



**CHALMERS**



# Bärplansbåt: Från Koncept till Konstruktion

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima vetenskaper

HUGO ALFREDSSON  
LINUS BÖRJESSON  
FREDRIK HANSSON  
ALEXANDER KONGSTAD  
ISAC PALM  
HUGO SUNDSTRÖM

**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2024  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)

KANDIDATARBETE VT 2024

## **Bärplansbåt: Från Koncept till Konstruktion**

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima vetenskaper

HUGO ALFREDSSON  
LINUS BÖRJESSON  
FREDRIK HANSSON  
ALEXANDER KONGSTAD  
ISAC PALM  
HUGO SUNDSTRÖM



**CHALMERS**

Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg 2024

Bärplansbåt: Från Koncept till Konstruktion  
Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima vetenskaper  
HUGO ALFREDSSON  
LINUS BÖRJESSON  
FREDRIK HANSSON  
ALEXANDER KONGSTAD  
ISAC PALM  
HUGO SUNDSTRÖM

© HUGO ALFREDSSON, LINUS BÖRJESSON, FREDRIK HANSSON, ALEXANDER KONGSTAD, ISAC PALM, HUGO SUNDSTRÖM 2024.

Handledare: Ola Benderius, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper  
Handledare: Alexey Vdovin, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper  
Examinator: Arash Eslamdoost, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2024  
Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Färdig modell tagen vid fälttest.

Skriven i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Göteborg 2024

Bärplansbåt: Från Koncept till Konstruktion  
Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima vetenskaper  
HUGO ALFREDSSON  
LINUS BÖRJESSON  
FREDRIK HANSSON  
ALEXANDER KONGSTAD  
ISAC PALM  
HUGO SUNDSTRÖM  
Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper  
Chalmers Tekniska Högskola

## Sammandrag

Bärplansbåtar har funnits under en lång tid, men på grund av begränsade kontrollsystem har de varit för komplicerade och dyra. Parallellt med utvecklingen av bärplansbåtar går utvecklingen av elbåtar snabbt framåt. Många problem med elbåtar gällande batteristorlek och vikt gör dem icke-hållbara på grund av deras begränsade körsträcka. Men idén att kombinera dessa tekniker kan revolutionera sjöfartsindustrin på grund av den betydande mängd energi som kan sparas vid flygande körning.

Denna kandidatuppsats syftar till att bygga en bärplansbåt med målet att förbättra ett tidigare projekt med liknande mål. Målet är att skapa en ej skalenlig prototyp av en bärplansbåt, vilket möjliggör slutsatser och rekommendationer för framtida forskning inom detta område. Rapporten fokuserar främst på systemets design, den använda metoden och associerade utmaningar.

Systemets design omfattar flera komponenter: ett kontrollsystem, vingkonfiguration, vingdesign, skrovdesign och slutligen hur de är sammanlänkade. Kontrollsystemets uppgift är att reglera stigning och roll för att bibehålla båtens stabilitet vid flygning. För reglering användes ett autopilotprogram kallat ArduPilot. Vingkonfigurationen och vingdesignen är relaterade till varandra med målet att ge tillräckligt med lyftkraft för att lyfta båten. Den valda konfigurationsdesignen är ett trevingat system, med två vingar placerade framtill och en bak. De främre vingarna ansvarar för att ge 80% av vingarnas lyftkraft samtidigt som de reglerar roll, medan den bakre vingens uppgifter innebär styrning, reglering av stigning (och därmed höjd). Designen av vingarna resulterade i en T-formad konfiguration, med vingöron på de främre vingarna och rundade kanter på den bakre vingen. Dessutom placerades båtens propellrar något ovanför vingen på de främre stagen. Regleringen av dessa vingar sker ovanför vattenytan, där vingarna och stagen ändrar sin vinkel för att reglera lyftkraften. Skrovdesignen anpassades från ett tidigare projekt som fokuserade på att designa en bärplansfärja. Detta skrov valdes eftersom det tidigare arbetet ansågs ha optimerat formen för ett liknande ändamål.

Systemdesignen testades sedan för att analysera konstruktionen trots avsaknaden av en höjdsensor. En höjdsensor ska mäta avståndet från båten till vattenytan, vilket tillåter autopiloten att reglera detta avstånd. Utan sensor måste avståndet regleras manuellt vilket är komplicerat. Det visade sig dock att båten både kunde flyta och flyga, vilket bekräftar att propellrarna kan leverera tillräckligt med drivkraft och vingarna kan producera den nödvändiga lyftkraften. Ett problem som upptäcktes var en lätt baktung vikt-fördelning. Det resulterade i att fören lyfte från vattenytan innan aktern hade lyft. Följaktligen, när vingarna och propellrarna på de främre vingarna nådde vattenytan minskade deras effektivitet, vilket fick båten att sjunka mot vattnet igen. Genom att lägga till extra vikt på fören flyttades den longitudinella tyngdpunkten framåt och därmed närmare den resulterande lyftkraften från vingarna, vilket resulterade i en bättre dynamisk jämvikt av krafter och moment i systemet. Det möjliggjorde att båten kunde flyga i några sekunder.

De primära slutsatserna som dras för den fortsatta utvecklingen av båten är att uppnå rätt balans när det gäller båtens tyngdpunkt och lyftkraftsrelationen mellan den bakre vingen och de främre vingarna, samt att implementera en höjdsensor.

## Abstract

Foiling boats have been around for a long time but due to limited control systems they have been too complicated and expensive. Parallell with the development of foiling boats, the development of electric boats is going quickly. Many problems with electric boats regarding, battery size and weight make them non-sustainable because of their small driving range. But the idea of combining these techniques can revolutionize the shipping industry due to considerable amount of energy that could be saved when foiling.

This bachelor thesis endeavors to build a hydrofoiling boat, aiming to enhance a prior project with a similar objective. The goal is to create a scaled prototype of a hydrofoiling boat, enabling conclusions and recommendations for future research in this field. The report focuses mainly on the system's design, the employed methology and associated challenges.

The system's design comprises several components: a control system, wing configuration, wing design, hull design, and finally, how they are interconnected. The control system's role is to regulate roll and pitch to maintain the boat's stability in flight. For the model, an autopilot program called ArduPilot was utilized. ArduPilot is a program usually used for radio controlled airplanes with built in gps and gyroscope to regulate the system. The wing configuration and wing design are interrelated, aiming to provide sufficient lift to elevate the boat. The chosen configuration design is a three-wing system, with two wings located at the front and one at the rear. The front wings are tasked with providing 80% of the wings' lift while also regulating roll, whereas the rear wing's role involves steering, regulating pitch (thus altitude), and contributing the remaining 20% of the system's lift. The design of the wings resulted in a T-shaped configuration, with winglets on the front wings and a rounded edge on the rear wing. Additionally, on each front wing strut, the boat's propellers were positioned slightly above the wing itself. Regulation of these wings occurs above the water surface, where the entire wings, including their supporting struts, alter their angle (rake) to regulate lift force. The hull design was adapted from a previous project focused on designing a foiling ferry. This hull was chosen because the prior work was deemed to have optimized the shape for similar purposes as this endeavor. Both the hull and wings were 3D-printed using PETG material.

Once the system design was complete, the boat was tested to analyze the construction despite an absence of a height sensor. A height sensor is supposed to measure the distance of the boat to the water surface allowing the autopilot to regulate this distance. Without the sensor the distance have to be regulated by hand which could be complicated. It was found that the boat could both float and fly, confirming that the propellers can deliver enough thrust and the wings can produce the required lift. A problem did, however, arose regarding its slight astern weight distribution. This resulted in the bow of the boat lifting from the water surface before the stern had fully lifted. Consequently, when the wings and propellers on the front wings reached the water surface, their effectiveness diminished, causing the boat to descend towards the water again. Adding extra weight to the bow moved the longitudinal center of gravity forward, and thus bringing it closer to the resultant lift force from the wings which consequently resulted in a better dynamic equilibrium of the forces and moments in the system. This allowed the boat to fly for a few seconds.

Finally, the results of the field tests are discussed, and conclusions are drawn regarding the development of the boat and future research directions. The primary conclusions drawn for the continued development of the boat are to achieve the correct balance concerning the boat's center of gravity and the lift force ratio between the rear wing and front wings, as well as to implement a height sensor.

## **Förord**

Rapporten presenterar resultaten av en kandidatuppsats utförd vid Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper på Chalmers tekniska högskola i Göteborg, Sverige. Målet med projektet var att bygga en fungerande modell av en bärplansbåt. Projektet genomfördes under perioden Januari-Maj 2024.

## **Författarnas tack**

Vi vill tacka Docent Arash Eslamdoost för möjligheten att arbeta med detta intressanta projekt och för hans mycket hjälpsamma vägledning under hela arbetet. Vi skulle också vilja rikta ett tack till vår handledare Docent Ola Benderius för hjälp med frågor kring reglersystem och personalen i Prototyplabbet för hjälp vid konstruktion.

Hugo Alfredsson, Linus Börjesson, Fredrik Hansson, Alexander Kongstad, Isac Palm, Hugo Sundström  
Göteborg, Maj 2024

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	1
1.2	Syfte . . . . .	1
1.3	Förutsättningar . . . . .	1
1.4	Antaganden och avgränsningar . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>4</b>
2.1	Skrov . . . . .	4
2.2	Vinge . . . . .	4
2.2.1	Vingars lyft- och motståndskraft . . . . .	4
2.2.2	Vingkonfiguration . . . . .	7
2.3	Reglering . . . . .	8
2.4	Propulsion . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Systemdesign</b>	<b>10</b>
3.1	Skrov . . . . .	10
3.2	Vinge . . . . .	11
3.2.1	Vingprofil . . . . .	12
3.2.2	Storlek och utformning av vingar . . . . .	14
3.2.3	Stag . . . . .	16
3.3	Propellrar . . . . .	18
3.3.1	Propellerplacering . . . . .	18
3.3.2	Propellerkraft . . . . .	19
3.4	Lyft- och motståndskraft . . . . .	19
3.5	Ställning . . . . .	22
3.6	Tyngdpunkt . . . . .	23
3.7	Reglering . . . . .	24
3.8	Elektronik . . . . .	25
3.8.1	Kopplingschema . . . . .	25
3.8.2	Konfiguration . . . . .	26
3.8.3	Radiokontroll . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Fälttest</b>	<b>29</b>
4.1	Förutsättningar . . . . .	29
4.2	Testresultat . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>35</b>
5.1	Lyft- och motståndskraftsberäkningar . . . . .	35
5.2	Reglering . . . . .	35
5.2.1	Höjdregering . . . . .	35
5.2.2	Reglerande av anfallsvinkel ovanför vattenytan . . . . .	36
5.3	Balans . . . . .	36
5.3.1	Tyngdpunkt relativt till skrovets flytkraft . . . . .	36
5.3.2	Flygbalans . . . . .	37
5.4	Vibrationer . . . . .	37
5.5	Vingkonstruktion . . . . .	37
5.6	Propellerposition . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Slutsats</b>	<b>39</b>
	<b>Referenser</b>	<b>40</b>

<b>Bilagor</b>	<b>42</b>
<b>A Matlab kod</b>	<b>42</b>
<b>B Komponentlista</b>	<b>46</b>

# 1 Inledning

Bärplansbåtar har funnits sedan sent 1800-tal, men det blev speciellt stort under 1960-talet när företag började titta på bärplansbåtar med jetmotorer. Även om den uppståndelsen dog efter några år finns jetbärplansbåtar kvar än idag. De största anledningarna till att bärplansbåtar slutade produceras var den begränsade reglerteknologin och att underhåll var kostsamt och komplicerat. Idag har denna teknologi kommit ikapp i både regler- och materialtekniken vilket gör att bärplansbåtar med största sannolikhet kan vara aktuella igen (Sheahan, 2021). Samtidigt har det sedan länge utvecklats båtar som drivs av elektriska motorer, men det finns vissa svårigheter med dessa. Den önskade effektiviteten jämfört med pris, storlek på batteri och tyngd har inte varit hållbar. Med hjälp av bärplansteknik kan däremot energikonsumtionen reduceras upp till cirka 80%, vilket gör att båtar med elmotorer är möjliga igen men nu på ett hållbart vis (Eslamdoost m. fl., 2022). Bärplansbåtar med elmotorer kan och är delvis redan på väg att ändra sjöfartsindustrin på riktigt. Stockholm håller redan på att implementera den första "flygande" elfärjan för passagerare med hjälp av företaget Candela (Blideman, 2024). Följande kapitel ger en bakgrund till projektet samt översiktlig plan, syfte och projektavgränsningar.

## 1.1 Bakgrund

Bärplansbåtar är konstruerade på samma vis som vanliga båtar men är under vattenytan utrustade med vingar. Bärplansbåtsvingar genererar, liksom flygplansvingar, en lyftkraft när en fluid flödar över vingen. Denna lyftkraft får skrovet att lyfta ur vattnet. Den minskade våta ytan minskar motståndet markant och båtarna blir således mer effektiva och miljövänliga.

Detta projekt utgår från ett tidigare projekt inom samma område. I projektet undersöktes och konstruerades en prototyp av en bärplansbåt.

## 1.2 Syfte

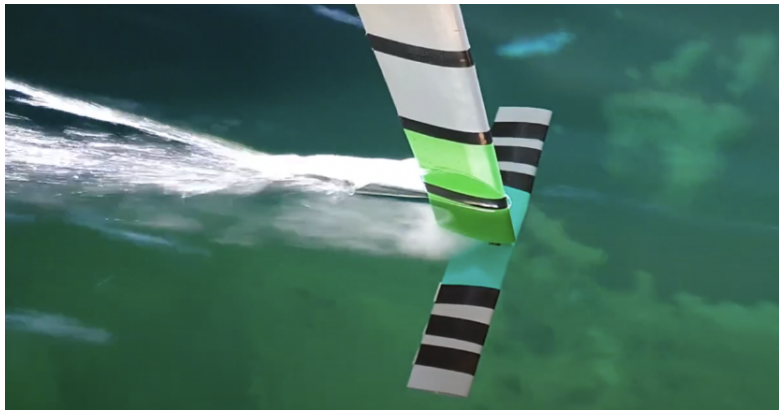
Syftet med följande projekt är att vidareutveckla det projekt som gjorts och undersöka dess felkällor för att kunna konstruera en modulär båtprototyp som ej är skalenlig, men som lyfter över vattenytan. Projektet kommer sedan att lägga grund för vidare forskning inom området bärplansteknik och elektrifiering av kommersiella färjor med bärplan.

## 1.3 Förutsättningar

Det projektet som detta grundar sig i var en mastersuppsats inom marin arkitektur och havsteknik (Favrum & Lundqvist, 2022). Modellen skulle vara modulär för att undersöka påverkan av vingarnas position på en bärplansbåt. Se figur 1 för bild på modellen. Deras projekt var tänkt som ett utvecklingsprojekt och som en plattform för att skaffa kunskap inom användningen av bärplansteknik på fullskaliga räddningsbåtar i Sjöräddningssällskapets flotta (Favrum & Lundqvist, 2022). Det togs därför fram en ställning som med hjälp av ett redan befintligt skrov samt tre vingar fungerade som en bärplansbåt som med vingarna försökte få båten att lyfta över vattenytan. Den prototyp som skapades fungerade dock inte som önskat och vid fälttesterna lyfte aldrig båten ur vattnet. Anledningarna till att båten inte lyfte ansågs inte bero på konceptidén utan på grund av att prototypen var för tung, propellrarna var felplacerade samt hade för låg effekt och att det skapades för mycket motståndskraft från dess bärplansvingar och skrov. Detta resulterade i att lyftkraften som skapades var för liten. Anledningen till prototypens vikt samt höga motståndskraft ansågs bland annat bero på det redan innan befintliga skrovet, se figur 1, som var tungt och stort i förhållande till vingarnas kapacitet. En annan stor upptäckt var ett ventilationsfenomen som upptäcktes vid tester, se figur 2. Det fanns en distans mellan vingen och det ihåliga staget, som är det som kopplar ihop vingen med ställningen, vilket skapade turbulens vid högre hastigheter men också ett sug från stagets topp som drog ner båten mot vattenytan. För att undvika denna distansen kan andra lösningar på hur anfallsvinklarna på vingarna justeras undersökas.

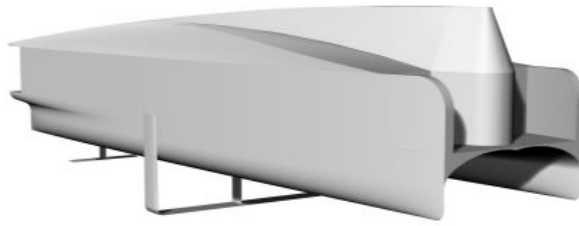


Figur 1: Tidigare projekts koncept.



Figur 2: Ventilationsfenomen upptäckt från tester vid SSPA.

Eftersom tiden inte finns för att både vidare utveckla konceptet med nya vingprototyper samt att utarbeta en design för ett helt nytt skrov används ett befintligt skrovkoncept. Skroven formgavs i ett projekt i Chalmerskursen "Marine Design Project 2023 (MMA151)" (Barman m. fl., 2023) på mastersprogrammet Mobility Engineering. Projektet gick ut på att skapa en passagerarfärja för uppdragsgivaren Styröbolaget, som senare namngavs till "HSC Vinga", se figur 3. Vid utvecklingen av bärplansbåten var inte den viktigaste parametern den hydrodynamiska förmågan. De fasta parametrarna var istället satta utifrån existerande infrastruktur, regelverk och frågeställan från uppdragsgivare. Parameterarna var bredd och längd på hela skroven samt att det skulle vara en katamaran. Det genomfördes däremot flera olika beräkningar av bland annat våg- och friktionsmotstånd för att optimera skrovformen. Viktigt att notera är att skroven är optimerade för att minimera motstånd vid hastigheter under lyfthastigheten, som är den hastighet då båten stiger upp ur vattnet. Innan denna hastighet är båten fortfarande i vattnet och skrovmotståndet är högt.



Figur 3: HSC Vinga, Electric foiling ferry MMA151.

#### **1.4 Antaganden och avgränsningar**

Projektet syftar endast till att genomföra experiment på, och konstruera en fartygsprototyp som använder sig av bärplansteknik. Däremot avser inte projektet att prototypen ska vara skalendig till ett verkligt fartyg. Således kommer anpassningar i dimensioner, material och effekt göras. Projektet är tidsbegränsat till vårterminen 2024 samt budgetbegränsat. Därmed kommer det inte gå att analysera stora mängder av vinggeometrier för att komma fram till den geometri som bäst passar projektets tillämpning. I ett tidigare projekt från kursen "Marine design project" inom samma område undersöktes och dimensionerades ett optimalt anpassat skrov som använder sig av bärplansteknik. Undersökning och design av skroven kommer därför inte vara en del av detta projekt då det anses vara väl optimerat.

## 2 Teori

I följande kapitel beskrivs först beräkningstillvägagångssätt för ett skrovs flyt- och motståndskraft. Efter detta beskrivs också vingars geometri, vingkonfiguration samt beräkningstillvägagångssättet för deras lyft- och motståndskraft. Konceptet vad gäller bärplan fungerar på samma vis som flygplan. Då forskningen kring flygplan har kommit något längre samt har en större bredd dras många paralleller mot den. Vidare i kapitlet beskrivs även reglering av vingarna för att skapa balans i systemet. Teorin lägger sedan grund för projektets koncept.

### 2.1 Skrov

För att utforma en fungerande bärplansbåt krävs det en båt med ett skrov som uppfyller krav på lyftkraft, motståndskraft och stabilitet. Lyftkraft från ett skrov beräknas med Arkimedes princip som säger att lyftkraften är lika med vikten av den undantryckta vätskan som en geometri trycker undan.

Motståndskraft för ett skrov kan beräknas med ekvation 1 (Propulsion Committee of the 28 ITTC, 2017), där  $R_T$  är skrovets totala motstånd,  $R_F$  är friktionsmotståndet och  $R_W$  är vågmotståndet.  $k$  i ekvationen är formfaktorn,  $A_w$  är den vattensänkta ytan av skrovet,  $\rho$  är densiteten av vatten,  $V$  är hastigheten av båten,  $C_F$  är friktionsmotståndskoefficienten och  $C_W$  är vågmotståndskoefficienten. När en bärplansbåt kommer upp i hastighet, kommer skrovet sakta lyfta ur vattnet och därmed kommer motståndet från skrovet vid en viss hastighet att försvinna men vingarna och stagens motstånd kommer bestå.

$$R_T = (1+k)R_F + R_W = (1+k)\frac{1}{2}\rho V^2 A_w C_F + \frac{1}{2}\rho V^2 A_w C_W \quad (1)$$

För att beräkna friktionsmotståndskoefficienten  $C_F$  används ekvation 2 (26th ITTC Resistance Committee, 2011) som enligt ITTC beräknas med hjälp av skrovets Reynoldstal,  $Re$ , som i sig kan beräknas genom ekvation 3, där  $\rho$  är densiteten av vätskan skrovet befinner sig i,  $V$  är hastigheten av vätskans flöde,  $L$  är den karaktäristiska längden, i detta fall längden av skrovet och  $\mu$  är vätskans dynamiska viskositet.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re_n) - 2)^2} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3)$$

### 2.2 Vinge

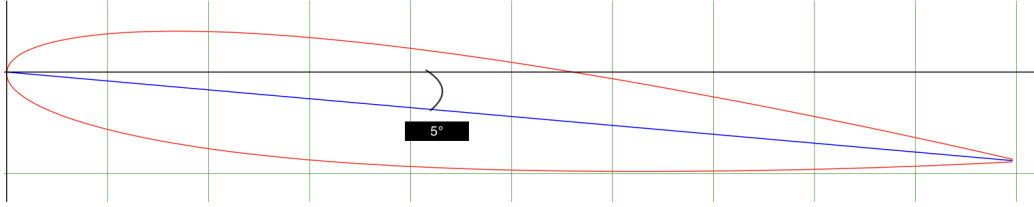
För att få ett fungerande bärplan till den båt som skall konstrueras krävs en vinggeometri som klarar av lyft av egentynghden men även att kunna regleras. Vinggeometrier finns i alla möjliga former, skalor och symmetrier. Projektet har utgått ifrån att fastställa de behov som krävs från vingarna och godtyckligt välja en profil som uppfyller dessa krav. Följande kapitel beskriver teorin kring vinggeometrier samt beräkningar av motstånd- och lyftkrafter.

#### 2.2.1 Vingars lyft- och motståndskraft

Beroende på tillämpning är olika utformningar på vingen att föredra. En parameter som ställs i centrum är vid vilken hastighet lyftkraften ska bli större än egentynghden. Exempelvis vid låga farter är en lång och smal vinge att föredra medan för högre farter måste vingen göras kortare och bredare (NE, u. å.). Tillämpning av vingar fungerar detsamma oavsett vilket media det strömmar genom, alltså luft som vatten. Förklaringen för hur lyftkraft alstras kan beskrivas på många olika sätt. En förklaring är att om en kraft appliceras på en massa får massan en högra hastighet i kraftens riktning. Vingens snedställda riktning gentemot fluiden ger en hastighetsökning av fluiden nedåt som i sig genererar lyftkraft (NE, u. å.).

Anfallsvinkel är ett centralt begrepp när det pratas om lyftkraft. Illustrerat i figur 4, ses en snedställning av

vingen. I detta fall med  $5^\circ$ . Desto större snedställning desto större lyftkraft alstras tills ett maximum uppnås varefter vingen stegras för mycket (NE, u. å.). Större anfallsvinkel kommer även bidra till en större motståndskraft vilket bromsar hastigheten hos fordonet.



Figur 4: Illustration av anfallsvinkel

Syftet med vingprofiler är att alstra den största möjliga lyftkraften, ortogonal mot stömlinjen, samtidigt som motståndskraften, parallell med strömlinjen, ska minimeras. Relationen mellan lyft- och motståndskraft, och anfallsvinkeln kan beskrivas: vinkeln mellan kordalinen och strömlinjen kallas för *anfallsvinkeln*,  $\alpha$ . Lyftkraften  $L$  och motståndskraften  $D$  beror på denna vinkel. De dimensionslösa krafterna definieras med avseende på vingarean  $A_p = bc$  (Frank M. White, 2016). Lyft- respektive motståndskraften kan beräknas enligt följande:

$$L = \frac{1}{2} C_{L,2D} \rho V^2 A_p \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{2} C_{D,2D} \rho V^2 A_p \quad (5)$$

Variablerna  $C_{D,2D}$  och  $C_{L,2D}$  är motstånd- respektive lyftkoefficienten som är en funktion av anfallsvinkeln,  $\alpha$ , och Reynoldstalet,  $Re_c$  (Frank M. White, 2016) som kan extraheras för en viss tvådimensionell vingprofil. Dessa koefficienter måste därför kompenseras för i en färdig tredimensionell vinge.  $A_p$  i dessa formler står för den projicerande arean, alltså arean av vingen vid en vy ovanifrån.

Reynoldstalet är en dimensionslös parameter som beskriver flödesförhållandet för en kropp i rörelse i en fluid. Reynoldstalet ligger till grund för analys av lyft och motståndskraft. Parametern beräknas enligt, som tidigare nämnt, ekvation 3. Där  $\rho$ ,  $V$ ,  $\mu$  är samma variabler som tidigare, men  $L$  är nu djupet (kordalinen) av vingen (Airfoiltools, 2024).

För att kompensera  $C_{L,2D}$  och  $C_{D,2D}$  för en tredimensionell vinge kan ekvation 6 och 7 användas (Larsson m. fl., 2022).

$$C_L = \frac{C_{L,2D}}{1 + \frac{2}{AR_{eff}}} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{C_L^2}{\pi AR_{eff} e} + C_{D,2D} \quad (7)$$

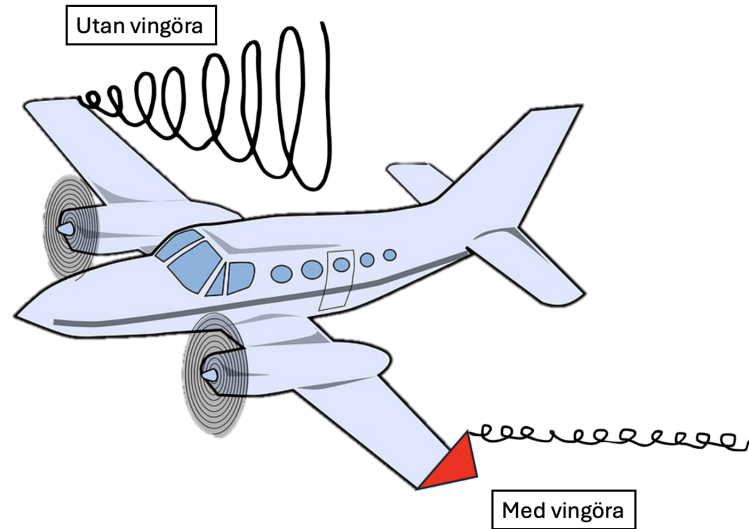
Där  $AR$  är vingens "Aspect Ratio" som kan beräknas genom ekvation 8 (Benson, u. å.) och  $AR_{eff}$  är den effektiva  $AR$ :n som beror på utformningen av vingen.

$$AR = \frac{s^2}{A} \quad (8)$$

Här är  $s$  vingspannet och  $A$  vingens area vid vy ovanifrån. "Aspect Ratio" är ett centralt begrepp inom vingteori som beskriver relationen mellan en vinges bredd (vingspann) och djup (kordalinen). För rektangulära vingar kan ekvationen förenklas till enbart  $s/b$  där  $b$  är vingens djup.

$AR_{eff}$  beror på utformningen av vingen som om den till exempel har vingöron. Vingöron är en del av många vingar där de längst ut på tippen finns en böjd del eller ett stopp för att minimera vingspetsvirvlar. Detta är ett

fenomen där det bildas virvlar i fluiden runt om vingen vilket inte är bra för vingens lyft- och motståndskraft. Exempel på hur dessa vingöron kan se ut ses i figur 5



Figur 5: Vinge med och utan vingöron (Clip art website - Viziclipart, u. å.).

Med vingöron kan  $AR$ :n ökas utan att öka vingspannet (Collins, 2017). För att beräkna  $AR_{eff}$  för en vinge med vingöron används ekvation 9, där  $s_{wl}$  är bredden av vingens vingöron.

$$AR_{eff} = AR + \frac{s_{wl}^2}{A} \quad (9)$$

Från ekvation 7 finns en variabel som benämns  $e$ . Denna variabel är 'Oswald's efficiency factor' och beräknas för rektangulära vingar från vingens  $AR$  enligt ekvation 10. För att kompensera för vingöronens påverkan används också ekvation 11 (Calculator Academy, 2023), där  $s_{eff}$  är vingens vingspann,  $s$ , adderat med vingöronens bredd.

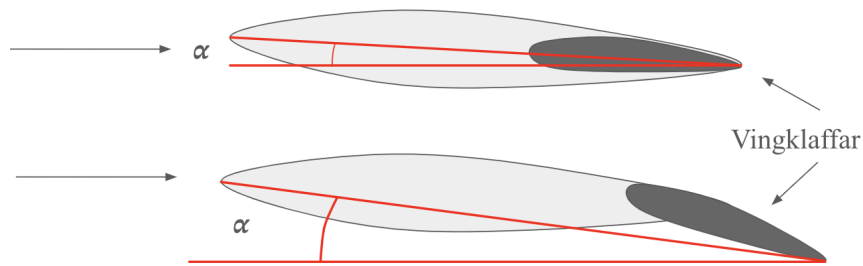
$$e_0 = 1.78(1 - 0.045AR^{0.68}) - 0.64 \quad (10)$$

$$e = \left(\frac{s_{eff}}{s}\right)^2 e_0 \quad (11)$$

Med de nya och kompenserade variablerna  $C_L$  och  $C_D$  kan den slutliga lyft- och motståndskraften beräknas med samma ekvationer som ekvation 4 och 5 fast med ett utbyte av de tvådimensionella koefficienterna mot de nya koefficienterna för en tredimensionell vinge. För att sedan beräkna systemets effekt används ekvation 12, där  $F_D$  är systemets motståndskraft,  $V$  systemets hastighet och  $\eta$  systemets sammanlagda verkningsgrad som till exempel propellerverkningsgraden, den mekaniska verkningsgraden och den elektriska verkningsgraden.

$$P = \frac{F_D V}{\eta} \text{ [W]} \quad (12)$$

För att öka lyftkraften hos en vinge kan vingklaffar användas. Vingklaffarnas uppgift är att ändra vingprofilen för att generera mer lyftkraft i lägre hastigheter. Vingklaffarna monteras i bakkanten på vingen och kan sedan skjutas ut nedåt och bakåt vilket förlänger kordalinen. Det ändrar i sin tur anfallsvinkeln vilket genererar mer lyftkraft men även mer motståndskraft, se figur 6. Därför används de oftast för att generera mer lyftkraft vid start och mer motståndskraft vid landning (Brassaw, 2024).

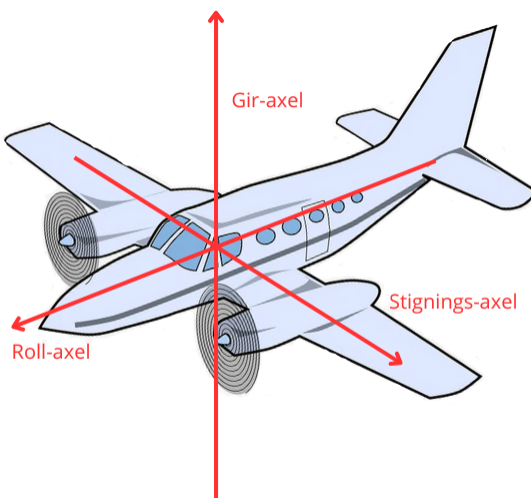


Figur 6: Vingklaffar

En annan aspekt som kan uppstå för vingar som är nedsänkta i vatten är ventilering. Detta sker när vingarna kommer för nära vattenytan och drar med sig luft i flödet runt vingen. Vid ventilering tappas lyftkraften och motståndet ökar. För att förhindra detta behöver det säkerställas att vingarna alltid befinner sig tillräckligt långt ner under ytan att detta inte uppstår. Ett säkert avstånd för detta anses vara ett avstånd på 1,5 gånger kordalinen enligt A. Eslamdoost (personlig kommunikation, 2024), docent vid marinteknik, Chalmers.

### 2.2.2 Vingkonfiguration

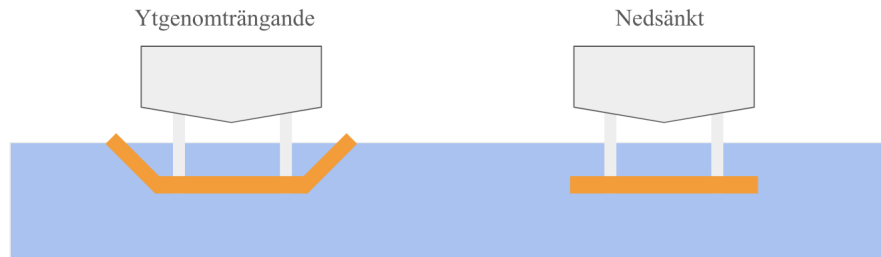
En bärplansbåt opererar på liknande sätt som många flygplan när det gäller att balansera på dess vingar i vattnet. Rotationen av en bärplansbåt omfattar tre huvudsakliga axlar: roll-, stignings- och giraxel. Varje axel representerar en dimension i ett 3-dimensionellt koordinatsystem. Rollaxeln sträcker sig längs båtens längdaxel och utgår från tyngdpunkten och justerar sidledsrotationer. Stigningsaxeln sträcker sig tvärs över båten mellan vingspetsarna och reglerar båtens vinkel i förhållande till det horisontella planet. Giraxeln är vertikal och går genom båten ortogonalt. Giraxeln styr båtens vinkel i förhållande till det vertikala planet. En schematisk representation av rotationsaxlarna visas i figur 7.



Figur 7: Rotationsaxlar: roll, stigning, gir (Clip art website - Viziclipart, u. å.).

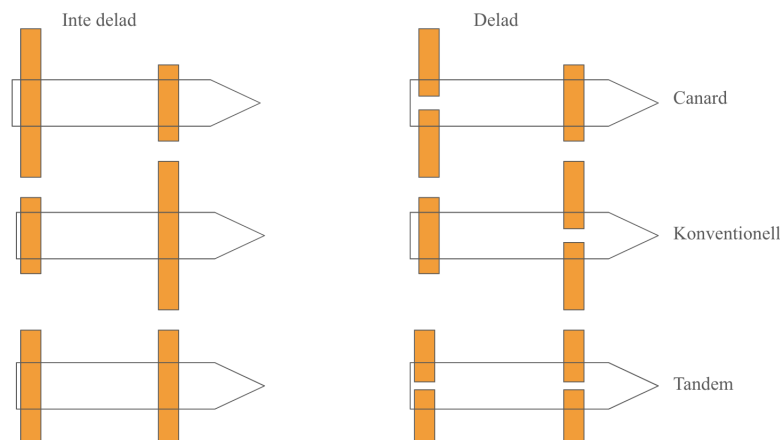
Konfigurationen av vingarna kan enligt Johnston (1985) delas in i två olika delar. Dessa är ytgenomträngande vingar och nedsänkta vingar, se figur 8. Ytgenomträngande vingar är en självstabiliserande konfiguration för

stigning och roll. Det fungerar genom att delar av vingarna är nedsänkta i vattnet och andra delar är ovanför vattenytan. Vingen är sedan sammankopplad med stag för att bära skrovet ovanför vattenytan under drift. När hastigheten ökar bidrar det till större lyftkraft vilket gör att en större del av vingen hamnar ovanför vattenytan. På detta sätt regleras stigning automatiskt. När skrovet istället lutar ökar ytan av vingen under vattenytan vilket rätar upp skrovet och reglerar roll automatiskt. Med nedsänkta vingar är hela vingen nedsänkt under vattenytan. Vingen är sedan kopplad till skrovet genom stag som bär båten ovanför ytan under drift. Dessa vingar är inte självstabiliserande och kräver därmed aktiv styrning av anfallsvinkel för att reglera höjd och roll



Figur 8: Ytgenomträngande och nedsänkta vingar

Vingarna kan därefter delas in i de tre olika konfigurationerna canard, konventionell och tandem, se figur 9. Canardkonfiguration är enligt Johnston (1985), när bakre vingen bär 65% av tyngden eller mer. En konventionell konfiguration är när främre vingen bär 65% av tyngden eller mer och tandem är när tyngden fördelas lika mellan för och akter. Dessa olika konfigurationer kan i sin tur ha delade eller sammansatta vingar.



Figur 9: Olika vingkonfigurationer

### 2.3 Reglering

För att båten ska balanseras på dess vingar krävs precis reglering av dess anfallsvinklar. Regleringen av en bärplansbåt kan kategoriseras i två huvudsakliga metoder: passiv reglering och dynamisk reglering. Passiv reglering innebär att båtens bärplanssystem är konstruerat på ett sådant sätt att dess rotationsaxlar justeras automatiskt utan behov av aktiv intervention. Ett exempel på passiv reglering är användningen av ytgenomträngande vingar.

Ytgenomträngade vingor förklaras i under-underavsnitt 2.2.2. Ytgenomträngande vingor är särskilt effektiva för att reglera stigningsaxeln och kan placeras på vardera sida om rotationspunkten för att uppnå önskad effekt.

Dynamisk reglering innebär att bärplansvingarna inte automatiskt kan justera rotationsaxlarna och därför måste dessa justeringar göras externt med hjälp av till exempel en servostyrning. För att reglera de olika rotationsaxlarna krävs förändringar i lyftkraften som genereras av de olika bärplansvingarna. Detta kan uppnås genom att ändra anfallsvinkeln på vingarna, vilket resulterar i varierande lyftkrafter på de olika vingarna. Dynamisk reglering tillämpas främst på modeller där samtliga bärplansvingar är helt nedsänkta under vattenytan.

För att effektivt hantera dynamisk reglering automatiskt kan en regulator användas. Regulatorer inom regler-tekniken kan styras med hjälp av en eller flera styrsignaler för att kontrollera ett system (Lennartsson, 2000). Det finns olika typer av regulatorer, men med tanke på kraven på snabbhet och stabilitet för att upprätthålla kontinuerlig flygförmåga hos en bärplansbåt, är en PID-regulator (Proportional-Integral-Derivative) särskilt lämplig. En PID-regulator består av tre huvuddelar: en P-del som justerar förhållandet mellan aktuellt och önskat värde (felet), en I-del som kompenserar för eventuellt kvarstående fel från P-delen över tid och en D-del som främst används för system där felet inte är proportionellt hela tiden. Denna kombination möjliggör en snabb och stabil reglering som minimerar avvikelser på kort tid, vilket är viktigt för en bärplansbåts optimala prestanda.

## 2.4 Propulsion

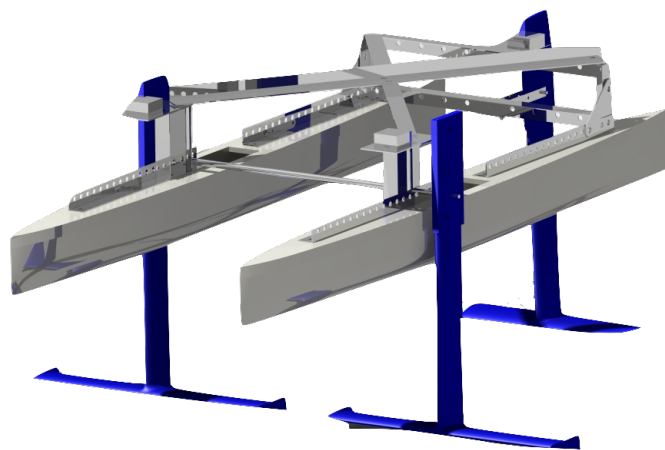
När en propeller roterar trycks vatten bakåt och vattnet framför upplever ett lägre tryck än bakom propellern vilket gör att vattnet framför sugas mot propellern. Detta resulterar i en kraft som driver båten framåt enligt Newtons andra lag som säger att  $F = ma$  där massan,  $m$  är vattnets massa och accelerationen,  $a$  är accelerationen som upplevs av vattnet. Propellrars propellerkraft,  $T_p$ , mäts oftast i kilogram och för att omvandla detta till en kraft mätt i Newton kan ekvation 13 användas med gravitationskonstanten,  $g$ .

$$F_p = T_p g \text{ [N]} \quad (13)$$

Precis som för vingarna kan ventilering ske för propellrarna där de kan komma tillräckligt nära vattenytan att de börjar ta in luft. Luft har en lägre densitet än vatten och därför minskar drivkraften vilket inte är önskvärt. Ett säkert avstånd för propellrarna till vattenytan kan däremot vara svårt att uppskatta men enligt A. Eslamdoost (personlig kommunikation, 2024), docent vid marinteknik, Chalmers, kan en god uppskattning vara en propellerdiameters längd.

### 3 Systemdesign

Under detta kapitel kommer systemdesignen förklaras, se figur 10. Kapitlet behandlar metodiken som tog projektet till dess resultat för respektive del. Metoderna för respektive del grundar sig i den bakomliggande teorin som redogjordes för i föregående kapitel. Ett generellt önskemål för modellen är att bygga ett system som ska vara modulärt för att med lätthet kunna justera och modifiera mindre komponenter i framtiden. För de delar där modularisering är möjligt har modularisering implementerats. Systemet kan delas upp i följande delar: de två skroven, stag med vingar, propellrar, ställningen som kopplar ihop stagen och skroven, samt reglersystem med tillhörande elektroniska delar. Alla delar förutom reglersystemet är ritade och ihopsatta i Catia V5. En lista på samtliga komponenter hittas i appendix B.

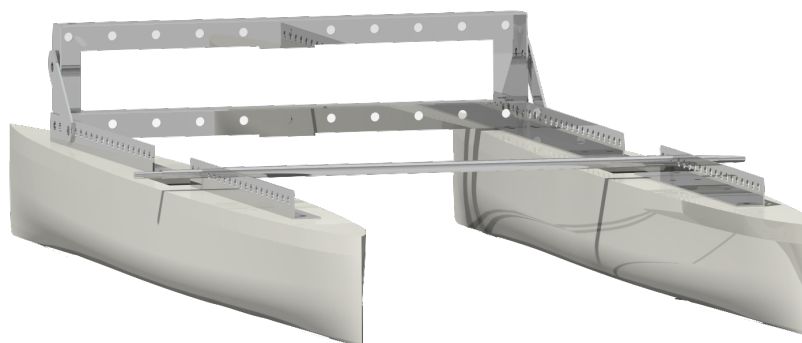


Figur 10: Systemdesign.

#### 3.1 Skrov

Skroven är som tidigare nämnt i underavsnitt 1.3 är taget från ett tidigare projekt, se figur 3. Skroven är anpassade för en färja som skall kunna använda bärplansteknik och är optimerade just för detta. På grund av den optimeringen ansågs det lämpligt att använda samma skrov för det här projektet och anpassa resterande komponenter utefter det. Det är endast den nedre delen av HSC Vinga, alltså dess skrov, som används i projektet och inte resterande delar av båten. Detta för att göra plats åt en ställning som kommer hålla ihop vingar, stag, elektriska komponenter och hela modellen.

Skroven är nedskalade från ursprungsdesignen till en längd på 1,2 meter. Denna längd valdes på grund av att vikten på skroven inte ska bli för stor eftersom den totala vinkten inte ska överskrida tio kilogram. Skrov på 1,2 meter gav en flytkraft på 12 kilogram för att få ha en säkerhetsmarginal på 20%. Bredden mellan de två skroven är även justerad för att de båda framvingarna ska få tillräckligt med plats. Bakgrunden till beräkningarna för dimensionering av vingarna finns i kapitel 2.2. Nedan i figur 11 ses en datorstött illustration av skroven tillsammans med en del av ställningen.



Figur 11: Datorstödd illustration av skrov med en del av ställningen.

Tillverkningen av skroven gjordes till största del i Chalmers FUSE där skrovdelarna 3D-skrivits i plasten PETG. På grund av storleken av skrivarna har skroven behövt skrivas i flera delar som sedan satts ihop med hjälp av PETG-pluggar, epoxylim, silikontätning och tejp. Skroven skrevs ut ihåliga för att spara vikt och säkerställa tillräcklig lyftkraft då båten står still. PETG filament är ett vanligt filament vid 3D-skrivning och har egenskaper som är fördelaktigt för projektet. PETG är i relation till andra filament slitstarkt och har hög vattentålighet vilket är av stor vikt för projektet (123ink, u. å.).

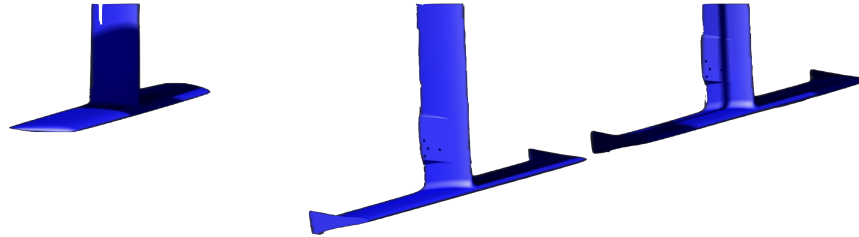
### 3.2 Vinge

Vinggeometrin kan anses vara den viktigaste delen i detta projekt då detta ger upphov till att bärplansbåten kan lyfta. Därför används den teori som beskrivits i kapitel 2.2 för att ta fram den vinggeometri som är bäst lämpad för detta projekt. Tidigt i projektet beslutades att använda tre stycken T-formade vingar i en konventionell delad konfiguration med två fram och en bak. Staget till den bakre vingen används som roder för att styra båtens rörelse kring giraxeln. Att använda tre stycken vingar med två fram och en bak beslutades att använda eftersom det efterliknar ett flygplan och därmed blir enklare att implementera en reglering i ett autopilotprogram.

Ett annat viktigt beslut som togs tidigt i projektet var hur anfallsvinkeln hos vingen skulle justeras där det fanns två olika alternativ. Det första alternativet var att enbart justera vingens anfallsvinkel under vattenytan genom att justera vingens vinkel i förhållande till staget. Däremot kräver det alternativet rörliga delar under vattnet, vilket riskerar att bli mer utsatt för slitage i en havsmiljö och blir även en mer komplex konstruktion. Det andra alternativet var en stel design där stag och vingen inte kan röra sig i förhållande till varandra, utan istället justeras vinkeln för stag och vinge gemensamt i förhållande till skroven. Fördelen med det första alternativet är att vingens tryckpunkt behålls konstant i förhållande till skroven jämfört med den andra designen där tryckpunkten flyttas framåt eller bakåt beroende på vingens anfallsvinkel och båtens tyngdpunkt. Designen där vingens anfallsvinkel justeras i förhållande till staget komplicerar målet gällande en strömlinje-formad design då en mer komplex design bör användas. Därav beslutades det att använda det andra alternativet med stela vingar och reglering ovanför vattenytan. Därefter undersöktes huruvida vingklaffar kan användas för att öka lyftkraften hos vingen. Då båten är nedskalad till modellskala ansågs det allt för komplext att utforma en vinge i modellskala med de anpassningar som krävs för vingklaffar och fortfarande behålla en strömlinje-formad design som kan generera den lyftkraft som krävs. Därför beslutades att inte använda vingklaffar.

Fördelningen av lyftkraft på fram- respektive bakvinge beskrevs i kapitel 2.2.2 för vingkonfigurationen som valdes vara att mer än 65% av lyftkraften ska genereras av framvingarna. Med bakgrund av teorin i kapitel

2.2.2 valdes att 80% av lyftkraften ska åstadkommas av framvingarna vilket resulterar i att tyngdpunkten för modellen ska placeras 20% bakom framvingarnas tryckpunkt förhållandevis bakvingens. Se figur 12 för vingkonfiguration.



Figur 12: Systemets vingkonfiguration.

### 3.2.1 Vingprofil

För att välja den bäst lämpade vingprofilen måste flera aspekter tas i beaktning. Vingen måste först och främst kunna skapa den nödvändiga kraft som behövs för att lyfta massan av hela konstruktionen samtidigt som den ska vara kompatibel och fungera bra med ett reglersystem. Massan av hela konstruktionen antas vara 10 kilogram vilket är en uppskattning grundad från det tidigare arbetet (Favrum & Lundqvist, 2022) samt antaganden från gruppen och A.Eslamdoost (personlig kommunikation, 2024), docent vid marin teknik, Chalmers. Estimationen är högt räknad för att kunna kompensera för diverse komplikationer då nästkommande ekvationer grundas i denna massa. Den slutgiltiga massan landade på 8.2 kilogram vilket betyder att många kraftberäkningar är högt räknade. Förutom att kraven på vingens lyft- och motståndskraft ska uppnås är det även önskvärt att regleringen av vingens anfallsvinkel sker på ett sådant vis att någorlunda linjäritet på krafternas gradient uppnås.

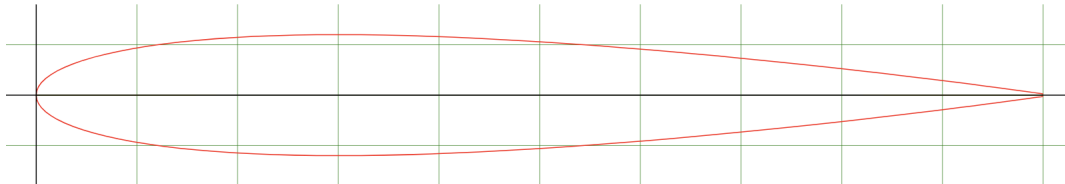
Inga egna vingprofiler skapas i detta projekt, utan redan beprövade profiler kommer istället ligga i grund för projektets val av vingprofil. Det är grund av att det finns tillgänglig data på en mängd olika vingprofiler som gör det enkelt att jämföra och utvärdera dem. Dessutom sparar det tid att inte utveckla och testa en helt egen vingprofil och dess egenskaper. I projektet används databasen Airfoil Tools (Airfoil Tools, u. å.-b) för att jämföra de olika vingprofilerna. Arbetet för att välja den bäst lämpade vingprofilen startade genom att sälla bort de profiler som inte var lämpliga för ett reglersystem. Dessa innefattade asymmetriska profiler som ger mycket lyftkraft men vid små ändringar i anfallsvinkeln ändras lyft- och motståndskraften markant. Det gör asymmetriska vingprofiler till ett instabilt val och är därför inte lämpligt till ett reglerande system.

Efter sållning av icke symmetriska vingprofiler återstår ett stort antal potentiella alternativ som är lämpliga för reglering. För att välja mellan dessa krävs det att jämföra profilernas olika lyft- och motståndskraft samt profilernas förhållande mellan dessa. För att göra en korrekt jämförelse undersöks lyft- och motståndskraftens värden under samma förhållanden, alltså under samma Reynoldstal. För att avgöra Reynoldstalet krävs densiteten och viskositeten hos fluiden som objektet färdas genom, karaktäristiska längden och hastigheten på föremålet. Förklaring och ekvation för Reynoldstalet kan ses i kapitel 2.1. Vingprofilen kommer färdas genom vatten, vars viskositet är  $1.002 \cdot 10^{-3}$  vid  $10^\circ$  C. Eftersom det är svårt att veta exakt hur dimensionerna hos vingprofilen skall vara och hur snabbt modellen kommer att färdas innan några beräkningar har gjorts, jämförs detta med tidigare års projekt. Vingprofilens kordalinje antas då initialt vara 80 mm. Modellen kommer inte operera i endast en hastighet utan denna variabel delas istället in i två delar. Lyfthastighet och marschhastighet som antas initialt vara 2.5 respektive 3 m/s. Antagandet togs från kommunikation med examinator A.Eslamdoost (personlig kommunikation, 2024), docent vid marin teknik, Chalmers. Dessa hastigheter tillsammans med deras Reynoldstal kan ses i tabell 1.

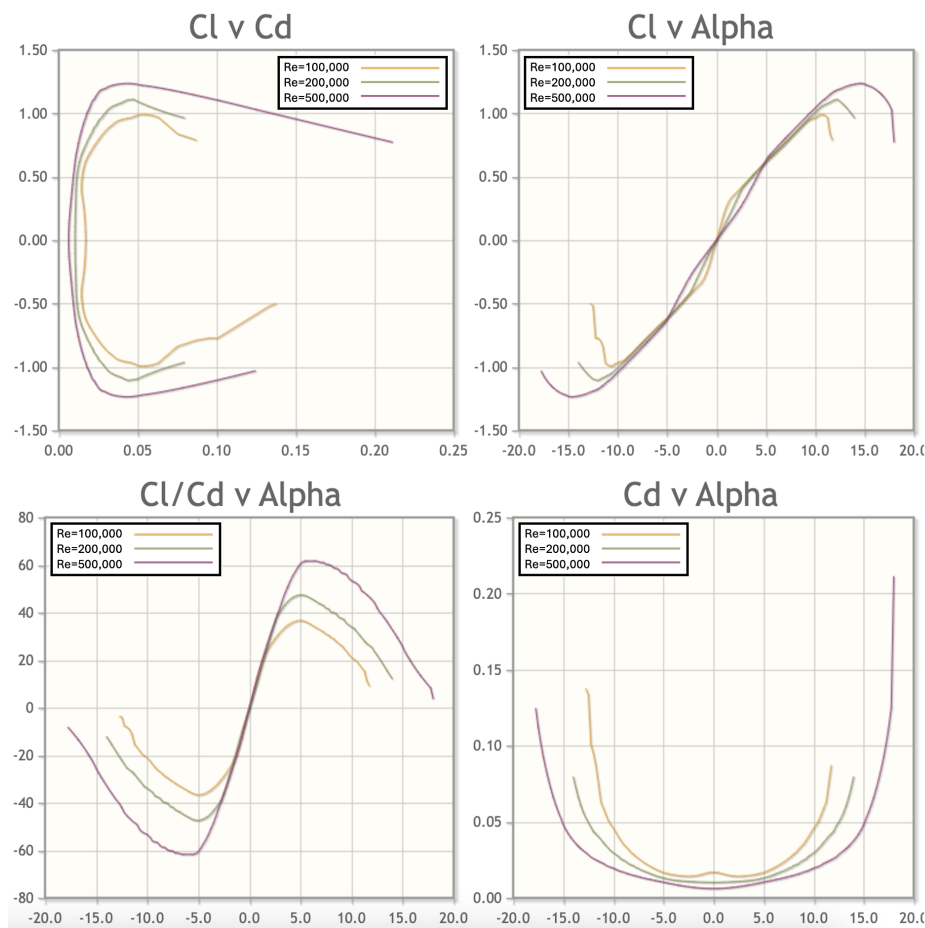
Tabell 1: Reynoldstal i förhållande till hastighet.

	Hastighet [m/s]	Reynoldstal
Starthastighet	2,5	153000
Marschfart	3	183600

Genom att jämföra vingprofilens drag- och lyftkraft med lyfthastighetens och marschhastighetens Reynoldstal, går det att välja den vingprofil som antas vara mest lämpad för detta projekt. Den vingprofil som anses uppfylla de ställda kraven bäst är NACA-0012 (Airfoil Tools, u. å.-a). Drag- och lyftkraft i förhållande till anfallsvinkel för NACA-0012:s vingprofil redovisas i figur 14,  $C_l$  är lyftkonstanten,  $C_d$  är dragkonstanten och  $\alpha$  är anfallsvinkeln. NACA-0012:s vingprofil kan ses i figur 13.



Figur 13: NACA-0012:s vingprofil.



Figur 14: NACA-0012:s lyft- och dragkoefficientsgrafer.

Efter val av vingprofil behövs utgångsansfallsvinkeln hos vingen avgöras. Alltså den vinkel som vingarna har i båtens utgångsläge vid start. För att avgöra utgångsansfallsvinkeln används graferna i figur 14 som beskriver  $C_l/C_d$  mot  $\alpha$  och även den graf som beskriver  $C_l$  mot  $\alpha$ . Det som analyserades var först och främst i vilken vinkel lyftkraften är som störst i förhållande till motståndskraften, eftersom denna vinkel är den mest energisnåla med mest kraft för att lyfta båten. För denna vinkel jämförs även lyftkraften separat för att avgöra om det är rimliga värden. Den initiala vinkeln för framvingarna efter utvärdering är  $5^\circ$  där vinkeln skall kunna regleras upp till  $9^\circ$  och ner till  $1^\circ$  för att öka och minska lyftkraften vid behov. För bakvingen valdes den initiala vinkeln till  $2^\circ$  där den skall kunna regleras från  $-2^\circ$  till  $6^\circ$  på grund av samma anledning som för framvingarna. Den lägre vinkeln på bakvingen valdes för att möjliggöra en negativ vinkel på denna vinge för att kunna reglera stigning vid ett samma vinkelspann som framvingarna.

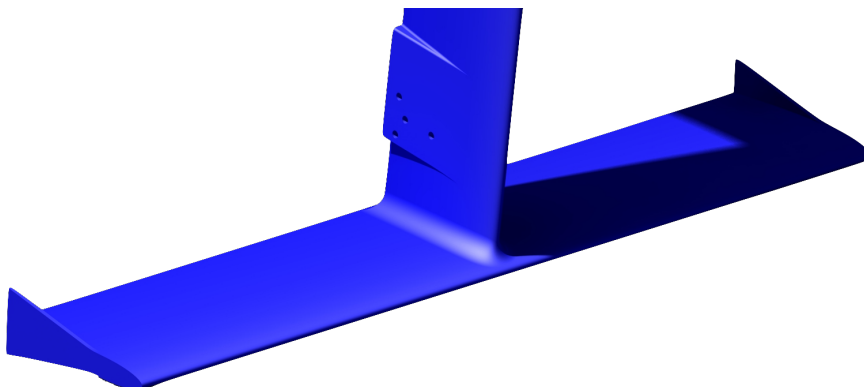
### 3.2.2 Storlek och utformning av vingar

Efter val av vingprofilen och den initiala vinkeln kan vingens storlek och dess utformning designas. För att avgöra en bra storlek används i första hand 'Aspect Ratio':n som beskrivs i kapitel 2.2.1 med tillhörande ekvationer 8 och 9. Med ett högre värde på AR:n fås bättre relation mellan lyft- och motståndskraft vilket också ger ett mer energieffektivt lyft till båten. Med hela konstruktionens antagna massa i åtanke, itereras en fungerande bredd och kordalinje fram. Utöver vingens bredd och kordalinje är det nödvändigt att minimera eventuellt turbulent flöde vid vingpetsarna. Turbulent flöde orsakar mer motståndskraft och kan åtgärdas med hjälp av strömlinjeformad utformning på vingprofilens ändar eller med vingörön som beskrivs i kapitel 2.2.1. Därför valde gruppen

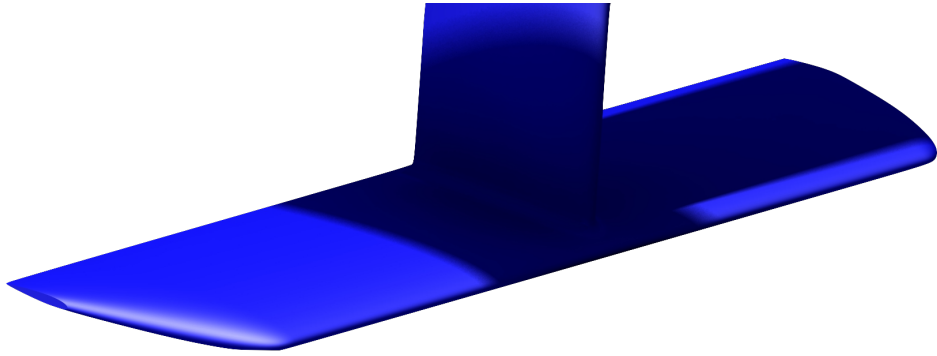
tillsammans med A. Eslamdoost (personlig kommunikation, 2024), docent vid marinteknik, Chalmers, att framvingarna skulle vara utformade med vingöron och bakvingen skulle utformas med ett strömlinjeformat avslut vid vingspetsarna. Anledningen till att vingöron inte används på den bakre vingen är på grund av risken till ökad motståndskraft när vingen skall vinklas i sidled. Kordalinjen ändras även till 85 millimeter för att i senare del av projektet kunna sammanfogas med staget utan att förlora viktiga egenskaper som styvhet och storlek. Med en total massa som antas vara 10 kilogram blir geometrin på vingarna enligt Tabell 2 och tillsammans med vingspetsarnas konfigurationer, blir vingarnas utseende enligt figur 15 och 16.

Tabell 2: Vingspann och kordalinje på vingarna.

	Vingspann [mm]	Kordalinje [mm]
Framvinge (2st)	400	85
Bakvinge	300	85

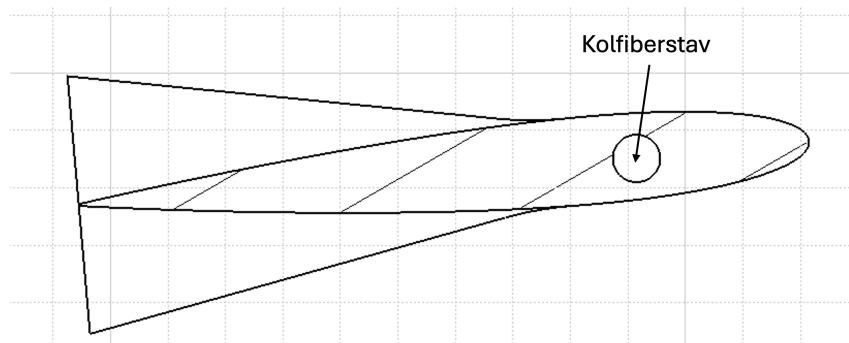


Figur 15: Utformning av framvinge.



Figur 16: Utformning av bakvinge.

På grund av vingarnas komplexa geometri används 3D-skrivning för att tillverka dessa. Precis som för skroven i underavsnitt 3.1, används PETG som material på grund av beskrivna anledningar. Även vingarna delas upp i olika delar vid utskrift på grund av dess storlek i förhållande till 3D-skrivaren. Utskrivning av vingarna har 15% fyllnadsgrad för att göra vingarna styva, samtidigt som de har låg vikt. Däremot har T-sammanfogningen som kopplar vinghalvor med stag en fyllnadsgrad på 30% för denna komponent ansågs komma behöva utstå högre belastningar. Delarna sammansätts med hjälp av mindre PETG-pluggar, epoxylim samt silikontätning och vattentät tejp för att öka vattentätheten. För att öka styvheten i samtliga vingar implementeras även en kolfiberstav med diametern 5 millimeter i vingarnas främre del enligt Figur 17. Ökad styvhet gör vingarna mer tåliga för högre krafter samt minskar risken för oönskade vibrationer som kan störa flödet runt vingarna och påverka lyftkraften negativt. Kolfiber är ett styvt material med låg densitet vilket ger minimal viktökning vid implementering i vingen.



Figur 17: Placering av kolfiberstav i vinge.

### 3.2.3 Stag

Stagen har till uppgift att sammanfoga de tre olika vingarna med skroven och påverkar inte lyftkraften. Ett mer strömlinjeformat stag bidrar till högre effektivitet hos båten eftersom mindre motståndskraft produceras. Staget, som tillsammans med vingen utsätts för mycket kraft, har även till uppgift att hålla vingen stabil och agera vibrationsdämpare för denna. Därför måste ett robust stag väljas. Till projektet valdes vingprofil NACA-0015 på samtliga stag på grund av dess symmetri och strömlinjeform samt att den, i projektets dimensioner, fick önskad bredd. Staget, likt skroven och vingarna, 3D-skrivs i filamentet PETG. För att ytterligare stabili-

sera staget integrerades en kolfiberstav med diametern 5 millimeter i staget på samma sätt som vingen enligt Figur 17. Ytterligare en variabel för stagdimensionering är längden av stagen. Givet från A. Eslamdoost (personlig kommunikation, 2024), docent vid marinteknik, Chalmers, fungerar en vinge som den ska så länge vingen inte kommer närmre vattenytan än 1.5 gånger längden av kordalinen där vingen kan tappa lyftkraft. Med det i åtanke valdes en längd av stag för att det inte skulle vara någon risk att vingarna tappade lyftkraft. Längden av stagen valdes till 470 millimeter för både de främre och bakre stagen. För att justera anfallsvinkeln hos vinge och stag konstruerades två hål i stagen. Ett hål som agerar rotationspunkt och ett håll som servon kan kopplas till. Hålet för rotationspunkten placerades 350 millimeter från botten av stagen och hålet för att koppla servon placerades 450 millimeter från botten av stagen

Under projektet beslutades även att placera en propeller på vardera stag för framvingarna, mer om detta i kapitel 3.3.1, vilket betydde att en anpassning i dimensionering av stagen behövde göras. En plattform där propellerna skulle placeras för att bli parallell med strömlinjen integrerades. Propellerna kopplas med kablar och nästa problem blev då att på ett bra sätt leda de från propellern till batteriet. Lösningen blev att integrera ett hål igenom staget som leder sladdarna till toppen av staget ovan vattenytan. Hålen tätades sedan med silikon. Se figur 18 för projektets lösning.



Figur 18: Stag med utrymme för sladdar integrerat.

### 3.3 Propellrar

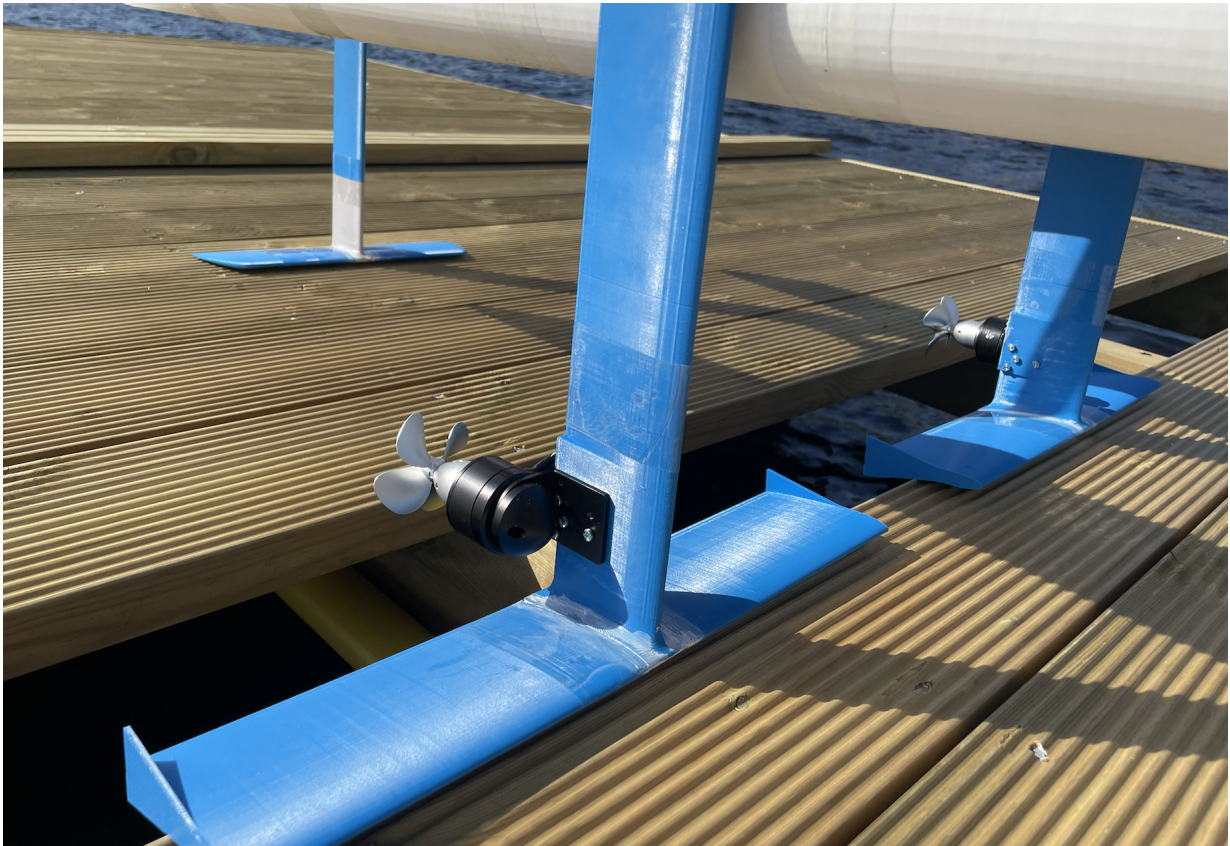
I följande delkapitel undersöks hur de drivande propellrarna integrerades i konstruktionen samt hur mycket drivkraft dessa kommer tillverka för båten.

#### 3.3.1 Propellerplacering

Givet till projektet var två stycken propellrar i metall som tillsammans producerar 9 kilogram i drivkraft. Med tidsbilden för projektet som bakgrund beslutade gruppen att inte undersöka inköp av andra propellrar utan att integrera de befintliga i slutkonstruktionen. Vidare genomfördes en undersökning av den bästa placeringen av de befintliga propellrarna. Det första koncept som tas fram är en lösning där propellrarna integreras in i vingkonstruktionen. Den är då placerad i T-leden, alltså längs ner i staget och i mitten av vingen. Integrationen sker i en torpedprofil som ger en strömlinjeformad konstruktion utan att störa flödet över vingarna och således påverka lyftkraften. Det var framförallt dessa aspekter som framgick under undersökningen. På grund av komplexiteten vid integrationen av propellrarna i T-leden och deras inkompatibilitet med det befintliga stag- och vinglösningen, har projektet inte lyckats genomföra integrationen på ett framgångsrikt sätt.

Till att börja med undersöktes om propellrarna skulle placeras på framvingarna eller bakvingen. Eftersom båten inte planar likt en planande båt måste inte propellern nödvändigtvis sitta längst bak utan kommer kunna vara vattentäckt även längre fram. Två ytterligare fördelar med att ha propellrarna på framvingarna är att det centreras nära konstruktionens tyngdpunkt samt att det även går att styra båten lättare genom att gasa och sakta ned de olika propellrarna var och en för sig. Med detta som bakgrund togs beslutet att propellrarna skulle sitta på främre stagen.

Vidare undersöktes exakt placering på de främre stagen. Den största frågan som ställdes var om propellern skulle sitta under eller över respektive framvinge. Konstruktionen då propellrarna skulle vara placerade under vingarna hade varit att staget fortsatt ner under vingen och att propellern fästs där. Alternativet då propellrarna satt över vingarna skulle propellrarna fästas på det redan befintliga staget utan att staget behöver förlängas. Problematiken med att fästa propellrarna över respektive framvinge är att propellrarna lider av en större risk att hamna för nära vattenytan när båten lyfter. Problematiken med att ha vardera propeller under respektive framvinge är dels att det blir större ytor under vattnet vilket skapar mer motståndskraft. (A.Eslamdoost personlig kommunikation, 2024) Under det föregående projektet sattes propellrarna under vingen, vid en krash tappades då propellrarna. Med detta som bakgrund valde gruppen att sätta propellrarna ovanför vingarna och sträva efter att kunna ha en sådan reglering att propellern inte riskerar att komma över vattenytan. Se figur 19 för konceptet nedan.



Figur 19: Gruppens propellerkoncept

### 3.3.2 Propellerkraft

Propellrarna som användes hade tillsammans en propellerkraft på 9 kilogram med en spänning på 24V och 4,5 kilogram för en spänning på 16V. Detta kan med ekvation 13 beräknas till en propellerkraft på 44,19-88,38 N. Ett rimligt antagande för systemet är att propellrarna befinner sig i den undre delen av detta spann vid ett kontinuerligt arbete men att den vid kortare stunder kan nå den övre delen. Den angivna effekten som propellrarna kan generera är 700 Watt.

### 3.4 Lyft- och motståndskraft

Med båtens vingar, skrov och propellrar designade kunde ekvationerna från kapitel 2.1 och 2.2.1 användas för att beräkna systemets drag- och lyftkraft. Först beräknades vingarnas lyftkraft i tre lägen där vingarna är vinklade minimalt, medium och maximalt. Dessa tre lägen ger anfallsvinklar enligt tabell 3 för framvingar och bakvinge.

Tabell 3: Vinklar för vingarna vid de tre olika lägena.

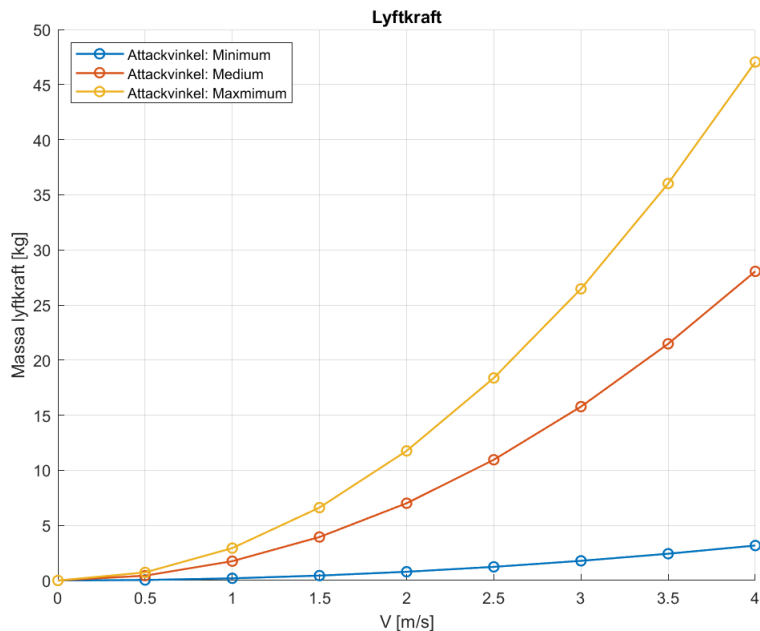
Anfallsvinkel:	Minimum	Medium	Maximum
Framvinge	1°	5°	9°
Bakvinge	-2°	2°	6°

För att beräkna lyftkoefficienterna för de olika lägenas vinklar togs vingprofilernas tvådimensionella lyftkoefficient först fram för dessa. Sedan korrigerades dessa koefficienter för att ta hänsyn för vingens tredimensionella geometri genom vingarnas AR och även för dess vingöron som ökade lyftkoefficienten. De slutliga vingarnas lyftkoefficienter kan ses i tabell 4.

Tabell 4: Lyftkoefficienter för vingar.

Anfallsvinkel:	Minimum	Medium	Maximum
Framvinge	0.1056	0.4575	0.6827
Bakvinge	-0.1370	0.1370	0.4696

Efter beräkningen av lyftkoefficienterna kunde lyftkraften beräknas med ekvation 4 för fram- och bakvinge. Vid summering av de tre vingarnas lyftkrafter vid olika hastigheter framkommer en gemensam lyftkraft för systemet som kan ses i figur 20.



Figur 20: Lyftkraft för vingsystemet

Grafen i figur 20 visar att för en medium anfallsvinkel nås tillräcklig lyftkraft för att lyfta en båt på 7-10 kilogram vid en hastighet på 2-2,5 m/s och för den maximala anfallsvinkel nås samma lyftkraften vid 1.5-2 m/s. Se bilaga A för detaljerade uträkningar.

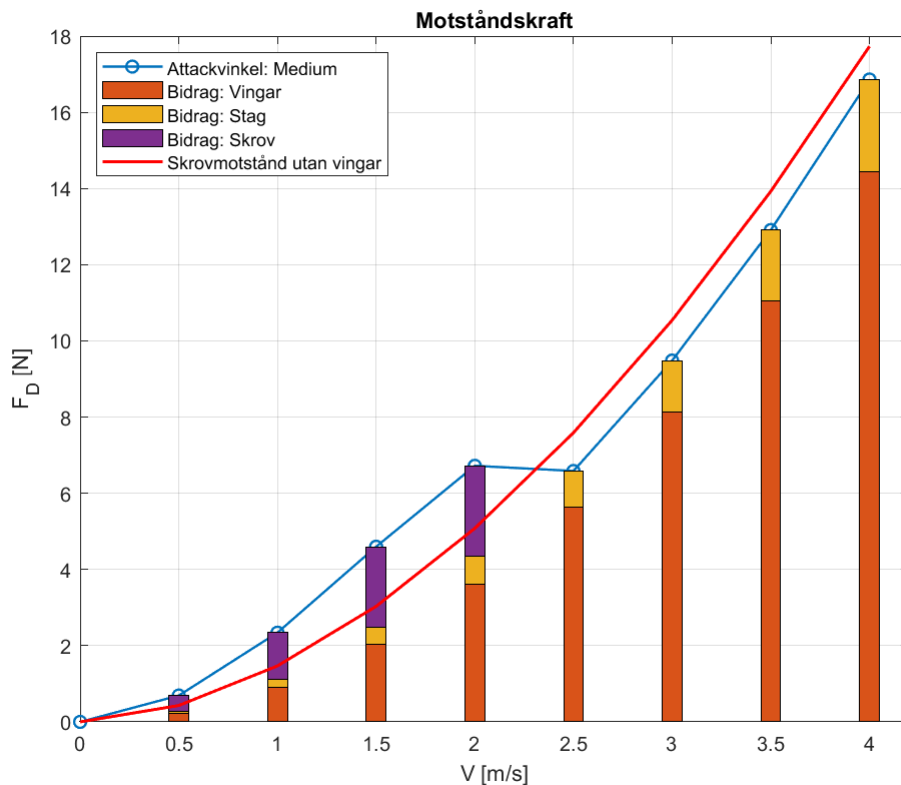
För att avgöra om prototypen kan komma upp i dessa hastigheter beräknades också systemets motstånd (motståndskraft) från skroven med ekvation 1 och från vingarna samt stagen med ekvation 5 med de korrigerade koefficienterna från resterande ekvationer i kapitel 2.2.1. Ekvation 1 som användes för skroven behövde modifieras för att uppskatta våg- och formfaktormotståndet och den ekvationen såg ut på detta vis:

$$R_T = (1+k)R_F + R_W = (1+k)\frac{1}{2}\rho V^2 A_w C_F + \frac{1}{2}\rho V^2 A_w C_W \quad (1)$$

Modificeringen av ekvation 1 gjordes genom att uppskatta hela vågmotståndet, som betecknades  $R_W$ , till ett påslag på 20% av friktionsmotståndet (Larsson, 2010). Koefficienten  $k$  är skrovets formfaktor och denna uppskattades konservativt till 0.1 (Barman m. fl., 2023). Dessa modifieringar resulterade i ekvation 14.

$$R_T = 1.2(1+k)\frac{1}{2}\rho V^2 A_w C_F \quad (14)$$

$C_F$  i ekvation 14 är skrovets friktionskoefficient och  $A_w$  skrovets area som är under vatten. När båten accelererar kommer vingarna börja ge lyftkraft och därmed kommer skroven sakta lyfta från vattenytan. Därför behöver  $A_w$  uppdateras mot båtens hastighet där den kommer bli mindre och mindre tills båten lyfter och den når noll. Uppdateringen av  $A_w$  beräknades genom att extrahera lyftkraften för vingarna med anfallsvinkel medium, sedan beräkna hur mycket flytkraft som krävdes av skroven och till sist beräkna hur mycket area av skroven som kvarstod under vattenytan. Denna sekvens beräknades med en uppskattning av båtens vikt på 10 kilogram. Motståndet för hela båten och komponenternas bidrag vid olika hastigheter kan ses i figur 21.



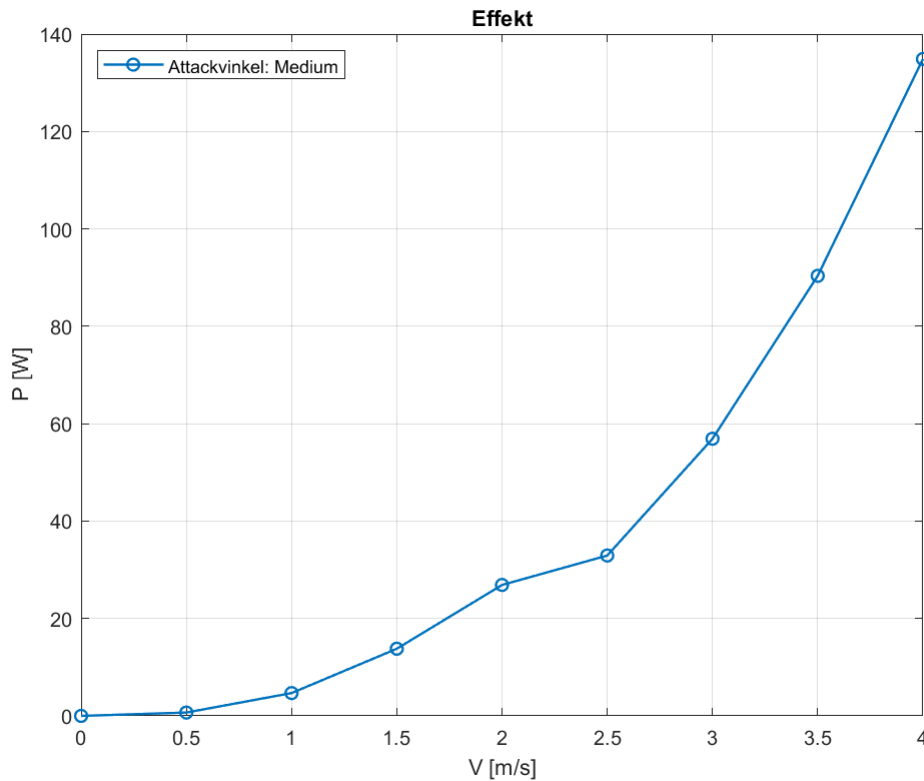
Figur 21: Motståndskraft för båtens komponenter.

Grafen i figur 21 visar hur motståndet är exponentiellt relaterat till hastigheten men att när skroven lyfter från vattenytan minskar motståndet kraftigt. Den röda linjen i grafen är skrovets motstånd utan vingar som ger lyftkraft, alltså när skrovets area under vatten alltid är maximal. Den röda linjen visar att för låga hastigheter när båten inte flyger över vattenytan är motståndet större för modellen med vingar men för högre hastigheter när båten flyger är den mindre. Eftersom bärplansbåtar ska spendera majoriteten av körande tid i flygande läge visar figur 21 att det finns energi att spara. Energibesparingen representeras av skillnaden mellan den röda och blåa linjen vid ungefär 3 m/s som är båtens marschfart. För detaljerade beräkningar, se bilaga A.

Utöver energibesparingen visar också från grafen om propellrarnas drivkraft kraft är nog för att övervinna

båtens motståndskraft vid dessa hastigheter. Vid marschfart nås det högsta motståndet för modellen på ungefär 9 N vilket är långt under propellrarnas drivkraft, som kan ses i under-undersnitt 3.3.2, på 44,19-88,38 N.

En annan aspekt värd att analysera är systemets effekt. Effekten för systemet kan beräknas genom ekvation 12 där verkningsgraden  $\eta$  uppskattades till 0.5 för systemet efter en diskussion med A. Eslamdoost (personlig kommunikation, 2024), docent vid marin teknik, Chalmers. Den sammanlagda effekten kan ses i figur 22.



Figur 22: Propellrarnas ideala effekt.

Ett intressant resultat från den här grafen är att när motståndet minskar sker det ändå en ökning av effekten som båten behöver dock med minskad lutning. Detta kan ses genom att jämföra figur 21 och 22 vid datapunkterna mellan 2 och 2.5 meter per sekund där kraften minskar men effekten ökar mellan dem. Ett annat resultat från grafen är att propellereffekten på 700 Watt är mer än tillräcklig för båten då grafen inte visar på ett effektbehov över 140 Watt för de hastigheter båten planeras att köras i. Vid marschfart på 3 meter per sekund ger propellarna en effekt på över elva gånger effektbehovet.

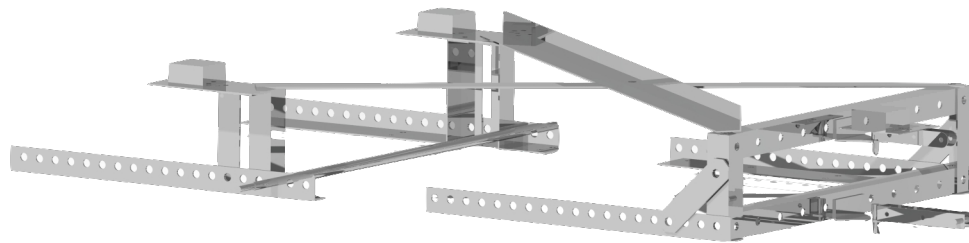
### 3.5 Ställning

För att koppla samman skrov och vingar behövs en ställning som ska vara lätt, justerbar och tålig. På uppdrag från examinator är det viktigt att ställningen ska kunna flyttas till annat skrov om detta blir aktuellt i framtiden. Utöver denna flexibilitet sätts även ett mål från projektgruppen att kunna justera positionen av vingar för att minska felkällor kopplade till att båten inte lyfter.

Ett problem från det tidigare projektet är den höga totalvikten. En viktig del i att minska vikten är att hålla vikten av ställningen låg. Därför behövs ställningen byggas i ett lätt material som ska tåla de krafter den

ska utsättas för. Det krävs en konstruktion som optimerar materialanvändningen samtidigt som den behåller ställningens styvhet för att motstå de belastningar som kan uppkomma. För att åstadkomma detta krävs nogra planering och design av ställningen där stabilitet i alla sex frihetsgrader är i fokus. Tanken för att lösa detta blir att använda flertalet fackverk som ger stabilitet i framförallt rotation som enligt projektgruppen verkar vara det mest komplicerade att hämma.

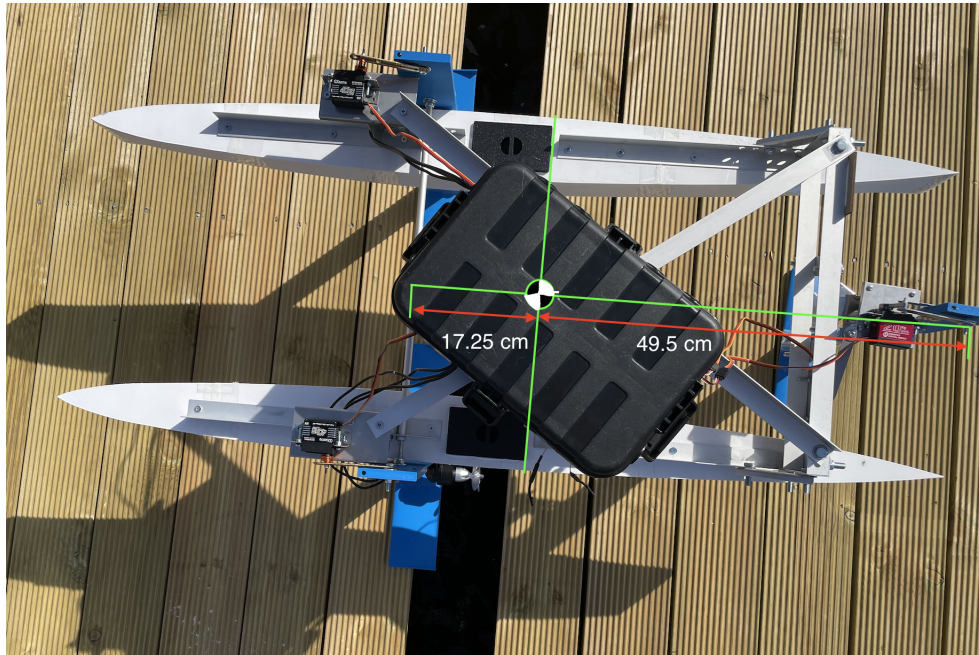
Materialet som passar bäst in på dessa ståndpunkter anses vara aluminium som är lätt, starkt och som inte snabbt korroderar i kontakt med vatten. För att maximera hållfasthet anses vinkelprofiler ge bra stabilitet i vridmoment och gav en lätt fästpunkt för vingarna. Utöver vinkelprofilerna kommer plattor av aluminium användas i fackverken. Se figur 23 för det slutliga konstruktionsresultatet.



Figur 23: Datorstödd illustration av ställning.

### 3.6 Tyngdpunkt

Målet för tyngdpunkten är, som nämndes i underavsnitt 3.2, att hamna 20% bakom framvingarnas tryckpunkt jämfört med bakvingens för att få korrekt fördelning av lyftkraft för vingarna. Efter färdig konstruktion görs mätningar på var tyngdpunkten befinner sig som kan ses i figur 24. Måtten från mätningen visar att tyngdpunkten ligger 26% bakom framvingen vilket ger ett större lyftkraftskrav för bakvingen.



Figur 24: Tyngdpunkt för konstruktionen i förhållande till kraftpunkten för vingarna.

Mätningarna visar också att tyngdpunkten ligger 54 centimeter från skrovets akterkant av de 120 centimeter långa skroven. Skroven är inte heller helt symmetriskt och de är bredare på den främre sidan vilket tillsammans med att tyngdpunkten är 6 centimeter bakom skrovets mitt, gör båten något baktung.

### 3.7 Reglering

Då alla vingar på prototypen är helt nedsänkta under vattenytan, medföljer ingen passiv reglering. Detta innebär att en extern dynamisk reglering måste implementeras. Eftersom bärplansbåtar i stort sett styrs på samma sätt som radiostyrda flygplan, är det möjligt att tillämpa en liknande regleringsmetod för detta projekt. Det finns flera populära regleringstekniker för radiostyrda flygplan, vilka varierar beroende på val av vingkfiguration. Exempelvis inkluderar dessa fyra-kanalsplan, sidoroderplan, "V-tail" plan och ornitopter. Prototypens vingkfiguration består av två främre vingar och en enda bakre vinge, vilket liknar strukturen hos ett fyra-kanalsplan. Därför är en regleringsmetod som liknar fyra-kanalsplanet lämplig för att styra prototypen.

Ett fyra-kanalsplan fungerar genom att ha fyra separata kanaler som styr varje rotationsaxel, tillsammans med ett gasreglage. De fyra kanalerna inkluderar två skevroder som styr rollaxeln, ett höjdroder som styr stigningsaxeln, ett sidoroder som styr giroaxeln samt ett gasreglage för att kontrollera hastigheten. Denna modell kan enkelt anpassas till prototypen, där de två främre vingarna fungerar som individuella skevroder, den bakre vingen tillsammans med dess stag fungerar som både höjdroder och sidoroder, samt två propellrar kopplade till ett gasreglage.

I prototypen är de fyra kanalerna konfigurerade på följande sätt: kanal ett styr höjdrodret, kanal två styr båda skevrodren, kanal tre styr propellrarna, och kanal fyra styr sidorodret. Dessa kanaler kan antingen styras manuellt med en kontrollenhet eller automatiskt med en autopilot. I detta projekt är målet att modellen ska fungera automatiskt och därför används en autopilot för styrningen.

En autopilot är en typ av moderkort som med hjälp av gyroskop, GPS, programvara och andra inmatningar kan reglera utdata. Utdata i detta fall är kanalerna kopplade till de olika rodren samt propellrarna. Autopiloten (ID: 4.07 i tabell B) som används i systemet är en CUAUV nano v5. Bärplansbåtar kräver noggrann reglering som

kan hantera störningar snabbt. En PID-regulator möter dessa krav och är en effektiv regleringsmetod som kan implementeras med programvaran i autopiloten. Då det inte finns tid att utveckla en PID-regulator från grunden, kommer befintlig PID-regulatorprogramvara att användas.

Ardupilot (*ArduPilot*, u. å.) är en öppen källkodsprogramvaruplattform för bland annat PID-regulatorer som ofta används för att kontrollera bland annat radiostyrda flygplan och helikoptrar. Ardupilot har flera olika programvaror, och en specifik programvara för radiostyrda flygplan som kallas Arduplane (*ArduPlane*, u. å.). Arduplane innehåller en reglerinställning för fyra-kanalsplan, vilket används i detta projekt.

Inom Arduplane finns olika flyglägen som kan väljas beroende på graden av automatisering önskad av användaren. I detta projekt implementeras två flyglägen: ”Stabilize” (stabilisera) och ”Manual” (manuell). I ”Stabilize”-läget kan autopiloten automatiskt stabilisera roll och stigning, medan användaren kontrollerar girandet och gasreglaget. Det är även möjligt för användaren att manuellt styra roll och stigning vid behov. I ”Manual”-läget kontrollerar användaren alla frihetsgrader samt gasreglaget utan att autopiloten hjälper till.

För att kunna ladda in Arduplanes programvara i autopiloten används ett program som heter Mission Planner (*Mission Planner*, u. å.). Mission Planner är en kontrollstationsprogramvara som används för att ladda in programvara i autopiloter samt konfigurera och ställa programvaran som laddas in. Mission planner fungerar som en mellanhand mellan Ardupilots programkod och användaren för att enklare användning.

## 3.8 Elektronik

För att prototypen ska fungera som önskat finns ett system av elektroniska komponenter. Systemets huvuduppgift är att förse propellarna med kraft samt styra de rörliga komponenter som finns på prototypen. Detta för att prototypen ska kunna föra sig framåt samt kunna hålla sig flygande helt radiostyrt utan att en användare ska behöva hjälpa till.

Det elektroniska systemets huvuddel är autopiloten (ID:4.07 i tabell B). Autopilotens roll är att bearbeta insignaler från systemet och ge en önskad utsignal till de elektriska komponenter som styr prototypen. Detta gör autopiloten med hjälp av programvara från Ardupilot.

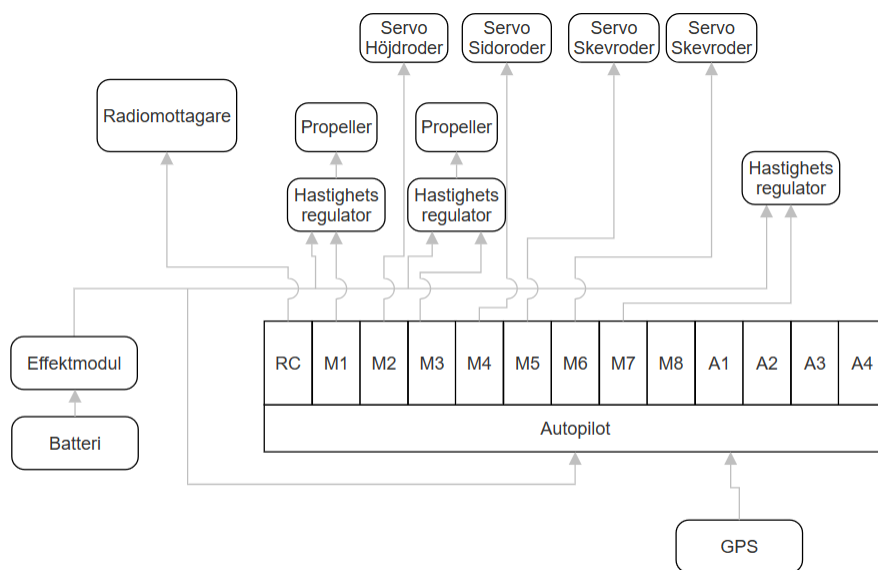
Insignalerna som finns kan delas upp i två kategorier, en som användaren själv justerar och en som kommer från sensorer. Vilket flygläge som används påverkar hur många olika insignaler som används från respektive kategori. Flyglägena som används i projektet förklaras i underavsnitt 3.7. De sensorer som systemet har är en GPS (ID:4.04 i tabell B) och ett gyroskop integrerat i autopiloten. GPS:ens uppgift är att mäta systemets exakta position i vattnet samt över vattenytan. GPS:en som systemet har kan inte ge en tillräckligt exakt position över vattenytan för att autopiloten ska kunna reglera höjden till en exakt position. Önskas detta måste en extern sensor som mäter höjd läggas till. Gyroskopet uppgift är att mäta båtens rotationsaxlar. För att autopiloten ska kunna läsa av användarens insignaler används en radiokontroll (ID:4.06 i tabell B) som kan justera de fyra kanaler som benämns i underavsnitt 3.7. Radiokontrollens funktioner förklaras djupare i under-avsnitt 3.8.3.

Autopilotens utsignaler består av två hastighetregulatorer och fyra servomotorer. Hastighetregulatorerna är kopplade till var sin propeller och har som uppgift att ge ström och rotera vardera propeller. De fyra servomotorer som finns är uppdelade i fyra olika utsignaler och kontrollerar de olika vingarna på prototypen. De två främre vingarna styrs av var sin servomotor, där servomotorn justerar vingarnas anfallsvinkel. Bakvingen styrs av två servomotorer där en servomotor styr vingens anfallsvinkel och en servomotor styr stagets vinkel (sidoroder).

### 3.8.1 Kopplingschema

Figur 25 visar hur det elektriska systemet är kopplat. Batteriet (ID:4.08 i tabell B) är kopplat till en effektmodul (ID:4.11 i tabell B) som förser autopiloten med 5 volt som sedan är vidarekopplat till hastighetsregulatorerna.

Eftersom autopiloten endast förser DuPont uttaget för kontrollens radio mottagare med ström och inte de andra DuPont uttag måste en extern strömkälla förse DuPont uttagen istället, t.ex. med en hastighetsregulator. De hastighetsregulatorerna som används för propellrarna är "UBEC" hastighetsregulatorer (ID:4.09 i tabell B) och kan därför inte förse autopilotens DuPont uttag med ström. Därför behövs en extra "BEC" hastighetsregulator (ID:4.1 i tabell B) som endast fungerar för att sänka batteriets 22.8 volt till 5 volt för DuPont uttagen. Detta hade också fungerat med DC-DC omvandlare men detta projekt hade inte tillgång till en DC-DC omvandlare. Servomotorerna är kopplade till autopilotens DuPont uttag. GPS:en är kopplad direkt in i autopilotens TELEM1 uttag och förses med ström från autopiloten.



Figur 25: Kopplingsschema

En "BEC"(Battery Eliminator Circuit) hastighetsregulator har möjlighet att förse servomotorer och liknande med ström, eftersom den har en inbyggd voltregulator. En "UBEC" (Universal Battery Eliminator Circuit) hastighetsregulatorer har ingen inbyggd voltregulator och kan därför inte förse andra komponenter med ström. En "UBEC" hastighetsregulator är ofta mer effektiv och blir inte lika varm som en "BEC" hastighetsregulator.

En DC-DC omvandlare används för att konvertera en likströmkällas spänningsnivå till en annan spänningsnivå. I detta projekt kan det användas för att sänka batteriets volt från 22.8 volt till 5 volt. Tabell 5 visar hur servoutsignalerna på autopiloten är konfigurerade i Mission Planner för att Ardupilots programvara ska fungera

### 3.8.2 Konfiguration

Tabell 5 visar hur servo utsignalerna på autopiloten är konfigurerade i Mission Planner för att Ardupilots programvara ska fungera.

Tabell 5: Konfiguration

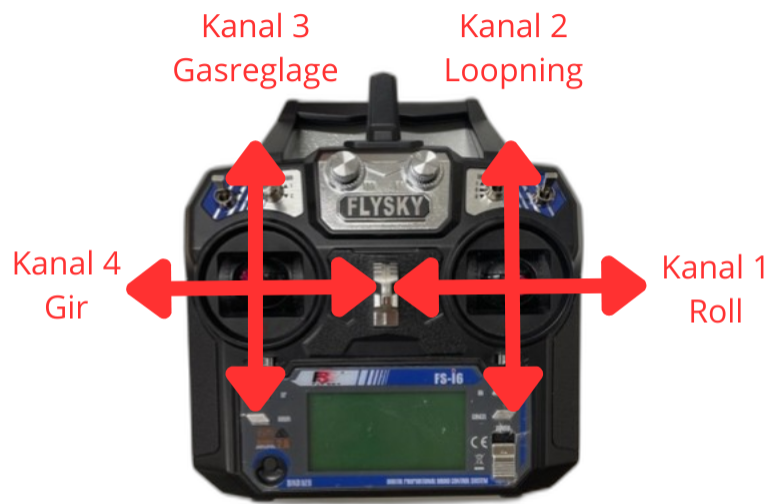
Utsignal	Komponent	mission planner
M1	Hastighetsregulator (ID:4.09 i tabell B)	RCIN3
M2	Servomotor (ID:4.02 i tabell B)	Elevator
M3	Hastighetsregulator (ID:4.09 i tabell B)	RCIN3
M4	Servomotor (ID:4.02 i tabell B)	RCIN4
M5	Servomotor (ID:4.01 i tabell B)1	Aileron
M6	Servomotor (ID:4.01 i tabell B)	Aileron
M7	Hastighetsregulator (ID:4.1 i tabell B)	RCPassThru

### 3.8.3 Radiokontroll

Kontrollen som används i projektet är en FlySky FS-I6<sup>2</sup> som har två stycken joysticks för att kontrollera de olika kanalerna. Det går att justera hur kanalerna ska kopplas till joysticksen. För projektet valdes standard inställning hos kontrollen. Figur 26 och tabell 6 visar hur kontrollen är konfigurerad.

Tabell 6: Kontroll kanaler

Kanal	Axel
1	Roll
2	stigning
3	Gasreglage
4	Gir



Figur 26: Kanaler på radiokontroll

## 4 Fälttest

För att skapa ett underlag för diskussion, slutsatser och rekommendationer för framtida forskning genomfördes ett fälttest för att testa systemdesignens egenskaper. Efter genomfört fälttest kunde fördelar, nackdelar och förbättringar med projektets konstruktion fastställas. I följande kapitel beskrivs fälttestets förutsättningar, metodik och resultat.

### 4.1 Förutsättningar

Fälttestet genomfördes den 3 maj 2024 i Stensjön som ligger i Mölndal. Stensjön valdes eftersom det är en relativt skyddad sjö vilket reducerar vind och vågor vilket minimerar felkällor för ett första test. Förhållandena för testdagen var fördelaktiga med sol, måttlig vind och mindre vågor. Däremot var det relativt hög ström vilket kan ha medfört felkällor till resultatet. En mindre verktygssats medtogs för att kunna göra mindre modifieringar på konceptet under fälttestets genomförande. Inför fälttestet hade inte en fungerande höjreglering ännu utvecklats som istället fick regleras manuellt med radiokontrollen. Reglering kring rollaxeln var implementerad med hjälp av Ardupilots egna autopilotssystem.

### 4.2 Testresultat

Vid det första test som genomfördes hade ingen modifiering av reglersystemet gjorts. Regleringen av stigning och roll sköttes automatiskt med hjälp av Ardupilot. Direkt vid sjösättning kunde det anteciperas att båtens tyngdpunkt var långt bak förhållandevis skrovens flytkraft, se figur 27.



Figur 27: Stilla och flytande båt innan första testet.

När båten sedan skulle testköras lyfte fören snabbt även vid låg hastighet och det kunde konstateras att tyngdpunkten var för långt bak. Det fanns även svårigheter med regleringen av både stigning och roll som försöktes, utöver autopilotens reglering, regleras manuellt med kontrollen då autoregleringen inte var tillräcklig. Framvingarna lyfte båten tills att motorer och vingar kom ovanför vattenytan och de ventilerades, vid det laget tappade vingarna all sin lyftkraft, och efter det dök båten ned till startläge igen. Se figur 28 nedan för sekvensen då båten stegrade.



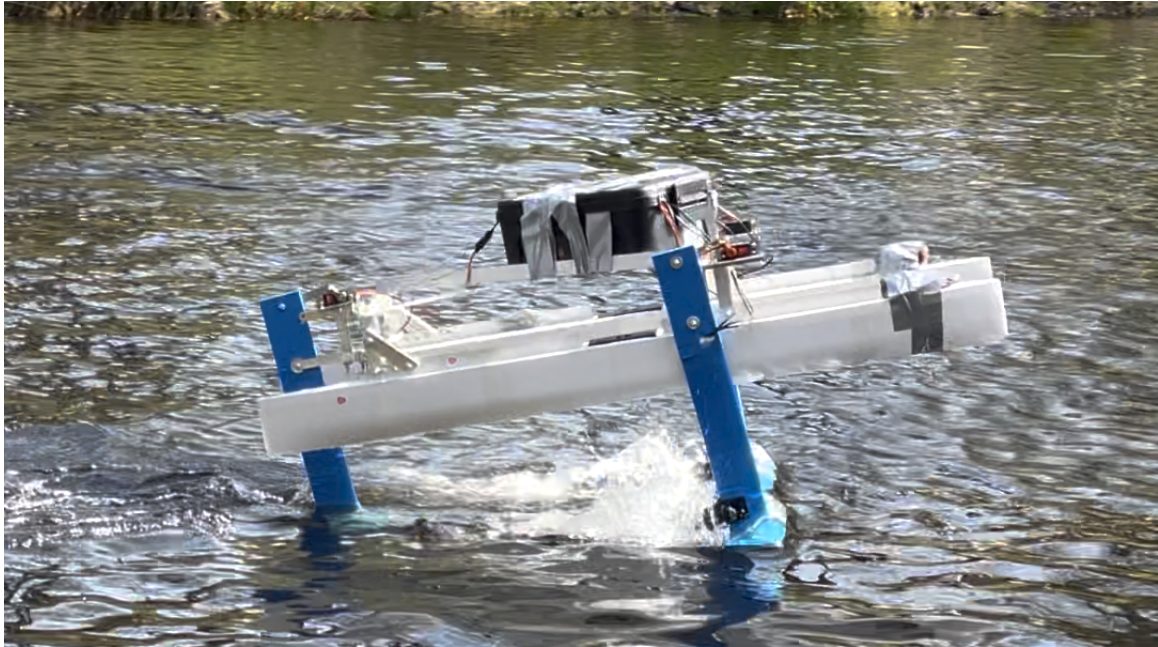
Figur 28: Stegrande båt vid första testet.

För att åtgärda den ojämma lyftkraften av fram- och bakvingarna gjordes först ett försök att öka bakvingens utgångsansfallsvinkel för att denna skulle generera mer lyftkraft. Utrymmet för rollregleringen upplevdes som otillräckligt och ett försök i att minska framvingarnas utgångsansfallsvinkel genomfördes också. Trots förändringarna var resultatet för den andra testkörningen näst intill oförändrat från den första. Båten stegrade fortfarande snabbt tills dess att motorer och vingar var ovanför vattenytan och båten dök igen. För att ytterligare stabilisera båten konstaterades att tyngdpunkten behövde förflyttas. Det saknades tid och verktyg för att genomföra en större rekonstruktion av båten, därför förflyttades tyngdpunkten genom att fästa stenar i fören på båten med en sammanlagd vikt på 720 gram. Detta var en kortsiktig lösning för att testa prototypens stabilitet, se figur 29.



Figur 29: Montering av stenar på båtens för.

Efter montering av stenarna testkördes båten en tredje gång för att se om det blev någon skillnad i stabilitet längs med roll- och stigningsaxeln. Genom att tyngdpunkten flyttades fram lades mer vikt på framvingarna vilket gav en markant resultatsskillnad. Resultatet gav mindre stegring av båten vilket var det som ville åstadkommas. Trots den stora skillnaden var båten fortfarande något baktung. Vid ökad hastighet lyfte båten något bakåtlutat sedan avslutades förloppet med att framvingarna steg för högt, lyftkraften tappades och båten dök liksom förloppet under första och andra testförloppen. I figur 31 ses hur båten är något baktung men till skillnad från figur 28 har nu även bakvingen kunnat generera lyftkraft. Figur 31 visar sekvensen precis innan framvingarna toppade och båten dök.



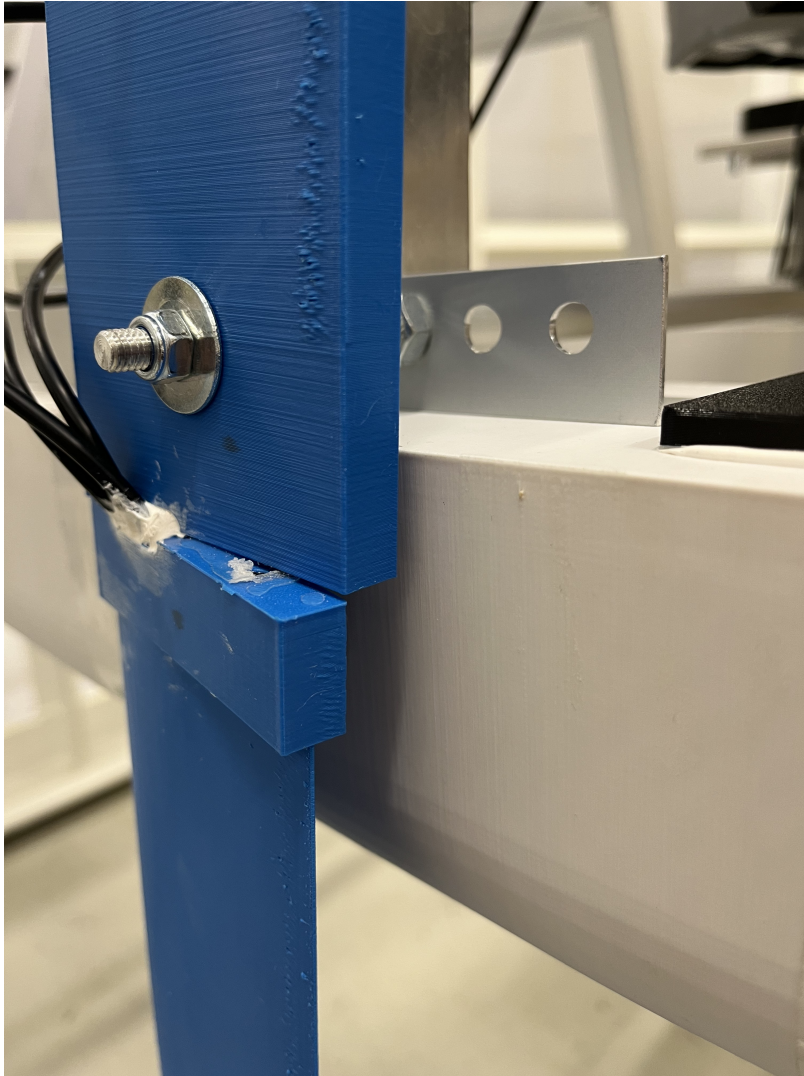
Figur 30: Tredje testkörningen med en sten monterad på vadera skrov.

Den fortfarande något baktunga båten utrustades med ytterligare två stenar i fören av båten för att skjuta fram tyngdpunkten ännu mer. Den sammanlagda pålägda vikten var nu uppe i 1250 gram vilket resulterade i en vikt på 9,45 kilogram för hela båten. Eftersom det hade varit problem med stabiliteten längs stigningsaxel togs också ett beslut att göra all reglering manuell. Under den fjärde och sista testkörningen bekräftades det att lyftkraften som producerades var fortfarande mer än tillräckligt stor för att lyfta egentygden av båten trots den tillagda vikten av stenarna. Till skillnad från de tidigare testkörningarna kunde ett nytt resultat urskilja sig där vid flygande tillstånd av båten började båten agera framtung. I lyfthastigheten agerade båten horisontellt men efter en tid började fören vinkla sig neråt mot vattenytan tills den nåddes. Alltså verkade tyngdpunkten ligga rätt förhållandevis skrovens flytkraft men för långt fram för vingarnas lyftkraftstryckpunkter. Se figur 31 nedan för att se båten åka rakt.



Figur 31: Fjärde testet med två stenar monterade på vadera skrov.

Efter de genomförda testerna noterades att en av pluggarna som sammanfogar de olika 3D-skrivna delarna på det vänstra staget hade gått av. Det resulterade i att staget vreds i sidled, se figur 32.



Figur 32: Vridet stag till följd av plugg som gått av.

Det var utifrån dessa fyra testkörningars resultat som gruppen kunde föra diskussion, utvärdera konceptet, fastställa felkällor och ge rekommendationer för vidare arbete av projektet och övrig forskning.

## 5 Diskussion

I enlighet med konceptutvecklingsmetodik hade gruppen föredragit att genomföra ett fälttest, konstatera problematik med konstruktionen för att sedan förbättra konstruktionen och testa den igen. Dessvärre tidsbegränsades detta av projektets ramar och endast ett fälttest kunde genomföras.

### 5.1 Lyft- och motståndskraftsberäkningar

I lyft- och motståndskraftsberäkningarna finns de flertalet felkällor som kan vara värda att diskutera. För det första så är flertalet koefficienter godtyckligt uppskattade. Alla lyft- och motståndskraftskoefficienter är tagna från hemsidan "Airfoiltools.com" där koefficienterna för de olika vinklarna är avlästa från grafer vilket kan ha avlästs fel med en viss marginal. Ett bättre sätt för att få ut noggrannare koefficienter skulle vara att använda sig av "XFOIL" vilket också är programmet som "Airfoiltools.com" använder. Skillnaden skulle vara möjligheten att i "XFOIL" simulera vingprofilen med rätt anfallsvinkel för att få exakta koefficienter till vardera vinkel.

En annan möjlig felkälla gällande motståndskraftsberäkningarna skulle kunna vara mindre delar av konstruktionen under vattnet som motstånd inte korrigerades för. De delar som inte tog i beaktning under motståndskraftsberäkningarna är utbuktningen i stagen för monteringen av propellrarna, propellarna i sig och T-sammanfogningen där vinge möter stag vilket också borde minska lyftkraften då ingen fluid befinner sig på ovanvingen vid denna skarv. En CFD-simulering (Computational Fluid Dynamics) skulle resulterat i mer exakta lyft- och motståndskoefficienter.

En tredje felkälla skulle kunna vara koefficienterna som används till skrovets motstånd där formfaktorn  $k$  uppskattades till 0.1 av projektgruppen som designade skroven och vågmotståndet som uppskattades till 20% av friktionsmotståndet. Vågmotståndet är också hastighetsberoende och vågstorleksberoende vilket skulle öka med både hastighet och vågstorlek. I en noggrannare uträkning hade en CFD-simulering för skroven också varit av relevans med syfte att få ut en vektor med vågmotstånd för respektive båthastighet.

Trots alla dessa listade felkällor kom båten upp i rätt hastighet och nådde önskad lyftkraft vilket visar på att dessa felkällor var försumbara för prototypen. Det kan även vara möjligt att koefficienterna till beräkningarna är uppskattade tillräckligt konservativt för att täcka upp för de felkällor som ej blev korrigerade för. Alla uträkningar har också utgått från att båten väger tio kilogram vilket är nästan två kilogram tyngre än i verkligheten. Detta resulterar i att båten lättare lyfter från vattnet än förväntat.

Figur 21 visar att energibesparingen vid flygande läge är låg. En stor skillnad mellan en nedskalad och en fullskalad bärplansbåt är relationen mellan skrov och vingar. I en fullskalad båt kan relationen mellan vingar och skrov vara mycket större än vad den måste vara för mindre båtar vilket skulle resultera i en större energibesparing än den som kan ses för modellen. Energibesparingen för en fullskalad båt kan vara så stor som 80% (Eslamdoost m. fl., 2022). Trots att energibesparingen är låg för modellen är det viktiga med figuren att den sparar energi i flygande läge.

### 5.2 Reglering

En central del i projektet har varit utvecklingen av ett regleringsystem för att kunna hålla båten i ett stabilt flygande läge. Följande avsnitt diskuterar hur prototypens reglering fungerade under fälttestet.

#### 5.2.1 Höjdreglering

En stor anledning till varför prototypen inte kunde hålla sig flygande längre än några sekunder var på grund av en inkonsekvent höjdreglering. Då höjdregleringen endast reglerades manuellt med kontroller i fälttestet var det alldeles för svårt att hålla en jämn höjd och vid många tillfällen flög båten alldeles för högt vilket resulterade i förlust av lyftkraft och prototypen slutade flyga. Genom att implementera en automatisk höjdreglering med

hjälp av autopiloten är det möjligt att snabbare reagera om båten kommer för långt upp från vattenytan eller för nära vattenytan och reglera stigningsaxeln tillsammans med gaspådraget för att kunna hålla rätt marschhöjd under färd. För att kunna applicera en automatisk höjddreglering krävs en extern höjdsensor som kan mäta exakt höjd från vattenytan mycket bättre än vad den GPS som prototypen är utrustad med kan.

För att få ett mer stabilt system som inte kräver konstant reglering är det också möjligt att ställa in anfallsvinkeln på prototypens vingar för att kunna uppnå jämvikt mellan lyftkraft och tyngdkraft vid marschfart. Detta underlättar regleringsprocessen eftersom prototypen inte konstant lyfter eller sjunker utan håller höjden relativt konstant där mindre justeringar krävs för att reglera systemets marschhöjd. Detta kräver däremot ett startläge där anfallsvinkel på vingarna är större än vid marschfart för att prototypen ska kunna få mer lyftkraft och lyfta till marschhöjd vid lägre hastigheter. För att uppnå önskad reglerprestanda enligt specificerade krav ovan måste regleringssystemet justeras och finjusteras i enlighet med den specifika prototypen. Denna anpassning kräver ett betydligt högre antal testomgångar än de som utfördes under projektet.

En alternativ åtgärd för att öka systemets stabilitet är att justera längden på prototypens stag. Detta skulle kunna resultera i att vingarna tar längre tid att närma sig vattenytan, vilket i sin tur ger mer utrymme för manuell höjddreglering utan att prototypen förlorar lyftkraft. Förlängningen av stagen kan leda till att marschhöjden ökar och systemets tyngdpunkt förskjuts uppåt, vilket kan resultera i minskad stabilitet och ökad risk för vältning samt eventuellt svårigheter i rollaxelreglering. Dessutom ökar hävarmen för staget vilket kan öka belastningen på staget och resultera i ökade vibrationer som kan påverka lyftkraften negativt. En ökad belastning på staget ökar även belastningen på servomotorerna som justerar stagets vinkel och det krävs mer energi för att justera vinkeln.

Dessa reglerlösningar som har diskuterats ska vara möjligt att lösa med Ardupilots programvara men då inte kunskapen och tiden fanns till för att konfigurera en extern höjdsensor med Ardupilot lyckades inte en automatisk höjddreglering implementeras i projektet.

### **5.2.2 Reglerande av anfallsvinkel ovanför vattenytan**

Beslutet att justera vingarnas anfallsvinkel med en stel design där staget och vingen justeras i förhållande till skroven ovanför vattenytan visade sig vara en fungerande lösning vid fälttestet som utfördes. Under fälttestet testades möjligheten att justera anfallsvinklarna när prototypen befanns sig i vattnet både stillastående och under färd framåt. Lösningen visade sig fungera väldigt bra då vingarna gav respons i form av att de olika rotationsaxlarna kunde justeras med hjälp av radiokontrollern som önskat.

## **5.3 Balans**

Vid fälttesterna upptäcktes problem som innefattade båten balans. Problemen ansågs bero på förhållandet mellan tyngdpunkten och skrovets flytkraft, förhållandet mellan tyngdpunkten och vingarnas tryckpunkter, balansen av vingarnas lyftkrafter och tyngdpunktens position på stigningsaxeln. I följande kapitel diskuteras orsaker och åtgärder på dess problem.

### **5.3.1 Tyngdpunkt relativt till skrovets flytkraft**

Vid fälttestet observerades att prototypens skrov flöt med en snedvriden vinkel i förhållande till vattenytan, där aktern låg lägre än fören. Denna konfiguration resulterade i att både skroven inte flöt horisontellt med vattenytan och att stagen inte låg i en 90 graders vinkel mot vattenytan. Eftersom propellrarna är monterade på främre stagen var de inte vinkelräta mot vattenytan. Vid start från stillastående läge genererade propellrarna inte bara framdrivande kraft, utan även en uppåtriktad kraft på grund av den snedvridna vinkeln. Denna extra kraft från propellrarna bidrog till att framvingarna fick en högre lyftkraft än vad som var beräknat. Som följd till detta lyfte framvingarna snabbare än bakvingen, vilket resulterade i en ojämn lyftfördelning och stegring då prototypens nos höjdes. För att motverka detta placerades vikter, i form av stenar, i fören på prototypen för att jämna ut skrovets vinkel i förhållande till vattnet.

Effekten av dessa vikter var att vingarna lyfte parallellt med varandra, men det medförde också att tyngdpunkten under flygningen förflyttades för långt framåt. Detta resulterade i att en stor del av vikten hamnade på de främre vingarna under flygning. Denna obalans gjorde det svårt att upprätthålla en jämn flygning och kan vara en av anledningarna till att prototypen inte kunde flyga under längre perioder.

För att lösa detta är ställningen justerbar med möjlighet att flytta skroven fram och bak relativt till vingarna. Problemet som uppstår är att skroven inte kan komma tillräckligt långt bak. Ställningen måste därför korrigeras så att skroven kan komma längre bak och få en önskad flytvinkel gentemot vattenytan.

### 5.3.2 Flygbalans

Systemets tyngdpunktspacering längsmed roll-axeln under flygning i det mättes fram enligt figur 24 och visar att 75 % av vikten hamnar på framvingarna och resterande 25 % hamnar på bakvingen. Då lyftpunkten valdes till en fördelning på 80/20 % skillnad i underavsnitt 3.2 bedöms tyngdpunktens placering relativt lyckad. Varför inte prototypens akter lyfte kan därför inte endast kopplas till systemets tyngdpunkt utan fler faktorer spelar in.

Under fälttestet uppmärksammades också att tyngdpunktenplaceringen längsmed stignings-axeln är felplacerad och inte ligger i mitten. Detta ger upphov till att prototypen lutar åt barbord sida under flygning. För att motverka att prototypen lutar måste roll-axeln regleras konstant och utgångsläget där båda framvingarna har samma anfallsvinkel resulterar inte i en balanserad flygning. Resultatet som medkommer när anfallsvinklarna är olika blir att mer motståndskraft tillkommer och en effektiv flygning är svår att uppnå.

En orsak till att tyngdpunkten placering blir felplacerad både längsmed stignings- och roll-axeln är lådan med de elektriska komponenterna. Lådan är placerad relativt högt över tyngdpunkten längsmed giraxeln, vilket ger en längre hävarm, vilket i sig påverkar tyngdpunktens känslighet i roll- och stigningjustering.

## 5.4 Vibrationer

Ett problem som upptäcktes var att det var vibrationer i vingarna som var mycket prominenta efter att konstruktionen var färdig. Dessa vibrationer var troligtvis en konsekvens av att vingarna var konstruerade med en låg utfyllnad för att minimera vikten och att vingarna satt fast vid en fästpunkt. Gällande bakvingen uppstod en del vibrationer då roderbeslagen var något instabila. Innan fälttestet fanns det stora osäkerheter kring ifall vingarna skulle hålla och ifall dessa vibrationer skulle påverka fälttestet. Under testet fick båten mer än tillräckligt med lyftkraft, vilket gör det mycket svårt att avgöra vibrationernas påverkan på lyftkraften. En rekommendation skulle vara att göra vingarna styvare, kanske med hjälp av fler och större kolfiberstänger, samt att göra infästningen av vinge och stag till ställningen stabilare.

## 5.5 Vingkonstruktion

Från testresultatet i underavsnitt 4.2 skrivs om hur stagets övre sammansättnings PETG-plug bröts. Detta kan vara ett utfall av många olika faktorer, både yttre faktorer och konstruktionsmässiga faktorer. De yttre faktorerna för att detta kan ha skett är vattnets krafter på vingen. Dessa kan orsaka vibrationer i vingen som i sin tur kan leda till utmattning i materialet som kan ge upphov till brott. Vid snabbare och skarpare svängar av båten blir krafternas riktning i förhållande till stagets position placerad mer på stagets långsida i stället för kortsidan. Detta förstör det laminära flödet runt profilen och skapar ett större motstånd samt större krafter på stagets långsida. I och med att styvheten hos kolfiberstaven är markant större än den hos PETG-pluggen, kan det leda till att pluggen bryts medan kolfiberstaven hålls intakt. Även PETG-pluggens uppbyggnad kan spela roll i brottet. Vid 3D-printning smälts materialet ner och placeras i lager som hela tiden byggs på. Det gör att redan solid plast binds ihop med ny smält plast för varje lager. Vid slag på konstruktionen riskerar då dessa lagerbindningar att brytas. Sammansättningarna av staget var även stärkta av epoxylim och silikontätning. Dock kan mängden av båda dessa gett mindre stöd än väntat som i sin tur leder till att mer av de yttre krafterna läggs på PETG-pluggen.

För att undvika brottet kan därför många olika åtgärder göras med konstruktionen. Först och främst hade det varit optimalt om hela vingen och staget inte delades upp, utan 3D-printades i en stor del. Detta gör att pluggar inte kommer att behövas och risken för brott minskas. Diametern på pluggarna kan inte göras större eftersom den då hade hamnat utanför stagprofilens gränser. Styvare material i pluggarna som aluminium eller stål, minskar risken för att pluggen bryts. Att pluggarna inte skall 3D-printas är då också att föredra för att eliminera risken för att brott ska ske mellan lagerna som skapas. Pluggen kan även fortsätta genom alla delar precis som kolfiberstaven samtidigt som den konstrueras av ett styvare material, vilket både bidrar till starkare sammansättning mellan delarna och styvhet till hela staget. Ett styvare stag minskar vibrationerna och leder då till minskad risk för utmattning i materialet som i sin tur minskar risken för brott. Sista rekommendationen till åtgärder kan vara att öka mängden av epoxylim och silikontätning mellan delarna för att minska belastningen på pluggarna.

## 5.6 Propellerposition

I under-underavsnitt 5.2.1 diskuterades det om hur en höjdsensor skulle stabilisera systemet utifrån vad som kunde konstateras under fälttesterna. Ett problem som en höjdsensor skulle lösa är att hålla vingar och propellrar på ett korrekt avstånd från vattenytan för att förhindra ventilering. Ett annat diskussionsområde för att förhindra ventilering är var propellrarna placerades. Eftersom propellrarna placerades över vingarna kommer de närmre vattenytan vilket ökar chanserna för ventilering. Andra placeringar som diskuterades var att placera propellrarna under vingarna och i T-sammanfogningen för vingarna. Att placera propellrarna under vingarna ansågs vara riskabelt då det vid en eventuell grundstötning skulle dessa komponenter vara de som skadades först. Däremot skulle denna lösning säkerställa att ingen ventilering för propellrarna skulle uppkomma.

Att placera propellrarna i T-sammanfogningen ansågs vara den optimala placeringen men för de propellrar som tillhandahålldes gruppen i början av projekt var detta inte designmässigt kompatibelt. Andra lösningar för att förhindra ventilering skulle kunna vara att förlänga stagen eller placera propellrarna närmare vingarna. Att förlänga stagen skulle däremot bidra till mer vibrationer och även till mer motståndskraft samt en längre hävarm vilket hade resulterat i större krafter i båten. En förflyttning av propellrarna närmre vingen kommer också med komplikationer. Den största komplikationen är att flöden kring vinge och propeller påverkar varandra. Propellern kommer då förhindra flödet av vatten på ovansidan vingen vilket generar mer motståndskraft och mindre lyftkraft.

## 6 Slutsats

Målet med projektet var, liksom det föregående projektet, att konstruera en bärplansbåt som lyckas lyfta över vattenytan. Detta var något som projektets modell lyckades med. Från testerna kunde det till och med dras slutsatser om att vingarna kunde ge för mycket lyftkraft som resulterade i att båten, vingarna och propellrarna snabbt kom upp över vattenytan. Detta gjorde att lyft- och drivkraften tappades och båten störtade i vattnet igen. Däremot kunde inte båten hålla sig uppe särskilt länge vilket var ett av huvudmålen för projektet. Detta diskuterades kunna ha flera anledningar men de två största ansågs vara en ej integrerad höjdreglering samt även båtens balans.

Fortsatt arbete rekommenderas vara ett arbete gällande regleringen och framförallt att applicera en höjdreglering som kan hålla båten på ett optimalt avstånd från vattenytan genom att reglera vingarnas anfallsvinkel. Från Ardupilot fanns det goda möjligheter att reglera för rollning och stigning men utan en höjdreglering kan inte båten stanna i ett flygande läge under en längre tid. Ett helt nytt system som inte använder sig av Ardupilot hade också varit aktuellt för att mer bärplansbåtsspecifikt reglera och för att underlätta implementeringen av en höjdreglering.

När det kommer till båtens balans diskuterades ett flertal justeringar som kan behöva göras. En justering som diskuterades var båtens tyngdpunkt. Både tyngdpunkten förhållandevis vingarnas tryckpunkter men också förhållandevis skrovets flytkraft. Ett sätt att balansera tyngdpunktsförhållandet för skroven skulle vara att enkelt flytta fram ställningen och därmed skjuta fram tyngdpunkten förhållandevis skroven. Detta hade däremot flyttat bak tyngdpunkten förhållandevis vingarnas tryckpunkter vilket hade ställt ännu större lyftkraftskrav på bakvingen. Fortsatt arbete rekommenderar gruppen istället att vara en analys av båten där ställningen inklusive vingarna placeras med rätt avstånd från den önskade tyngdpunkten så att tyngdpunkten är 20% bakom framvingars tryckpunkt jämfört med bakvingens. Efter detta kan en analys, av var lådan med elektronik borde befinna sig för att nå just denna önskade tyngdpunkt, vara relevant där även att tyngdpunktens placering är av stor vikt för att balansera båtens rollning. Efter analyserna kan ställningen flyttas och en lösning för att sätta lådan på rätt ställe konstrueras. Lådan rekommenderas även att flyttas närmare vattenytan för att få tyngdpunkten längre ner.

Ett annat problem som diskuterades gällande balansen av båten var att bakvingen gav för lite lyftkraft jämfört med framvingarna. Detta ansågs vara ett designfel där problemet var att utgångsanfallsvinkeln för bakvingen var för låg på  $2^\circ$ . Den låga anfallsvinkeln valdes för att bakvingen skulle kunna nå negativa anfallsvinklar för att kunna reglera rollningen. Ett rimligare design hade varit att höja utgångsanfallsvinkeln till liknande som framvingen men att också ge en större vinkeljustering för bakvingen så den ändå kan nå negativa anfallsvinklar.

Några andra konstruktionsförbättringar som skulle kunna genomföras är att minska vibrationer i vingen, stabilisera ställning, byta från 3D-printade komponenter till helt vattensäkra alternativ, exempelvis glasfiber liksom många andra båtar.

Sammantaget är gruppen nöjda med projektet och ser fram emot att ta del av vidarearbete i projektet samt vidare forskning och bärplansteknik.

## Referenser

- 123ink. (u. å.). *Vad är PETG filament?* Hämtad från [https://www.123ink.se/page/petg\\_filament.html](https://www.123ink.se/page/petg_filament.html) (Hämtad 2024-05-02)
- 26th ITTC Resistance Committee. (2011). *Resistance test*. Hämtad från <https://ittc.info/media/1217/75-02-02-01.pdf>
- Airfoil Tools. (u. å.-a). *NACA 0012 AIRFOILS (n0012-il)*. Hämtad från <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il> (Hämtad 2024-04-29)
- Airfoil Tools. (u. å.-b). *Reynolds number calculator*. Hämtad från <http://airfoiltools.com/calculator/reynoldsnumber> (Hämtad 2024-04-29)
- ArduPilot. (u. å.). <https://ardupilot.org/ardupilot/>. (Hämtad 2024-05-06)
- ArduPlane. (u. å.). <https://ardupilot.org/plane/>. (Hämtad 2024-05-06)
- Barman, A., Mischke, S., Hessissen, A. O., Sörfeldt, A. & Varvne, M. (2023). Hsc vinga. *MMA151 Marine Design Project 2023, Department of Mechanics and Maritime Sciences Chalmers*.
- Benson, T. (u. å.). *Wing Geometry Definitions*. Hämtad från <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/geom.html> (Hämtad 2024-02-27)
- Blideman, T. (2024). ”flygande” elfärja ska göra pendlandet lättare. *SVT Nyheter Stockholm*. Hämtad från <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/stockholm/flygande-elfarja-ska-gora-pendlandet-lattare>
- Brassaw, B. (2024). Airplane flaps – what are they, and how do they work? *Thrust Flight*. Hämtad från <https://www.thrustflight.com/airplane-flaps/#>
- Calculator Academy. (2023). *Oswald Efficiency Factor Calculator*. Hämtad från <https://calculator.academy/oswald-efficiency-factor-calculator/>
- Clip art website - Viziclipart. (u. å.). Hämtad från <https://www.catchmyparty.com/parties/flight-of-imagination-enhance-design-with-clipart-magic-airplane> (Hämtad 2024-05-09)
- Collins, M. (2017). What am i: Winglets. *AOPA*.
- Eslamdoost, A., Faurosi, A., Shiri, A., Thollot, A., Ebbesson, F. & Giovanetti, L. M. (2022). Fluid-structure interaction of a foiling craft. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 372. Hämtad från <https://doi.org/10.3390/jmse10030372>
- Favrum, E. & Lundqvist, N. (2022). Hydro-dynamic design, system design and control system for a model-scale foiling boat. *Master's thesis in Naval Architecture Ocean Engineering, Department of Mechanics and Maritime Sciences Chalmers*.
- Frank M. White. (2016). *Fluid Mechanics*. University of Rhode Island.
- Johnston, R. J., Captain. (1985). Chapter v: Hydrofoils. *Naval Engineers Journal*, 97(2), 286. Hämtad från <https://foils.org/wp-content/uploads/2017/12/Naval-Engineers-Journal-Modern-Ships-and-Craft-71242.pdf>
- Larsson, L. (2010). *Ship resistance and flow*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Larsson, L., Eliasson, R. & Orych, M. (2022). *Principles of yacht design*. Bloomsbury Publishing.
- Lennartsson, B. (2000). *Reglerteknikens grunder*. Studentlitteratur.

*Mission Planner*. (u. å.). <https://ardupilot.org/planner/>. (Hämtad 2024-05-06)

NE. (u. å.). *Flygplan*. Hämtad från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/flygplan>  
(Hämtad 2024-04-29)

Propulsion Committee of the 28 ITTC. (2017). *1978 performance prediction methods*. Hämtad från <https://www.ittc.info/media/8017/75-02-03-014.pdf>

Sheahan, M. (2021). Foiling: the history of the hydrofoiler. *Yachting World*. Hämtad från <https://www.yachtingworld.com/features/foiling-the-history-of-the-hydrofoiler-135741>

# A Matlab kod

## Contents

- Olika vingprofiler
- Cl and Cd
- Lyft- och dragkraft
- Plotning

```
close all
clear all
clc
```

## Olika vingprofiler

```
%Cl_2D = [0.17, 0.45, 0.93]; % GOE - AoA 2, 6 & 10 grader
%Title = 'GOE 460';
%Cd_min = 0.009; % Tagen från airfoiltools.com Cd när Cl = 0

Cl_2D = [0.15, 0.65, 0.97]; %NACA0012 - AoA 1, 5 & 9 grader
Title = 'NACA 0012';
Cd_min = 0.007;
Cl_2D_b = [-0.21, 0.21, 0.72]; % bakvinge, AoA -2, 2, 6

% Cl_2D = [0.49, 0.82, 1.29]; %NACA6412 - AoA -2, 2, 6 grader
% Title = 'NACA 6412';
% Cd_min = 0.009;
```

## Cl and Cd

```
e0 = 0.91; % Oswalds effektivitetsfaktor med AR = 4,7 för rektangulära vingar
s = 0.40; % vingspann
A = s*0.085; % vingarea
s_wl = 0.04; % vingspann för vingöron

AR = s^2/A; % 'Aspect ratio'

s_eff = s + 2*s_wl; % Effektivt vingspann för vingar med vingöron
AR_eff = AR + s_wl^2/A; % Effektiv 'aspect ratio' för vingar med vingöron

e = (s_eff/s)^2*e0;

Cl = Cl_2D/(1+2/AR_eff); % Beräknar lyftkoefficienten
Cd = Cl.^2/(pi*AR_eff*e) + Cd_min; % Beräknar dragkoefficienten
```

## Lyft- och dragkraft

```
rho = 1e3; %Densitet vatten
V = [0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4]; % Hastighet av båt [m/s]
A_str = [0.25*0.08 0.24*0.08 0.22*0.08 0.2*0.08 0.18*0.08 0.15*0.08 ...
0.15*0.08 0.15*0.08 0.15*0.08]; % Area av stag under vatten vid olika hastigheter

visc = 1.307e-03; %Vattens viskositet vid 10 grader Celsius
L = 1.2; %Längd av skrov
Re = rho.*V*L/visc; %Reynoldstalet vid olika hastigheter
C_F = 0.075./(log10(Re)-2).^2; % Friktionskoefficienten
k = 0.1; % Från Vinga
Aw = [1166.184*4e-4 1100*4e-4 966.671*4e-4 812.834*4e-4 547.626*4e-4 ...
0 0 0]; % Yta av skrov under vatten vid olika hastigheter [m2]

%Bakvinge
e0_b = 0.9432; % AR uppskattad till 3,75
AR_b = 3.75;
A_b = 0.08*0.3;
Cl_b = Cl_2D_b/(1+2/AR_b);

for i=1:length(Cl_2D)
F1(i,:) = Cl(i)*rho.*V.^2*A/2; % Lyftkraft per framvinge
F1_b(i,:) = Cl_b(i)*rho.*V.^2*A_b/2; % Lyftkraft bakvinge

Fd_w(i,:) = 3*Cd(i)*rho.*V.^2*A/2; %Vingarnas dragkraft
Fd_str(i,:) = 1.2*3*0.007*rho.*V.^2.*A_str./2; %Stagets dragkraft
Fd_skrov(i,:) = 1.2*(1+k)*rho.*V.^2.*Aw.*C_F./2; % 1.2 vågkompensation, k = 0.1
Fd_SKROV(i,:) = 1.2*(1+k)*rho.*V.^2.*Aw(1).*C_F./2; %Dragkraft skrov utan vingar
```

```
Fd_in_water(i,:) = Fd_w(i,:) + Fd_str(i,:) + Fd_skrov(i,:); % Fd vingar + Fd stag + Fd skrov
end

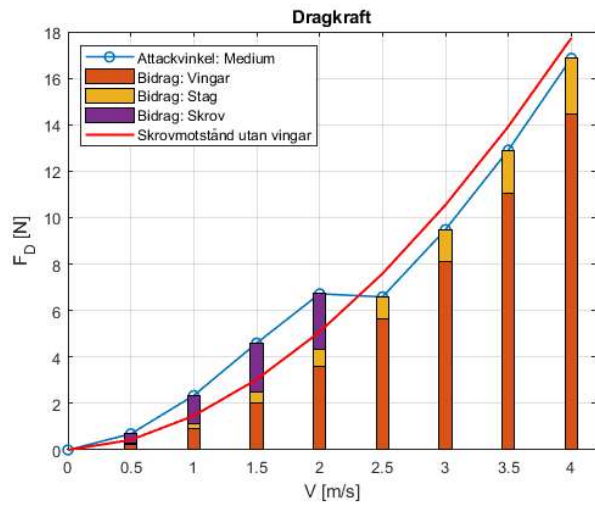
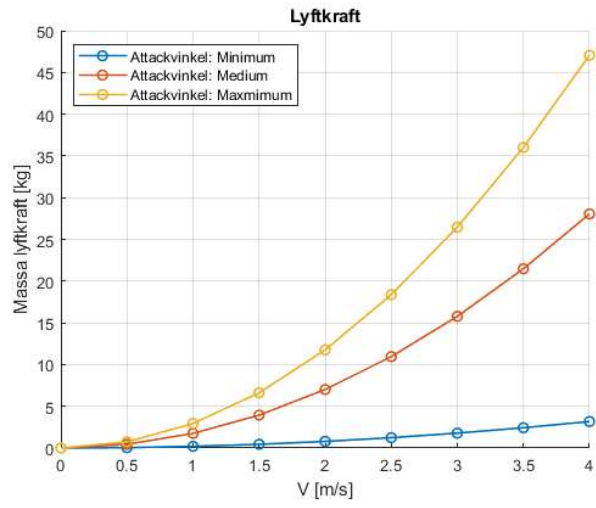
M = (F1*2 + F1_b)/9.81; % massa som klarar att lyftas, approximativt
P = Fd_in_water(2,:).*V/0.5; %Effekt med verkningsgrad = 0.5
```

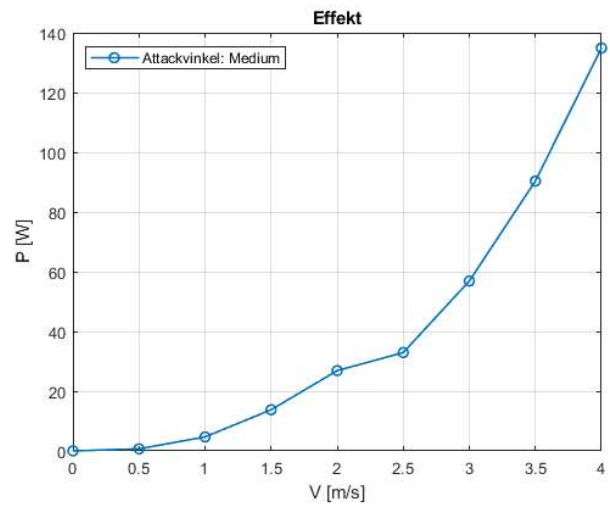
## Plottning

```
figure(1)
hold on
plot(V, M, 'o-', 'linewidth', 1.2)
legend('Attackvinkel: Minimum','Attackvinkel: Medium','Attackvinkel: Maximum','Location', 'Northwest')
grid on
ylabel('Massa lyftkraft [kg]')
xlabel('V [m/s]')
title('Lyftkraft')

figure(2)
plot(V, Fd_in_water(2,:), 'o-', 'linewidth', 1.2)
hold on
bar(V, [Fd_w(2,:); Fd_str(2,:); Fd_skrov(2,)], 0.2, 'stacked')
plot(V, Fd_SKROV(2,:), 'r', 'linewidth', 1.5)
xlim([0, 4.2])
legend('Attackvinkel: Medium','Bidrag: Vingar','Bidrag: Stag','Bidrag: Skrov','Skrovmotstånd utan vingar','Location', 'Northwest')
grid on
ylabel('F_D [N]')
xlabel('V [m/s]')
title('Dragkraft')

figure(3)
plot(V, P, 'o-', 'linewidth', 1.2)
legend('Attackvinkel: Medium','Location', 'Northwest')
grid on
ylabel('P [W]')
xlabel('V [m/s]')
title('Effekt')
```





## B Komponentlista

Komponentlista						
	ID	Komponent	Material	Antal	Utskriftstid / komponent (h)	Total utskriftstid (h)
Skrov och Ställning	1.01	Skrov	PETG	2	54	108
	1.02	Lock	PETG	2	1.5	3
	1.03	L-balk fram montering båt	Aluminium 1.5mm	2	-	-
	1.04	L-balk bak montering båt	Aluminium 1.5mm	2	-	-
	1.05	Lodrät L-Balk bak	Aluminium	2	-	-
	1.06	Vågrät L-balk bak	Aluminium	2	-	-
	1.07	Korsbalk	Aluminium	1	-	-
	1.08	Korsbalk L-profil	Aluminium	1	-	-
	1.09	Stabilitet L-Balk bak	Aluminium	2	-	-
	1.1	Stabilitet balk bak	Aluminium	2	-	-
Stag och Framvinge	2.01	Rotationsaxel	Aluminium	1	-	-
	2.02	Lodrät L-balk Servoplatta Skevroder	Rostfritt stål 1mm	4	-	-
	2.03	Vinkelbeslag Servo	Rostfritt stål 1mm	4	-	-
	2.04	Servoplatta Skevroder	Rostfritt stål 1mm	2	-	-
	2.05	Tryckstång	Mässing	2	-	-
	2.06	Vingända med vingöron	PETG	4		
	2.07	T-koppling vinge	PETG	2		
	2.08	Stag m. fixering för propeller	PETG	2		
	2.09	Stag överdel	PETG	2		
	2.1	Kolfiberstav Stag	Kolfiber	1	-	-
	2.11	Kolfiberstav	Kolfiber	1	-	-
Roder och vinge bak	3.01	Vinkelbeslag Servomontering	Rostfritt stål 1mm	4	-	-
	3.02	Servoplatta Höjdroder	Rostfritt stål 1mm	1	-	-
	3.03	Servoplatta Sidoroder	Rostfritt stål 1mm	1	-	-
	3.04	Tryckstång	Aluminium	2	-	-
	3.05	Roderbeslag samt montering	Rostfritt stål	1 set	-	-
	3.06	Roderlänk	Aluminium	1	-	-
	3.07	Vinkelbeslag tryckstång	Rostfritt stål	1	-	-
	3.08	Vinkelbeslag servoplatta	Aluminium	2	-	-
	3.09	Vingända	PETG	2		
	3.1	T-koppling vinge	PETG	1		
	3.11	Stag	PETG	1		
	3.12	Kolfiberstav Stag	Kolfiber	1	-	-

Elektronikkomponenter						
	ID	Komponent	Material	Antal	Utskriftstid / komponent (h)	Total utskriftstid (h)
Ställdon	4.01	Servo Skevroder	40 kgcm & vattentät	2	-	-
	4.02	Servo Sidoroder & höjdroder	20 kgcm & vattentät	2	-	-
	4.03	Motor	Dual thurst 9kg 24V	2	-	-
Sensor	4.04	GPS	CUAV NEO V2	1	-	-
Kommunikation	4.05	Radiomottagare	FS-iA6B	1	-	-
	4.06	Radiokontroller	Flysky FS-i6	1	-	-
	4.07	Autopilot	CUAV V5 nano	1	-	-
Energisystem	4.08	Batteri	6S LiPo 22.2 V 400 mAh	1	-	-
	4.09	Hastighetsregulator	UBEC 50A brushless	1	-	-
	4.1	Hastighetsregulator	BEC 50A brushless	2	-	-
	4.11	Effektmodul	CUAV HV PM 60v 60A	1	-	-