate (PET)
Rör:					
Ändlock:	Acetal-plast	Aluminium			



Figur 3.2: Akryl-rör tillsammans med ändkåpor i aluminium. Notera att akryl-röret i illustrativt syfte är mycket kortare än vad det avses att vara.

## Design och konstruktion av rör

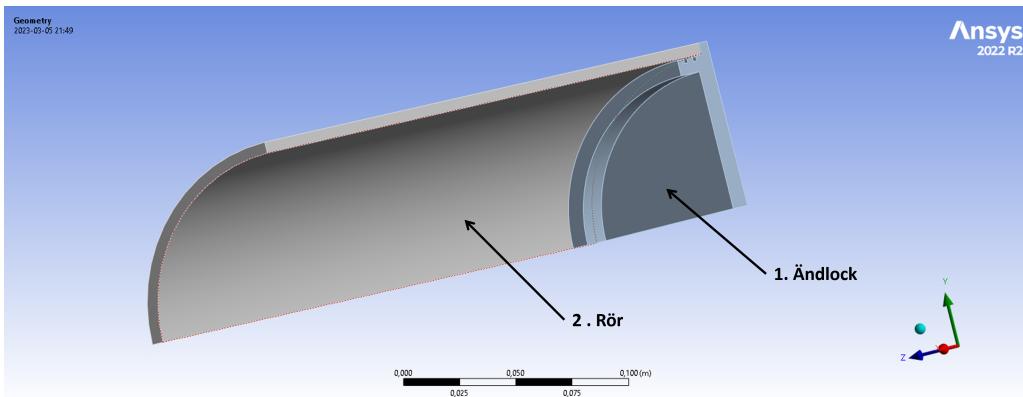
Att använda ett symmetriskt rör ansågs innehålla flera fördelar; däribland att de inre komponenterna kunde bytas ut eller byta ordning utan behov av större rekonstrueringar med avseende på skrovens utformning. Rörets längd kan dessutom justeras för att anpassas efter de ingående komponenternas dimensioner. Vidare innebar det också att projektgruppen kunde prioritera tid på de ingående komponenterna och rörets hållfasthet, snarare än att utforska alternativa typer av utformningar på röret. Sist men inte minst är ett symmetrisk

rör mycket enklare att tillverka och finns också i större utsträckning i lager hos återförsäljare vilket skulle underlätta vid konstruktionen av projektgruppens prototyp.

## Designoptimering med hjälp av Ansys Workbench

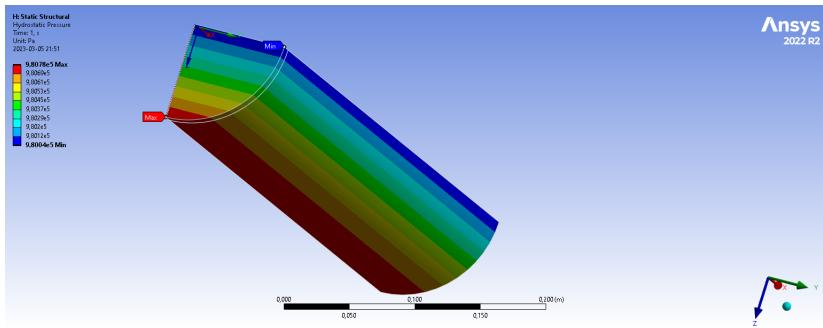
Ett vattendjup på 100 meter motsvarar ett tryck på 1 MPa. För att undersöka huruvida designen håller för vattentrycket vid 100 meters djup, genomförde projektgruppen simuleringar i programmet *Ansys Workbench*. Simuleringarna har använts iterativt där olika designer och materialval har alternerats för att undersöka hur spänningskoncentrationer, säkerhetsmarginaler, deformationer och knäckfall varierar.

En utmaning vid simuleringar av fritt flytande kroppar i ett medium är att det är svårt att hitta lämpliga punkter för att införa fästpunkter. Utan fästpunkter kan inte *Ansys* genomföra simuleringarna på grund av att kroppen förflyttas. Doktorandstudenten Eric Voortman Landström, som rådfrågades av projektgruppen, uppmanade att dela upp geometrin för att kunna utnyttja symmetri (Voortman Landström, [12-03-2023](#)). Inledningsvis undersöktes skrovet, bestående av ett rör och en ändkåpa, uppdelat i en åttodel, se figur 3.3

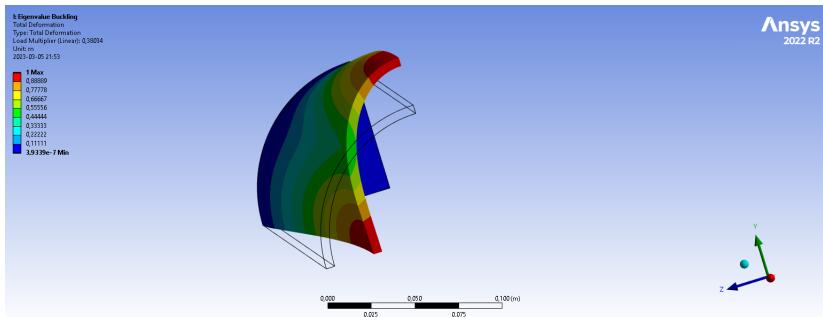


Figur 3.3: En åttodel av rör tillsammans med ändlock

Materialet PMMA prioriterades vid simuleringarna på grund av att projektgruppen hade etablerat en god kontakt med en leverantör med PMMA-rör i rätt dimensioner. Från simuleringen kunde det konstateras att säkerhetsfaktorn för spänningar uppgick till 4,46, vilket ansågs tillfredsställande. Däremot ger variationerna i det hydrostatiska trycket upphov till att det är lite högre tryck på undersidan av skrovet/röret än översidan, vänligen se figur 3.4. Därav undersöktes även eventuella knäckfall, det kunde då konstateras att röret skulle knäckas omedelbart (load multiplier = 0,38). Load multiplier, eller lastmultiplikator på svenska, är en faktor som skalar den applicerade belastningen på strukturen tills den kritiska buckling-belastningen uppnås. Vänligen se figur 3.5.

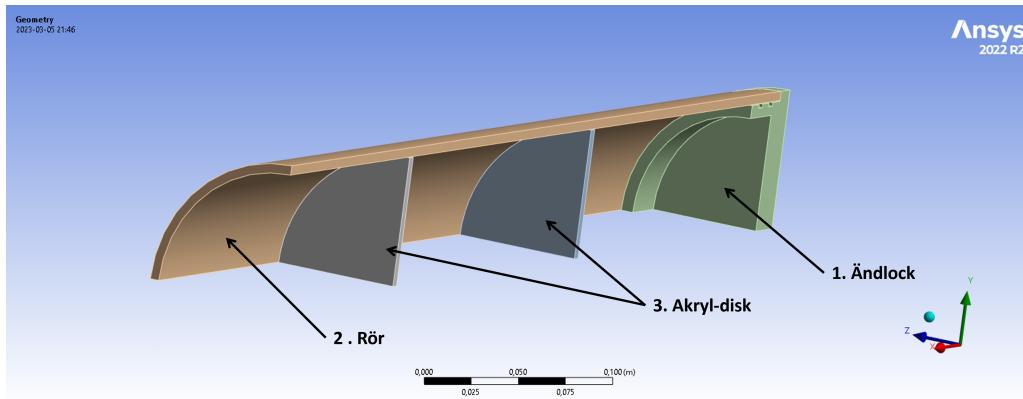


Figur 3.4: Illustration av hur det hydrostatiska trycket varierar över röret. Vattenytan är placerad i negativt z-led.



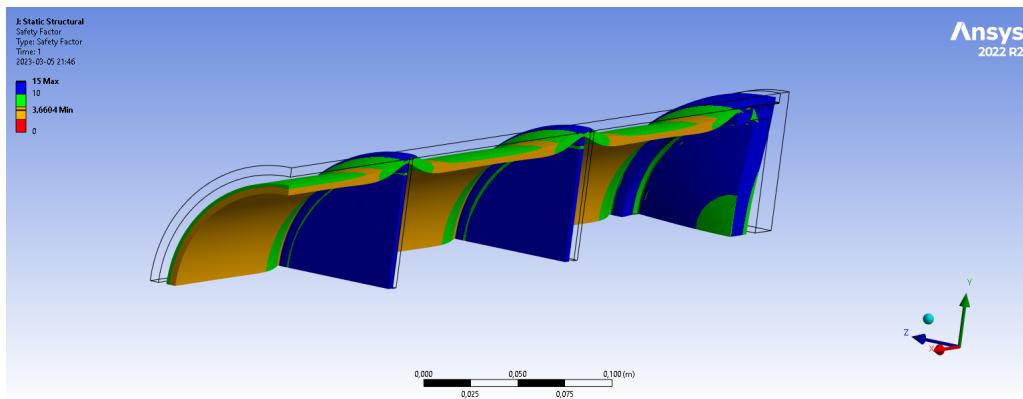
Figur 3.5: Knäckfall för simulering nr 1. (Mod 1). Load multiplier = 0,38.

För att undgå knäckning utforskades det olika lösningar gällande geometrin, då projektgruppen gärna behåller som preliminärt materialval på grund av dess tillgänglighet i närområdet. I samband med att rörets simuleringar genomfördes undersöktes även den inre strukturen i röret. För att skapa en modulär och anpassningbar glider undersöktes idéen att förse den inre strukturen med flera 4 mm tjocka diskar av akryl, se figur 3.6. Diskarna skulle i sin tur användas för att montera de ingående delarna i farkosten. Dessa diskar implementerades i simuleringarna och det visade sig att diskarna stödjer röret avsevärt gällande knäckfallen, trots att diametern på akryldiskarna är 1 mm mindre än rörets innerdiameter. Vid simuleringen placerades diskarna på 200 mm avstånd från varandra.

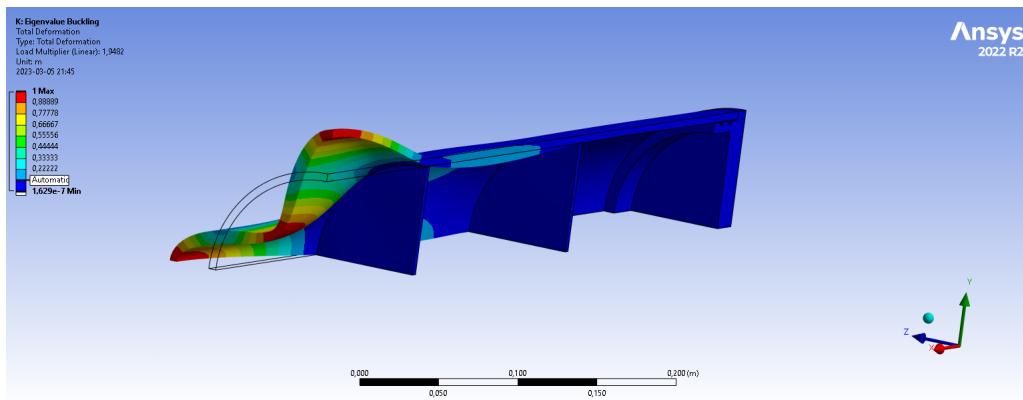


Figur 3.6: Geometri med interna akryldiskar.

Efter flera iterativa simuleringar kunde det konstaterats att säkerhetsmarginalen för spänningarna hade minskat till 3,66. Däremot hade load multipliern i knäckfallssimuleringen ökat till 1,94 vilket ansåg vara mycket positivt och tillfredsställande. Se figur 3.7 respektive 3.8.



Figur 3.7: Säkerhetsmarginal illustrerad över röret med interna akryldiskar. Säkerhetsmarginal = 3,66.



Figur 3.8: Knäckfall vid simulering med interna akryldiskar. Load multiplier = 1,94.

Utifrån ovan nämnda simulering kunde projektgruppen dra slutsatsen att det fungerar att använda PMMA-plast för röret. Övriga material simulerades inte främst på grund av materiallets goda tillgänglighet via projektgruppens leverantörskontakt men också på grund av att det var extremt tidskrävande att genomföra simuleringarna. Materivalet påverkar även den inre konstruktionen eftersom det krävs akryl-diskar internt, mer om detta i avsnitt [3.2.3](#). Utifrån simuleringarnas resultat beslutades det att gå vidare med PMMA-plast som materialval för röret.

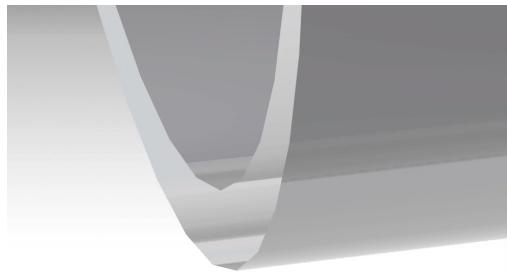
## Design och konstruktion av ändkåpor

Vid utveckling av skrovets ändkåpor behövdes flera funktioner och syften tas i beaktnings. De behöver dels täta mot vattenintrång och måste även understödja röret strukturellt vid ändarna. Ändkåporna huserar även alla anslutningar av kablage och liknande mellan skrovets interna och yttre delar.

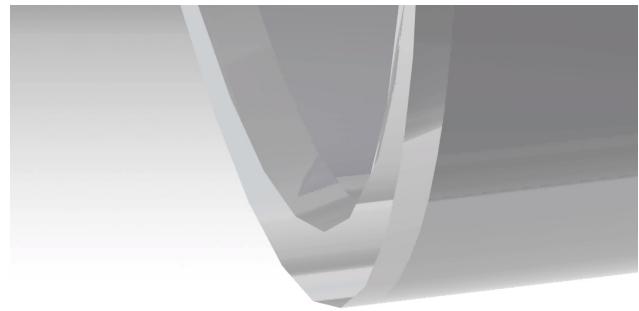
För att kåporna ska kunna monteras och demonteras från röret undersöktes olika tätningar. Vid ett studiebesök hos Voice of the Ocean kunde det konstateras att den glider de använder sig av (Seaexplorer) använder o-ringar för att täta deras skrov (Petersson, [20-02-2023](#)). På bilder uppladdade av Rutgers University Center for Ocean Observation Leadership kunde det observeras att o-ringar används som tätmetod även på en annan kommersiell glider från företaget Slocum **infoga källa till länk**. Projektgruppen valde därför att också använda o-ringar, men ändå tog beslutet att använda två o-ringar per ändkåpa, eftersom det ökar säkerheten om en o-ring skulle gå sönder i monterat läge.

Vid utformning av spåren i ändkåporna för o-ringarna behövde tätningarnas töjning samt ihoppressning beräknas. Beräkningarna samt resultaten för o-ringsdimensioneringen kan ses i bilaga [C](#).

I samband med att beräkningarna gällande o-ringarna utfördes konstaterades det att röret behöver fasas av för att inte o-ringarna ska riskeras att skadas i samband med montering. För att kunna bearbeta röret utvecklades ett verktyg med syftet att stödja vid filning med handhållen fil. Enligt **infoga källa till gubbarnas datatablad** ska röret fasas av mellan  $15\text{--}20^\circ$  för montering av o-ring. Därav beslutades det att fasa av röret  $17,5^\circ$ . Verktyget fästs mot kanten av röret och tillhandahåller ett spår/skena för att användaren ska kunna få stöd i rätt vinkel i samband med manuell filning. Se figur [3.9](#) för illustration av avfasat rör samt figur [3.10](#) för en bild av verktyget. Verktyget skrevs ut med 3D-printer och visade sig fungera mycket bra.



(a) Rör utan fas.



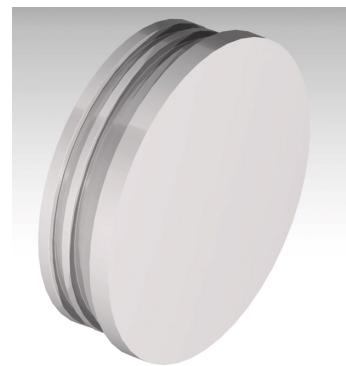
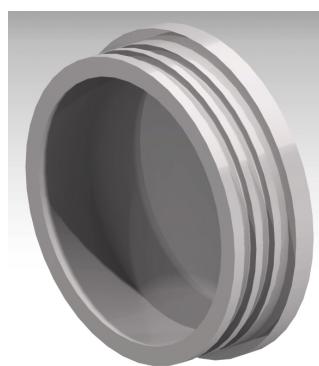
(b) Rör med fas.

Figur 3.9: Illustrations av skillnaden mellan ett icke fasat rör och ett fasat rör. Nödvändigt vid montering av O-ringar.



Figur 3.10: Verktyg för att assistera vid handhållen filning i syfte att fasa av röret  $17,5^\circ$ . Verktyget fästs med 2 stycken buntband, ett i vardera rektangulära hål i verktyget

Ändkåporna designades med ovanstående information i åtanke, se figur 3.11. Grundgeometrin skulle senare visa sig behållas. Däremot genomfördes mindre justeringar av designen i samband med simuleringar, se avsnitt 3.2.2.



Figur 3.11: Initial design av ändlock

## Designoptimering med hjälp av Ansys Workbench

För att säkerställa att locken kan motstå tryck har det genomförts flera ANSYS-simuleringar och iterationer av designen samt materialval. Ursprungligen undersöktes POM/acetal-plast på grund av att företaget PlastMästarn, som tidigare levererat akrylröret till projektgruppen, rekommenderade det. Initialt såg även prisbilden god ut, och på så sätt går materialvalet i projektets linje där viss kostnadseffektivitet är i fokus. Acetal är även enkelt att bearbeta och det korroderar inte.

### Test av gängor:

Innan simuleringar gällande acetal påbörjades undersöktes det först hur väl det gick att dra och montera i gängor. Flera olika typer av komponenter och anslutningar fästs i ändkåporna och förlitar sig på dess skruvförband. Det är därför viktigt att det går att dra gängor som håller. För att testa detta borrades och gängades flera M5 och M3 hål i en provbit. Se figur 3.12. Gängorna kändes robusta och starka, ett enklare dragprov utfördes för hand och gängorna försöktes dras sönder genom att använda ett för högt åtdragningsmoment. Testet resulterade i slutsatsen att det skulle gå bra att gänga acetalplasten.



Figur 3.12: Test av gängor i acetal-plast. Gängstorlekarna M3 och M5 testades.

Vidare utfördes simuleringar i ANSYS. Arbetet genomfördes iterativt, och konstruktionen anpassades mot en säkerhetsmarginal på minst 2. För att uppnå en sådan säkerhetsmarginal krävdes en godstjocklek på 18 mm, vilket tyvärr var för grovt för de tätande anslutningar som redan beställts från Blue Robotics (Robotics, [u. å-b](#)). Därefter togs beslutet att gå vidare och undersöka andra material än acetal.

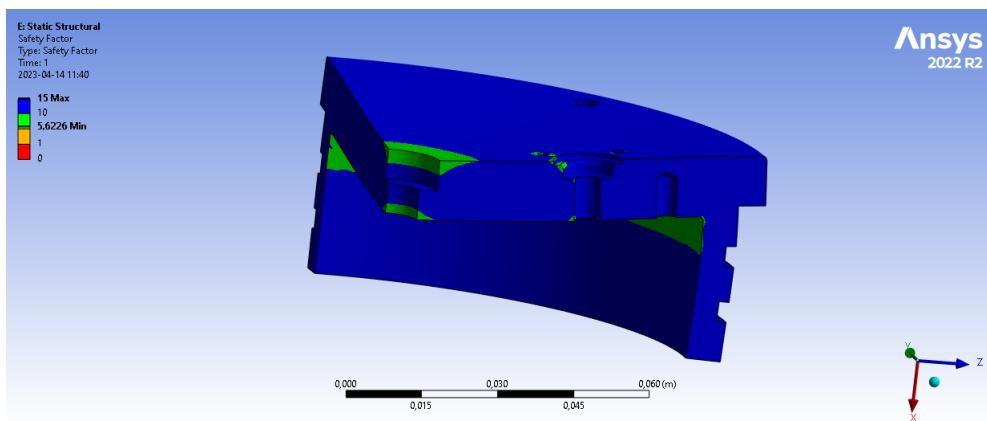
Vidare undersöktes aluminium; goda hållfasthetsförmågor tillsammans med låg densitet ansågs vid första anblick vara ett mycket bra materialval. Risken för korrosion, samt komponentens något mer begränsade bearbetningssbarhet ansågs dock vara något utmanande.

Med hjälp av ANSYS itererades designens godstjocklek vidare. I tabell 3.3 presenteras de legeringar som undersöktes iterativt.

Tabell 3.3: Legeringar som undersöktes vid simuleringar i ANSYS.

<b>Aluminium legering:</b>	SS4120-02	SS5052	SS6082 T6
----------------------------	-----------	--------	-----------

Slutligen indikerade simuleringarna att 12 mm var en optimal tjocklek, bäst säkerhetsmarginal uppnås med legeringen SS6082 T6. Säkerhetsmarginalen uppgår då till 5,6 och de tätande förslutningarna från Blue Robotics kan monteras (Robotics, u. å-b). Vänligen se figur 3.13 för en bild ur simuleringen mot säkerhetsmarginal i ANSYS.



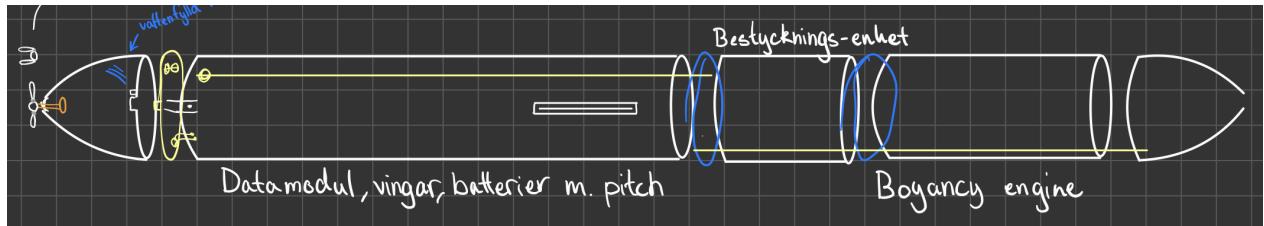
Figur 3.13: Säkerhetsmarginal på 5,6 vid simulerings av endcap i ANSYS. Material: Aluminium SS6082 T6.

Det är genom ändlocken som olika slangar, kablar och anslutningar sitter. Främst för att de vattentäta kopplingar som används inte går att fästa på rörets krökta yta. Följande kopplingar/anslutningar används fram respektive bak i prototypen:

- Anslutning blåsa (fram)
- Trycksensor (fram)
- Anslutning 12V+ (bak)
- Anslutning jord (bak)
- 2st anslutningar mellan Arduino och kontroll (bak)

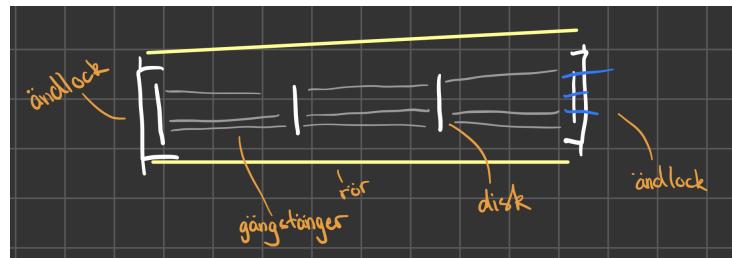
### 3.2.3 Modularitet och intern struktur

Tidigt under projektets gång togs det fram flera olika idéer och koncept gällande farkostens modularitet vid tillfällen för brainstorming-sessioner. Två huvudsakliga koncept övervägdes. Det första baserades på idén att farkosten delades upp i olika moduler. På så sätt skulle modulerna bytas ut baserat på uppdraget, se figur 3.14.



Figur 3.14: Olika moduler som tillsammans skapar en farkost. Tidig konceptskiss.

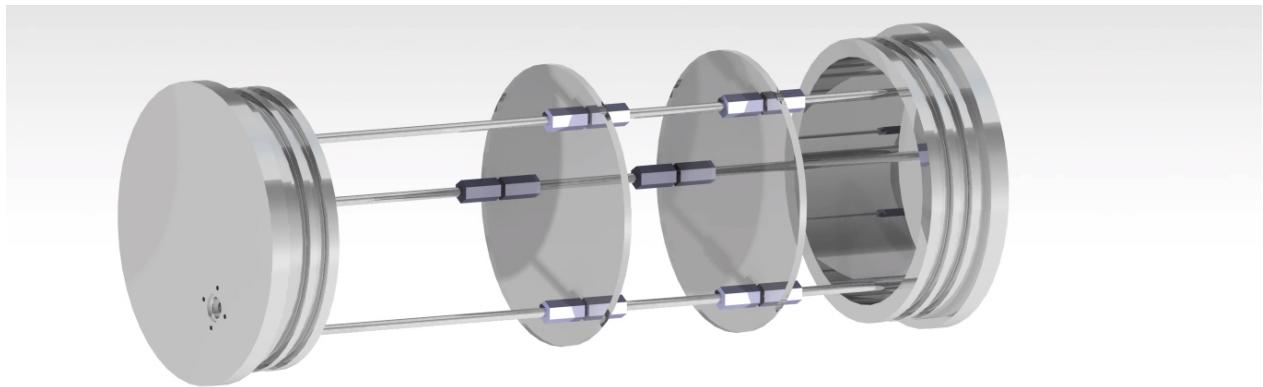
Det andra huvudsakliga konceptet som genererades var att använda sig av diskar sammankopplade av gängstänger. På så sätt skulle hela innanhöljet dras ut och in i röret i ett svep. Se figur 3.15.



Figur 3.15: Diskar sammankopplade av gängstänger skapar en gemensam enhet.

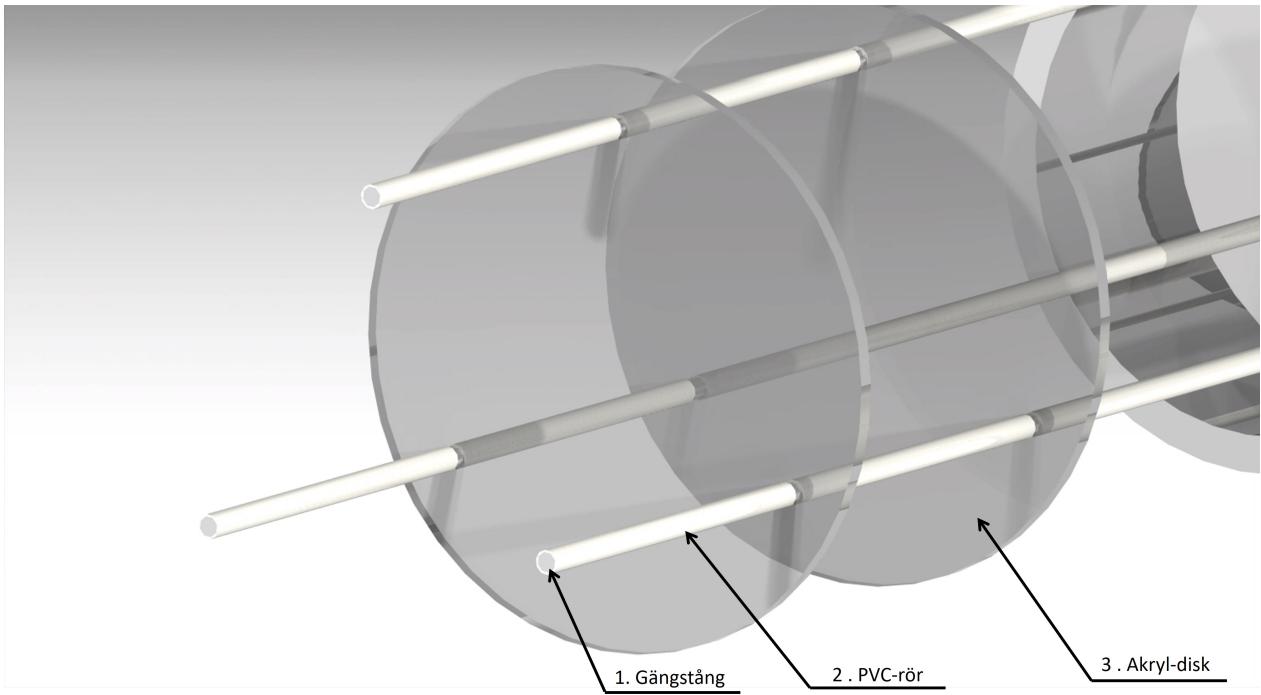
Eftersom den interna strukturen utvecklades parallellt med produktens delsystem – vars dimensioner och utformning fortfarande var under utveckling – prioriterades det senare konceptet då det ansågs ge upphov till maximal flexibilitet.

Syftet med den interna strukturen är att möjliggöra montering av farkostens delsystem. Projektgruppen vidareutvecklade det senare konceptet till en struktur där skivor, med samma diameter, monteras längs med tre gängstänger och läses fast med hjälp av muttrar, se figur 3.16. Skivornas position på gängstängerna kan därefter justeras beroende på delssystemets storlek. En laserskärare användes för att tillverka skivorna och på så sätt kunde nya skivor snabbt skäras ut i samband med att övriga ingående delsystem vidareutvecklades.



Figur 3.16: Gängstänger och muttrar används för att hålla diskarna på plats. Notera att inget rör illustreras i figuren.

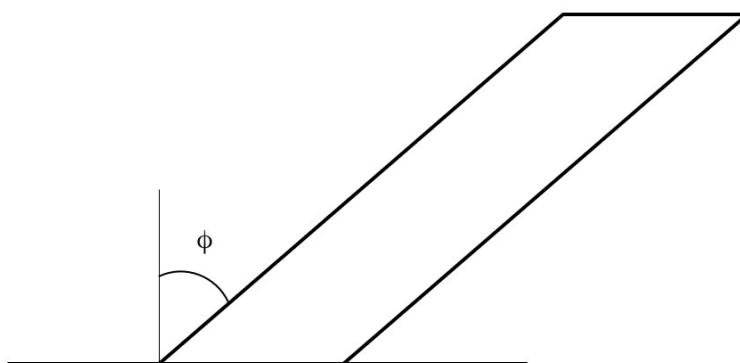
En potentiell risk som upptäcktes i samband med de initiala testerna var att muttrarna risikerade att vibrera loss från sina ursprungliga lägen i samband med att de olika motorerna var i drift. För att lösa det problemet beslutades det att montera smala PVC-rör i varierande förbestämda längder ovanpå gängstängerna. Se figur 3.17. Rören är färdigskurna till specifika längder och håller därmed inte bara muttrarna på plats utan de underlättar även vid montering. Det går inte bara snabbare då muttrar inte behöver skruvas in på stängerna, utan det elimineras samtidigt behovet att vid varje montering måtta in korrekt avstånd mellan diskarna och således komponenterna i glidern. Här kan istället rörbitarna färg-/sifferkodas och enkelt monteras i rätt ordning.



Figur 3.17: PVC-rör används för att hålla diskarna på plats. Notera att inget rör illustreras i figuren.

### 3.2.4 Vingar

Utdrömningen av vingarna beror på vilken miljö farkosten ska användas i. En svepvinkel, se  $\phi$  i figur 3.18, på  $7^\circ$  ger den längsta glidtiden,  $35^\circ$  ger den bästa svängförmågan och  $60^\circ$  ger det bästa motståndet mot strömmar i vattnet (Wang m. fl., Nov. 2022). Med kravspecifikationen som utgångspunkt valde projektgruppen en svepvinkel på  $45^\circ$ , eftersom det ger en blandning mellan bästa manövrerbarheten och motståndet med strömmar. Dessutom är  $45^\circ$  en bra vinkel för att minimera risken att tång fastnar i vingarna (Webb m. fl., 2001).

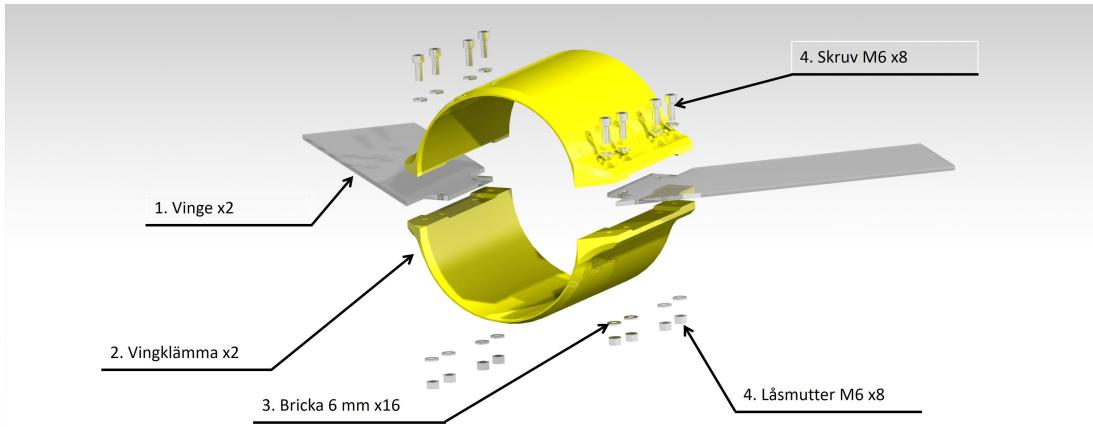


Figur 3.18: Bild över vinge, där  $\phi$  är svepvinkeln.

### 3.2.5 Hölje och modularitet - Resultat

#### Vingar - Resultat

I figur 3.19 visas ett vingfäste. Vingklämmorna (komponent nr.2 i figur 3.19), monteras först runt skrovet med hjälp av skruvförband. Därefter kan vingarna (komponent nr.1 i figur 3.19) monteras i ett spår, som finns i vingklämmorna, med skruvförband. Detta för att kunna demontera vingarna under transport på land utan att påverka vingklämmornas position på skrovet.



Figur 3.19: Fäste för vingar, som sedan kläms på skrovet.

## 3.3 Flytkraftsmotor

En gliders flytkraftsmotor bör designas och dimensioneras efter noggrann utvärdering av dess storlek, dyktid, användningsmiljö och kundens individuella krav. De krav som tidigare diskuterats i avsnitt 1.1 användes därav som beslutsunderlag när flera möjliga varianter undersöktes. Några olika typer av flytkraftsmotorer undersöktes i syfte att avgöra vilken sort som var bäst lämpad för projektets syfte och som samtidigt var möjlig för gruppen att framställa.

### 3.3.1 Kolv-cylinder baserad flytkraftsmotor

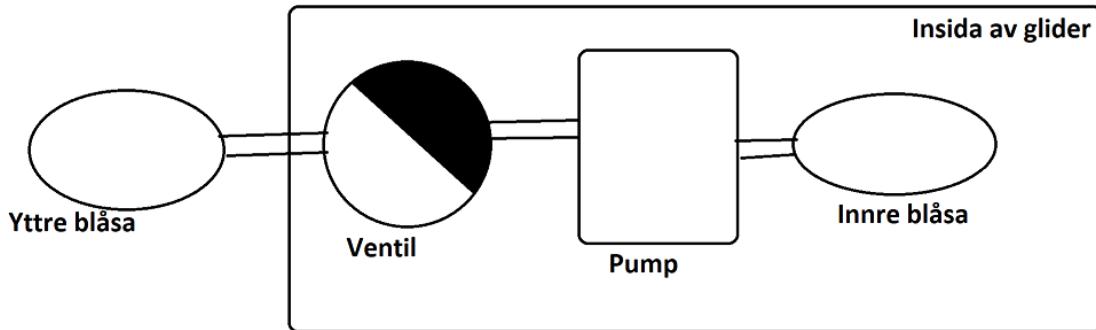
En principiell enkel lösning är att använda en kolv-cylinder-baserad flytkraftsmotor. En cylinder skulle då placeras längst fram på glidern med en kolv som avgränsar insidan av glidern mot vattnet på utsidan. Genom att ändra positionen på kolven går det att justera den undantryckta volymen  $\Delta V$  (se ekvation 2.1). En stor fördel med denna lösning är att det enkelt går att ha koll på hur mycket vatten som trycks undan eftersom kolvens position är enkel att mäta. Svårigheterna med denna lösningen är dock att få 100 % täthet mellan kolven och cylinder utan att orsaka stor friktion.

Ytterligare en svårighet som upptäcktes med denna lösning var drivningen av kolven. Ett

linjärt ställdon undersöktes men förkastades, då dessa blir stora när de ska kunna trycka undan vatten på det tryck som glidern ska klara. Efter konsultationen med konstruktionsexperter uppmärksammades även svårigheterna med att rikta kolvdelen och ställdonet exakt lika, samt svårigheten med att tillverka en sådan kolv. Ytterligare nackdelar med denna lösning var att det linjära ställdonet skulle ställa stora hållfasthettskrav på den inre strukturen eftersom den skulle behöva trycka med en kraft på uppskattningsvis 5 kN vid maximalt djup. Kraften kunde minskas genom att sänka diametern på cylinder men det medförde att cylindern behövde vara längre för att behålla samma volym. Ställdonet blev då också större om större slaglängd krävdes. Slutligen förkastades denna lösning eftersom dess nackdelar övervägde fördelarna.

### 3.3.2 Oljebaserad flytkraftmotor

En oljebaserad flytkraftsmotor justerar den undantryckta volymen genom att förflytta olja från en blåsa på insidan av glidern till en blåsa på utsidan. Detta genomförs med en pump och vidare stoppas oljan på utsidan att tryckas tillbaka till insidan av trycket med en ventil som placeras innan pumpen. Olja används i systemet eftersom den har en lägre densitet än vatten ( $\rho_{olja} \approx 800 \text{ kgm}^{-3}$ ). I figur 3.20 illustreras den principiella uppbyggnaden av en oljebaserad flytkraftsmotor.



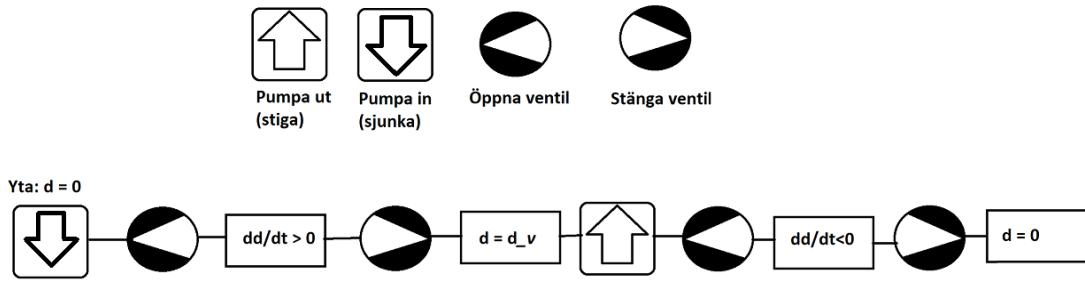
Figur 3.20: Översikt av hur flytkraftsmotorn kommer att vara uppbyggt

Fördelen med detta system är att det endast uppkommer en tryckgradient vid ventilen och pumpen. Detta är optimalt då dessa komponenter är väl lämpade för att hantera tryckgrader. Vidare tar denna lösning ganska lite plats och kan placeras ganska fritt inom glidern med slangar som sammankopplar de ingående delarna. En stor fördel är också att oljan naturligt vill strömma in till gilderns insida på grund av det höga trycket utanför glidern. Detta gör att det endast är nödvändigt att pumpa oljan i en riktigt och enbart öppna valvet för att oljan ska transporteras i andra riktningen. Detta är väldigt fördelaktigt då det spara väldigt mycket energi. Noterbart är dock att behov av att pumpa oljan i båda riktningarna fortfarande återfinns. Detta då det ska bara möjligt att nå neutralt flytförmåga vid ytan där trycket utanför glidern är lågt.

En nackdel med denna lösning är att den ställer höga krav på pumpen som behöver ha

ett lagom flöde och kunna jobba mot ett ganska högt tryck. Vidare behöver blåsorna vara placerade så att oljan alltid kommer att ha kontakt med mynningen och då kan förflyttas från blåsan.

När glidern ska dyka kommer pumpen att sättas igång och ventilen öppnas. För att hinna bygga upp ett tryck som kan motstå det utomstående vattentrycket är det fördelaktigt om ventilen öppnas strax efter att motorn till pumpen har startat. Detta kan åstadkommas med kod eller med en kondensator som sitter innan ventilen. I figur 3.21 följer ett flödesschema över vilka steg som ingår i ett dyk.



Figur 3.21: Flödesdiagram för flytkraftsmotorn under ett dyk. Djupet under vattenytan betecknas  $d$ .

Ett problem med detta system är att det inte kommer att vara möjligt att veta volymen olja i respektive blåsa. Eftersom pumpen förflyttar olika mängder vätska beroende på vilket tryck som den arbetar mot går det inte att anta ett konstant flöde för alla djup. Det är heller inte möjligt att anta att flödet beror linjärt på trycket, då många andra faktorer spelar in i mängden flöde. Eftersom det krävs många omgångar pumpande för en mätning skulle ett litet fel i uppskattningen av flödet kunna leda till att för mycket olja pumpas i någon riktning. Detta kan leda till att glidern inte får den flytförstågan som önskas eller att någon av blåsorna går sönder. Med större och mer avancerade program hade denna lösning säkert kunna fungera bra, men enkelheten i att istället bevaka den vertikala hastigheten bedöms överväga detta.

Sammantaget identifierades den oljebaserade flytkraftsmotorn som det bättre alternativet och togs ensamt vidare för utveckling och dimensionering.

### 3.3.3 Flytkraft och oljemängd

I planeringsrapporten gjordes en simulering för hur blåsvolymen skulle påverka den vertikala hastigheten i vattnet. Med denna framkom det att ca en liter skulle vara en fullt tillräcklig volym för att få önskvärda resultat. Vid studiebesöket på VOTO framgick det däremot att deras glider, som var tyngre än vad detta projektets, pumpade en betydligt mindre mängd olja (Petersson, 20-02-2023). Det beslutades då att mer tid skulle läggas på att ge glidern en neutral flytkraft i normalfallet i utbyte mot att ha en mindre oljemängd att förflytta.

### 3.3.4 Pump och dimensionering

Pumpen är en av en gliderns mest kritiska komponenter, eftersom det generellt är den mest energikrävande komponenten (Petersson, 20-02-2023). Den behöver också vara tillförlitlig och vara relativt kraftfull för att klara att pumpa mot det externa vattentrycket. Utifrån dessa krav identifierades pumptypen positive-displacement pump önskvärd på grund av dess energieffektivitet vid högre tryck samt god funktion med viskosa fluider (Engineers, 2023). Denna pumptyp kan dessutom arbeta i två riktningar, vilket krävs för projektets tillämpning. Pumpen bör också ej ha en övertrycksventil, eftersom pumpens arbetstryck kommer variera under körningen. Nackdelen med detta är dock om det skulle bli fel där pumpen körs och ventilen inte öppnas. Det hade i värsta fall lett till oljeläckage men risken för den typen av fel ansågs försumbart.

Med bakgrund i tillförlitligheten och tillgängligheten vid lämpligt tryckintervall en kuggjhulspump, en komplett sådan beställdes med en färdigmonterad motor. Detta minimerade komplexiteten vid installation och garanterade tillförlitlighet.

### 3.3.5 Pumpstyrning

Till en börjar var tanken att styra pumpen med en ESC, (electronic speed controller). Vid test av en ESC från pumpens tillverkare gick denna ändå sönder. Denna lösning förkastades då för att istället försöka bygga en egen H-brygga. Även detta misslyckades då det gick för mycket ström genom de transistorer som vi hade beställt.

Eftersom ingen reglering av hastigheten behövs användes till slut relän för att kontrollera polaritet och ström som nu enbart hade två lägen vardera.

### 3.3.6 Blåsor, rörsystem och kopplingar

Som medium i flytkraftsmotorn valdes hydraulolja. Detta eftersom det är enklare att handskas med än luft eller gas som inte går att förvara i flytande form och som dessutom är kompressibelt under tryck. Olja har även en lägre densitet än vatten, vilket gör att den kommer att ha en större effekt på flytkraften när den förflyttas. Vidare finns det många komponenter som är gjorda för att förflytta och förvara hydraulolja. Till en början testades olja med graderingen ISO VG 116, som har hög viskositet. Med en så trögflytande olja gick det långsamt för pumpen. Det valdes då att istället använda olja som var graderad till ISO VG 32 som hade en lägre viskositet och gick lättare att pumpa.

De slangar som oljan transporteras i är vanliga plastslangar, vilka – precis som övriga kopplingar i metall – ska klara minst 10 bar. Kopplingarna valdes ut genom att i butiken Dunlop Hiflex pröva ut kopplingar som till slut fick hela systemet att gå ihop. Slangen som gick från ventilen till den yttre blåsans penetrator gick att skruva fast på penetratorns gängning och ett buntband sattes sedan runt den kopplingen för att säkra den. Från ventilens ända placerades några kopplingar som avslutades med en fjädrad klämkoppling, i vilken slangen klämde fast. På andra sidan placerades en likadan fjädrad klämkoppling som klämde fast den mindre slangen till pumpen. På pumpen trädde slangen med visst våld över nipplarna

som satt på pumpen. Dessa spändes sedan åt med buntband som drogs åt med hjälp av en tång. Kopplingen på pumpen såg likadan ut från båda hållen och slangen kopplades till blåsan med en penetrator där en fjädrad klämventil klämde fast slangen.

När blåsorna skulle väljas betraktades först de krav som ställdes på de. Eftersom mediet på båda sidor om blåsorna alltid har samma tryck kommer blåsorna i sig aldrig uppleva någon tryckgradient. Detta gjorde att de bara behövde vara vattentäta. Vidare behövde de rymma 5 dl och kunna ändra volym efter hur mycket olja som de innehöll. Valet föll då på att använda kondomer eftersom dessa var billiga och relativt enkla att komma åt. Alternativet kontra kondomerna var att beställa oljeblåsor av tjockare gummi som används i hydrauliska oljeaccumelatorer. Dessa hade fördelen av att ha betydligt mer robusta kopplingar och även en mer hållfast och tålig utsida. Dessa valdes bort på grund av lång leveranstid för önskad storlek, det höga priset och dess onödigt stora volym och vikt. Valet att använda kondomer var även fördelakt för att möjliggöra fler tester tidigt i processen. Till dessa blåsor designades även behållare som skyddar blåsornas och upprätthåller dess position.

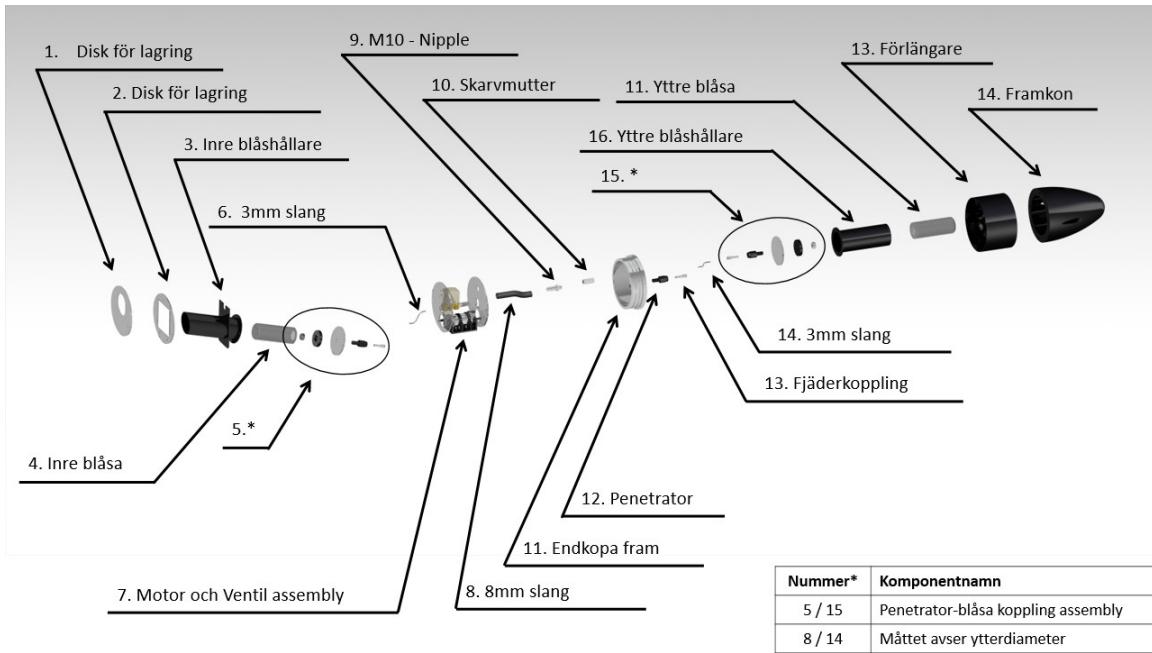
Kopplingen mellan gliderns insida och den vattenfylda frontkonen gjordes genom en penetrator. Penetratorn möjliggör en bra tätning mot vattnet och oljan matas genom penetratorn från ventilen till den yttre blåsan. På insidan används... Från penetratorn på utsidan används återigen...

### 3.3.7 Ventil

Ventilen som används är en spolventil som normalt är stängd med hjälp av en fjäder som trycker ner en spärr till genomflödet. För att öppna ventilen appliceras en ström genom spolen och det skapar ett magnetfält som trycker upp fjädern och då tillåter ett flöde genom ventilen. Den ventil som används är tillverkad för vatten som medium. Då vatten är mer korroderande än olja och har högre viskositet bedöms detta inte vara något problem. För ett mer långsiktigt användande är det troligtvis bättre att använda en ventil som är avsedd olja. Ventilen är tillverkad för att klara 10 bar.

### 3.3.8 Gliderns flytkraftsmotor - Resultat

Nedan i figur 3.22 presenteras en sprängskiss på alla ingående komponenter i flytkraftsmotorn. Diskarna som presenteras i vyn är skurna i PMMA med en laserskärare. Alla svarta delar i figuren är tillverkade genom additiv tillverkning i materialet PLA. Dessa har utvecklats för statisk largning av komponenter och har därför inga ytterligare komplexa funktioner. Dessa hållare lagrar komponenterna med skruvförband där M5 används genomgående. Övriga komponenter kommer beskrivas nedan i större detalj inom respektive område.

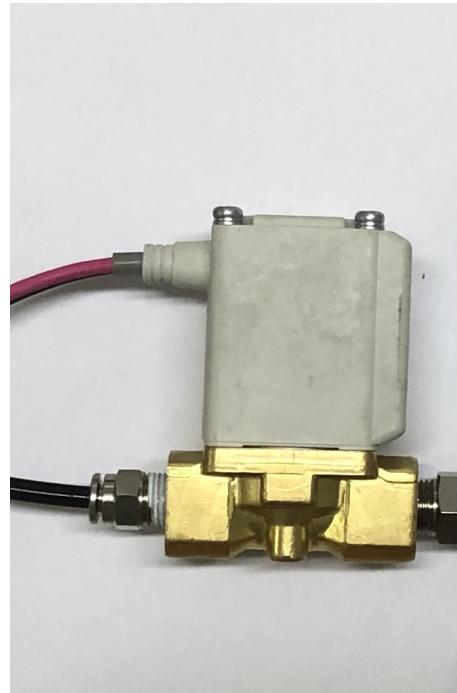


Figur 3.22: Sprängskiss över ingående komponenter i gliderns flytkraftsmotor.

Ventilen som valdes var en normalt stängd SMC spolventil och presenteras i figur 3.23b. Ventilen kräver en spänning på 12 V för att öppnas. Det räckte därav inte att koppla in den direkt på Arduinon som bara ger 5 V. Istället kopplades ventilen parallellt med motorn som också krävde 12 V så att ventilen öppnas när motorn går.



(a) Bortlös motor kopplad med kugghjulspump.

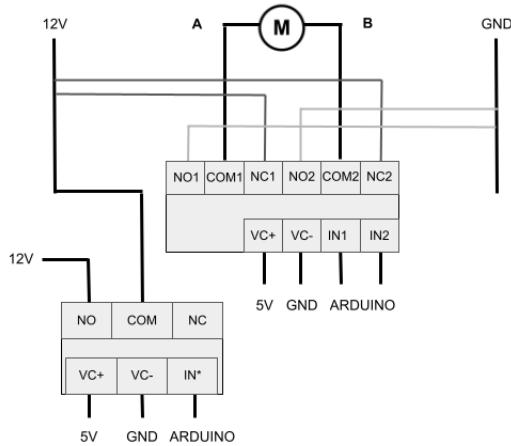


(b) SMC Soleniod ventil, kopplas till slangar på den guldfärgade delen.

Figur 3.23: Visar gilderns ventil och pumpmotor.

Till pumpen valdes en borstad motor från *magomhrc* som var färdigmonterad på pumpen. Den levererades med raka slangkopplingar med en diameter på 3 mm. Tillverkaren påstår att pumpen ska klara av 25 bar men arbetar som bäst vid under 10 bar. Flödet ska då kunna uppgå till 500 ml/min. Dessa begränsningar uppfyller kravspecifikationen som ligger bifogad i bilaga A.

Pumpen drivs av 12 V och kommer alltid att arbeta på högsta fart för att få en effektiv och snabb förflyttning av oljan. Detta åstadkoms genom att använda tre stycken relän som styr om pumpen får ström eller inte, samt vilken polaritet pumpen får. Ett första relä styr om pumpen ska få ström eller inte. Sedan är två relän kopplade till pumpen som styr om strömmen ska gå från pol A till pol B eller tvärt om, se figur 3.24 och tabell 3.4. Reläerna kontrolleras via digitala 5 V portar från arduino. I figur 3.24 demonstreras hur ström fördelar för att styra riktningen som motorn pumpar i.

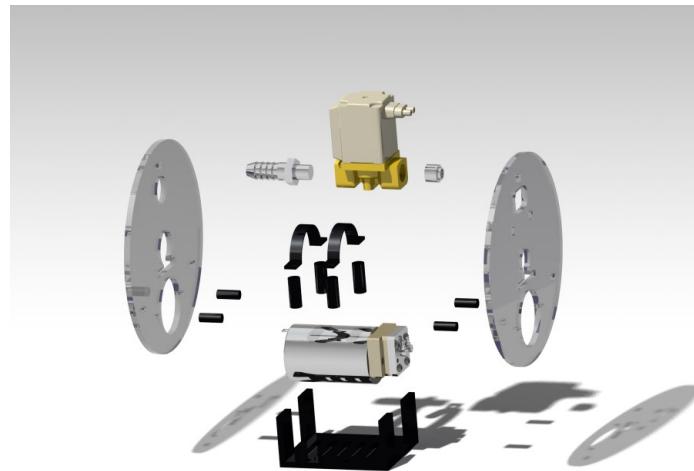


Figur 3.24: Kopplingschema för pumpens reläkoppling

<b>IN*</b>	<b>IN2</b>	<b>IN1</b>	<b>COM2</b>	<b>COM1</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Resultat</b>
IN*=1, 12V on	1	0	-	+	GND	12V	Pumpning in?
	0	1	+	-	12V	GND	Pumpning ut?
IN*=0, GND	0	0	+	+	12V	12V	-
	1	1	-	-	GND	GND	-

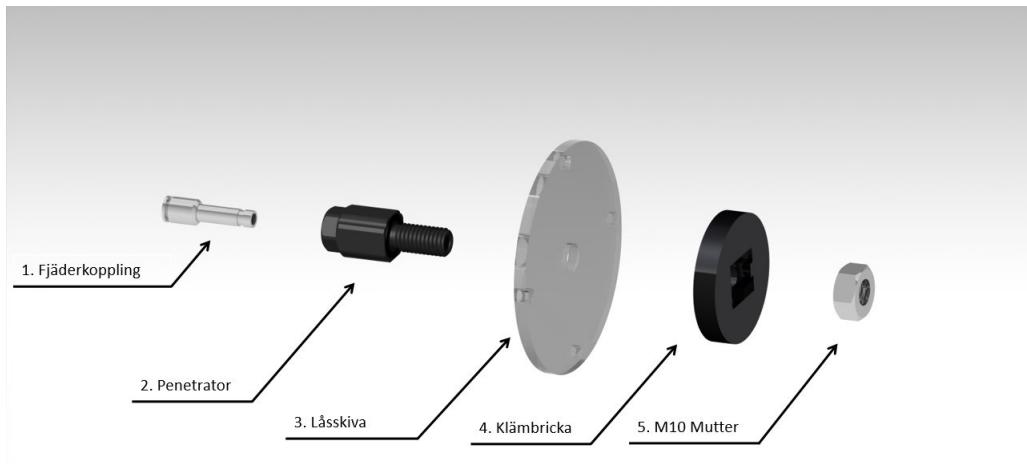
Tabell 3.4: Kombination som kan uppnås med reläkoppling

Under tester av pump och ventil upptäcktes det att pumpen orsakade en del vibrationer och även utvecklade lite värme. Vibrationerna kan påverka andra delsystem i glidern vilket medför att de bör hållas till ett minimum. Det utvecklades därav en vibrationsdämpande hållare för hela pump och ventil assemblyn, se figur 3.25. Vibrationsdämpningen sker genom att pumpen fjädras i diskarna med en gummislang som löper utanför M3 skruvförband. Dämpningen kräver då att gummislangen är längre än förbandslängden vilket då gör att gummit alltid är i kompression och kan absorbera vibrationer.



Figur 3.25: Visar pump och ventil assemblyn.

Kopplingslösningen som används från slang till blåsa visas i figur 3.26. Förslutningen sker genom att penetratorns o-ring om hålls med tryck mot en låsskiva i PMMA. Detta görs genom penetratorns mutterskalle som fixeras i rotation av en 3D-printad klämbricka. Blåsan kan därav läsas genom att dess o-ring träs över muttern och in på baksidan av klämbricka för att därav fixeras med åtdragande av penetratorn. Detta illustras i figur ??.



Figur 3.26: Kopplingslösning mellan slang och blåsa.

## 3.4 Styrning och sensorer

För att styra alla komponenter i glidern valdes mikrokontrollern *Arduino Uno*. Detta för att enkelt kunna ha kontakt med många av de sensorer och motorer som skulle användas utan att dra för mycket energi från batterierna. Vidare saknades djupare kunskaper om styrning

av något slag förutom enstaka inslag i tidigare kurser. Då Arduino är open-source och med en stor användarbas finns det mycket hjälp att tillgå för många olika användningsområden.

Vid framtagandet av koden och kopplingarna med Arduinon testades först varje sensor eller motor var för sig innan de stegvis integrerades med resten av koden.

### 3.4.1 Styrning och sensorer - Resultat

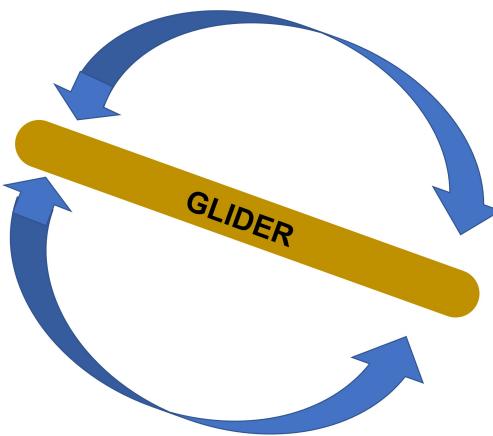
All styrning av glidern gjordes genom Arduinos som tolkade inställda lägen på kontrollen och sedan styrde gliderns funktioner utefter det. Alla ingående delars elektronik kopplades med CAT6 ethernetkablar. Dessa är fastlödda på kopplingsbrädor som sattes ovanpå båda Arduinos.

De sensorer som glidern blivit utrustad med är en trycksensor och ett gyroskop, båda dessa kopplades till Arduinon med I2C som möjliggör att använda många flera sensorer samtidigt då varje sensor får en egen adress istället för en egen pin där den avläses. Värdena från sensorerna uppvisades sedan på en skärm som även den var uppkopplad med I2C för att informera om gliderns vinkel och djup.

Med kontrollen som syns i figur 3.29 går det att välja om glidern ska pumpa in eller ut, om den ska justera pitchmotorn manuellt eller automatiskt, om den ska vinklas upp eller ner, hur snabbt motorn ska gå och vilken vinkel rodret ska inta.

## 3.5 Pitchkontroll

Ett kritiskt delsystem i gliderns framdrift är en pitchkontroll. Pitchkontrollen justerar gliderns vinkel mot horisontalplanet, se figur 3.27.



Figur 3.27: Förenklad illustration av pitch-kontrollens funktionalitet.

Syftet med att kunna kontrollera gliderns vinkel mot horisontalplanet är för att vingarna ska kunna driva farkosten framåt i samband med att den sjunker eller stiger. Projektgruppen

bestämde sig tidigt för att detta skulle åstadkommas genom att förflytta farkostens tyngdpunkt längs dess färdriktning.

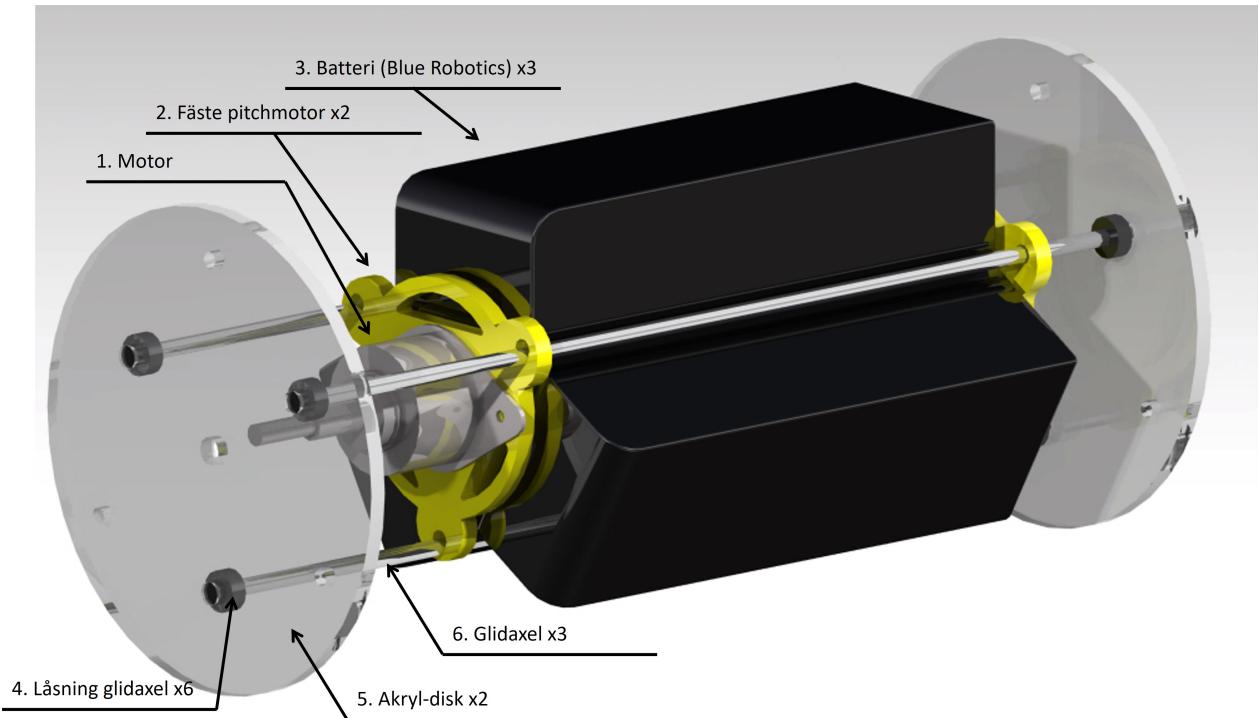
Eftersom pitchkontrollen är avgörande för farkostens framdrift är det av stor vikt att den är tillförlitlig. En enkel konstruktion har därför eftersträvats i samband med utvecklingen. Därför beställdes ett linjärt ställdon från leverantören RS med syfte att tidigt kunna experimentera med olika typer av lösningar. Initialt konstaterades det även att det lämpar sig väl att skriva ut de ingående komponenterna med en 3D-printer eftersom hållfasthetsskraven är låga. Det leder även till en god kostnadseffektivitet.

Designen itererades fram genom flera mindre tester. Det bestämdes tidigt att de tilltänkta batterierna ska förflyttas i längsled för att i sin tur flytta på farkostens tyngdpunkt. Detta eftersom batterierna ofta är tunga och därmed inte behöver förflyttas lika långt för att skapa samma vridade moment som en lättare komponent. Se avsnitt 3.7 för metod gällande val av batterisystem.

Initialt skrevs följande komponenter ut med syfte att testa passform och monterbarhet. Se figur XX. Det konstaterades att mindre justeringar krävdes för att komponenterna skulle passa i varandra. I övrigt ansågs konstruktionen lämplig och en slutgiltig konstruktion designades.

### 3.5.1 Pitchkontroll - Resultat

Figur 3.28 illustrerar en digital modell av pitchkontrollern. Delsystemet är en billig och enkel konstruktion som med hjälp av ett linjärt ställdon förflyttar de tilltänkta batterierna. Till den fysiska prototypen används dock 3D-utskrivna kopior fyllda med ballast istället för batterier, då strömförsörningen sker externt.



Figur 3.28: Tre stycken exempelbatterier från Blue Robotics (komponent nr.3) illustreras monterade på en konstruktion (komponenterna nr.1 – 2) som i sin tur är upphängd och glider i längsled på tre stycken glidaxlar (komponent nr.6). Den upphängda konstruktionen förflyttas av en pitchmotor (komponent nr.1) och delsystemet i sin helhet fästs med små låsningar (komponent nr.4) i innanhöljets arkitektur (komponent nr.5).

Paketet består utav sju stycken huvudsakliga komponenter, varav sex stycken åskådliggörs i figur 3.28. Batterierna (komponent nr. 3) fästs på en 3D-utskriven triangelformad profil (komponent nr.7). Den triangleformade profilen är i sin tur ihopklämd mellan två stycken fästen (komponent nr. 2). Det ena utav de två fästena huserar ett linjärt ställdon (komponent nr.1 i figur 3.28 komponent nr.05-01 i bilaga B) som i sin tur driver paketet längs med tre stycken glidaxlar (komponent nr. i figur 3.28 komponent nr.05-02 i bilaga B). Vid enklare tester har följande tekniska specifikationer kunnat sammanställas, se tabell 3.5.

Tabell 3.5: Tekniska specifikationer för pitchkontroll.

Hastighet	$\sim 2$ cm/s
Spänning	12 V
Effekt	10 W
Slaglängd	55 mm
Maximal belastning	100 N

## Drivning av motorn

Det linjära ställdon som beställdes, komponent nr.05-01 i bilaga **B**, hade en inbyggd steppermotor och krävde därmed drivning från en extern H-brygga (komponent nr.05-03 i bilaga **B**). H-bryggan implementerades inledningsvis på ett kopplingsdäck, på så sätt skapades en god översikt i samband med att ett kopplingsschema utvecklades. Se bilaga **F**.

## Mjukvara

För att automatisera pitchmotorn så att glidern kan justera batteriets position för att nå en viss vinkel utfördes tester med ett gyroskop. Gyroskopet kopplades till Arduinon med I2C och vinkeln i horisontalled avlästes. Enklare mjukvara behandlade i sin tur vinkel och justerade batteriets position därefter.

## Placering av pitchmotorn

### 3.6 Arduinoprogram och kontroller

Programmet som styr hela glidern skrevs i C++ i scriptredigeraren Arduino IDE. I Arduino IDE finns många funktioner för att ladda ned och använda utomstående bibliotek samt ladda upp kod till Arduinos. Programmet för den första Arduinon, som är kopplat till flytkraftsmotorn, pitchmotorn och trycksensorn samt reglagen för dessa, bestod av flera egenskapade bibliotek som hanterade varje komponent som styrdes. Dessa sammansättades i en main-funktion som anropar funktioner i biblioteken beroende på vilka reglage som är aktiverade.

Eftersom den andra Arduinon enbart styr thrustern och rodret skapades inga egna bibliotek för dessa. Istället styrdes dessa direkt från en main-funktion, där styrningen beror på vilka reglage som är aktiverade.

Utöver detta användes flera open-source bibliotek för att styra bland annat det linjära ställdonet som förflyttar batteripaketet. I bilaga **G** återfinns hela källkoden med alla egenskapade bibliotek för Arduinon. Övriga bibliotek går att hitta på [Arduinos egna hemsida: arduino.cc](#) där det även går att läsa dokumentation på biblioteken.

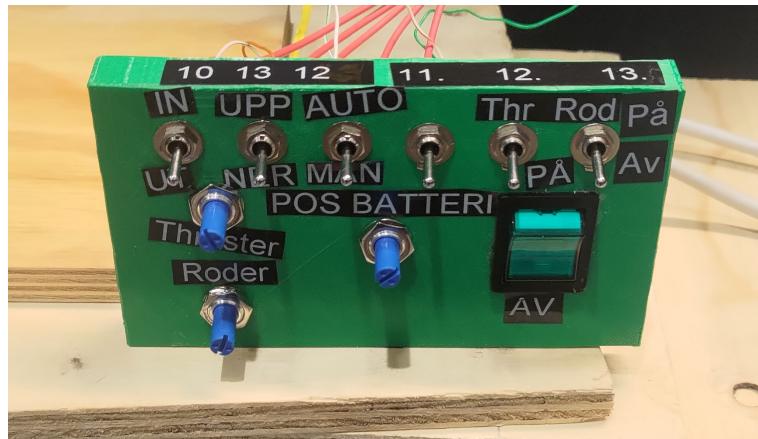
För att kommunicera med båda Arduinos och därmed styra gliderns funktioner byggdes en extern kontroll. Denna består av flertalet vippströmbrytare och potentiometrar som gav Arduinon information om vilka lägen den skulle finna sig i eller i vilken skala någonting skulle uträttas. Dessa listas nedan i tabell **3.6**:

Tabell 3.6: Beskrivning av reglage och dess funktion.

Typ	Funktion	Arduino	Värden
Vippställsbrytare	Pumpriktning	1	Ut/In
Vippställsbrytare	Pumpläge	1	På/Av
Vippställsbrytare	Pitchreglering	1	Manuell/Automatisk
Vippställsbrytare	Pitchreglering automatisk	1	Upp/Ner
Potentiometer	Batteriposition - pitch	1	0 - 100% av längden
Vippställsbrytare	Trusterläge	2	På/Av
Vippställsbrytare	Roderläge	2	På/Av
Potentiometer	Thrusterhastighet	2	0-100%
Potentiometer	Roderposition	2	-30° - 30°

Dessa reglage justeras manuellt av användaren med kontrollen och det finns även en extra vippställsbrytare som är kopplad till Arduino två som kan programmeras till en extra valfri funktion.

Alla vippställsbrytare kopplades till Arduinon parallellt med en  $10\text{ k}\Omega$  pull-down resistans för att säkerställa att Arduinon får ett läge som går till jord när vippströmkontakten är i avstängt läge.



Figur 3.29: Kontrollplatta med etiketter.

Alla knappar märktes och vilken pin de var kopplade till antecknades vid sidan av lådan för att senare kunna felsökas eller kopplas om.

## 3.7 Batterier

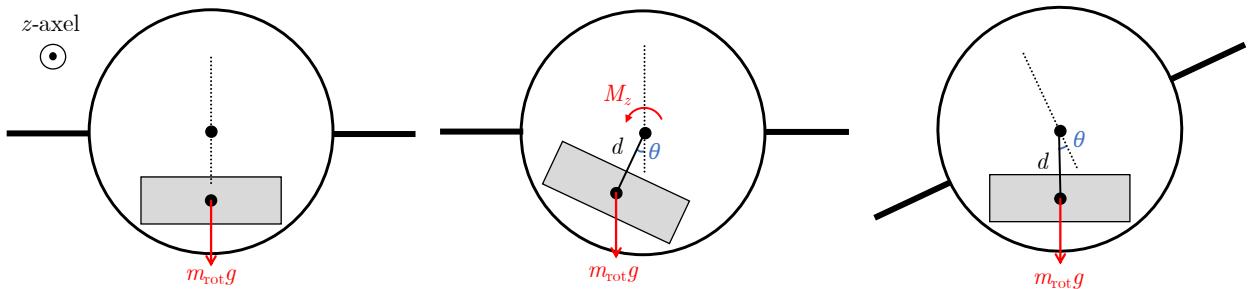
Eftersom gliderprototypen som detta projekt framställer kommer att drivas och styras från land via en säkerhetslinia kommer batterierna inte att finnas på den slutgiltiga konstruktionen. I den CAD modell av glidern som framställs är batterierna däremot med. En uppskattning

var att batterierna skulle behöva ha kapaciteten 30 A h för att kunna ta mätningar i över en vecka. I CAD modellen används batterierna som ballast och de förflyttas av ett linjärt ställdon. Deras vikt används då för att justera gliderns pitch så att den åker horisontellt med önskvärd hastighet. I den verkliga glidern placeras istället ballast i form av vikter på batteriernas plats för att uppfylla samma funktion.

### 3.8 Manövrering i horisontalplanet och design av akter

Då glidern önskas kunna användas i skärgårdsmiljö – en utmanande miljö med många hinder – är ett krav från *REVERE* att glidern har god manövrerbarhet i horisontalplanet. På marknaden idag finns framförallt två metoder för manövrering av gliders och dessa är rotering av intern massa eller ett roder (Barker, 2012). För att avgöra vilken av metoderna som var bäst lämpad för detta projekt gjordes en kortare teoretisk analys, där krav på vattentäthet, liten svängradie, eventuella svårigheter vid konstruktion samt komplexiteten av styralgoritmerna togs i beaktande. Övriga metoder som inte innefattar dessa valdes även att utvärderas hastigt.

Inledningsvis undersöktes hur ett system med rotation av massa skulle kunna leva upp till kraven från *REVERE*. Manövrering av glidern styrs genom att förskjuta dess tyngdpunkt, vilket skapar ett roll-moment,  $M_z$ , kring gliderns längdaxel;  $z$ -axeln i figur 3.30. Momentet ges av  $M_z = d \sin(\theta) \cdot m_{\text{rot}}g$ , där  $d$  är hävarmen,  $m_{\text{rot}}$  är massan som roteras,  $\theta$  är rotationsvinkeln och  $g$  är tyngdaccelerationen. En uppenbar fördel med detta system är att allt sker inom skrovet och det är således helt vattentätt. Dock hävdar (Ribeiro m. fl., 2015), som konstruerat en glider med roterbar massa, att  $m_{\text{rot}}$  behöver uppgå till  $\sim 90\%$  av gliderns totala massa för att överträffa den svängradie som kan skapas av ett roder. Vidare har konventionella gliders med en mindre roterbar massa ofta en stor svängradie på 20–30 m (Davis m. fl., 2003). Att manövrera glidern med ett akterroder kan i stället ge en betydligt mindre svängradie på  $\sim 7$  m (Davis m. fl., 2003). Nackdelen med ett roder är att det ställer större krav på tätningsgraden kring roderaxeln. Sammantaget gjordes bedömningen att en roterbar massa inte skulle ge glidern tillräckligt god manövrerbarhet samt att det skulle vara svårt att konstruera och styra. Glidern manövreras således med ett roder i dess akter.



Figur 3.30: I figuren visas en skiss över hur ett moment kring  $z$ -axeln genereras genom att rotera massan  $m_{\text{rot}}$  en vinkel  $\theta$ . Stegen sker från höger till vänster i figuren.

Utöver rotation av massa och akterroder utvärderades andra – mer okonventionella metoder – för att möjliggöra styrning i horisontalplanet. En design där glidern är uppdelad i två sammanfogade segment och svänger genom en intern led likt en ledbuss (dragspelsbuss) utvärderades. Detta kommer med fördelen att skrovet kan vara helt intakt samt att en god svänggradie troligen hade kunnat uppnåtts. Ur vissa aspekter ansågs lösningen dock problematisk, då ett mjukt rörligt material exempelvis hade haft svårt att stå emot trycket vid djupen som glidern ska kunna operera på. Lösningen bedömdes därmed svår att konstruera och dessutom ansågs den vara platsineffektiv samt problematisk för hydrodynamiken.

Att utrusta glidern med en akterpropeller, som potentiellt skulle kunna vinklas för att tillåta styrning i horisontalplanet utvärderades också. Lösningen är dock beroende av att skrovet penetreras för att tillåta en vinkling av propellern. Denna idé kom att skrotas även då möjligheten att montera av akterpropellern ville hållas tillgänglig. Detta då specifika uppdrag möjliga inte är i behov av denna propeller, att montera av denna sparar då vikt som potentiellt kan ersättas med bestyckning, samt skapar en bättre hydrodynamik som ökar gliderns effektivitet. Det är även motiverat med att glidern bör kunna styras i horisontalplanet även då akterproppellern inte är drift.

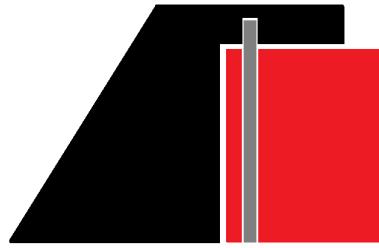
En lösning med en bogpropeller för att styra sig i horisontalplanet diskuterades också. Det största bekymret med denna lösning var att ingen tillräckligt liten och vattentät brushless motor hittades samt att hydrodynamiken förväntades påverkas negativt.

Att glidern skulle manövreras med hjälp av skrovmonterade nedsäkningsbara vattenpumpar var också en idé som utforskades. Lösningen var dock problematisk då den troligen hade varit beroende av många skrovpenetrationer för kabeldragning samt att det hade påverkat hydrodynamiken negativt. Alternativt hade dessa pumpar kunnat tänkas placeras invändigt i glidern, där deras ”in- och utblås” penetrerar skrovet. Detta hade förbättrat hydrodynamiken drastiskt, men krävt en avancerad tätningsprocess och vidare hade pumparna svårt att klara 10 bar.

### 3.8.1 Design av akterroder och kraftöverföring

Akterrodret utformades i huvudsak av en statisk roderdel en rörlig roderdel; svart respektive röd i figur 3.31. För att säkerställa god manövrerbarhet hos glidern placerades rodet vertikalt i överkanten på gliderns akter. Den valdes att placeras i just överkanten för att det ska vara bättre skyddat ifall glidern stöter i botten. Vidare möjliggör placeringen att sensorer eller till exempel en GPS sändare skulle kunna placeras i rodrets statiska del, något som gjorts av det kommersiella företaget Slocum (Barker, 2012).

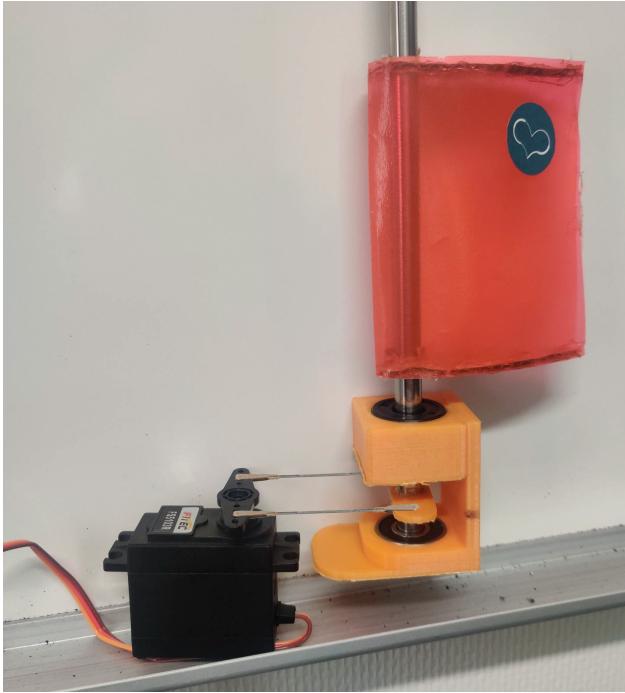
För att rotera rodet krävs en motor med god kontroll över dess position och därfor utvärderades alternativ med en stegmotor och med en servomotor. En nackdel med en servomotor jämfört med en stegmotor är att servomotorn kräver ström för att upprätthålla ett moment. Trots det föll valet ändå på en servomotor, eftersom denna var lätt att styra med en Arduino och en potentiometer. För att välja lämplig servomotor med tillräckligt moment gjordes en snabb analys av kraftsituationen kring rodet (se bilaga E).



Figur 3.31: Schematisk bild över akterrodret med den statiska roderdelen i svart, den rörliga roderdelen i rött och roderaxeln i grått.

Initialt beställdes servomotorn *MSR-3.2-36 360°* för att göra tidiga tester. Detta var en billigare servomotor med kontinuerlig rotation ( $360^\circ$ ) och med tillräckligt vridmoment för applikationen enligt analysen av kraftsituationen i bilaga E. Försöken gick ut på att testa hur väl servon kunde styra rodret samt hur applicerat motstånd påverkade servomotorn. I detta fall skedde motståndet genom fasthållning av roderaxeln, men i den slutgiltiga lösningen kommer detta vara det vridmoment som uppstår vid svängning.

För att genomföra testet skapades en testanordning, vilken visas i figur 3.32. Anordningen bestod av en vertikal axel som hölls fast av två kullager placerade i en 3D-printad del. Servomotorns horn (den utbytbara bit, oftast plast, som sitter på servomotorns kugg) var sammankopplad med en böjd ståltråd med ett 3D-printat horn med samma hålavstånd som var fäst direkt i axeln med superlim. På axeln fästes ett roder i kartong och plast i demonstrationssyfte, men även för att lättare se vinkelutslaget som servon gav vid en given insignal. Vid detta test styrdes inte servon med en potentiometer utan istället helt från mjukvara i *Arduino UNO* för att lättare jämföra det önskvärda och det givna vinkelutslaget.



Figur 3.32: Servotestannordning. Notera att denna bild är efterkonstruerad och att den innehåller 2 stötstänger istället för de ursprungliga böjda ståltrådarna, då dessa gått förlorade.

Från testerna drogs slutsatsen att en servomotor med kontinuerlig rotation var svårstyrd för specifika vinkelutslag. På grund av servomotorns kvalitet och med en intern växellåda i plast, bedömdes även risken för utnöting stor. Den böjda stålträden var även bra i drag, men mindre bra i tryck, samt att den var något oregelbundet formad. Från detta ställdes kraven på en ny servomotor att den skulle ha en begränsad rotation till  $\pm 90^\circ$ , för att ha en hög ställprecision. Dessa servomotorer har även ökat vridmoment, något som gör hela roderlösningen mer robust och tillförlitlig. Förutom tillräckligt moment ställdes även krav på att servon skulle ha en intern växellåda med kugghjul i metall. De böjda ståltrådarna skall även bytas ut mot stötstänger, en vanlig lösning i bland annat modellflygplan. Vid böjning av ena änden av dessa finns många olika metoder och tekniker, några av dessa är Z-bend och L-bend, med olika för- och nackdelar (Johnson, 2006). Servohornets fästning med superlim fungerade till synes bra, tills mer kraft applicerades och servohornet lossnade. Denna fästning var även permanent på det avseendet att den ej gick att demontera. Det bestämdes då att en ny fästmetod var nödvändig, någon som också möjliggjorde demontering.

Efter testerna av servomotorer undersöktes lösningar på kraftöverföringen mellan servomotorn, innanför skrovet, och det rörliga rodret på skrovets utsida. Inledningsvis undersöktes två metoder: magnetkoppling genom skrovets ändkåpa och en axeltätning. Den första lösningen har fördelen att vara helt vattentät, då inga rörliga delar går genom skrovet. Nackdelen kan bli att kopplingsstyrkan mellan magneterna på de olika sidorna om ändplatan blir för svag och att det skulle resultera i att rodret ej går att styra. För den magnetiska kraften  $F_m$  mellan två magneter på ett avstånd  $r$  gäller approximativt att  $F_m \propto r^{-2}$  (Nordling & Österman, 2021), vilket sätter en begränsning på ändplattans godstjocklek. Detta bör dock kunna redu-

ceras genom användandet av många starka magneter och ett material på ändkåpan med låg magnetisering — exempelvis aluminium eller plast. Den andra lösningen med en axeltätning har i stället fördelen att kunna ge en direkt länk mellan servo och roder, dock ställs höga krav på tätningen. En axeltätning hittades som var anpassad för roterande axlar (Trelleborg *Turcon*® *Roto Variseal*® - *TVM100050-T40S*) och klassad för tryck upp till 2 MPa — motsvarande 200 m. På grund av projektets snäva begränsning i tid valde projektgruppen att gå vidare med tätningslösningen.

Hela akterdelens utformning designades i CAD (**CATIA V5**) och majoriteten av komponenterna skrevs sedan ut i PLA-plast med 3D-skrivaren *ZYYX+*. Mjukvaran **UltiMaker CURA** användes för att generera utskriftskod. En av komponenterna, hållare till axeltätningen, tillverkades i aluminium och tillverkningen genomfördes i Chalmers prototypverkstad.

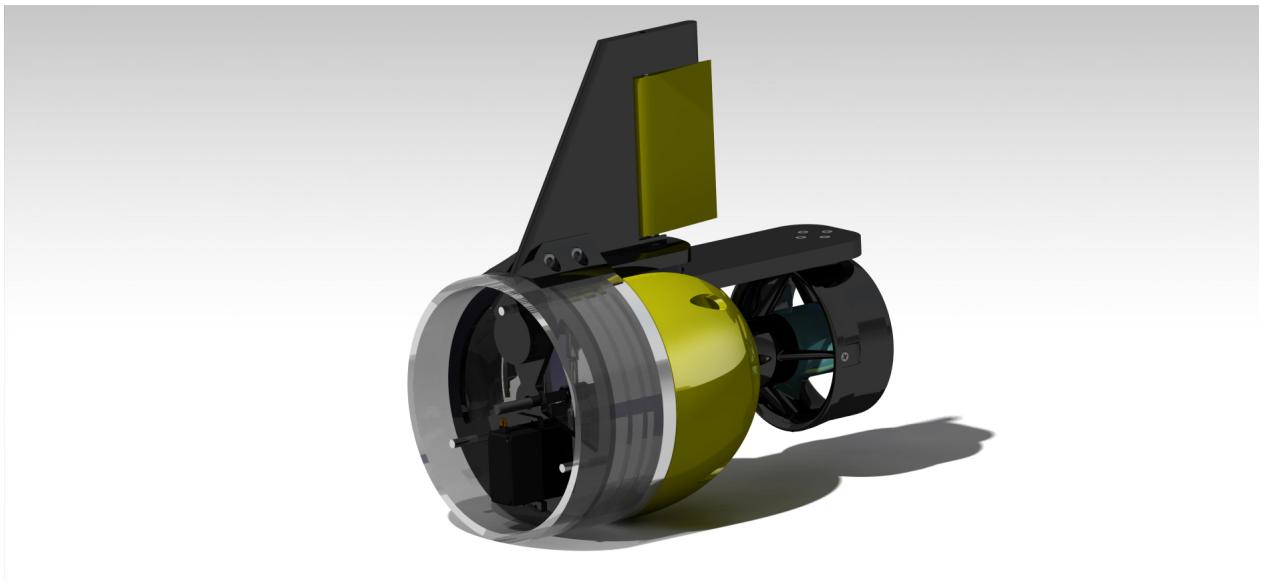
### 3.8.2 Propeller

För att ytterligare öka gliderns manövrerbarhet samt göra den mindre känslig för undervattenströmmar utvärderades om glidern skulle behöva en förses med en akterpropeller. Från analysen i bilaga D följer det att en gliders terminalhastighet är i storleksordningen  $v \approx 1 \text{ m s}^{-1}$  och med en liten pitchvinkel kan gliderns maximala hastighet i  $x$ -led uppskattas till  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Hastigheten hos havsströmmar på djup mindre än 100 m kan variera inom intervallet  $0,25 \text{ m s}^{-1} - 2 \text{ m s}^{-1}$ , vilket är högre än gliderns maximala hastighet (Driscoll m. fl., 2008).

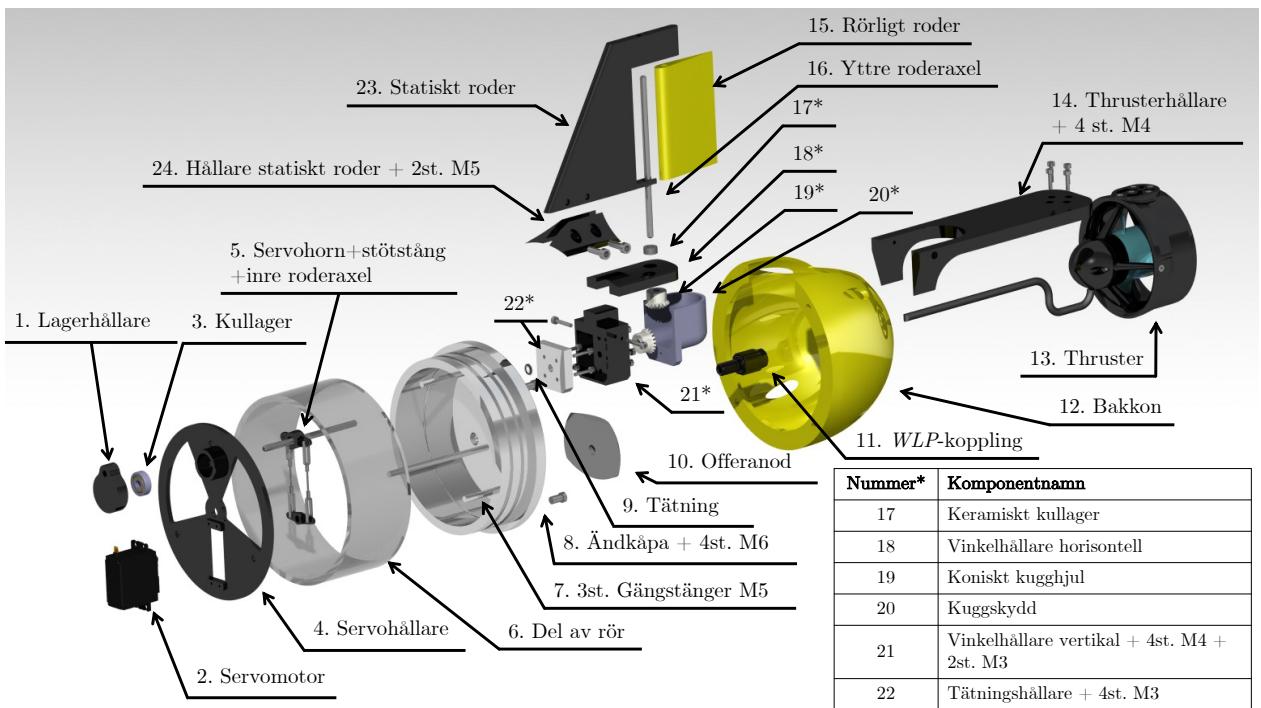
Ytterligare en motivering för att använda en propeller är att den skulle kunna användas som en säkerhetsåtgärd ifall glidern skulle fastna på ett sådant sätt att den inte kan frigöras enbart med flytkraftsmotorn.

### 3.8.3 Gliderns akter, roder och propeller - Resultat

Figur 3.33 visar prototypens akter i CAD-miljö, då alla komponenter monterats. Aktern består i övergripande av ett statisk roderdel samt rörligt roder som styrs med en servomotor genom en roderaxel, en propeller med hållare och en ändkåpa som tätar i rörets ände. För att ytterligare visualisera akterns ingående delar visas i figur 3.34 en sprängskiss över akterns olika komponenter samt hur de monterats. Majoriteten av komponenterna i figurerna har skrivits ut med 3D-skrivare i PLA-plast.



Figur 3.33: En renderad bild av gliderns akter i CAD-miljö. Notera att här representeras rörets ände samt gängstängerna endast av en 100 mm rörbit respektive gängstångsbit i visualiserings- samt monteringssyfte i CAD:en.



Figur 3.34: Sprängskiss över gliderns akter. För att tydligare förklara komponenterna har varje komponent numrerats och namnet på varje komponentens CAD-fil är också utskrivet. Notera att WLP-koppling (komponent nr.11) egentligen är 5 st i antal som är fäst på ändkåpan.

Det rörliga rodrets vinkel kan justeras  $\pm 30^\circ$  och dess styrning sker med servomotorn *Hitec Standard-Servo D954SW Digital-servo* (komponent nr.2 i figur 3.34). Denna servomotor har en begränsad rotation, med en hög ställprecision. Den har ett högt vridmoment för applikationen på 1,77 N m och en slitstark växellåda i stål (Hitec, u. å). Vidare styrs servon med en *Arduino Uno* och i koden, vilken återfinns i bilaga G.2, används biblioteket Servo. Servomotor är fäst i servohållaren (komponent nr.4) som i sin tur är fäst på gängstängerna (komponent nr.7). Servohållaren är en 3D-printad disk som utöver servomotorn även håller fast ett kullager (komponent nr.3) för att den inre roderaxeln (komponent nr.5) ska gå rakt och med låg friktion. Kullagret hålls fast av en lagerhållare (komponent nr.1), vars uppgift är att dels ta upp axialkrafterna som axeln utsätts för när vattentrycket utifrån glidern trycker in på axeln, dels förhindra rörelse av kullagret.

Servohållaren har två ”triangulära” hål som är till för att underlätta vid montering, minska vikten och materialanvändningen, samt för att kunna möjliggöra för dragning av styrnings- och strömkalbar genom ändkåpan (komponent nr.8). Thrusterns (komponent nr.13) kabel dras mellan stötstängerna och igenom det centrerade hålet i servohållaren. Stötstängerna och servohornen (komponent nr.5) translaterar vridmomentet från servomotorn till den inre roderaxeln. I ena änden av dessa stänger böjdes i en ”Z-bend”, främst då det är en billig och stark koppling (Johnson, 2006). Denna ”Z-bend” fästs i ett 3D-printat servo-horn (komponent nr.5) som innehår en stoppring som fästs direkt på den inre roderaxeln med en M3-skruv.

Rotationsrörelsen från den inre roderaxeln överförs till den yttre roderaxeln (komponent nr.16) och därmed till det rörliga rodret (komponent nr.15) genom koniska kugghjul (komponent nr.19). Kugghjulen har utväxlingen 1:1, då rotationen från servon ska motsvara rotationen av rodret men också för att servons moment är tillräckligt stort. För att täta runt den inre roderaxeln används en tätningen *Turcon® Roto Variseal® - TVM100050-T40S* (komponent nr.9), se figur 3.35, en enkelverkande tätning bestående av en U-formad tätningsmantel och en V-formad korrosionsbeständig metallfjäder, som är dimensionerad för roterande axlar under ett tryck på 2 MPa (Trelleborg, u. å). Både den inre och yttre roderaxeln är en  $\varnothing 5$  axel i korrosionsresistent stål med en h6 tolerans och en hårdhet på 60 HRC.



Figur 3.35: Rotationstätningen: Turcon® Roto Variseal® - TVM100050-T40S, genomskärning.

Tätningshållaren (komponent nr.22) klämmer fast tätningen i ändkåpan, samt tätningen runt roderaxeln. Detta är komponent i aluminium som skruvas fast direkt i ändkåpan. Detta är en av de få delar som tillhör gliderns akter som inte valt att 3D-printas. Detta är då just denna komponent har den viktiga uppgiften av att hålla fast tätningen, vilket som nämnt tidigare kräver snäva toleranser, samt bär den vertikala vinkelhållaren (komponent nr.21), som i sin tur har många av bakdelens komponenter fäst i sig. Den vertikala- samt den horisontella vinkelhållaren (komponent nr.18) är permanent ihoplimmade, de är endast uppdelade i två olika komponenter för att underlätta framställningen med 3D-printern. Dessa skruvas direkt fast i tätningshållaren.

Vinkelhållarnas uppgift är att hålla de keramiska kullager (komponent nr.17) som de bärger roderaxlarna går igenom, samt hålla i thrusterhållaren (komponent nr.14). På vinkelhållaren går det även att fästa kuggskyddet (komponent nr.20), vars uppgift framför allt är att skydda vinkelkugghjulen i de fall då man vill placera "boyancy-foam" (ett tryckbeständigt skum som ökar flytförmågan) i bakkonen (komponent nr.12). När glidern utrustas med diverse bestyckningar, samt när den används i miljöer med olika vattendensiteter, behöver glidern balanseras och då kan detta skum placeras i bak- respektive framkonen. Thrusterhållaren är fäst i vinkelhållaren och bär thrustern (komponent nr.13). Propellermotorn (*T200, BlueRobotics*) är helt vattentät och ansluts genom ändkåpan till en strömkälla samt elektronisk styrning med hjälp av en kabeltätning (*WetLink Penetrator*) (komponent nr.11). Styrningen av propellern sker med en *Arduino Uno* och en elektronisk hastighetsreglerare (*Basic ESC, BlueRobotics*); källkod presenteras i bilaga G.3. Maximalt kan propellern ge en framåtdrivande kraft på  $\sim 50$  N, vilket ger glidern bättre möjligheter att manövrera (Robotics, [u. å-a](#)). Thrusterhållaren är utformad på så sätt att all reaktionskraft från thrusterns framåtdrift går rakt in ändkåpan och därmed inte belastar vinkelhållaren (där den är fäst), eller någon annan komponent i aktern. Bakkonen är utformad på så sätt att den är i kontakt med thrustern, men att thrustern samtidigt får tillräcklig vattentillförsel för att operera.

Den yttre roderaxeln (komponent nr.16) bär det rörliga rodret (komponent nr.15), den kom-

ponent som styr hela glidern i horisontalplanet. För att ge glidern bättre hydrodynamik har rodret utformats för att vara smalt och motivering till roderaxelns placering görs i bilaga E. Den yttre roderaxelns topp är placerad i ett hål i det statiska rodret (komponent nr.23) för att stabilisera axeln. Vidare skyddar det statiska rodret det rörliga rodret. Det statiska rodret är fäst i gliderns skrov (komponent nr.6) i en hållare (komponent nr.24), vilken även låser fast hela ändkåpan. Även om ändplattan kläms in och hålls fast av det yttre vattentrycket blir roderhållaren en ytterligare säkerhetsåtgärd för att ändkåpan inte ska lossna eller rotera runt i röret.

I ändkåpan är även en offeranod i zink (komponent nr.10) fäst, detta för att främst skydda ändkåpan, men även för att skydda tätningshållaren från korrisionsangrepp. Denna har bearbetats till en form som är mer platseffektiv och som inte hindrar fästningen av bakkonan.

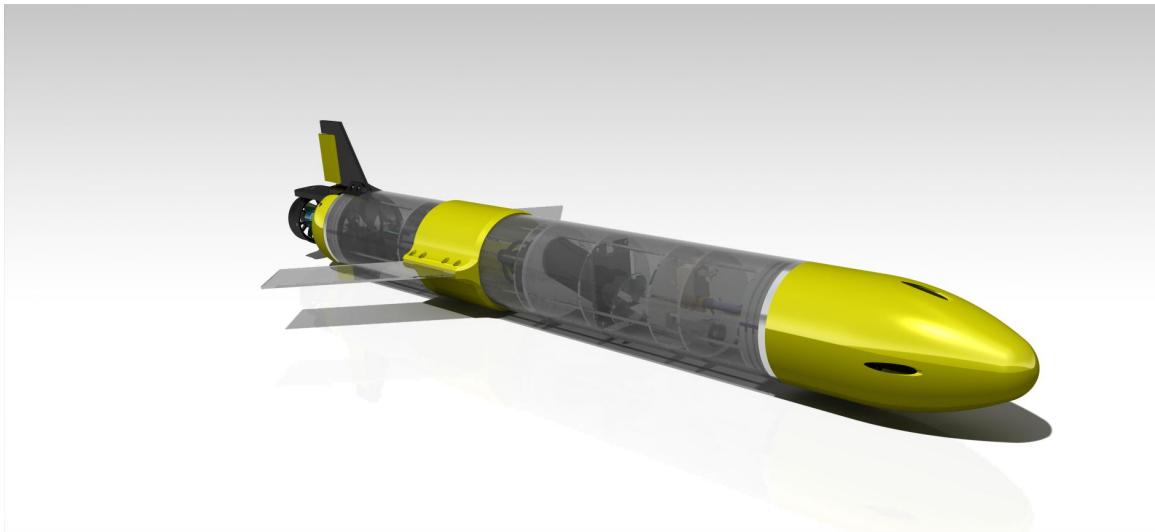
# Resultat

I följande avsnitt presenteras resultat för slutprodukten, utvärderingar efter tester och en kostnadskalkyl över hela projektet. I bilaga B återfinns en fullständig lista på alla komponenter som används till glidern.

## 4.1 Resultat av hela glidern

Här kommer alltså resultatet för alla delsystem sammanvägt.

MODULARITET OCH SMIDIGHET, BÅDE INTERNT OCH UPPDRAGSMÄSSIGT. Flytta vingar, byta ut interna komponenter, ta av thruster. Mängd uppdrag.



Figur 4.1: Rotationstätningen: Turcon® Roto Variseal® - TVM100050-T40S, genomskärning.

## 4.2 Kostnad

Den sluttgiltiga kostnaden för prototypen blev 24 139 kr, vilket är en bra bit under projektets budget på 50 000 kr. En del av de inköpta komponenterna – ungefär 13 139 kr – visade sig inte vara användbara för den sluttgiltiga prototypen. Exempelvis har en del verktyg införskaffats och vissa komponenter köptes in för att utvärdera olika koncept. Sammantaget delas kostnaderna in i två delar: en sluttgiltig kostnad för glidern, 24 139 kr och en utvecklingskostnad, 13 139 kr.

Kostnaderna för alla enskilda komponenter återfinns i komponentlistan i bilaga B.

## 4.3 Tester, utvärdering och funktioner hos prototypen

De delsystem som utvecklades testades kontinuerligt under utvecklingen för att säkerställa dess funktion och kompatibilitet med övriga komponenter. Vidare testades samma system med vissa variationer för att kunna dra slutsatser om det bästa sättet att fortsätta utvecklingen. Då testerna sällan var särskilt tidskrävande och genomfördes parallellt med bygget av systemet fördes väldigt liten eller ingen dokumentation över resultaten.

Vid skrivandet av denna rapport är glidern ännu inte färdigställd. Med anledning av detta kommer slutliga tester och utvärderingar av den färdiga prototypen och dess delsystem att lämnas till det fortsatta arbetet. Detta arbete kommer till viss del att genomföras kort efter denna raports färdigställande men eventuellt även i framtida kandidatarbeten eller dylikt.

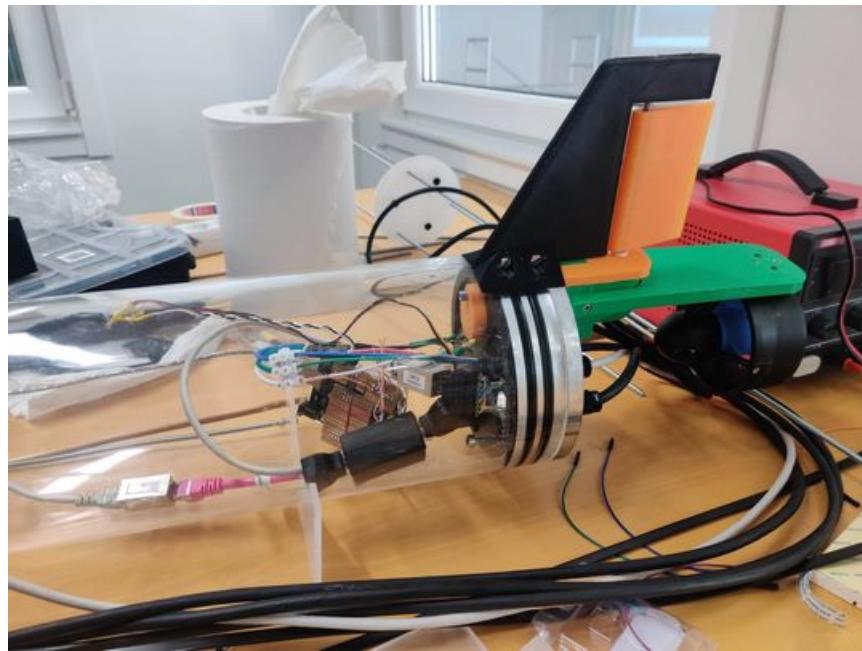
Roderaxeln rostade, skulle vara korrosions-beständig :(

I detta projekt har fokus legat på att färdigställa en glider med grundfunktionerna att kunna sjunka, stiga samt justera sin pitchvinkel gentemot horisontalplanet. Vidare utrustades även glider med en vanlig motor och roder för att kunna agera som en ”vanlig” radiostyrd ubåt.

Delsystemen för grundfunktionerna är i skrivande stund helt eller nästan helt färdigställda. Flytkraftsmotorn är sammansatt och har vid enklare tester presterat ganska väl men något långsamt. En pumpning som skulle motsvara ett dyk tog ca 5 minuter.

Pitchmotorns komponenter fungerade initialt men i samband med att kopplingsschemat implementerades på det slutliga brädet så gick motorn alternativt båda h-bryggorna sönder. Exakt vilken komponent som har gått sönder ska utvärderas de kommande veckorna inför tävlingsmomentet. Prototypen av delsystemet Pitchkontroll, se avsnitt 3.5.1, är därmed ur funktion. Vid tidigare tester har dock motorn fungerat mycket bra, den har främst använts i samband med manuella kommandon men också testats i samband med gyrot (komponent nr.06-12).

Thrustern och rodret sitter på plats och är sammankopplade så att de går att styra med kontrollen. Vid ett test på land fungerade dessa komponenter bra tillsammans med kontrollen. Vid ett test i en grund pol fylldes glidern med tyngder så att den inte skulle flyta för mycket, den blev lite baktung vilket var fördelaktigt för att hålla både thruster och roder nedslänkt i vatten. Både thruster och roder fungerade väl även under vatten. Då bakdelen låg på botten behövde man lyfta lite i kablarna för att thrusterns fulla effekt skulle bli märkbar. Med full fart på thrustern uppgick gliderns hastighet till uppskattningsvis gångfart. Då polen var ganska liten och glidern inte kunde åka någon längre sträcka var det omöjligt att bedöma rodrets funktion.



Figur 4.2: Rotationstätningen: Turcon® Roto Variseal® - TVM100050-T40S, genomskärning.

Vid ett test av flytkraftsmotorn konstaterades att motorn kunde pumpa den mer lättflytande oljan från ena blåsan till den andra på 1 minut och 30 sekunder. Testet genomfördes dels med båda blåsor torrt på land och dels med en blåsa nedsänkt i vatten för att efterlikna de omständigheter som den är tänkt att fungera i. Pumpmotorn fick då ca 11,5, de slangar som användes var så långa som de kommer vara i slutprodukten. Detta test bedömdes efterlikna de omständigheter glidern kommer att operera i. Resultatet från testet var positiva då en kort pumptid innehåller att glidern snabbt kan göra en vändning och därmed glida längre mellan de vertikala svängarna.

För att testa vattentätheten i ändkåporna lades papper in i glidern och ändkåporna sattes sedan på med O-ringar och molykote-fett. Glidern lades sedan i en pol där den fick ligga i ett dygn. Dagen efter togs glidern upp och det kunde konstateras att allt papper inuti glidern var torrt. Därmed konstaterades att ändkåporna håller tätt. Då det efter detta steg är röret i sig som har lägst hållfasthet innehåller detta att ändkåporna bör kunna stå emot det vattentryck som 100 m innehåller.

## 4.4 Kravuppfyllelse

# Framtida arbete

På grund av de avgränsningar som kandidatarbetet innebär kommer målet med arbetet inte vara en färdig glider. Det finns många utvecklingsmöjligheter med glidern som skulle göra den bättre lämpad för verkliga tillämpningar. I detta stycke diskuteras områden som behöver läggas till eller förbättras för att glidern ska kunna fungera. Om detta arbete ska fortsättas föreslås dessa områden vara utgångspunkter att jobba ifrån för att göra glidern komplett.

## 5.1 Batteri

## 5.2 Flytkraftsmotor

Det kanske viktigaste systemet i en effektiv AUV är dess flytkraftsmotor. Energieffektiviteten här är enormt viktigt för att en glider ska kunna färdas långa sträckor. Det är därför viktigt till framtida arbete att analysera exakt vilka behov och krav den behöver uppfylla för att kunna välja den mest energisnåla alternativet. Mer komplex analys och testande bör sedan göras hurvida det är mer effektiva att pumpa på maxeffekt kortare tid eller tvärt om. Slang- och kopplingsdiamenter bör också optimeras för att erhålla optimalt flöde. Materialval är också ett område för ytterligare optimering och undersökning då det finns ett avvägande att göra mellan reliabilitet och uthållighet kontra friktion. Vid nya inköp bör också stor vikt läggas vid att erhålla önskade utgångar / kopplingar direkt. Behov av mellankopplingar medför enbart negativa konsekvenser som ökad risk för läckage samt större ockuperad volym.

Valet som gjordes med en färdigkombinerad pump och motor gjorde till stor del för reliabiliteten av ett redan fungerade system. Det finns stor förbättringspotential här genom att välja en motor med ett högt kraft-vikt förhållande. Ett bra val för detta är att använda borstlös likströms motor (Madichetty m. fl., 2021). Fördelen med en borstlös kontra en motor med mekaniska borstar är också att det inte finns något behov att att byta ut borstarna vid slitage.

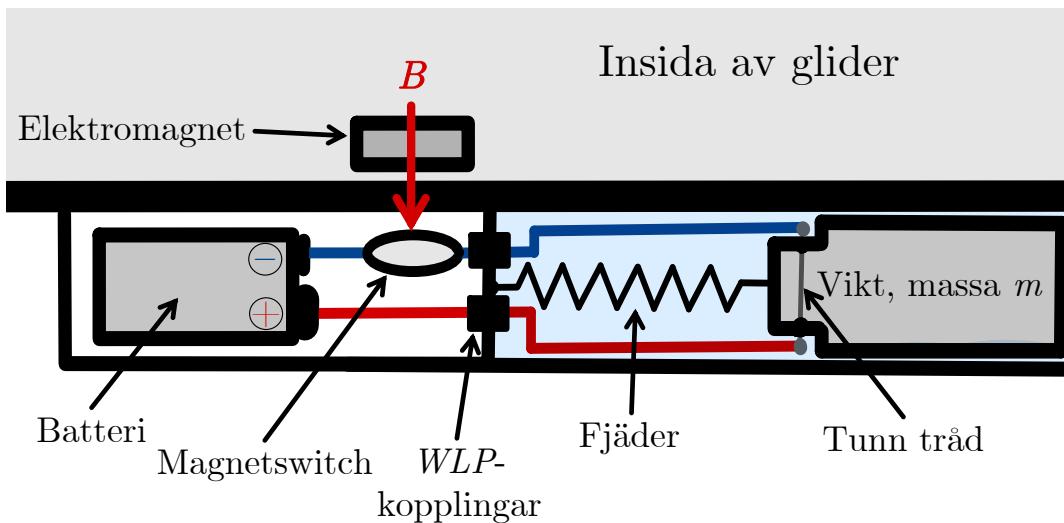
Flytkraftsmotorns oljebehållare är ett område som också skulle kunna vidareutvecklas genom att ersätta kondomerna med mer branchettablerade gummibläsor som användes i oljeaccumulatorer. Dessa addrar både en större prislapp och vikt men har fördelen av att vara betydligt mer robust och tålig för kontinuerlig användning och eventuella stötar. Dessa har även kraftigare och mer tillförlitliga kopplingar vilket tar bort onödig komplexitet med den befintliga lösningen.

## 5.3 Styrning och automation

DETTA HAR VI NOG MYCKET ATT NÄMNA PÅ

## 5.4 Säkerhetssystem

Eftersom industriella gliders ofta är mycket dyra är de flesta utrustade med säkerhetssystem, som kan användas för att återfå glidern vid en potentiell olycka. Projektgruppen studerade en glider, som stiftelsen VOTO (Petersson, 20-02-2023) tillhandahåller, där deras säkerhetssystem bestod av en vikt som kunde släppas för att ge glidern en större flytkraft. En tråd, som spänner vikten mot en fjäder, bränns av för att frigöra vikten. Under projektet fanns inte tiden att fysiskt få fram det ta säkerhetssystem, utan projektgruppen valde att skapa en teoretisk design som använde samma princip som VOTO:s glider, men däremot med ett eget system för att bränna av tråden. För att minimera antalet genomgående hål in till glidern valde projektgruppen att aktivera en extern krets med hjälp av en magnet genom skrovet. I figur 5.1 visas en schematisk skiss över säkerhetssystemets komponenter och dess funktion.



Figur 5.1: Figuren visar en schematisk skiss över design av säkerhetssystemet. Systemet, vilket är fäst på gliderns utsida, utgörs av en vattentät kammar med ett batteri och en magnetswitch och en vattenfyld kammar med en fjäderupphängd vikt som hålls fast av en tunn tråd. Kretsen sluts då elektromagneten fält,  $B$ , påverkar magnetswitchen och detta bränner i sin tur av den tunna tråden som håller vikten.

För att utlösa säkerhetssystemet och aktivera kretsen krävs att ett av två oberoende tidsvillkor är uppfyllda. Det första villkoret uppfylls om trycket som registreras av trycksensorn är oförändrat under längre tid samtidigt som glidern befinner sig i lyftläget – alltså att den yttre blåsan är fyld med olja. Att glidern inte registrerar en tryckskillnad trots att den befinner sig i lyftläget indikerar att pumpsystemet är ur funktion, att glidern fastnat eller att trycksensorn gått sönder. Det andra tidsvillkoret uppfylls om gliderns totala tid under ytan överstiger en förutbestämd tidsgräns, vilken kommer kunna anpassas inför varje operation.

Förutom systemet med vikten, har andra möjligheter att säkert återfå glidern vid ett haveri undersökts. Projektgruppen ser exempelvis en möjlighet att placera en liten kolsyrepatoron

som kan fylla en flytkudde i gliderns för. Detta system skulle kunna aktiveras av samma villkor som systemet med vikten. Vidare kommer glidern ha möjlighet att utrustas med läckagesensorer från Blue Robotics som mäter fuktigheten inuti glidern. Läckagesensorn skulle kunna ge ytterligare ett villkor för att aktivera säkerhetssystemet med massan.

# Referenser

- Ansys. (u. å). *Stiffness-limited design at minimum mass*. Hämtad 2 maj 2023, från [https://support.grantadesign.com/resources/grantaedupack/2021R1/learn/topic1.htm#t=html%5C%2Fref\\_indices%5C%2Findex\\_edu\\_stiff\\_mass.htm%7D](https://support.grantadesign.com/resources/grantaedupack/2021R1/learn/topic1.htm#t=html%5C%2Fref_indices%5C%2Findex_edu_stiff_mass.htm%7D)
- Barker, W. P. (2012). An Analysis of Undersea Glider Architectures and an Assessment of Undersea Glider Integration into Undersea Applications.
- Benson, T. (u. å). *Aerodynamik Center - ac*. NASA. Hämtad 6 februari 2023, från <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/ac.html>
- Davis, R., Eriksen, C., & Jones, C. (2003). Autonomous Buoyancy-driven Underwater Gliders. I G. Griffiths (Red.), *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles* (s. 51). Taylor & Francis.
- Driscoll, F., Alsenas, G., Beaujean, P., Ravenna, S., Raveling, J., Busold, E., & Slezicki, C. (2008). A 20 KW open ocean current test turbine, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5152104>
- Engineers, M. S. (2023). *Useful information on positive displacement pumps*. Hämtad 13 april 2023, från <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/positive-displacement-pumps>
- European Environmental Agency. (2022-08-05). *Oxygen concentrations in coastal and marine waters surrounding Europe*. Hämtad 2 maj 2023, från <https://www.eea.europa.eu/ims/oxygen-concentrations-in-coastal-and>
- Fallon, E. S. (1965). *Hydroglider* (Nr 3204596). USA, United States Patent Office. <https://patents.google.com/patent/US3204596?oq=US3204596A>
- Gafurov, S. A., & Klochkov, E. V. (2015). Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Development Tendencies [Proceedings of the 2nd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM2014) September 15 –17, 2014 Samara, Russia]. *Procedia Engineering*, 106, 141–148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.017>
- Grinter, P. (2021-08-05). *Autonomous Underwater Vehicles for U.S. Navy Sensing-Glider Program*. Unmanned Systems Technology. Hämtad 10 april 2023, från <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2021/08/new-autonomous-underwater-vehicles-for-u-s-navy-sensing-glider-program/>
- Hitec. (u. å). *D954SW 32-Bit, High Torque, Steel Gear Servo*. Hämtad 25 april 2023, från <https://hitecrcd.com/products/servos/d-series-servos/d954sw/product>
- Johnson, P. K. (2006). *L-Bends and Z-Bends*. Airfield models. Hämtad 18 mars 2023, från [https://airfieldmodels.com/information\\_source/model\\_aircraft\\_hardware/l-bends\\_and\\_z-bends.htm](https://airfieldmodels.com/information_source/model_aircraft_hardware/l-bends_and_z-bends.htm)
- Lantmäteriet. (u. å). *Tyngdkraften*. Hämtad 3 maj 2023, från <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swePOS/Referenssystem/Tyngdkraftssystem/Tyngdkraften/>
- Madichetty, S., Mishra, S., & Basu, M. (2021). New trends in electric motors and selection for electric vehicle propulsion systems. *IET Electrical Systems in Transportation*, 11(3), 186–199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/els2.12018>
- National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA). (u. å). *What causes ocean currents?* Hämtad 2 maj 2023, från <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/currents.html>
- National Oceanography Centre (NOC). (2023). *Gliders*. Hämtad 2 maj 2023, från <https://noc.ac.uk/facilities/marine-autonomous-robotic-systems/gliders>
- Nordling, C., & Österman, J. (2021). *Physics Handbook for Science and Engineering* (9. utg.). Studentlitteratur.

- Olson, S., Jansen, M. F., Abbot, D. S., Halevy, I., & Goldblatt, C. (2022). The Effect of Ocean Salinity on Climate and Its Implications for Earth's Habitability [e2021GL095748 2021GL095748]. *Geophysical Research Letters*, 49(10), e2021GL095748. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL095748>
- Petersson, O. (20-02-2023). Studiebesök på Voice of the Ocean (VOTO). Personlig kommunikation.
- Ribeiro, G. A., Pinar, A., Wilkening, E., Ziaeefard, S., & Mahmoudian, N. A multi-level motion controller for low-cost Underwater Gliders. I: I *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, WA, USA, 2015, 1131–1136. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139333>. 2023-02-08.
- Robotics, B. (u. å-a). *T200 Thruster*. Hämtad 22 april 2023, från <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>
- Robotics, B. (u. å-b). *WetLink Penetrator*. Hämtad 7 maj 2023, från <https://bluerobotics.com/store/cables-connectors/penetrators/wlp-vp/>
- SMHI. (2023-04-17). *Ytvattentemperatur i havet*. Hämtad 9 maj 2023, från <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/haven-runt-sverige/ytvattentemperatur-i-havet-1.6001>
- Trelleborg. (u. å). *Turcon® Roto Variseal®*. Hämtad 4 mars 2023, från <https://www.seals-shop.com/eu/en/rotary-seals/turcon-roto-variseal>
- Wang, Y., Wang, C., Yang, M., Liang, Y., Han, W., & Yang, S. (Nov. 2022). Glide performance analysis of underwater glider with sweep wings inspired by swift. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1048328>
- Webb, D., Simonetti, P., & Jones, C. (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>
- Voortman Landström, E. (12-03-2023). Personlig kommunikation.

# Bilagor

# Kravspecifikation

I följande bilaga visas en kravspecifikation (se figur A.1), där gruppen enats om några projektets målvärden. Syftet med kravspecifikationen är att tydliggöra och konkretisera gruppens gemensamma mål. Målen kommer kunna korrigeras under projektets gång.

Chalmers Tekniska Högskola		Dokumenttyp	Kravspecifikation - Systemkrav			
Utförande: MA-SK (grupp 2)		Projekt	Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima vetenskaper			
Kriterie		Krav/Önskemål	Målvärde	Enhet	Verifiering	Referens
<b>1. Manöverbarhet</b>						
1.1 Statiskt stabilitet		Krav	100	%	Test prototyp delsystem	Jury
1.2 Förändring av flytförmåga (volym)		Krav	5	%	Test prototyp delsystem	Jury
1.3 Girning, radie		Krav	10	m	Test prototyp delsystem	Jury
1.5 Rullning		Krav	360	grader	Test prototyp delsystem	Jury
1.6 Vattentäthet under tryck		Krav	10	bar	Test prototyp delsystem	Jury
<b>2. Monterbarhet (batteri)</b>						
2.1 Batteribyte		Krav	20	minuter	Test prototyp, ev VP?	Jury
2.2 Monteringsverktyg		Krav	5	st	Test prototyp	Jury
2.3 Inlärningstid för montering		Önskemål	30	minuter	Test prototyp	Jury
<b>3. Energiåtgång</b>						
3.1 Drifttid hav		Önskemål	1	månad	Beräkningar	Jury
3.2 Drifttid skärgårdsmiljö		Önskemål	1	vecka	Beräkningar/test prototyp	Jury
<b>4. Bestyrkningsmöjligheter</b>						
4.1 Sensorer (volym)		Önskemål	10	% volym	CAD	Jury
4.2 Batterier		Krav	30	Ah	Test prototyp/beräkningar	Jury
4.3 Inbyggda system (reglersystem/navigationssystem mm)		Önskemål	95%	funktion	Test prototyp/simuleringar	Jury
<b>5. Funktionell prototyp</b>						
5.1 Kostnad		Önskemål	50000	kronor	Ekonomisk planering samt verifiering	REVERE
5.2 Funktion		Önskemål	30%	funktion	Test prototyp	Jury
<b>3. Livslängd</b>						
3.1 Livslängd		Önskemål	10	år	Beräkningar/simulering	REVERE
3.2 Livslängd		Önskemål	20	år	Beräkningar/simulering	REVERE

Figur A.1: Kravspecifikation för den slutgiltiga produkten.

# Komponenter och kostnader

Denna bilaga innehåller en fullständig lista (tabell B.1) över gliderns alla komponenter samt dess kostnader. Notera att tabellen endast innehåller de komponenter som köpts in till projektet och som kom att användas i glidern. Den totala kostnaden för hela projektet blev 24 139 kr.

Tabell B.1: Tabellen visar en fullständig komponentlista för glidern.

Område (Komponentnr.)	Komponent	Artikelnummer	Antal	Pris totalt [kr]	Länk/lev.
Ballast (01-01)	Ballast	-	1	679.78	Ballast Products
Flytkraftsmotor (02-01)	Relä	-	3	140	Tema elektronik
Flytkraftsmotor (02-02)	I2C level arduino konverterare	LEVEL CONVERTER-R1-RP	1	250	JM Robotics
Flytkraftsmotor (02-03)	Hydraulolja viskös ISO VG 32	WKOH32-4	1	259	SVITH
Flytkraftsmotor (02-04)	Kabelpenetrator	WLP-M10-6.5MM-HC	3	360	JM Robotics
Flytkraftsmotor (02-05)	pa-4/2.7 svart 100m>pas42-100	-	1.5	17.16	Dunlop Hiflex
Flytkraftsmotor (02-06)	Clamp mini 1b 10.5-12.5	-	2	17.72	Dunlop Hiflex
Flytkraftsmotor (02-07)	Push in bspf 4mm 1/8 >ma11 04 18	-	1	21.12	Dunlop Hiflex
Flytkraftsmotor (02-08)	push in red 4mm 6mm >ma25 0406	-	1	26.18	Dunlop Hiflex
Flytkraftsmotor (02-09)	Slang till pump	368-0182	1	349.58	RS
Flytkraftsmotor (02-10)	Gängtape 12X0.08 mm>326-1286	-	1	6.33	Dunlop Hiflex
Flytkraftsmotor (02-11)	Pressure Relief Valve Backfill Adapter	SKU: PRV-M10-BACKFILL-ADAPTER-R1-RP	1	628.64	JM Robotics
Flytkraftsmotor (02-12)	Straight bspf60 male 1/4-1/4"	-	1	8.35	Dunlop Hiflex
Flytkraftsmotor (02-13)	Push in 90 union 12mm 12mm >ma28 12 12	-	1	80.84	Dunlop Hiflex
Flytkraftsmotor (02-14)	Fitada mm bspf 1/8 1/8 >ra12 1818	-	1	9.51	Dunlop Hiflex
Flytkraftsmotor (02-15)	Pump	503001-301	1	962.35	MagonHRC
Flytkraftsmotor (02-16)	Ventil	840-7020	1	304.87	RS
Horisontalplan (03-01)	Stötstånger	MBS-0001	2	30	MBS RC-models
Horisontalplan (03-02)	Esc för thruster	BESC30-R3	1	360	JM Robotics
Horisontalplan (03-03)	Servomotor till roder	1534794	1	1112	Conrad
Horisontalplan (03-04)	Dränbar motor, thruster	T200-THRUSTER-BROV2-CCW-SPARE-R2-RP	1	2100	JM Robotics
Horisontalplan (03-05)	Röderaxel	724-3386	1	125.44	RS
Horisontalplan (03-06)	Tätning	TVM100050-T40S	1	402.47	Trelleborg
Horisontalplan (03-07)	Keramiskt kullager	CE-685-ZR02-PTFE-DRY	2	481.68	Kugellager-express
Horisontalplan (03-08)	Kullager	612-5852	1	58.86	RS
Horisontalplan (03-09)	Vinklad kuggjhul	521-6042	2	88.08	RS
Hölje (04-01)	Rundrör	4249568	4	48	Hornbach
Hölje (04-02)	Gängstäng	530-315	1 pack (5st/pack)	180	RS
Hölje (04-03)	PMMA-skiva	26-2115	2	458	Biltema
Hölje (04-04)	Rör, skrov	-	1	800	PlastMästaren
Hölje (04-05)	Ändkör tillverkade	-	2	6685	HenEk AB
Hölje (04-06)	Offeranod i Zink	B116830	2	243.44	Anode factory.se
Hölje (04-07)	Distanser till stängerna	205-3068	5	48.46	RS
Hölje (04-08)	O-ring	255-6942	2	78.79	RS
Hölje (04-09)	Tryckventil	PRV-M10-ASM-R1-RP	1	280	JM Robotics
Hölje (04-10)	penetrator 6.5mm	WLP-M10-6.5MM-HC	4	360	JM Robotics
Hölje (04-11)	Fett till O-ring	MISC-MOLYKOTE-111-TUBE-R1	1	320	JM Robotics
Pitch (05-01)	Linjärt ställdon	454-1000	1	1609.72	RS
Pitch (05-02)	Bosch Rexroth 0.4m Long Steel Closed Bush Shaft	724-3386	3	369.57	RS
Pitch (05-03)	Anslutningskort för stegmotordrivare, Adafruit	300-91-184	1	74.23	Elfa
Styrning (06-01)	ethernet-kabel för intern el	240-6296	3	84.9	RS
Styrning (06-02)	ethernet-kabel för intern el	240-6297	3	84.9	RS
Styrning (06-03)	ethernet-kabel för intern el	240-6298	3	84.9	RS
Styrning (06-04)	RJ45 adapter hona hona	301-30-891	10	457	Elfa
Styrning (06-05)	Display för arduinos	300-91-227	2	467.18	Elfa
Styrning (06-06)	Ethernet-kabel för styrning	812-4788	1	679.47	RS
Styrning (06-07)	RJ45 adapter hona hona	301-30-891	5	228.5	Elfa
Styrning (06-08)	ON-OFF-ON switch	301-03-430	10	233.1	Elfa
Styrning (06-09)	Potentiometer 10 kΩ	110-95-627	5	320.8	Elfa
Styrning (06-10)	RJ45 adapter till skruvkoppling	124-2520	5	469.1	RS
Styrning (06-11)	Arduino Uno Rev 3	715-4081	2	503.46	RS
Styrning (06-12)	MPU-6050 Gyroskop	301-67-655	1	157.00	Elfa
Styrning (06-13)	RJ45 kontakt 10 pack	301-30-009	1	52.5	Elfa
Styrning (06-14)	Transistorer	686-8063	1 st 20-pack	94.86	RS
Styrning (06-15)	ON-OFF switch m led	301-55-776	4	96.04	Elfa
<b>Summa:</b>	-	-	-	<b>24 370 kr</b>	-

# Beräkningar av o-ringar

En o-ring med tvärnittsarean 5 mm och innerdiametern 126 mm valdes till ändkåporna. I monterat läge, för en statisk radiell tätning, ska o-ringen töjas maximalt 6%. Tätningen ska dessutom pressas ihop 15-30%. Spårbredden för o-ringens ska vara cirka 125% av tätningens tvärnittsarea. Ytfinheten i o-ringsspåren får dessutom inte överstiga 1,6 Ra ( $\mu\text{m}$ ) vid statisk tätning (**empty citation**). Utformningen av o-ringsspåren i ändkåpan visas i Figur C.1 och nedan visas beräkningarna på hur o-ringens påverkas i monterat läge.

Beräkning av spårbredden:

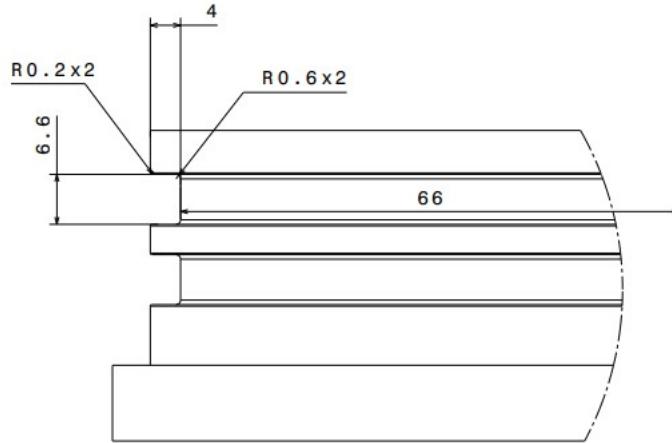
$$\text{Spårbredd} = 1,25 \times 5\text{mm} = 6,6\text{mm} \quad (\text{C.1})$$

Beräkning av o-ringens ihoppressning, där spårdjupet i ändkåpan är 4 mm, resulterade i att tätningen pressas ihop 1 mm då ändkåpan är monterad i skrovet:

$$\text{Ihoppressning} = \frac{5 - 4}{5} = 20\% \quad (\text{C.2})$$

Spårdjupet i ändkåpan, där o-ringens ska monteras, medför en radie på 66 mm, se C.1, och då tätningens innerradie är 63 mm får o-ringens i monterat läge då töjningen:

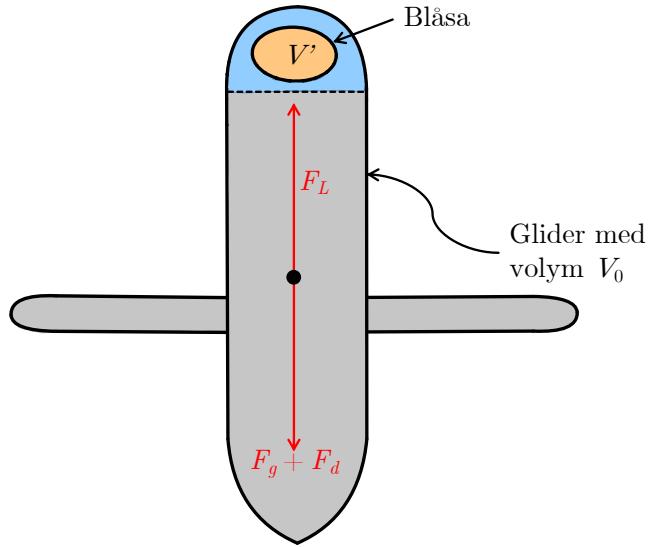
$$\text{Töjning} = \frac{66 - 63}{63} = 4,76\% \quad (\text{C.3})$$



Figur C.1: Del av ändkåpa med mått utsatta för o-ringens.

# Estimering av blåsstorlek och vertikal hastighet

Givet att farkosten får väga  $m = 10\text{ kg}$  och att vi kommer att använda en blåsa med varierbar volym,  $V'$ , som placeras utanför glidern går det att teckna en vertikal kraftjämnvikt. Kraftsituationen visas i figur D.1. Vi låter här  $V_0 = \frac{m}{\rho} + V_d$  där  $V_d$  alltså är skillnaden i volym för



Figur D.1: Figuren visar en skissartad friläggning av glidern som rör sig med terminalhastigheten  $w$  i vertikalt led.

att glidern utan blåsa enbart ska ha neutral flytkraft. Vidare kommer enbart vertikala krafter och hastigheter betraktas för att göra en enklare och grövre estimering av problemet. Att farkosten färdas med en vinkel kommer i efterhand gå att justera med en enkel sin  $\theta$ -term där  $\theta$  är vinkeln mot ett horisontellt plan som farkosten färdas med. Med Newtons andra lag ställs kraftjämnvikt mellan accelerationen, vattenmotståndet  $F_d$ , flytkraften  $F_L$  och tyngdkraften  $F_g$  upp enligt

$$\begin{aligned} F_L &= \rho_v g(V_0 + V') \\ F_g &= mg \\ F_d &= \frac{1}{2} C_D w^2 A = \frac{1}{2} C_D \pi R^2 \\ &\implies \\ g(\rho_v(V_0 - V') - m) &= ma + \frac{1}{2} \rho_v C_D w^2 \pi R^2, \end{aligned}$$

där  $w$  är hastighet i  $z$ -led,  $R$  radien på glidern och  $C_D$  formmotståndskoefficienten. Denna koefficient kommer senare gå att hitta i tabeller. Då vi enbart är ute efter terminalhastigheten

som glidern kommer röra sig med uppåt sätts  $a = 0$ . Genom att förenkla och lösa ut  $w$  erhålls

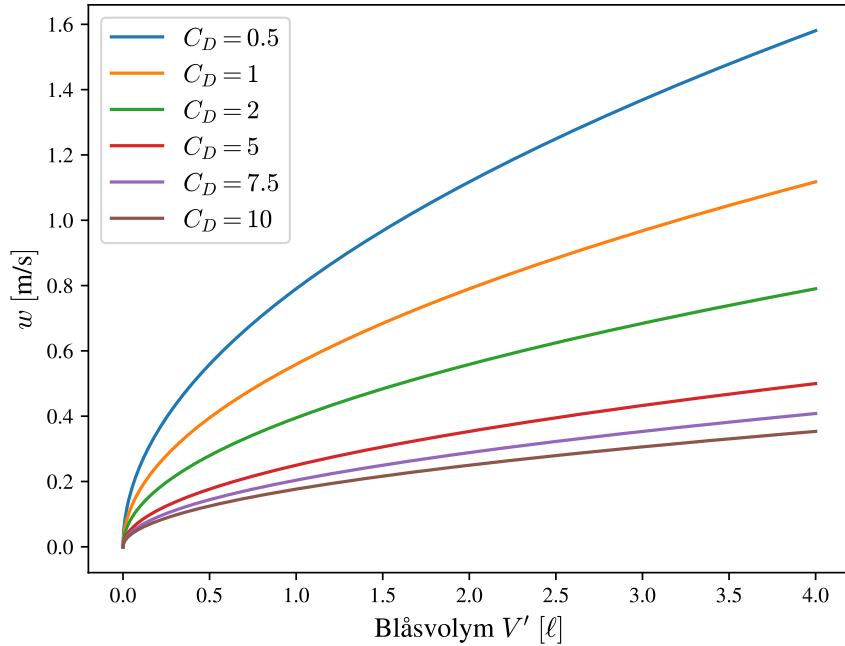
$$w = \sqrt{\frac{2g(\rho_v(V_0 - V') - m)}{\pi R^2 C_D \rho_v}} = \left\{ V' - V_d = V'(1 - \frac{1}{2}) = \frac{V'}{2} \right\} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{gV'}{\pi C_D}}, \quad (\text{D.1})$$

där antagandet att  $V' - V_d = V'/2$  tas från att vi kommer vela ha lika stor acceleration uppåt som nedåt. För att visualisera ekvation D.1 visas i figur D.2 grafer över vertikala hastigheten  $w$  som funktion av blåsans volym  $V'$  för olika värden på formmotståndskoefficienten  $C_D$ . Ett rimligt antagande för glidhastigheten hos glidern är i intervallet  $0,5\text{--}2,5 \text{ kn} = 0,25\text{--}1,3 \text{ m s}^{-1}$ ; ett krav som kan tillgodoses med en blåsa med volym  $V' \approx 1,0 \text{ L}$ .

I detta uttryck kan man sedan anta att vi kommer att ha en radie  $R \in [0,1; 0,15] \text{ m}$  och sedan att  $C_D \in [0,25; 2]$ . Genom att sedan anta att vi vill ha en hastighet  $w \approx 0,3 \text{ m s}^{-1}$  kommer vi sedan kunna beräkna  $V'$  som

$$V' = (wR)^2 \frac{\pi C_D}{g}, \quad (\text{D.2})$$

där även  $C_D$  kan varieras inom det antagna området för att hitta ett  $V'$  som fungerar för de flesta fallen.



Figur D.2: I figuren visas grafen för vertikal hastighet  $w$  som funktion av blåsans volym  $V'$  i liter för olika formmotståndskoefficienter  $C_D$ . För att generera graferna har ekvation D.1 använts med ett värde på  $R = 10 \text{ cm}$ .

## D.1 Källkod i Python för grafer till vertikal hastighet och volym på blåsa

```

import numpy as np
import scipy.constants as K
import matplotlib.pyplot as plt

# LaTeX font
plt.rcParams['mathtext.fontset'] = 'cm'
plt.rcParams['font.family'] = 'STIXGeneral'

# Parameters
g = 9.81; mu = 1e-3
Vp_max = 4e-3
V_p = np.linspace(0,Vp_max,1000)
V_d = np.linspace(0,Vp_max/2)
m = 10; R = 0.1

Cd = [0.5,1,2,5,7.5,10]; C = []
plt.figure(1)
R = 0.1
# loop for plotting w vs V' for different C_D - values
for i in range(0,len(Cd)):
    w =(1/R) * np.sqrt((g * V_p)/(np.pi * Cd[i]))
    plt.plot(1000*V_p,w)
    C.append('$C_D = {}$'.format(Cd[i]))
    plt.xlabel('Blåsvolym $V^{\prime} \cdot \pi \cdot l$', fontsize = 13)
    plt.ylabel('$w \cdot m/s$', fontsize = 13)

plt.legend(C,fontsize = 12)

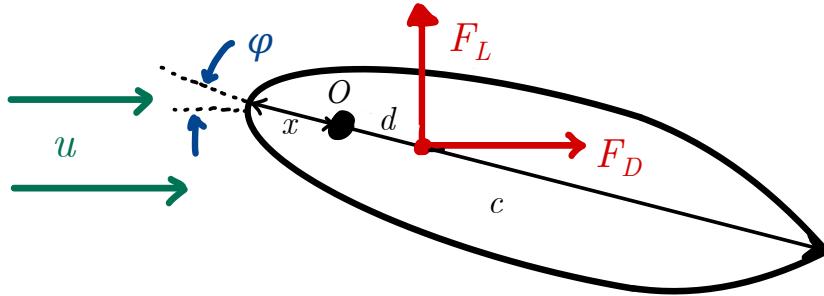
# loop for plotting V' vs Cd for different velocities w.
plt.figure(2)
w = np.linspace(0.1,1,10)
vz = []
for j in range(0,len(w)):
    V = []
    for i in range(0,len(Cd)):
        #w = 10 * np.sqrt((g * V_p)/(np.pi * Cd[i]))
        V.append((w[j]/10)**2 * np.pi*Cd[i]/g)
    plt.plot(Cd,V)
    vz.append('$w = {} \text{ m/s}'.format(w[j]))
    plt.xlabel('Drag $C_d \cdot l$')
    plt.ylabel('Blåsvolym $V^{\prime} \cdot \pi \cdot l$')
    plt.legend(vz)

plt.show()

```

# Analys av krafter på roder

För att dimensionera rodrets servomotor, bestämma rodrets storlek samt dess placering på roderstocken gjordes en kortare kraftanalys på rodret. I figur E.1 visas en enklare friläggning av rodret då strömningen har hastigheten  $u$ .



Figur E.1: Figuren visar en friläggning av rodret med inritad lyftkraft,  $F_L$ , och formmotståndskraft,  $F_D$ . Strömningen har hastigheten  $u$ ,  $x$  och  $d$  är avstånd från roderstockens placering  $O$  till främre änden respektive lyftcentrum för rodret. Rodrets totala längd är  $c$  och det står med en attackvinkel  $\varphi$  mot strömningen.

Momentet kring roderstocken,  $O$ , orsakat av strömningen ges av

$$M_O = d(\cos(\varphi)F_L - \sin(\varphi)F_D). \quad (\text{E.1})$$

Lyft- och formmotståndskraften kan skrivas om med följande uttryck

$$F_{L,D} = C_{L,D} A_{L,D} \rho \frac{u^2}{2},$$

där  $C_{L,D}$  är lyft/formmotståndskoefficienten,  $A_{L,D}$  är en referensarea och  $\rho$  är vattnets densitet. Insättning i ekvation E.1 ger

$$M_O = d\rho \frac{u^2}{2} (\cos(\varphi)C_L A_L - \sin(\varphi)C_D A_D)$$

och genom att sätta  $\sin(\varphi) = 0$  erhålls

$$M_{\max} = d\rho \frac{u^2}{2} C_L A_L \cos(\varphi) \quad (\text{E.2})$$

som övre gräns på momentet.

För att uppskatta några av storheterna i ekvation E.2 gjordes ytterligare några förenklingar och dessutom sattes några numeriska värdena. För en symmetrisk vinge gäller det att  $d+x = c/4$  samt att  $A_L = cl$ , där  $\ell$  är rodrets längd vinkelrätt mot skissen i figur E.1 Benson, u. å. [\cite{Benson}](#). Vidare är bör  $0,1c < d < 0,2c$  och  $d$  sattes därför godtyckligt till  $c/6 = 0,167c$ .

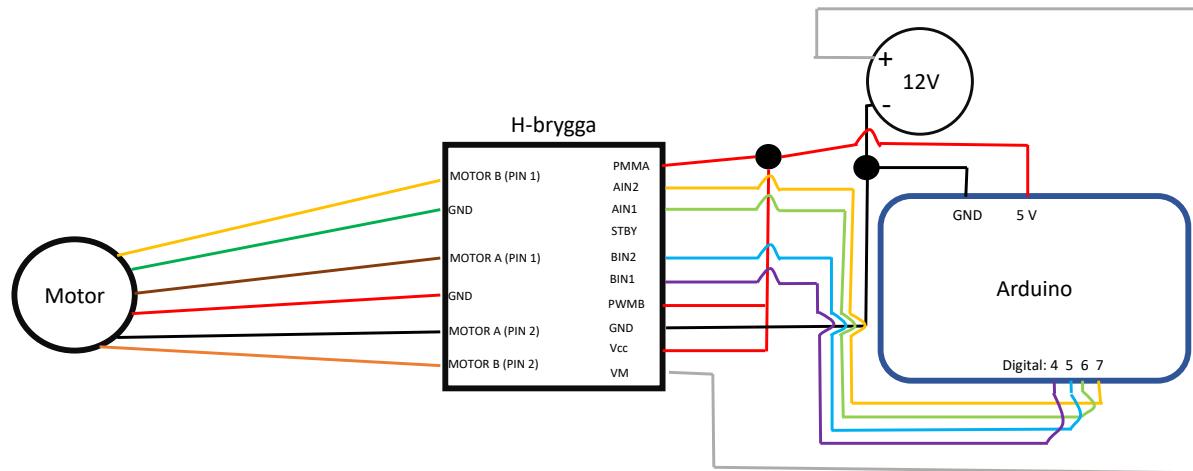
Då analysen syftar till att ta fram en övre gräns på  $M_{\max}$  sattes  $C_L = 1$  och ekvation E.2 kan nu skrivas

$$M_O = 0,167\rho \frac{u^2}{2} c^2 \ell.$$

Genom att sätta  $c = 5\text{ cm}$  och  $\ell = 10\text{ cm}$  erhölls  $M_{\max} \approx 0,1\text{ N m}$ .

# Kopplingschema för pitchmotor

I följande bilaga visas ett kopplingsschema för motorn som används i samband med pitch-kontroll med tillhörande h-brygga samt Arduino. Se figur F.1.



Figur F.1: Kopplingschema

Komponenterna återfinns i bilaga B:

- Motor - komponent nr.05-01
- H-brygga - komponent nr.05-03
- Arduino - komponent nr.06-11

# Källkod Arduino

I följande avsnitt presenteras den huvudsakliga koden för vardera Arduino samt de ingående biblioteken som skapades för glidern.

## G.1 Kod för styrning av pitch *Arduino*

----- KOD HÄR TACK -----

## G.2 Kod för styrning av roder *Arduino*

```
#include <Servo.h>
Servo myservo;

int servo_pin = 9;  int ang_int = 30; byte pot_pin = A0;

void setup() {
    servo_setup(servo_pin);
}

void loop() {
    servo_run(A0,ang_int);
}

void servo_setup(int servo_pin){ // Input är digitala output-pinnen till servon.
    myservo.attach(servo_pin);
    Serial.begin(9600);
    pinMode(10,OUTPUT);
    digitalWrite(10,HIGH);
    delay(15);
}

void servo_run(byte pot_pin,int ang_int){ // Argument är :analoga input-pinnen från
→  potentiometern, intervall som man vill svänga med (± 30°).
    int potval = analogRead(pot_pin);
    int val = map(potval, 0, 1023, (100-ang_int), (100+ang_int));

    int ROUNDFACTOR = 5;      // Här avrundas värden till närmsta multipel av 5 för att
→  inte servon ska vobbla.
    int rem = val % ROUNDFACTOR;
    if (rem < 3)
        val -= rem;
    else
        val += ROUNDFACTOR - rem;
    myservo.write(val);
```

```

    int ang = map(potval,0,1023,-30,31);
    Serial.print("ang = ");
    Serial.println(ang);
    delay(30);
}

```

### G.3 Kod för styrning av pump *Arduino*

----- KOD HÄR TACK -----

### G.4 Kod för styrning av propeller *Arduino*

```

#include <Servo.h>
byte thruster_pin = 9;
byte pot_pin = A0;
Servo servo;

void setup() {
    thruster_setup(thruster_pin);
}

void loop (){
    thruster_run(pot_pin,100);
}

void thruster_setup(int thruster_pin){ // Funktion för initialisering av thruster
    servo.attach(thruster_pin);
    servo.writeMicroseconds(1500);
    Serial.begin(9600);
    delay(7000);
}

void thruster_run(byte pot_pin,int diff) { // Funktion för körning av thruster
    int potVal = analogRead(pot_pin); // Läser av potentiometern
    if (potVal > 512 - diff && potVal < 512 + diff){ // Kollar om potentiometern är nära
        mitten. Detta stänger av motorn.
        int pwmVal = 1500;
        int proc = 0;
        servo.writeMicroseconds(pwmVal);

        Serial.print("hastighet="); // Skriver ut hastigheten i procent i Serial Monitor
        Serial.print(proc);
        Serial.println("%");
    }
    if (potVal > 512 + diff){
        int pwmVal = map(potVal,512+diff,1023,1500,1900); // Konverterar potentionmetervärden
        till värden för thrustern.
        servo.writeMicroseconds(pwmVal);
    }
}

```

```
int proc = map(potVal,512+diff,1023,0,100);
Serial.print("hastighet="); // Skriver ut hastigheten i procent i Serial Monitor
Serial.print(proc);
Serial.println("%");
}
if (potVal < 512 - diff){
int pwmVal = map(potVal,0,512-diff,1100,1500); // Konverterar potentionmetervärden
→ till värden för thrustern.
servo.writeMicroseconds(pwmVal);
int proc = map(potVal,0,512-diff,-100,0);
Serial.print("hastighet=");
Serial.print(proc);
Serial.println("%");
}
}
```