



CHALMERS



Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima Vetenskaper

CARL BJÖRK
GUSTAV CLASSON
OLIVER EL-HADDAD
SAMUEL NETZ
ADAM NORDSTRÖM
NORE STRID

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE VÅRTERMINEN 2025

Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima Vetenskaper

CARL BJÖRK
GUSTAV CLASSON
OLIVER EL-HADDAD
SAMUEL NETZ
ADAM NORDSTRÖM
NORE STRID



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Maritima vetenskaper
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025

Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp
CARL BJÖRK
GUSTAV CLASSON
OLIVER EL-HADDAD
SAMUEL NETZ
ADAM NORDSTRÖM
NORE STRID

© CARL BJÖRK, GUSTAV CLASSON, OLIVER EL-HADDAD,
SAMUEL NETZ, ADAM NORDSTRÖM, NORE STRID, 2025.

Handledare: Arash Eslamdoost, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper
Examinator: Rickard Bensow, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2025
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Slutgiltig konstruktion av bärplansbåten

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2025

Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp
CARL BJÖRK, GUSTAV CLASSON, OLIVER EL-HADDAD,
SAMUEL NETZ, ADAM NORDSTRÖM, NORE STRID
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Maritima Vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Denna kandidatuppsats syftar till att utveckla en självreglerande bärplansbåt, med ambitionen att vidareutveckla en tidigare prototyp inom samma område. Målet har varit att ta fram en modell som genom praktisk testning och analys kan bidra till framtida forskning inom bärplansteknik.

Bärplan har länge varit en känd teknik, men dess tillämpning har begränsats av komplexa och kostsamma reglersystem. I takt med ökad elektrifiering inom sjöfarten har intresset för bärplansbåtar vuxit, eftersom tekniken möjliggör betydande reduktion av vattenmotstånd och därmed ökad energieffektivitet, vilket är särskilt relevant för eldrivna båtar med begränsad räckvidd.

Systemet består av flera delsystem: skrov, vingdesign, vingkonfiguration och ett kontrollsystem. Kontrollsystemet, implementerat med ArduPilot, reglerar elektriska komponenter samt båtens stigning och rullning. Vingkonfigurationen består av en större främre vinge för huvudsaklig lyft och rollkontroll, och en bakre vinge för pitchstyrning. Skrovet är baserat på en tidigare design framtagen för bärplansfärjor. Systemets funktionalitet verifierades genom ett antal fälttester, där justeringar genomfördes mellan testen. Resultaten visar att båten kan upprätthålla stabil flygning över vattenytan, vilket innebär att projektets mål uppnåddes.

Det mest framträdande förbättringsområdet är implementeringen av en tillförlitlig höjdsensor. Den sensor som användes under testerna visade sig vara otillräckligt noggrann för robust höjdregering, vilket påverkade systemets prestanda under vissa förhållanden.

Nyckelord: bärplansbåt, hydrofoiling, ardupilot, hydrodynamik, lyftkraft.

Abstract

This bachelor's thesis aims to develop a self-stabilizing hydrofoil boat, with the goal of improving upon a previous prototype in the same field. The objective has been to construct a non-scale model that, through practical testing and analysis, can contribute to future research in hydrofoil technology.

Although hydrofoils have been known for decades, their widespread adoption has been limited by the complexity and cost of required control systems. With the increasing electrification of marine transport, interest in hydrofoil boats has grown, as the technology enables significant drag reduction and thereby improves energy efficiency—particularly important for electric vessels with limited range. The system consists of several subsystems: hull, wing design, wing configuration, and a control system. The control system, implemented using ArduPilot, governs the boat's electronic components and actively regulates pitch and roll. The wing configuration includes a larger front wing for primary lift and roll control, and a rear wing responsible for pitch regulation. The hull is based on a previous design developed for a hydrofoil ferry, deemed suitable for similar hydrodynamic conditions.

The system was evaluated through a series of field tests, during which iterative improvements were made. Results show that the boat is capable of maintaining stable flight above the water surface, indicating that the project's main objective was achieved.

The most prominent area for improvement is the implementation of a reliable height sensor. The sensor used during testing proved insufficiently accurate for consistent altitude regulation, which affected performance under certain conditions.

Förord

Rapporten är resultatet av en kandidatuppsats skriven på Chalmers Tekniska Högskola vid Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper under perioden Januari-Maj 2025 i Göteborg, Sverige. Målet med projektet var att bygga vidare på tidigare uppsatser och utifrån dem konstruera en radiostyrd modell av en självreglerande bärplansbåt.

Författarnas tack

Vi vill rikta ett särskilt tack till docent Arash Eslamdoost för det engagemang han visat för projektet samt för de många kloka råd och den värdefulla handledning vi fått under arbetets gång. Vi vill även uttrycka vår uppskattning till personalen i prototypplabbet, vars stöd och tekniska expertis varit till stor hjälp vid konstruktionen av farkosten samt till professor Rickard Bensow som har varit examinator för projektet. Vi vill även tacka A.H. Lindfors stipendiefond som finansierat stora delar av projektet.

Ett varmt tack riktas också till företaget Candela, som generöst bjöd in oss till ett studiebesök vid deras kontor och produktionsanläggning i Stockholm, ett besök som inspirerade och gav värdefull insikt i bärplanstekniken.

Slutligen vill vi tacka professor S.A. Kinnas vid *The University of Texas at Austin* för tillgång till hans bilder relaterade till kavitation.

Författarna, Göteborg, Maj 2025

Innehåll

Figurer	viii
1 Bakgrund	1
1.1 Tidigare projekt	1
1.2 Syfte	3
1.3 Mål	3
1.4 Avgränsningar	4
2 Teori	6
2.1 Verkande krafter	6
2.2 Bärplan	6
2.2.1 Hydrodynamik bärplan	7
2.2.2 Beräkningar	7
2.2.3 Vingklaff	9
2.2.4 Konfiguration	9
2.3 Skrov	11
2.4 Stag	12
2.4.1 Strukturell integritet av stag	12
2.4.2 Hydrodynamik av stag	13
2.5 Propulsion	13
2.6 Ventilering och Kavitation	14
2.7 Reglersystem	15
2.7.1 PID-reglering	16
2.7.2 reglering av anfallsvinkel	16
2.7.3 Hastighetsreglering	16
2.7.4 Radiostyrda system	17
3 Systemdesign	18
3.1 Mekanik och strukturella delar	18
3.1.1 Skrov	19
3.1.2 Vinge	20
3.1.3 Vingprofil	23
3.1.4 Stag	25
3.1.5 Vinkeljärn	27
3.1.6 Överbyggnad	28
3.2 Elektriskt system och reglering	31
3.2.1 Reglersystemets övergripande design	31
3.2.2 Elektriska komponenter	32
3.2.2.1 Styrenhet	33
3.2.2.2 Servos	34
3.2.2.3 ESC	34
3.2.2.4 Motorer	35
3.2.2.5 Sensorer	35
3.2.2.6 Strömförsörjning	36

Innehåll

3.2.2.7	RC-mottagare	36
3.2.2.8	Inslutning	36
3.2.3	Mjukvarukonfiguration	37
4	Tester	40
4.1	Test av flytkraft och sensor	40
4.2	Fälttester	41
5	Resultat	42
5.1	Slutgiltig konstruktion	42
5.2	Resultat av tester	43
5.2.1	Resultat av flyt- och sensortest	43
5.2.2	Resultat av fälttest 1	45
5.2.2.1	Körbeteende och upplevelser under fälttest 1	46
5.2.3	Resultat av fälttest 2	48
5.2.3.1	Körbeteende och upplevelser under fälttest 2	49
6	Diskussion	50
6.1	Tolkning av resultat	50
6.2	Styrkor och förbättringsområden	51
6.2.1	Båtdesign	52
6.2.2	Elektriska komponenter och reglersystem	53
6.3	Jämförelser med tidigare projekt	54
6.4	Måluppfyllnad	54
6.5	Slutsats	55
	Litteraturförteckning	57
A	<i>Mission Planner</i> konfiguration	I
B	Komponentlista	V
C	Python kod	VII

Figurer

1.1	Koncept framtaget som masteruppsats (Lolck Favrum & Lundqvist, 2022).	2
1.2	Vidareutveckling av föregående koncept som kandidatarbete (Alfredsson m. fl., 2024).	3
2.1	Illustrering av verkande krafter på en bärplansfarkost (Candela, 2024).	6
2.2	Illustrering av anfallsvinkel α (Müller, 2006a).	7
2.3	Olika typer av vingklaffar (Müller, 2006b).	9
2.4	Rotationsaxlar (Candela samt egen illustration)	10
2.5	Illustration av ytgenomträngande och nedsänkta bärplan. (Egen illustration)	11
2.6	Olika vingkonfigurationer. (Egen illustration)	11
2.7	Uppståndelse av ventilation (Duncan m. fl., 2023).	14
2.8	Visualisering av stagvinkel (Hillman, 2018).	15
2.9	Kavitation på bärplan i vatten. <i>Courtesy of Professor S.A. Kinnas at UT Austin</i> (Kinnas, 2025).	15
3.1	Illustration av komponenter	18
3.2	Glasfiberlaminering av skrov med epoxy.	20
3.3	Överst: servo till tryckstång med och utan lock. Nederst: främre vingklaff i sina två ändlägen.	21
3.4	Snitt av den främre vingen	22
3.5	Vingklaff roder	22
3.6	Visualisering av vingprofil NACA-0012	23
3.7	Lyft- och motståndskoefficienter för vingprofil NACA 0012 (Airfoil Tools, 2025).	24
3.8	Snitt av främre stag	26
3.9	Bakre stag	27
3.10	Illustration av komponenter till överbyggnad	29
3.11	Infästningar för roder, balk och servo på vänster (a) och höger (b) sida	30
3.12	Illustration av sensorinfästning framtill på överbyggnaden	30
3.13	Kopplingsschema för båtens elektronik	32
3.14	Pixhawk CUAV V5+	34
3.15	GXservo QY3240MG	34
3.16	HobbyWing XRotor PRO 50A	35
3.17	HobbyWing Platinum PRO V4 60A	35
3.18	CUAV NEO V2	35
3.19	Seafront 5V Ultrasonic	35
3.20	Zeee 6S LiPo, 22.2 V	36
3.21	CUAV HV PM 60v 60A	36
3.22	Flysky FS-IA6B RC-mottagare	36
3.23	Biltema kopplingslåda med plattan och vissa komponenter installerade.	37
3.24	Biltema kopplingslåda med plattan och vissa komponenter installerade.	38

4.1	Båtens skrov placerade i vågtanken.	40
5.1	CAD-rendering av konstruktionen	42
5.2	Verklig modell av konstruktionen	42
5.3	Visuell mätning av djupgående av obelastat skrov	43
5.4	Visuell mätning av djupgående av fullt belastat skrov	43
5.5	Hela logen från sekvensen för sensors värden.	44
5.6	Inzoomning på första låga vågen.	44
5.7	Inzoomning på höga vågen.	44
5.8	Genererad sinusvåg baserad på visuellt estimerad amplitud och period från test i vågtank. Denna våg motsvarar den sensoravlästa signalen i figur 5.6.	45
5.9	Genererad sinusvåg baserad på visuellt estimerad amplitud och period från test i vågtank. Denna våg motsvarar den sensoravlästa signalen i figur 5.7.	45
5.10	Sjösättning av båten	46
5.11	Tillfällig lösning för att justera positionen av tyngdpunkten	46
5.12	Stegring som resulterade i tappad lyftkraft	47
5.13	Båten i flygande läge från fälttest 1	48
5.14	Båten i stabilt flygande läge från fälttest 2	49

1 Bakgrund

I takt med att samhällets konsumtion ökar växer även behovet av mer energieffektiva och hållbara transportlösningar. Elektrifieringen har möjliggjort stora framsteg inom landtransporter, med kraftfulla batterier och ett omfattande nätverk av laddstationer längs vägarna. Däremot kvarstår stora utmaningar inom den marina sektorn, där elektrifiering ställer andra komplexa problem. För att eldrivna båtar ska bli praktiska krävs innovativa lösningar som effektiviserar driften och förbättrar användbarheten.

Den största utmaningen med att elektrifiera den marina sektorn är det höga vattenmotståndet, som gör framdriften energikrävande och begränsar räckvidden. För att öka räckvidden krävs en mer effektiv framdrift, där en möjlig lösning är att minska båtens vattenmotstånd.

Traditionella båtar har en hög energiförbrukning på grund av motståndskraften som uppstår när stora delar av skrovet är under vattenytan. Detta motstånd gör att båten behöver mer kraft från motorn för att ta sig framåt, vilket leder till ökad energiförbrukning. Ett reducerat motstånd, och därmed energibehov, möjliggör en längre räckvidd för samma tillförd energi. En teknik som har visat sig effektiv i motståndreducering är bärplansbåtar, vingar likt flygplan under båten som lyfter skrovet ovanför vattenytan och därmed minskar energiförbrukning med upp till 80% (Eslamdoost m. fl., 2022).

Bärplansbåtar introducerades redan i början av 1900-talet (Candela, 2024). Bärplanstekniken låg däremot före sin tid och slutade därför att utvecklas under 80-talet på grund av dess höga underhållskostnad och säkerhetsbrister. Under senare år har dock intresset för bärplansteknik återigen ökat, tack vare framsteg inom kompositmaterial och systemkontroll som gjort tekniken mer tillförlitlig, säker och kostnadseffektiv. Detta har banat väg för nya tillämpningar, särskilt inom eldrivna båtar där energieffektivitet är avgörande.

1.1 Tidigare projekt

För att skapa en tydlig förståelse för detta arbetes syfte, mål och avgränsningar är det viktigt att beskriva de tidigare projekt som ligger till grund för det. Arbetet bygger vidare på tidigare examensarbeten inom bärplansteknik, där särskilt två studentprojekt vid Chalmers tekniska högskola har haft en avgörande betydelse.

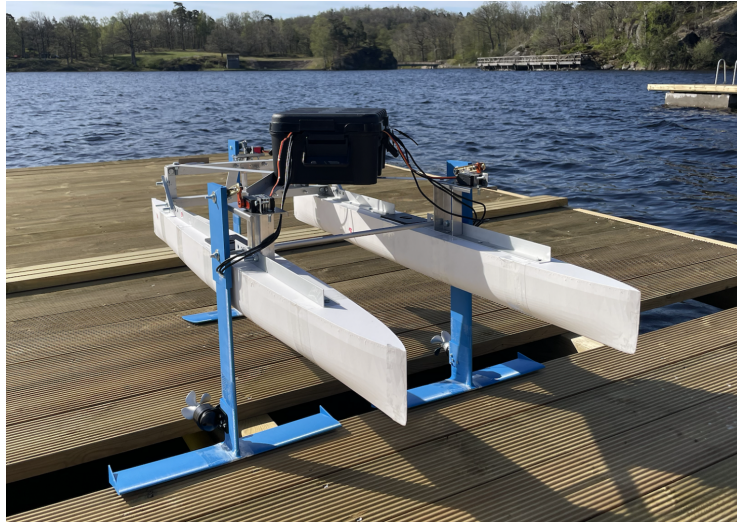
Grunden till projektet var en masteruppsats inom marin arkitektur och havsteknik (Lolck Favrum & Lundqvist, 2022). Projektet syftade till att bilda kunskap om bärplansteknik samt undersöka hur vingarnas position påverkade båtens egenskaper. På grund av skrovets höga vikt, höga motståndskrafter och otillräcklig lyftkraft lyfte båten aldrig ur vattnet upp på bärplanen. Vid fälttesterna upptäcktes även ventilationsfenomen vilket bidrog till turbulens. Ventilationen antogs huvudsakligen bero på ett mellanrum mellan bärplanet och staget. (Lolck Favrum & Lundqvist,

2022).



Figur 1.1: Koncept framtaget som masteruppsats (Lolck Favrum & Lundqvist, 2022).

En vidareutveckling av detta projekt gjordes i form av ett kandidatarbete inom Mekanik och Maritima vetenskaper (Alfredsson m. fl., 2024). Syftet med det projektet var inte att göra en skalenlig modell utan bevisa att konceptet var genomförbart. Modellen skulle använda sig av ett aktivt kontrollsystem för att hålla skrovet lyft över vattenytan. Skrovet som användes i kandidatarbetet var den undre delen av ett skrov konstruerat i ett Marine Design Project vid Chalmers tekniska högskola (Barman m. fl., 2024). Arbetet visade sig till viss del vara framgångsrikt genom att få skrovet att lyfta ur vattnet. Det fanns dock bekymmer med stabiliteten samt robustheten hos modellen. Det ansågs även finnas förbättringspotential gällande diverse designval. Tyngdpunkten visade sig vara placerad för långt bak vilket resulterade i att båten stegrade på grund av propellrarnas delvis uppåtriktade kraft. Valet att reglera anfallsvinkeln genom att justera vinkeln på staget visade sig bidra till en någorlunda vek konstruktion som skapade vibrationer.



Figur 1.2: Vidareutveckling av föregående koncept som kandidatarbete (Alfredsson m. fl., 2024).

1.2 Syfte

Projektets syfte är att konstruera en nedskalad modell av en bärplansbåt. Förhoppningen är att skapa en modulär och testvänlig design där båtens rörelser aktivt styrs av ett reglersystem. Regleringen baseras på en kombination av sensorer, där höjdsensorer används för att mäta avståndet till vattenytan och andra sensorer registrerar båtens dynamiska rörelser. Insamlade data bearbetas i realtid av ett styrsystem, som möjliggör justeringar av vingarnas anfallsvinkel och andra styrparametrar.

Projektet bygger vidare på tidigare forskning och utvecklingsprojekt inom bärplans teknik. De resultat som genereras förväntas bidra till ökad förståelse av dynamiken av bärplansfarkosters samt lägga grunden för framtida utvecklingsarbete inom området. Den flexibla och modulära designen av modellen skapar förutsättningar att undersöka och optimera olika konfigurationer av skrov, bärplan, vingar och reglersystem, med målet att förbättra prestandan och stabiliteten.

1.3 Mål

Huvudmålet med detta projekt är att utveckla en radiostyrd bärplansbåt med ett automatiserat reglersystem. Farkosten ska kunna hålla ett stabilt flygande läge minst 5 cm ovanför vattenytan i minst 20 sekunder, utan aktiv styrning av föraren eller påverkan av mindre vågor och vind. För att uppnå detta krävs att modellen först kan flyta stabilt i stillastående tillstånd, accelerera upp till minst 1 m/s, genomföra styrda svängar med en radie på högst 2 meter, samt lyfta skrovet från vattenytan på ett kontrollerat sätt.

Projektet syftar även till att förbättra stabilitet och manövrerbarhet jämfört med tidigare års prototyper, vilket ska kunna påvisas genom minst 100% längre flygtid. Det automatiska reglersystemet ska med hjälp av en eller fler höjdsensorer kunna hålla en konstant höjd från vattenytan med en maximal avvikelse på 10 cm under flygning. Genom optimeringar av design och komponentval är ett ytterligare mål att minska förekomsten av ventilering i propellrarna, vilket verifieras genom visuella observationer under testkörningar.

Slutligen är ett mål att dokumentera hela utvecklingsprocessen systematiskt så att framtida projektgrupper enkelt kan förstå, återanvända och vidareutveckla arbetet. Projektets mål kommer att utvärderas i rapportens resultat- och diskussionsdel utifrån insamlade mätdata, videomaterial och loggfiler.

1.4 Avgränsningar

Projektet är tidsbegränsat till vårterminen 2025 vilket medför att projektets fokus ligger på utvecklingen av en prototyp som kan demonstrera konceptet. Konstruktionen kommer därför inte att ta hänsyn till skalbarhet eller serieproduktion. Vidare är projektbudgeten begränsad, vilket kan komma att påverka val av material och komponenter.

Projektet bygger vidare på tidigare arbeten och forskning med fokus på identifierade förbättringsområden. För att möjliggöra en effektiv utveckling avgränsas det till de delsystem som kräver vidareutveckling: reglersystemet, justering av attackvinkel, konfiguration och överbyggnad. Däremot prioriteras inte delsystem som redan fungerar väl: vingprofiler och skrov. Denna avgränsning skapar en tydlig utgångspunkt för framtida projekt att bygga vidare på.

Inledningsvis kommer skrovformen utgöras av den undre delen av skrovet från projektet *HSC Vinga - Electric hydrofoiling passenger ferry for Styröbolaget Sailing in the southern archipelago of Gothenburg* (Barman m. fl., 2024), vilken även visade sig vara framgångsrik i projektet *Bärplansbåt - Från koncept till konstruktion* (Alfredsson m. fl., 2024). Skrovet utgör en central del av konstruktionen och en återanvändning av denna redan fungerande skrovform är därför fördelaktig.

Elektriska komponenter såsom servomotorer, kontrollenheter, sensorer och regulatorer kommer inte att utvecklas från grunden. Detta beror dels på att projektet är begränsat i tid och budget men framförallt eftersom att det finns många, för projektet, väl lämpade färdiga lösningar på marknaden. Projektet är avgränsat till att använda Ardupilot samt Pixhawk som reglersystem, då det visat sig vara ett beprövat och väl fungerande system (Audronis, 2017). Även propellrar i metall kommer att återanvändas från ett tidigare projekt på grund av den begränsade tiden och budgeten.

Projektet kommer att använda vingprofilen NACA 0012, som i tidigare projekt vi-

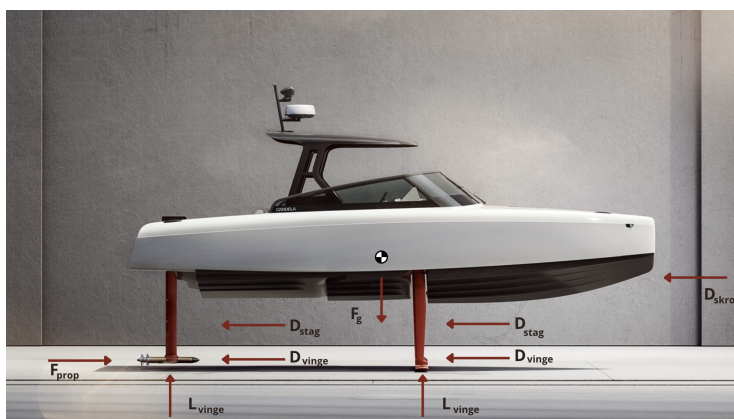
sat sig vara väl lämpad för bärplan. Profilen valdes utifrån dess goda balans mellan lyft- och motståndskraft samt dess förmåga att hantera de strukturella påfrestningar som uppstår. Dess symmetriska utformning ger en linjär respons mellan attackvinkel och lyftkraft, vilket är fördelaktigt vid implementering av reglersystemet. Genom att återanvända en beprövad vingprofil förenklas utvecklingsprocessen och minskar behovet av omfattande tester.

2 Teori

I detta kapitel behandlas teoretiska koncept, tätt kopplade till bärplansbåtar och projektet i sin helhet. Genom att studera olika källor läggs här en teoretisk grund att sedan bygga systemdesignen på i senare kapitel.

2.1 Verkande krafter

För att bygga en förståelse kring vilka krafter som verkar på en bärplansbåt inleds detta kapitel med en illustration och sammanställning dessa. Krafterna illustreras i figur 2.1, men notera att dessa krafter inte är specifika för figuren, utan enbart visas för att ge en allmän förståelse av vilka krafter som verkar på en bärplansbåt. D_{skrov} är det hydrodynamiska motståndet som resultat av skrovet, D_{stag} är det hydrodynamiska motståndet från stagen i vattnet, D_{vinge} är det hydrodynamiska motståndet vingarna skapar. F_g är tyngdkraften av hela farkosten och F_{prop} är den verkande kraften på båten till följd av kraften från den roterande propellern. L_{vinge} utgör den lyftkraft som genereras av vingarna.



Figur 2.1: Illustrering av verkande krafter på en bärplansfarkost (Candela, 2024).

2.2 Bärplan

Bärplanen utgör en central komponent i konstruktionen av en bärplansfarkost, då de genererar den lyftkraft som möjliggör att farkosten höjs ovanför vattenytan. Vid utformning och val av bärplan finns en mängd olika geometrier, storlekar och konfigurationer, vilka i sin tur påverkar farkostens hydrodynamiska egenskaper. Detta kapitel behandlar den teoretiska grunden för bärplan, med särskilt fokus på deras hydrodynamik samt olika vinggeometriers inverkan på farkostens prestanda.

2.2.1 Hydrodynamik bärplan

Vid analys av bärplanen hos en bärplansfarkost finns tydliga likheter med flygplansvingar. Precis som flygplansvingar genererar lyftkraft för att hålla farkosten i luften, skapar bärplanen den nödvändiga lyftkraften för att höja farkosten ovanför vattenytan. Bärplanens primära funktion är att generera tillräcklig lyftkraft för att lyfta farkosten, samtidigt som det hydrodynamiska motståndet minimeras (Nationalencyklopedin AB, 2025).

Principen för vingars eller bärplans funktion är densamma oavsett om de verkar i luft eller vatten, då lyftkraften genereras genom interaktionen mellan strömmande fluid och vingens yta. Lyftkraften på ett bärplan uppstår genom tryckskillnader som genereras av vattnets strömning över bärplanets yta. När vatten passerar över bärplanet delas strömningen upp i en övre och en undre del. Vingens profil skapar en längre strömningsväg på ovansidan vilket ger den övre delen en högre strömningshastighet, vilket enligt Bernoullis ekvation leder till ett lägre statiskt tryck. Samtidigt genererar den långsammare strömningen på undersidan ett högre tryck. Detta skapar en nettokraft med en uppåtriktad komponent, vilket ger upphov till lyftkraften (D. Anderson & Eberhardt, 1999).

Anfallsvinkeln är ett centralt begrepp vid analys av bärplanets lyft- och motståndskraft. Den definieras som vinkeln mellan bärplanets kordallinje och det relativa vattenflödet. En högre anfallsvinkel ökar lyftkraften genom att skapa större tryckdifferens mellan översidan och undersidan av bärplanet. Samtidigt medför detta en ökning av motståndskraften, vilket kan leda till högre energiåtgång. Vid för höga anfallsvinklar riskerar bärplanet att ställa, vilket minskar lyftkraften dramatiskt.



Figur 2.2: Illustrering av anfallsvinkel α (Müller, 2006a).

2.2.2 Beräkningar

Vid analys av en vingprofils hydrodynamik är det intressant att ta reda på vingens lyft- och motståndskraft. För att beräkna lyftkraften L , samt motståndskraften D används ekvation 2.1 och 2.2.

$$L = \frac{1}{2} C_{L,2D} \rho V^2 A_p \quad (2.1)$$

$$D = \frac{1}{2} C_{D,2D} \rho V^2 A_p \quad (2.2)$$

Vingarean A_p definieras enligt

$$A_p = bc \quad (2.3)$$

där b är vingens bredd och c är längden på kordalinjen. De dimensionslösa koefficienterna $C_{L,2D}$ och $C_{D,2D}$ representerar lyft- respektive motståndskoefficienter, och dessa kan bestämmas utifrån Reynoldsstalet Re samt vingprofilens anfallsvinkel α (White, 2011).

Reynoldsstalet beskriver förhållandet mellan tröghetskrafter och viskösa krafter i ett strömmande medium och definieras som:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.4)$$

där ρ är fluidens densitet, v är en karakteristisk hastighet, L är en karakteristisk längd, och μ är fluidens dynamiska viskositet. För en vingprofil motsvarar L ofta kordalängden (White & Xue, 2021).

För att beräkna lyft- och motståndskoefficienterna för en tredimensionell vinge behöver de tvådimensionella koefficienterna $C_{L,2D}$ och $C_{D,2D}$ justeras för att ta hänsyn till ändeffekter. Detta kan göras med ekvation (2.5) och (2.6) (Larsson m. fl., 2022):

$$C_L = \frac{C_{L,2D}}{1 + \frac{2}{AR_{\text{eff}}}} \quad (2.5)$$

$$C_D = \frac{C_L^2}{\pi AR_{\text{eff}} e} + C_{D,2D} \quad (2.6)$$

Där AR_{eff} är den effektiva aspektkvoten, som justeras beroende på vingens geometri, och e är Oswalds effektivitetstal. Enligt (NASA Glenn Research Center, 2023) kan e estimeras till 1.0 för en elliptisk vingprofil och till 0.7 för en rektangulär vingprofil.

Aspektkvoten AR kan i sin tur beräknas med ekvation (2.7):

$$AR = \frac{b}{c} \quad (2.7)$$

där b är bredden av vingen och c är kordalinjen.

Vingöron är vertikala eller vinklade ytor placerade vid vingpetsarna, med syftet att minska vingpetsvirvlar. Dessa virvlar uppstår till följd av tryckskillnaden mellan vingens ovansida och undersida och ger upphov till inducerat motstånd, vilket försämrar vingens lyft-till-motståndsförhållande (van Dam m. fl., 1981).

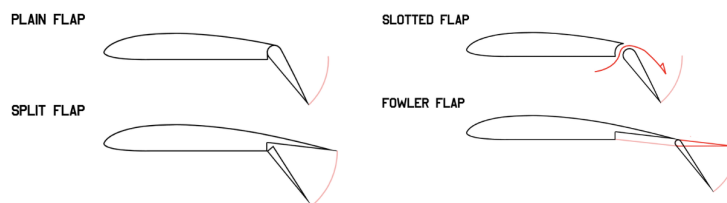
Effekten av vingöron kan uppskattas genom ett tillägg till den effektiva aspektkvoten A_{eff} , enligt ekvation (2.8):

$$A_{\text{eff}} = AR + 1.1 \cdot \frac{S_e}{S} \quad (2.8)$$

här är A_{eff} den totala effektiva aspektkvoten efter att vingöron har applicerats, och AR den ursprungliga aspektkvoten utan ändplattor. Termen $\frac{S_e}{S}$ beskriver förhållandet mellan ändplattornas sammanlagda area S_e och vingens planformarea S . Faktorn 1.1 är empiriskt härledd och baseras på experimentella data.

2.2.3 Vingklaff

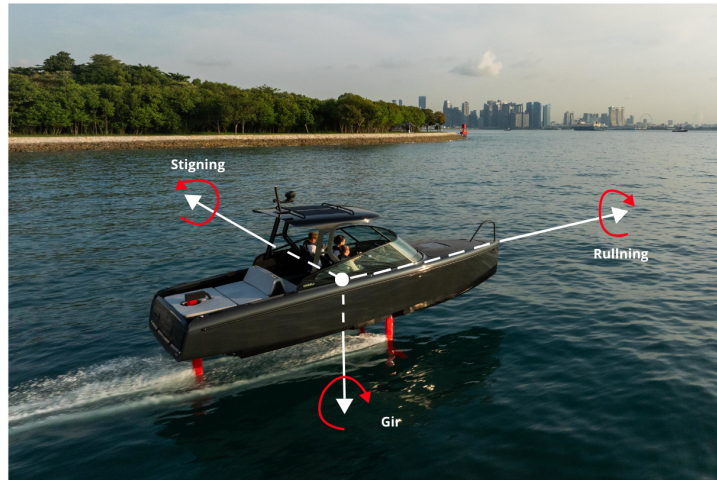
För att reglera en vinges lyft- och motståndskraft används ofta vingklaffar, vilka är rörliga ytor ofta placerade vid vingens bakkant. Genom att förändra vingprofilens geometri påverkas anfallsvinkeln, vilket resulterar i en ökad lyftkraft men även ett ökat motstånd. De vanligaste typerna av vingklaffar är plain flaps, split flaps, slotted flaps och Fowler flaps, vilka illustreras i figur 2.3 (Brassaw, 2024).



Figur 2.3: Olika typer av vingklaffar (Müller, 2006b).

2.2.4 Konfiguration

Farkosten styrs genom rörelse längs tre huvudsakliga rotationsaxlar: roll, stigning och gir. Rullning sker kring farkostens längdaxel och påverkar dess lutning i sidled. Stigning innebär rotation kring den laterala axeln och avgör om nosen pekar uppåt eller nedåt, en rörelse som på flygplan ofta styrs av höjdrodret på stjärtpartiet. Gir utgör rotation kring den vertikala axeln och påverkar farkostens riktning i sidled. Dessa rotationsaxlar är relevanta vid styrning av en bärplansfarkost, där bärplanen kan utformas och möjliggöra justeringar för att påverka stabilitet och manövrering. En illustration av dessa rotationsaxlar visas i figur 2.4.

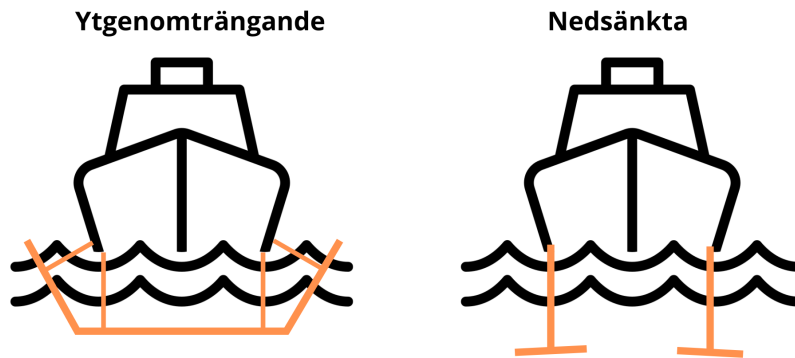


Figur 2.4: Rotationsaxlar (Candela samt egen illustration)

Bärplan kan enligt Johnston (1985) delas in i två huvudkategorier beroende på dess placering i vattnet: *ytgenomträngande* och *nedsänkta bärplan*. Dessa illustreras i figur 2.5

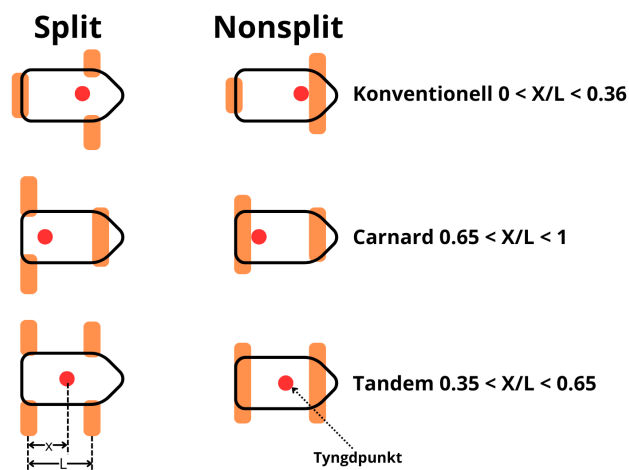
Ytgenomträngande bärplan är delvis ovanför vattenytan och förändrar sin nedsänkning beroende på farkostens hastighet och belastning. När hastigheten ökar, stiger farkosten ur vattnet och minskar därmed den våta ytan, vilket leder till reducerat hydrodynamiskt motstånd. Om farkosten sjunker djupare i vattnet ökar lyftkraften, medan om den stiger minskar lyftkraften. Även om farkosten börjar luta åt det ena hållet så ökar lyftkraften på den sidan vilket stabiliserar farkosten. De ytgenomträngande bärplanen är känsliga för vågor och variationer i vattenytan, vilket kan påverka stabiliteten vid högre hastigheter.

Nedsänkta bärplan är helt under vattenytan och påverkas därför mindre av ytrörelser och vågor. Dessa bärplan ger en mer stabil gång och är vanliga på bärplansbåtar som kräver jämn lyftkraft även i varierande sjöförhållanden. Eftersom de saknar den självstabiliserande egenskapen som ytgenomträngande bärplan besitter, kräver de aktiv styrning för att bibehålla en konstant höjd ovanför vattnet (Van Walree, 2000).



Figur 2.5: Illustration av ytgenomträngande och nedsänkta bärplan.
(Egen illustration)

Vingkonfigurationen kan delas in i tre huvudsakliga kategorier som består av Canard, Tandem och Konventionell. Dessa kan antingen ha delade eller sammansatta vingar, enligt figur 2.6. Enligt Johnston (1985) innebär Canard-konfiguration att den bakre vingen bär mer än 65% av lyftkraften. Tvärtom innebär konventionell när den främre vingen bär mer än 65% av lyftkraften. Med en tandem-konfiguration menas att lyftkraften jämnt fördelas mellan de båda bärplanen.



Figur 2.6: Olika vingkonfigurationer. (Egen illustration)

2.3 Skrov

Ett skrov till en båt utsätts för flera fysikaliska krafter som påverkar dess beteende i vattnet. När båten är stillastående eller rör sig långsamt, stöds dess vikt av lyftkraft enligt Arkimedes princip, vilket innebär att den lyftkraft som verkar på skrovet är

lika med vikten av den undanträngda vattenvolymen (Molland, 2011) enligt ekvation

$$F = \rho V g \quad (2.9)$$

Detta gäller tills båtens hastighet kan generera en vertikal reaktionskraft från vattnet som också börjar lyfta båten. Lyftet uppstår till följd av det ökade vattentrycket under skrovet. När båtens hastighet ökar tillräckligt mycket genereras en vertikal reaktionskraft från vattnet, och när denna kraft blir lika stor som båtens vikt, befinner sig båten i planing. Ofta optimeras båtens skrov för att underlätta planing då detta kan reducera båtens motstånd i vatten (Savitsky, 1964).

När båten rör sig genom vattnet genereras även ett hydrodynamiskt motstånd, vilket består av friktionsmotstånd från vattnet som strömmar längs skrovets yta samt vågmotstånd. Motståndet verkar i motsatt riktning mot båtens rörelse och kan delas in i flera komponenter. Vid låga hastigheter, där skrovet huvudsakligen bärs upp av hydrostatisk lyftkraft, dominerar friktionsmotståndet. När hastigheten ökar bidrar även tryckmotstånd och vågmotstånd i allt större utsträckning, där vågmotståndet och friktionsmotståndet blir de dominerande faktorerna för planande skrov (Yun & Bliault, 2012). I denna studie beskrivs det totala vattenmotståndet enligt Holtrop och Mennens metod enligt ekvationen

$$R_{\text{total}} = R_F(1 + k_1) + R_{\text{APP}} + R_W + R_B + R_{\text{TR}} + R_A \quad (2.10)$$

Det totala vattenmotståndet beskrivs som R_{total} och består av flera delar där varje term representerar en specifik bidragande faktor. Friktionsmotståndet, R_F , beskriver den viskösa friktionen mellan skrovet och vattnet och korrigeras med en formfaktor $(1 + k_1)$ för att ta hänsyn till skrovets geometri. R_{APP} syftar till motståndet från utstickande delar, såsom bidrag från exempelvis roder och propelleraxlar som stör vattenflödet. Vågmotståndet, R_W , kommer från när skrovet genererar vågor vid rörelse genom vattnet och påverkas av båtens skrov och hastighet. R_B motsvarar tryckmotståndet orsakat av en bulb vid vattenytan. R_{TR} bidrar till det totala motståndet genom förändringar i tryckfördelningen runt skrovet. Slutligen inkluderar ekvationen en korrelationsresistans, R_A , som används för att kompensera för skillnader mellan modellförsök och fullskaliga fartyg, samt för att ta hänsyn till ytjämnhet och luftmotstånd.

2.4 Stag

Stagen i en bärplansfarkost, på engelska kallat *struts*, som förbinder vingarna med skrovet spelar en central roll i farkostens struktur och hydrodynamiska prestanda. Stagen bör utformas för att tåla de stora krafter och moment som uppstår under drift, inklusive lyftkrafter från vingarna och dynamiska belastningar från vattnet.

2.4.1 Strukturell integritet av stag

Genom att dimensionera stagen utifrån farkostens belastningar säkerställs en effektiv kraftöverföring. Detta minimerar risken för strukturella deformationer och utmattningsbrott, vilket är avgörande för farkostens funktionalitet. Detta inkluderar

att välja passande material och dimensioner som klarar höga belastningar samtidigt som de bibehåller låg vikt och god hydrodynamisk prestanda (Merritt, 1962).

2.4.2 Hydrodynamik av stag

Det är viktigt att betrakta stagen som aktiva hydrodynamiska ytor, jämförbara med vingor, som kan generera lyftkraft i horisontalled. Detta blir särskilt betydelsefullt när stagen används som roder eller när båten girar, då de bidrar till kursstabilitet och styrförmåga genom att producera laterala krafter. Därför bör utformningen av stagen inte bara fokusera på strukturell integritet, utan även dess hydrodynamik. En välutformad stagprofil minimerar motstånd och flödesstörningar, vilket förbättrar farkostens totala effektivitet. Om stagen är för breda, grova eller felpacerade kan de skapa turbulens och störningar i vattenflödet, vilket i sin tur kan påverka vingarnas prestanda negativt (Jacobson, 2023).

2.5 Propulsion

En båtpropeller fungerar genom att omvandla motorns roterande rörelse till en framåtriktad kraft som driver båten genom vattnet. Detta sker genom att propellerns blad, som är utformade med en specifik skruvform, genererar en tryckskillnad mellan bladens fram- och baksida när de roterar i vattnet. Denna tryckskillnad orsakar en kraft som skjuter vattnet akterut, och enligt Newtons tredje lag – "varje kraft har en lika stor men motsatt riktad reaktionskraft" – genereras en framåtriktad kraft som driver båten framåt (Kerwin, 1986).

Denna motståndskraft bestäms med Newtons andra lag

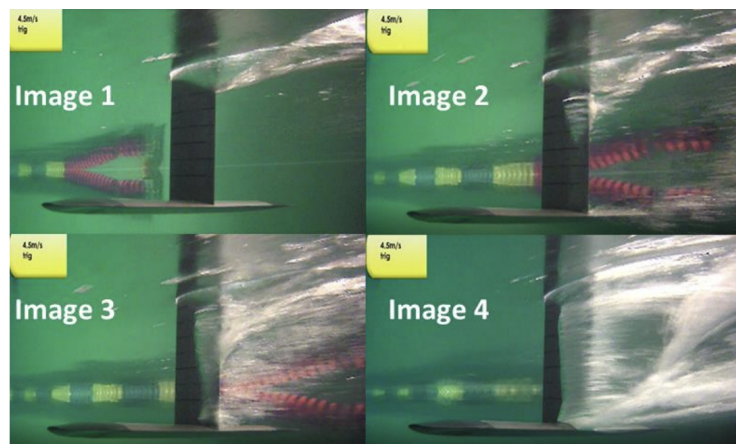
$$F = m \cdot a \tag{2.11}$$

se ekvation 2.11, där m är massan vatten som propellern trycker undan och a är accelerationen på detta vatten. När propellern snurrar suger den in vatten från framsidan och skjuter ut det bakåt med en högre hastighet. Vattnet antas accelereras från en initial hastighet, vilket ofta är nära noll om vattnet är stillastående relativt båten till en slutlig hastighet som ges av propellerns utflöde.

Effektiviteten hos en propeller beror på flera faktorer, bland annat dess form, diameter, och stigning. En välutformad propeller skapar optimal lyftkraft samtidigt som den minimerar kavitation, en effekt där trycket sjunker till den grad att vatten omvandlas till ånga, vilket kan orsaka skador på propellerns blad och minska dess effektivitet. Propellerns stigning, det vill säga den teoretiska distansen den rör sig framåt under ett varv, påverkar hur mycket vatten som skjuts akterut och därmed hur stor framåtkraften blir (Kerwin, 1986).

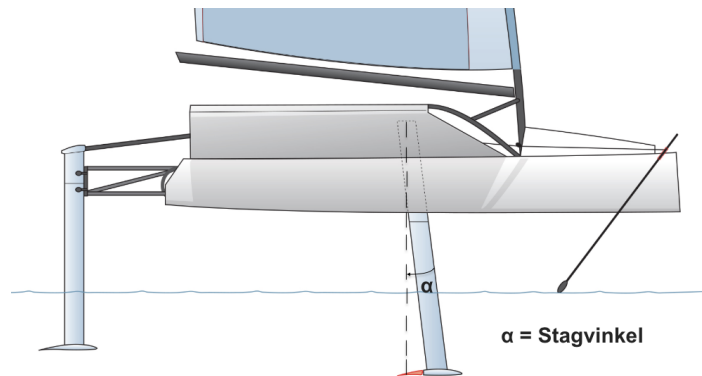
2.6 Ventilering och Kavitation

Ventilation är en kritisk faktor att beakta vid design av bärplansbåtar eftersom det enligt (Harwood m. fl., 2023) kan leda till en betydande minskning av lyftkraften och en ökning av motståndet, vilket försämrar båtens prestanda och stabilitet. Detta resulterar i sin tur i Ventilering i vatten inträffar när luft infiltrerar den övre sidan av en ving eller annan komponent i närhet av vattenytan, vilket resulterar i en reducerad lyftkraft och ett ökat hydrodynamisk motstånd (se figur 2.7). Figur 2.7 visar händelseförloppet samt propageringen av ventilering där bilderna i följd är tagna i kronologisk ordning. För att motverka ventilation är det avgörande att både stagen och vingarna utformas med strömlinjeformade profiler och är korrekt placerade för att upprätthålla ett jämnt vattenflöde (Barden & Binns, 2012).



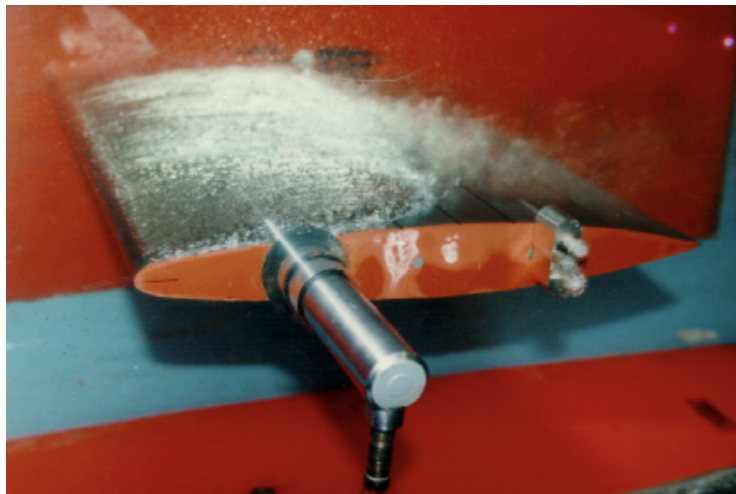
Figur 2.7: Uppståndelse av ventilation (Duncan m. fl., 2023).

Enligt Barden och Binns (2012) har justeringen av vinkeln på stagen, se figur 2.9, visat sig bidra till minskad ventilationsrisk genom att förändra flödesdynamiken och förhindra att luft dras ned i vattnet. Godø m. fl. (2024) nämner att ventilering påverkar även själva vingarna. Vingarna är särskilt utsatta nära vattenytan, vid höga hastigheter eller när vattnets flöde är turbulent, vilket kan leda till att luft dras ner från ytan på vingen. För att minska ventilationsrisken hos vingarna är det viktigt att designa dem för att ge ett konsekvent och stabilt flöde, samt hålla ett tillräckligt avstånd från vattenytan för att undvika att luften sugas ned i den hydrodynamiska ytan (Godø m. fl., 2024).



Figur 2.8: Visualisering av stagvinkel (Hillman, 2018).

Kavitation innebär bildandet av ångbubblor i flödet över bärplanet som ett resultat av lokala tryck som understiger vätskans ångtryck. Ett lågt tryck är förknippat med hög flödes hastighet och hög koefficient. Kavitation kan leda till en abrupt minskning av lyftkraft och ökning av motståndskraft (Van Walree, 2000).



Figur 2.9: Kavitation på bärplan i vatten. *Courtesy of Professor S.A. Kinnas at UT Austin* (Kinnas, 2025).

2.7 Reglersystem

Som tidigare nämnt medför bärplanstekniken utmaningar när det gäller stabilitet. Detta gäller särskilt i maritima miljöer där vågor, varierande hastigheter och förändringar i lyftkraft resulterar i plötsliga förändringar av båtens färdynamik. I avsnitt 2.2.4 beskrivs ytgenomträngande vingar samt att dem regleras passivt. Vidare beskrivs även behovet av aktiv, även kallad dynamisk, reglering för helt nedsänkta bärplan.

2.7.1 PID-reglering

En vanlig metod för hastighets- och styrreglering i bärplansfarkoster är PID-reglering, där PID är en akronym för Proportionell-Integrerande-Deriverande. En PID-regulator justerar styrsignalen baserat på ett reglerfel enligt ekvationen

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

där K_p , K_i och K_d är de proportionella, integrerande och deriverande förstärkningskonstanterna. Felet $e(t)$ definieras som skillnaden mellan börvärdet och den aktuella, se ekvation (2.13).

En PID-regulator används för att säkerställa att farkosten reagerar smidigt och effektivt på förändringar i hastighet och riktning. Genom att justera förstärkningskonstanterna kan systemet optimeras för att minimera avvikelser och förbättra stabiliteten (Lennartson, 2002).

2.7.2 Reglering av anfallsvinkel

För att upprätthålla en kontrollerad färdynamik, inklusive stigning, roll och höjd över vattenytan, måste anfallsvinkeln på bärplanen kontinuerligt regleras, vilket möjliggör justering av lyftkraften i realtid baserat på de rådande förhållandena. Denna metod möjliggör en stabil och kontrollerad färd ovanför vattenytan, även under varierande förhållanden (Faltinsen, 2005).

Den dynamiska regleringen kräver kontinuerlig inhämtning av indata från ett flertal sensorer, för att ge en exakt bild av båtens aktuella färdynamik. Utan denna realtidsdata skulle bärplanens anfallsvinkel inte kunna justeras korrekt, vilket återigen skulle leda till instabilitet och försämrade prestanda (von Ellenrieder, 2021).

Denna justering sker kontinuerligt baserat på sensorernas indata och utförs optimalt med hjälp av återkopplad reglering. Mer specifikt med hjälp av regulatorer, såsom PID-regulatorer, som snabbt och effektivt kan balansera systemet genom att hantera både små och stora avvikelser i färdynamiken. Regulatorer möjliggör en snabb respons på förändrade förhållanden, vilket är avgörande för att bibehålla en stabil och kontrollerad färd i varierande maritima miljöer (Ogata, 2020).

2.7.3 Hastighetsreglering

Hastighetsreglering i en bärplansfarkost är avgörande för att upprätthålla stabilitet och effektivitet vid färd över vattenytan. När farkosten ökar sin hastighet genererar bärplanen en lyftkraft som successivt lyfter skrovet ur vattnet, vilket minskar hydrodynamiskt motstånd och ökar effektiviteten. För att reglera hastigheten används ofta ett slutet och återkopplat reglersystem. Det önskade hastighetsvärdet v_{ref} jämförs med den aktuella hastigheten v och ger reglerfelet e , där

$$e(t) = v_{ref} - v(t) \quad (2.13)$$

Detta fel används sedan för att, med hjälp av en PID-regulator (kapitel 2.7.1), justera motoreffekten och vilket ändrar propellerhastigheten och därmed hastigheten av farkosten.

Felet e kan påverkas av störningar såsom vind, vågor, vattenmotstånd och variationer i lyftkraft (Magini & Burroughs, 1967). Målet med regleringen är att få e att gå mot noll och därmed uppnå en jämn acceleration och bibehålla en stabil färdhastighet.

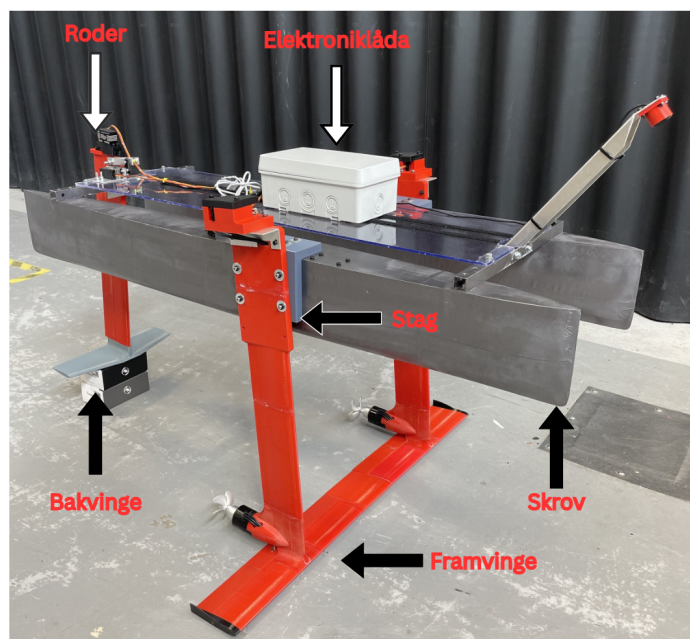
2.7.4 Radiostyrda system

Radiostyrda (RC) system används för trådlös styrning av farkoster genom att överföra kommandon från en sändare till en mottagare via radiofrekvenssignaler. Ett typiskt RC-system består av en sändare, en mottagare samt aktuatorer som servon eller elektroniska hastighetsregulatorer (ESC) (Valavanis, 2007). Kommunikation mellan sändare och mottagare sker oftast via en fast radiofrekvens, där varje styrkanal överförs som en digital signal i form av pulsviddsmodulering (PWM). I detta format kodas styrinformationen som pulser med en varaktighet mellan cirka 1000 och 2000 mikrosekunder, där längden tolkas som ett kommando till en specifik aktuator (F. P. Anderson & Liu, 2005). RC-system möjliggör därmed direkt användarinmatning eller fjärrstyrd reglering i realtid, vilket är avgörande för kontroll av t.ex. hastighet, kurs eller anfallsvinkel i autonoma farkoster (Valavanis, 2007).

3 Systemdesign

I detta kapitel presenteras systemdesignen för den utvecklade modellen. Kapitlet redogör för de metoder som använts för att motivera designvalen. Ett centralt designmål är att modellen ska vara modulär, vilket innebär att mindre komponenter enkelt ska kunna bytas ut eller omplaceras för att möjliggöra justeringar och optimeringar av systemets prestanda. De valda konstruktionslösningarna baseras på den teoretiska grunden som presenterades i föregående kapitel.

Systemet består av ett antal huvudsakliga delsystem: skrov, stag med vingar och klaffar, framdrivningssystem med propellrar, mekaniska ställningar som förbinder skroven samt ett regelsystem med tillhörande elektronik, se figur 3.1. Kapitlet är strukturerat i två delar, där den första behandlar de mekaniska och strukturella komponenterna, medan den andra fokuserar på regelsystemet och dess elektriska delar.



Figur 3.1: Illustration av komponenter

3.1 Mekanik och strukturella delar

Den första delen av systembeskrivningen behandlar de fysiska komponenterna som tillsammans utgör farkostens mekaniska struktur. Fokus ligger här på skrov, bärplan, framdrivning och bärande ställningar.

3.1.1 Skrov

Det skrov som används i detta projekt är hämtat från det tidigare kurs på masternivå på Chalmers, HSC Vinga, vilket beskrivs i avsnitt 1.4. HSC Vinga-projektet syftade till att utveckla ett skrov anpassat för en färja med bärplansteknik, och skrovets geometri är därför optimerad för just denna tillämpning. På grund av deras specifika anpassning till bärplansdrift bedömdes skroven vara väl lämpade att återanvända i detta arbete. Endast skrovformen från det tidigare projektet har integrerats; däck och överbyggnad har uteslutits för att skapa utrymme för nya stödstrukturer och övriga systemkomponenter.

För att möjliggöra montering av vinkeljärnen mot skrovet har skrovets geometri anpassats. Monteringsytan har justerats till att vara helt horisontell, för att säkerställa att vinkeljärnen låg dikt an mot skrovet. Detta förhindrade oönskad lutning av vingarna och bidrar samtidigt till ökad strukturell integritet, då hela vinkeljärnens kontaktyta ligger an mot skrovet.

För att skroven skulle passa det aktuella projektets skala genomfördes en proportionell nedskalning av modellen från HSC Vinga. Den slutliga skrovlängden valdes till 1,2 meter, vilket enligt Alfredsson m.fl. 2024 ger upphov till en lyftkraft på cirka 12 kg.

Utöver skalmodifieringen infördes även en höjning av fribordet med 4 cm. Syftet med denna åtgärd var att minska risken för att vatten tränger in över skrovet under drift, vilket i sin tur förbättrar farkostens stabilitet och skyddar de elektriska komponenterna från fuktskador. Den ökade fribordshöjden bidrar även till en marginellt högre lyftkraft, vilket ger en förbättrad säkerhetsmarginal vid varierande belastning och sjöförhållanden.

Skrovet har tillverkats genom additiv tillverkning (3D-skrivning) vid Chalmers FUSE. Det valda materialet är PETG. För att minimera vikten konstruerades skroven med en ihålig struktur. På grund av begränsningar i 3D-skrivarnas byggvolym delades skrovet upp i sex separata sektioner, vilka efter utskrift sammanfogades med superlim. Sammansättningen genomfördes efter att samtliga delar skrivits ut och testats för passform, vilket säkerställde en robust och sammanhängande struktur. För att säkerställa skrovets vattentätthet och samtidigt öka skrovets hållfasthet, mätades skrovets yta med epoxi för att sedan lamineras med ett tunt skikt glasfiberväv på skrovets ytor, se figur 3.2. Särskild uppmärksamhet ägnades åt sammanfogningarna mellan skrovdelarna, då dessa utgör en potentiellt svag punkt i konstruktionen och därmed är kritiska för både hållfasthet och täthet. För ytterligare vattentätthet och av estetiska skäl målades skrovet efter slipning med primer och grå sprayfärg.



Figur 3.2: Glasfiberlaminering av skrov med epoxy.

3.1.2 Vinge

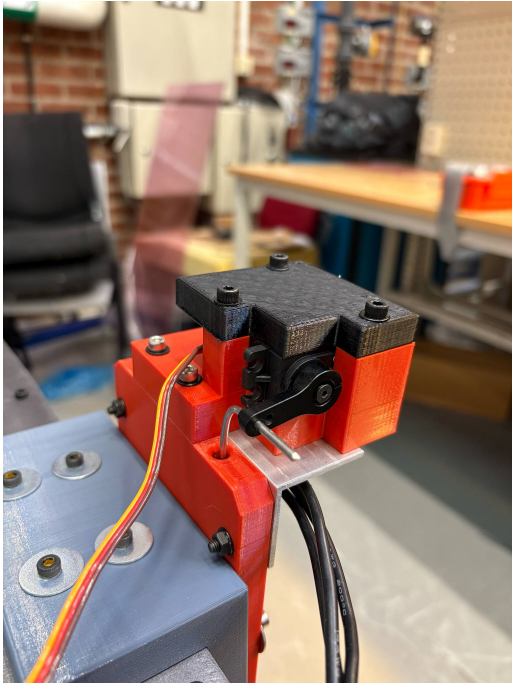
Vingarna utgör en central komponent i detta projekt, då de är avgörande för att farkosten ska kunna lyfta ur vattnet. Det teoretiska ramverket som presenterades i föregående kapitel ligger till grund för valet av vingprofil.

Det beslutades att använda en konventionell vingkonfiguration med en sammansatt främre vingstruktur, i enlighet med beskrivningen i avsnitt 2.1.3. Detta val motiveras av dess stabiliserande effekt på de främre vingarna och stag, samt den ökade vingarean, vilket förbättrar lyftegenskaperna. Därmed kommer mer än 65% av den totala lyftkraften genereras av den främre vingen.

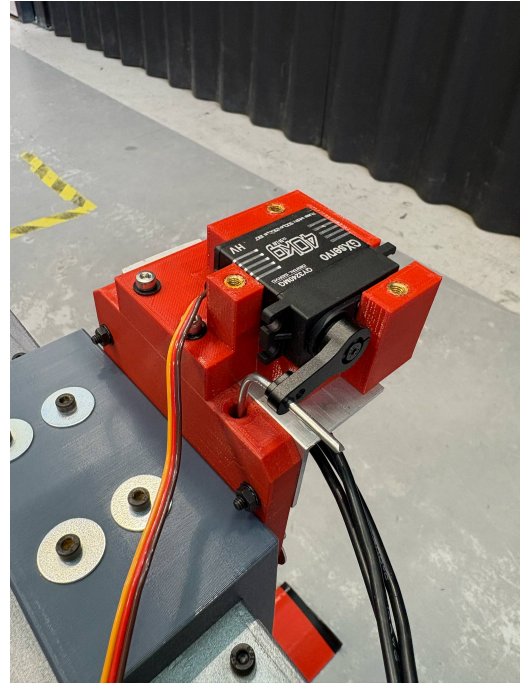
Ett centralt beslut i designprocessen var metoden för att justera anfallsvinkeln och därmed identifiera vilka komponenter som skulle vara rörliga. Ett av de övervägda alternativen var att justera hela vingen i förhållande till staget. Detta alternativ förkastades dock, eftersom det skulle kräva att flera komponenter befann sig under vattenytan, vilket skulle komplicera konstruktionen och öka risken för slitage på dessa komponenter i den marina miljön. Ett annat alternativ var att konstruera en stel enhet av stag och vinge och justera hela denna enhet gemensamt genom att ändra stagets vinkel. Denna lösning ansågs vara relativt enkel att implementera, men bedömdes vara olämplig då den utsätts för höga hydrodynamiska krafter, vilket kan leda till instabilitet. Den valda lösningen utgjordes istället av justerbara vingklaffar som kunde integreras i vingkonstruktionen. Dessa klaffars anfallsvinkel regleras via en tryckstång för att modifiera vingens dragkraft gentemot lyftkraft. Tryckstången är kopplad till en servo, som är monterad på ovasidan av de främre stagen. Rotation

3. Systemdesign

av servoarmen innebär en justering av tryckstången i horisontalled, vilket i sin tur leder till en justering av attackvinkeln på vingklaffarna. Dessa delar visualiseras i figur 3.3.



(a) Servo till tryckstång, med lock



(b) Servo till tryckstång, utan lock



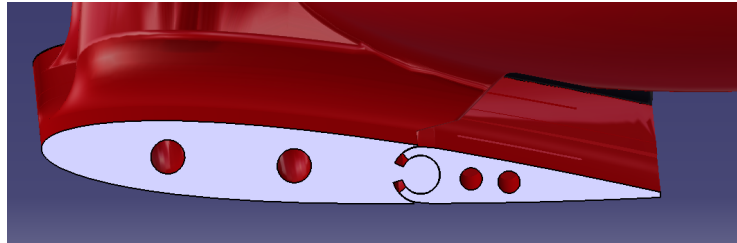
(c) Vingklaff i sitt maximalt nedfällda läge



(d) Vingklaff i sitt maximalt uppfällda läge

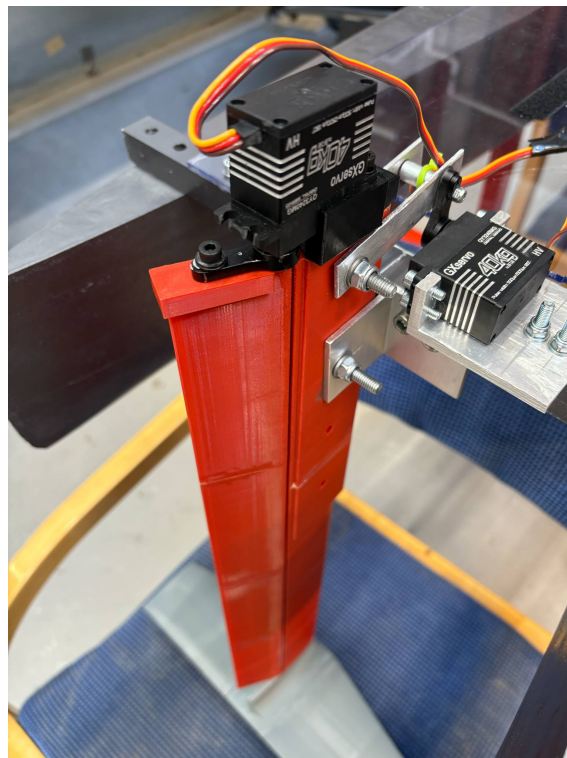
Figur 3.3: Överst: servo till tryckstång med och utan lock. Nederst: främre vingklaff i sina två ändlägen.

Vingens rotationskonstruktion liknar ett gångjärn, där vingklaffen roterar kring en fast rotationspunkt. Den halvcirkelformade utskärningen möjliggör denna rotation samtidigt som den fungerar som en mekanisk begränsning för vinkeländringen, se figur 3.4.



Figur 3.4: Snitt av den främre vingen

För att reglera farkostens girrörelse har en vingklaff integrerats på staget till den bakre vingen, liknande de klaffar som används på de främre vingarna. Se figur 3.5.



Figur 3.5: Vingklaff roder

På grund av den valda designen för den bakre vingen, där vingklaffen är placerad på staget, bedömdes det vara alltför komplext att även implementera en vingklaff direkt på vingen. Detta på grund av det begränsade utrymmet i staget, vilket medför att en tryckstång inte hade fått plats. Därför beslutades det att resten av staget

och vingen ska ha en stel konstruktion, där justeringar istället sker genom att hela enheten vinklas med en stagvinkeln. Se figur 3.5.

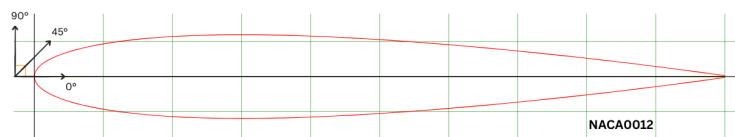
3.1.3 Vingprofil

I detta projekt har inga egna vingprofiler konstruerats. I stället har etablerade och väl dokumenterade vingprofiler använts, då omfattande tillgänglig data för dessa möjliggör effektiv jämförelse och utvärdering. För analys av aerodynamiska egenskaper och jämförelse mellan olika profiler har databasen Airfoilttools (Airfoil Tools, 2025) utnyttjats.

Arbetet inleddes med att utesluta vingprofiler som bedömdes vara olämpliga för användning i ett reglersystem. Asymmetriska profiler valdes bort, då dessa har hög känslighet för små förändringar i anfallsvinkeln, vilket resulterar i kraftiga variationer i både lyft- och motståndskraft. Denna egenskap gör asymmetriska profiler mindre lämpade för tillämpningar där stabil reglering av lyftkraft är avgörande.

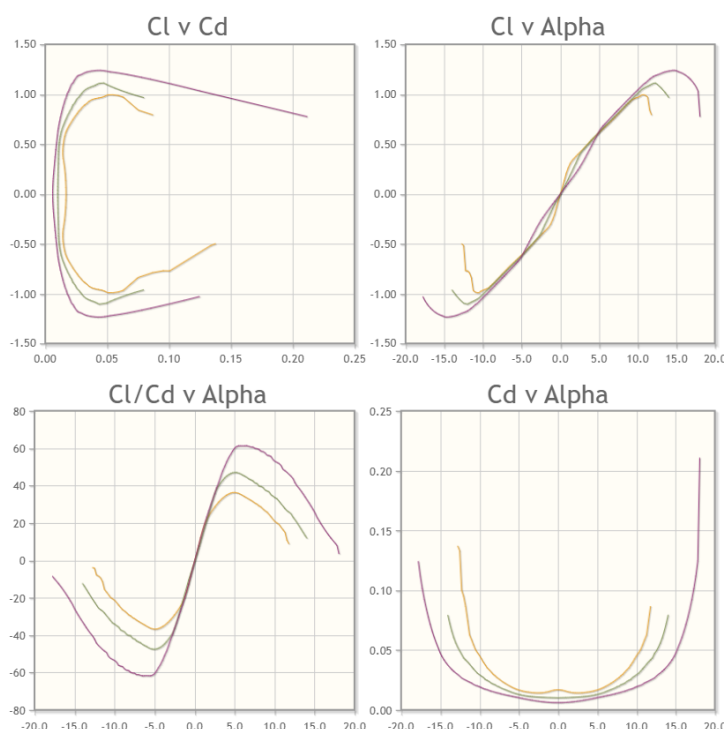
Den valda vingprofilen för projektet är NACA-0012. Den valdes främst på grund av sin symmetriska utformning, vilket medför linjära hydrodynamiska egenskaper vid variationer i anfallsvinkel. Detta innebär att lyftkraften förändras på ett förutsägbart och stabilt sätt, vilket underlättar reglering och styrning av modellen. Profilen genererar dessutom en gynnsam relation mellan lyftkrafts- och motståndskoefficienter inom det Reynolds-talsintervall som är relevant för detta projekt, vilket gör den väl anpassad för det aktuella tillämpningsområdet. En ytterligare fördel är dess enkla geometri, vilket förenklar tillverkningen genom 3D-printing.

NACA-0012 är en vingprofil som designats för flygfarkoster och är hämtad från databasen. Den har sin bredaste punkt vid 30% av kordalängden, där profilens bredd är 12% av kordalängden (Airfoil Tools, 2025).



Figur 3.6: Visualisering av vingprofil NACA-0012

Graferna i figur 3.7 visar hur lyftkoefficienten (C_L), motståndskoefficienten (C_D) och anfallsvinkeln (α) relaterar till varandra för vingprofilen NACA 0012. Dessa resultat gäller för ett Reynoldsintervall mellan 5×10^4 och 5×10^5 . Vid designhastigheten 3 m/s beräknas Reynoldstalet till 2.91×10^5 , enligt ekvation (2.4).



Figur 3.7: Lyft- och motståndskoefficienter för vingprofil NACA 0012 (Airfoil Tools, 2025).

Ett av de mest avgörande designvalen var att bestämma vingprofilens anfallsvinkel (α), det vill säga vinkeln mellan vingens kordalinje och horisontalplanet. Denna vinkel påverkar både lyft- och motståndskrafterna, och därmed även vingens effektivitet, uttryckt som förhållandet C_L/C_D .

Genom att analysera grafen över C_L/C_D som funktion av α framgår det att den mest effektiva anfallsvinkeln inom det aktuella Reynoldsintervallet ligger runt 5° . Med detta som utgångspunkt designades tre justerbara alternativ för anfallsvinkeln genom att anpassa infästningen av vingstagen. De möjliga anfallsvinklarna är 2° , 4° och 6° – alla nära den teoretiskt optimala vinkeln, men med flexibilitet för avvikelser i verkliga förhållanden.

För att ytterligare möjliggöra justering av lyftkraften implementerades en enkel vingklaff (*engelska plain flap*) på den främre vingen (se figur 2.3). Klaffen är en rörlig del av vingen som tillåter variation i den effektiva anfallsvinkeln. När vingklaffen befinner sig i sitt övre ändläge är den effektiva anfallsvinkeln -7.2° , och i det nedre ändläget är den $+10.0^\circ$.

En av huvudprinciperna i utformningen är att lyftkraften från vingarna ska övervinna tyngdkraften av båten så att skrovet lyfts upp ur vattnet. Båtens vikt är 10 kg, vilket motsvarar en tyngdkraft på 98.2 N. För att uppnå stabilitet har gruppen valt att all lyftkraft ska genereras av den främre vingen, medan den bakre fungerar som höjdroder (pitchreglering). Med hjälp av ekvation (2.1) beräknades lyftkraften för

anfallsvinklarna vilket illustreras i tabell (3.2)

Tabell 3.1: Dimensioner för fram- och bakvinge

	Bredd [mm]	Kordalinje [mm]
Framvinge	800	97.5
Bakvinge	300	97.5

Tabell 3.2: Beräknad lyftkraft vid olika anfallsvinklar och flapinställningar

Hastighet [m/s]	Anfallsvinkel [°]	Lyftkraft [N]		
		Flap neutral	Flap nedåt	Flap uppåt
3	2	70.44	337.43	-161.72
	4	140.88	407.87	-91.28
	6	211.32	478.31	-20.84
2	2	31.31	149.97	-71.88
	4	62.61	181.28	-40.57
	6	93.92	212.58	-9.26
1	2	7.83	37.49	-17.97
	4	15.65	45.32	-10.14
	6	23.48	53.15	-2.32

Tabell 3.2 redovisar den beräknade lyftkraften för olika kombinationer av anfallsvinkel, flapinställning och hastighet. Dessa beräkningar gjordes med hjälp av ekvationerna 2.1 och 2.2. Det framgår tydligt att båtens tyngd, som uppgår till 98,2 N, kan övervinnas i flera av de teoretiska fallen. Detta skapar en värdefull säkerhetsmarginal om det faktiska utfallet i praktiken skulle avvika negativt från den teoretiska modellen. Samtidigt möjliggör det en ökning av den totala vikten utan att lyftförmågan påverkas negativt.

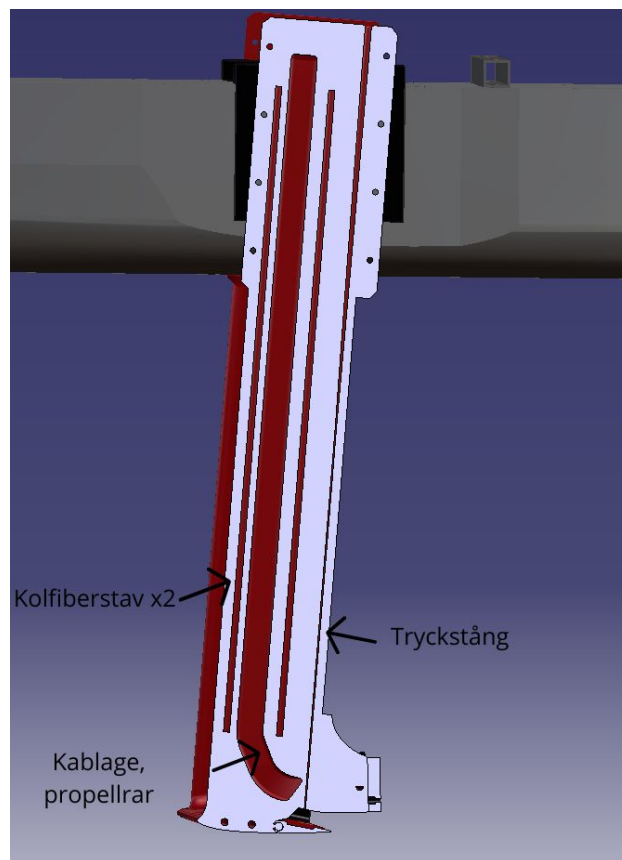
I praktiken är det dock inte fördelaktigt att använda alltför stora utslag i anfallsvinkel eller flap, då detta kan leda till ökat hydrodynamiskt motstånd och därmed bromsa båten. Vid hastigheten 3 m/s är farkosten mindre känslig för sådana variationer, vilket gör detta hastighetsintervall särskilt gynnsamt. Beräkningarna tyder dessutom på att farkosten har potential att bära ytterligare last, exempelvis i form av förstärkta skrov eller extra komponenter, utan att lyftegenskaperna försämras påtagligt.

3.1.4 Stag

Stagen har som primär funktion att sammanbinda vingarna med skrovet och bidrar därmed inte direkt till att generera lyftkraft. För att minimera deras hydrodynamiska motstånd har stagen utformats med samma vingprofil som bärplanen, det vill säga NACA 0012. För att minimera stagens bidrag till motståndskraft har de

dimensionerats till att vara 0,9 gånger så stora som vingen.

Utöver den strukturella kopplingen fyller stagen flera funktioner: de fungerar som kanal för kablage från propellerenheterna upp till skrovet, möjliggör överföring av rörelse via en tryckstång till vingarnas klaffsystem, samt bidrar till att stabilisera vingarnas position under drift. Figur 3.8 illustrerar utrymmet för de interna komponenterna som går genom det främre staget. Figur 3.8 åskådliggör även att tryckstångens utrymme är konformat upptill. Detta på grund av att servomotorn inte enbart förflyttar tryckstången vertikalt utan även också lite i sidled. Konformen är till för att minska friktionen mellan tryckstången och dess kanal.



Figur 3.8: Snitt av främre stag

Med hänsyn till de höga momentbelastningar som stagen utsätts för har två längsgående kolfiberstavar, med en diameter på 5mm, integrerats i konstruktionen för att förbättra stagets böjstyvhet och motverka deformation. Vingarna är, i likhet med stagen, förstärkta med genomgående kolfiberstavar, med en diameter på 3mm, som bidrar till ökad böjstyvhet och strukturell integritet. Dessa fungerar enligt samma princip som de kolfiberstavar som integrerats i skrovet. Kolfiberstavarna underlättar även linjeringen vid montering vilket är kritiskt med hänsyn till gångjärnet som vingklaffen roterar runt.

Det bakre staget är konstruerat annorlunda jämfört med de främre, då det även tjänar som styrmedel för att reglera båtens gir. Som tidigare nämnts har detta stag delats upp i två delar: en bärande stagstruktur och en rörlig vingklaff. Vingklaffen sträcker sig längs hela stagets längd för att möjliggöra girjustering oberoende av stagets höjd över vattenytan. Vingklaffen justeras via en servo som är fäst på toppen av den bärande stagstrukturen. Armen från servon är sedan direkt kopplad till vingen.

Ytterligare justeras anfallsvinkeln genom att rotera hela den bakre enheten. Det bakre staget är därför monterat kring en fast rotationspunkt och är dessutom kopplat till en rörlig komponent som styrs av en servomotor. För att öka stabiliteten omsluts staget av bockade aluminiumbeslag som fungerar som förstärkningselement. Konstruktionen illustreras i figur 3.9.



Figur 3.9: Bakre stag

3.1.5 Vinkeljärn

Stagen monteras på ett 3D-printat vinkeljärn, se figur ??, vilket i sin tur är fastskruvat i skrovet. Eftersom den valda vingprofilen är symmetrisk genererar den ingen lyftkraft vid neutral anfallsvinkel. Enligt docent Arash Eslamdoost (personlig kommunikation, 2024) är det dock fördelaktigt att ge vingen en initial attackvinkel på sex grader och därefter justera med hjälp av vingklaffarna. Med detta i åtanke utformades hålbilden i vinkeljärnen så att vingarna får en förinställd anfallsvinkel på just sex

grader vid montering. Detta ger även en fördel i form av att stagen är vinklade framåt vilket minskar risken för ventilation. För att undvika att propellrarna skapar en oönskad lyftkraftskomponent uppåt har dessa i sin tur monterats med en lutning på sex grader nedåt. När stagen väl är monterade på skrovet riktas propellrarnas kraft då horisontellt. För att förbättra passformen av vinkeljärnen har skrovet modifierats vid utskrivningen genom att en plan yta skapats där järnen ska fästas. Skulle det visa sig att en anfallsvinkel på sex grader är olämplig, antingen för hög eller för låg, möjliggör den modulära designen ett enkelt byte till andra vinkeljärn med justerad hålbild för att uppnå önskad vinkel. Även vinkeln på propellerns monteringsplatta kan justeras för att inte propellrarna ska bidra med en oönskat kraft i vertikalled vid ändring av stagvinkeln.

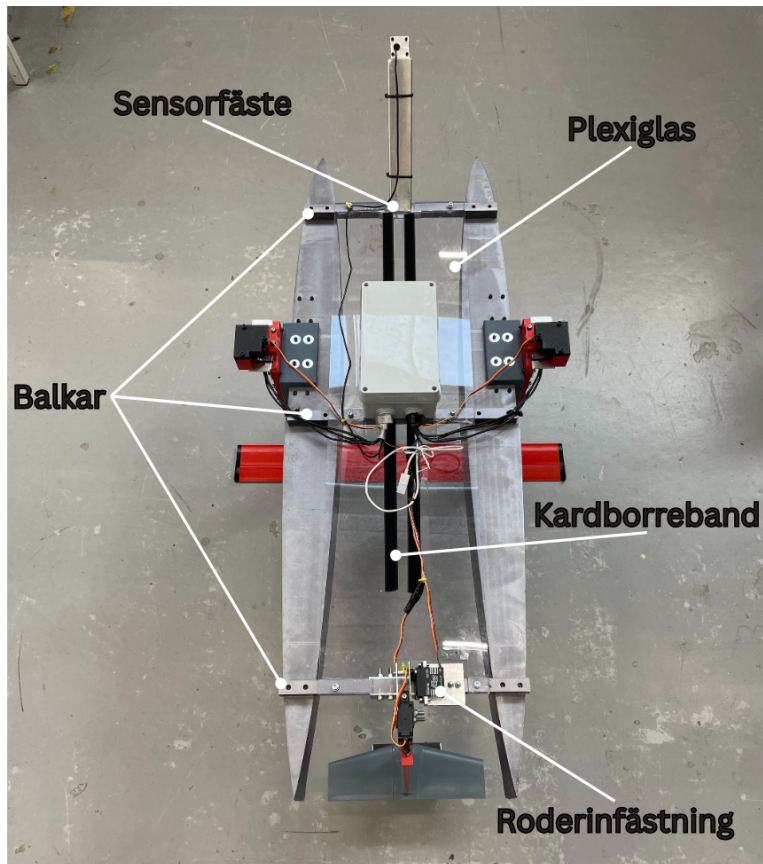
(LÄGG IN BILD PÅ VINKELJÄRNEN HÄR MED LABEL "vinkeljärn").

3.1.6 Överbyggnad

För att sammanfoga båtens olika komponenter såsom skrov, framvinge, roder, servon, sensorfäste och elektronik krävdes en gemensam bärande struktur. Denna överbyggnad behövde uppfylla flera centrala krav: den skulle vara robust, enkel att montera och demontera, ha låg vikt samt erbjuda goda möjligheter för infästning av ytterligare komponenter. En låg konstruktionshöjd prioriterades också eftersom det sänker farkostens tyngdpunkt och därmed förbättrar stabiliteten.

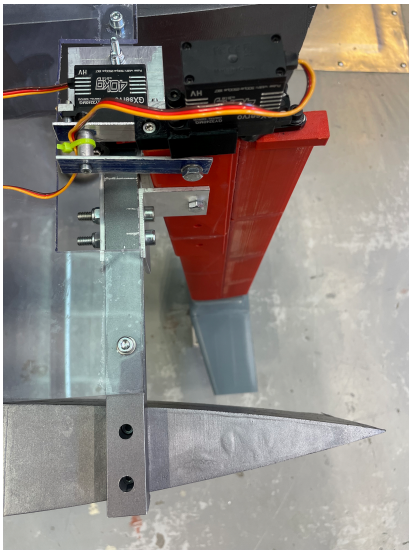
Som lösning valdes tre tvärgående balkar i aluminium som monterades mellan skroven. Antalet balkar valdes för att ge tillräcklig styvhet, begränsa vikten och samtidigt skapa bra ytor för infästning. Balkarna tillverkades av ihåliga fyrkantsprofiler eftersom dessa ger hög styvhet i förhållande till sin vikt och har fyra plana sidor som lämpar sig väl för montering. Aluminium användes som material på grund av dess låga vikt, höga hållfasthet och goda motståndskraft mot korrosion i kontakt med vatten.

För att underlätta montering av elektronik och dragning av kablar monterades en plexiglasskiva mellan skroven. På denna fästes två längsgående remsor med kardborreband vilket möjliggjorde flexibel placering av el-lådan och gjorde det enkelt att justera tyngdpunkten efter behov. En översiktlig illustration av överbyggnadens uppbyggnad och komponentplacering visas i figur 3.10.

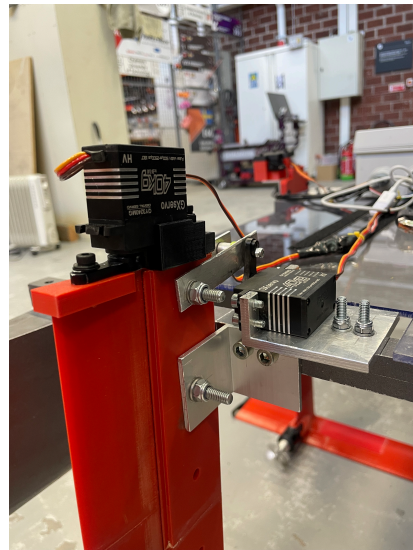


Figur 3.10: Illustration av komponenter till överbyggnad

Bilderna i figur 3.11 visar infästningen av balken mot skrovet samt hur roder och servo kopplas samman. Alla delar är fästa i den tvärgående balken, och skruvförband används för att säkra konstruktionen. Vänster och höger sida visas för att ge en komplett bild av lösningen.



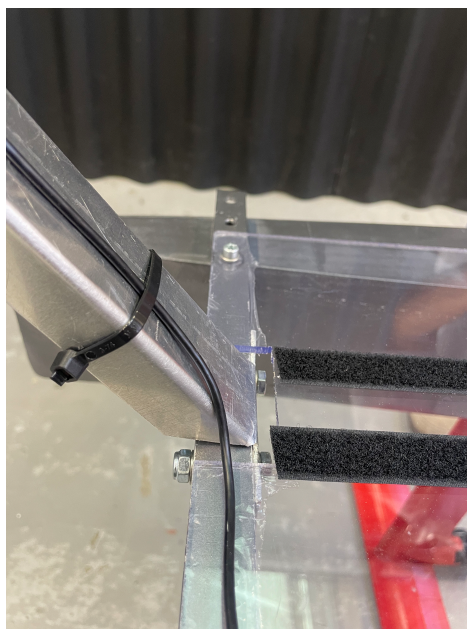
(a) Vänster sida



(b) Höger sida

Figur 3.11: Infästningar för roder, balk och servo på vänster (a) och höger (b) sida

En viktig komponent på överbyggnaden är höjdsensorn. För att den ska ge tillförlitliga mätvärden monterades den på en framåtriktad arm. Armen fästs i den tvärgående balken, som visas i figur 3.12.



Figur 3.12: Illustration av sensorinfästning framtill på överbyggnaden

3.2 Elektriskt system och reglering

I detta kapitel behandlas farkostens elektroniska system och dess reglering. Systemets uppbyggnad redogörs utifrån komponenternas funktion och samspel, med stöd av kopplingschema och komponentförteckning.

3.2.1 Reglersystemets övergripande design

För att möjliggöra en stabil och kontrollerad färd har ett reglersystem implementerats med syfte att styra både båtens framdrivning och vingegeometri i realtid. Regleringen utgör därmed en central del av systemdesignen, särskilt med hänsyn till den instabilitet som uppstår till följd av förändrade hydrodynamiska krafter vid foilande gång, vilket beskrivs i avsnitt 2.7.1 och 2.7.3.

För att möjliggöra realtidsstyrning bygger arkitekturen på återkoppling där sensor-data löpande samlas in och behandlas av en mikrokontroller, vilken i sin tur genererar styrsignaler till aktuatorerna. Denna struktur möjliggör snabb respons på förändrade förhållanden och minimerar reglerfel genom kontinuerlig justering av servons utslag och motorns varvtal. Den använda styrenheten i systemet är CUAV V5+, vilken är en öppen hårdvara designad för att agera som autopilot till drönare, miniatyrflygplan samt andra dylika farkoster. Denna valdes främst på grund av dess redan väl utvecklade system för flygfarkoster, vilket har likheter med bärplanfarkoster, vilket nämns under 2.2.1.

Som primär källa för navigationsdata används en GPS-modul med integrerad kompass och GNSS-mottagare. Denna modul tillhandahåller realtidsdata om båtens position, hastighet och orientering, vilket är avgörande för att upprätthålla stabilitet och kontroll under varierande förhållanden. Data från GPS-modulen används för att beräkna reglerfel enligt ekvation (2.13), varefter en PID-regulator (se avsnitt 2.7.1) appliceras för att bestämma lämplig styrsignal. Justeringen av anfallsvinkeln sker därmed automatiskt via servon kopplade till bärplanens fästen, medan hastigheten regleras genom modulation av motorns effekt via PWM-styrning, likt beskrivet i avsnitt 2.7.4. För att kunna reglera höjden över vattenytan har även en sonarsensor integrerats i systemet. Denna används för att mäta avståndet till vattenytan i realtid, och fungerar som återkoppling i höjdregeringen. Baserat på sonar-sensors mätvärden justeras vingarnas attackvinklar automatiskt, med målet att hålla en konstant, förutbestämd höjd under färd.

För att hantera olika styrvariabler individuellt används separata PID-regulatorer för höjd, rullning, stigning, gir och hastighet. Detta ger ökad flexibilitet och förbättrad prestanda jämfört med ett enkelreglerat system. De använda PID-parametrarna (K_p , K_i , K_d) designades för att kunna justeras empiriskt under testning av prototypen, med fokus på att uppnå så snabb och stabil respons som möjligt utan översväng eller oscillation.

Autopilotprogrammet *ArduPilot*, som är baserat på öppen källkod, användes för att

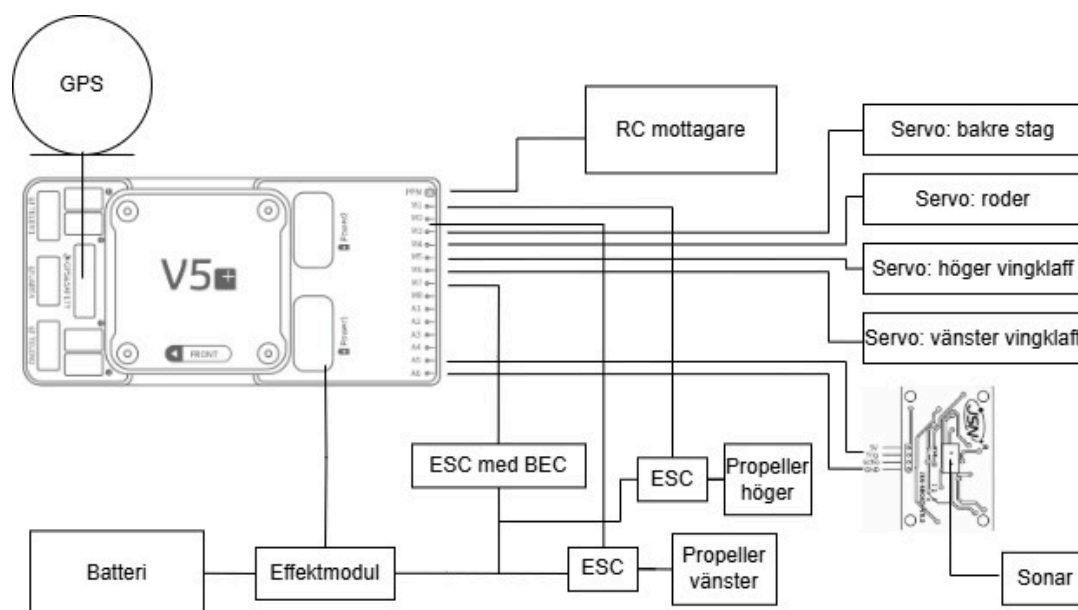
implementera styrlogiken i systemet. Mer specifikt användes versionen *ArduPlane*, som vanligtvis används för fasta vingar i flygapplikationer. Denna mjukvara valdes då den erbjuder färdiga reglerslingor för rullning, stigning och gir, vilket gör den väl lämpad även för att styra en foilandande båt med liknande dynamik i rotationsrörelser. I *ArduPlane* specificeras vilka komponenter som fungerar som roder och vingklaff, vilket i detta fall motsvarar de roterbara vingarna (bärplanen). Dessa kontrolleras via servomotorer, som justerar attackvinkeln på respektive vinge. Genom att mappa dessa funktioner till rätt kanaler i *ArduPilot* har reglering av båtens rörelser möjliggjorts.

Parametrisering och kalibrering av styrsystemet utfördes i *Mission Planner*, ett grafiskt gränssnitt för att implementera *ArduPilots* inställningar på styrenheten. Här har reglersystemets PID-parametrar, gränsvärden och servo-inställningar ställts in för att matcha båtens specifika dynamik.

Helheten utgör ett autonomt reglersystem där dynamisk kontroll av båtens färd-dynamik sker utan manuell inblandning. Detta är nödvändigt för att möjliggöra *foilandande* färd även i varierande ytillstånd och störningar från omgivningen.

3.2.2 Elektriska komponenter

I detta kapitel redogörs för de centrala elektriska komponenter som ingår i båtens reglersystem. Varje komponent beskrivs utifrån sin funktion, koppling till andra enheter, samt dess roll i det övergripande systemet. I figur 3.13 illustreras ett kopplingschema över hela reglersystemet, vilket ger en översiktlig bild av hur komponenterna är sammankopplade. En detaljerad förteckning över samtliga ingående komponenter återfinns i tabell 3.3.



Figur 3.13: Kopplingschema för båtens elektronik

Tabell 3.3: Komponentlista för det elektroniska systemet

Kategori	Komponent	Antal
<i>Styrsystem</i>		
Autopilot	Pixhawk CUAV V5+	1
RC-mottagare	Flysky FS-IA6B	1
<i>Kraftsystem</i>		
Batteri	Zee 6S LiPo, 22.2 V, 4000 mAh	1
Effektmodul	CUAV HV PM 60v 60A	1
ESC	HobbyWing XRotor PRO 50A	2
ESC med BEC	HobbyWing Platinum PRO V4 60A	1
<i>Sensorer</i>		
Avståndssensor	Seafront 5V Ultrasonic Distance Module	1
GPS	CUAV NEO V2 GNSS-system	1
<i>Drivsystem</i>		
Motorer	GroJos 24V Dual Motor 9kg Power	2
Servos	GXservo QY3240MG 40KG	4
<i>Övrigt</i>		
Kablage	Diverse anslutningskablar och kontakter	–
Inslutning	Grå kopplingslåda från Biltema	1
Platta	Guldig 3D-printad iläggsplatta till kopplingslåda	1

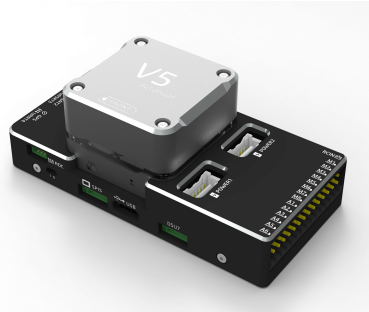
Förkortningar som förekommer i figur 3.13 och i tabell 3.3 innefattar bland annat **ESC** (*Electronic Speed Controller*), en elektronisk hastighetsregulator som styr en elmotors varvtal via en styrsignal; **BEC** (*Battery Eliminator Circuit*), en krets som omvandlar högre spänning till en lägre och stabil nivå för känslig elektronik; samt **RC-mottagare**, en radiosignalsmottagare som vidarebefordrar kommandon från en fjärrkontroll till systemets styrenhet.

Systemets elektriska uppbyggnad består som kan ses ovan av flera olika komponenter som samverkar i båtens reglersystem. Nedan följer en detaljerad beskrivning av dessa komponenter och kategorier, där varje komponent redovisas utifrån funktion och tekniska specifikationer.

3.2.2.1 Styrenhet

Systemets centrala styrenhet är *Pixhawk CUAV V5+*, se figur 3.14. Detta är en avancerad autopilot som hanterar all sensorinläsning, beslutslogik och utgångssignaler till servon och motorregulatorer. Den är baserad på STM32H7-arkitekturen och erbjuder flera CAN- och UART-portar, vilket möjliggör flexibel integration av externa moduler. Dess inbyggda IMU (Inertial Measurement Unit) innehåller ac-

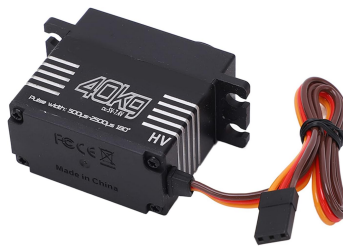
celerometrar, gyroskop och magnetometrar som ger realtidsdata för positions- och rörelse reglering. Flight controllern kommunicerar även med GPS och RC-mottagare samt genererar pulsbreddsmodulerings-signaler till ESC:er och servon.



Figur 3.14: Pixhawk CUAV V5+

3.2.2.2 Servos

Fyra servos av typen *GXservo QY3240MG*, se figur 3.15 används för att reglera rörliga mekaniska delar såsom roder, stag och vingklaffar. Dessa servos är vattentäta och specificerade för ett vridmoment på upp till 40 kg·cm vid 7.4 V, vilket ger god marginal för projektet. De kontrolleras via PWM-sigalner från styrenheten och får även ström från den.



Figur 3.15: GXservo QY3240MG

3.2.2.3 ESC

Två stycken *HobbyWing XRotor PRO 50A*, se figur 3.16 används för att reglera kraften till båtens två motorer. ESC:na konverterar PWM-sigalner från styrenheten till justerad likström till motorerna, och möjliggör exakt reglering av hastighet och riktning. En tredje ESC, en *HobbyWing Platinum PRO V4 60A*, se figur 3.17 har en integrerad BEC-funktion och levererar 5 V till systemets lågspänningskomponenter via styrenheten. Denna ESC är i sig inte kopplad till någon motor utan nyttjas enbart för BEC-funktionen. Alla ESC:er är utav märket HobbyWing.



Figur 3.16: HobbyWing XRotor PRO 50A



Figur 3.17: HobbyWing Platinum PRO V4 60A

3.2.2.4 Motorer

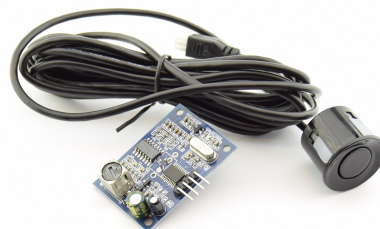
Framdrivningen sker med hjälp av två borstade *GroJos 24V Dual Thrust*-motorer som tillsammans genererar en kraft på 9 kg. Dessa motorer är konstruerade för dubbelriktad drift (framåt och bakåt) och har propellrar monterade. Genom ESC:na har de omprogramerats till enbart framåt drift då farkosten inte kan gå på bärplan baklänges. Motorerna är vattentäta och monterade med kapslade drivaxlar för marin användning. Motorerna styrs via ESC:erna och får sin kraft från huvudbatteriet via effektmodulen. Motorerna syns i flertalet tidigare figurer, t.ex. figur 3.1 och figur 3.3c.

3.2.2.5 Sensorer

Två externa sensorer används: en GPS-modul (*CUAV NEO V2 GNSS*, figur 3.18) och en ultraljudssensor (*Seafront 5V Ultrasonic Distance Module*, figur 3.19). GPS:en möjliggör exakt positionsbestämning via GNSS-system (bl.a. GPS, GLONASS), och integrerar även en kompass för riktningdata. Den är direkt kopplad till styrenheten. Ultraljudssensorn används för avståndsmätning till ytor (exempelvis vattenytan eller hinder) och är försedd med en vattentålig sond. Mätdata kan användas för exempelvis höjdstyrning eller autonom navigering. Sensorn är kopplad till styrenheten via ett styrbräde som medföljer sensorn vid inköp.



Figur 3.18: CUAV NEO V2



Figur 3.19: Seafront 5V Ultrasonic

3.2.2.6 Strömförsörjning

Ett *Zeee 6S LiPo-batteri* (22.2 V, 4000 mAh), figur 3.20 utgör huvudsaklig kraftkälla. Energin distribueras genom effektmodulen, en *CUAV HV PM 60v 60A* (Figur 3.21) som agerar som strömövervakare och kan kopplas till styrenheten för telemetri. ESC:er och styrenheten får sin spänning direkt via denna fördelning, med lågspänningskomponenter försörjda genom styrenheten.



Figur 3.20: Zeee 6S LiPo, 22.2 V



Figur 3.21: CUAV HV PM 60v 60A

3.2.2.7 RC-mottagare

Systemet kontrolleras trådlöst via en *Flysky FS-IA6B RC-mottagare*, se figur 3.22, som tar emot styr signaler från en kompatibel fjärrkontroll. Mottagaren är bunden till styrheten via en standard PPM/IBUS-anslutning. Den möjliggör manuell styrning av farkostens alla servos samt hastighetsreglering och gir.



Figur 3.22: Flysky FS-IA6B RC-mottagare

3.2.2.8 Inslutning

För att skydda systemets elektronik mot vattenstänk placerades styrsystemet i en vattentät kopplingslåda från Biltema. Inuti lådan monterades en specialdesignad, 3D-printad platta med urtag för batteriet, Pixhawk-enheten, RC-mottagaren samt för kabelgenomföringar (se figur 3.23). Plattan tjänade flera syften: dels säkerställdes att Pixhawk låg horisontellt för att garantera korrekt IMU-kalibrering, dels möjliggjordes en mer strukturerad kabeldragning, där delar av kablagen kunde döljas under plattan. Utöver detta användes ett flertal kablar, kontakter, krympslangar och anslutningar för att skapa kompatibla och vattentäta elektriska förbindelser mellan komponenterna.



Figur 3.23: Biltema kopplingslåda med plattan och vissa komponenter installerade.

3.2.3 Mjukvarukonfiguration

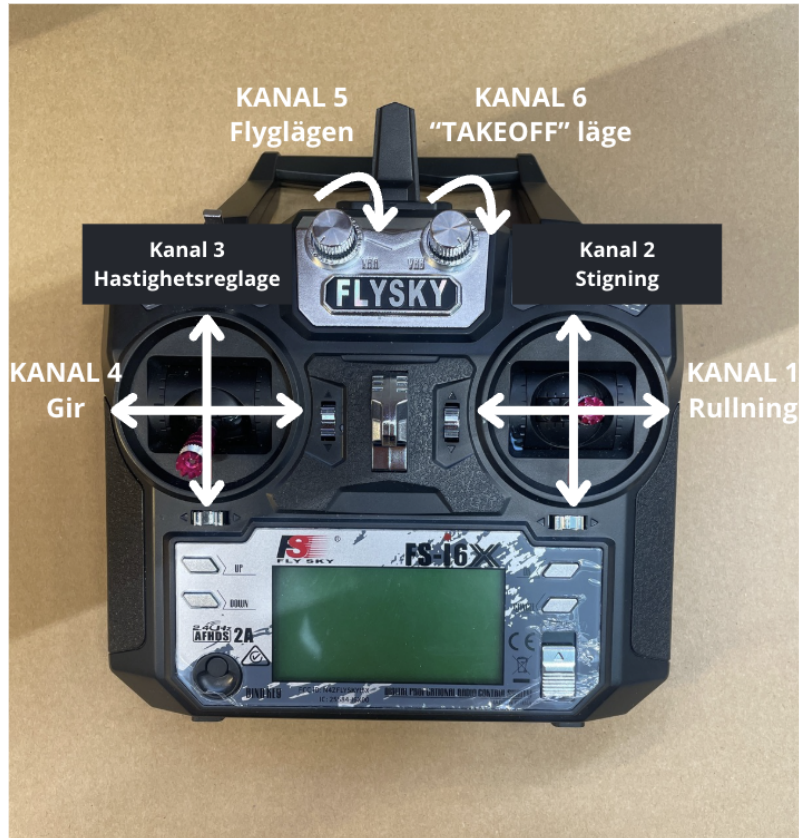
Detta avsnitt redogör för hur systemets mjukvara konfigurerats för att möjliggöra reglering av båtens höjd, stabilitet och framdrift samt inkoppling av sensor. Konfigurationen utfördes i huvudsak i det öppen-källkod-baserade systemet *ArduPilot*, med hjälp av konfigurationsprogrammet *Mission Planner*.

I *Mission Planner* kan man ladda upp förinställda varianter av fast programvara anpassade för olika typer av farkoster, såsom multirotorer, helikoptrar och flygplan. I detta projekt valdes fast programvara för fastvingade flygplan (*ArduPlane*). Efter att den fasta programvaran laddats upp till styrenheten (Pixhawk) möjliggjordes ett antal viktiga konfigurationssteg i *Mission Planner*, såsom kalibrering av sensorer, inställning av radio och kompass, samt tilldelning av funktioner till specifika utgångsportar och i vilken riktning de ska jobba. Den grundläggande uppsättningen för servofördelning presenteras i tabell 3.4. Detta kan även jämföras med kopplingschemat i figur 3.13.

Tabell 3.4: Översikt över servokopplingar till Pixhawk

Pixhawk-port	Ansluten komponent	Inställning	Inverterad
RC1	Rc-mottagare	-	-
M1	Höger Motor	ThrottleRight	-
M2	Vänster Motor	ThrottleLeft	-
M3	Roder	RCIN4Scaled	Ja
M4	Stag bak	Elevator	-
M5	Höger vingklaff	Aileron	Ja
M6	Vänster vingklaff	Aileron	Ja
M7	ESC med BEC	Throttle	-
A5	Sonar ut	GPIO	-
A6	Sonar in	GPIO	-

Samtliga aktuatorer har kontrollerats via RC-kontrollen enligt de angivna kanalerna i figur 3.24. Förtydligande om vilka portar i Pixhawken som kontrollerats av vilka kanaler har sammanställts i tabell 3.5.



Figur 3.24: Biltema kopplingslåda med plattan och vissa komponenter installerade.

Tabell 3.5: Koppling mellan Pixhawk-portar och RC-kontrollens kanaler

Pixhawk-port	RC-kanal
M1	3
M2	3
M3	4
M4	2
M5	1
M6	1
M7	-
A5	-
A6	-

För att ansluta och aktivera sensorer krävdes ytterligare inställningar via *Full Parameter List* i *Mission Planner*. Denna lista innehåller ett stort antal parametrar

som styr både hårdvarukopplingar och beteenden i olika flyglägen. Under projektet användes framför allt flyglägena FBWA (*Fly-By-Wire-A*) och Manuell, medan även tester genomfördes i FBWB (*Fly-By-Wire-B*). En fullständig dokumentation över genomförda inställningar återfinns i bilaga A. En kortare förklaring av de flyglägen som användes visas i tabell 3.6.

Tabell 3.6: Översikt av använda flyglägen i ArduPlane

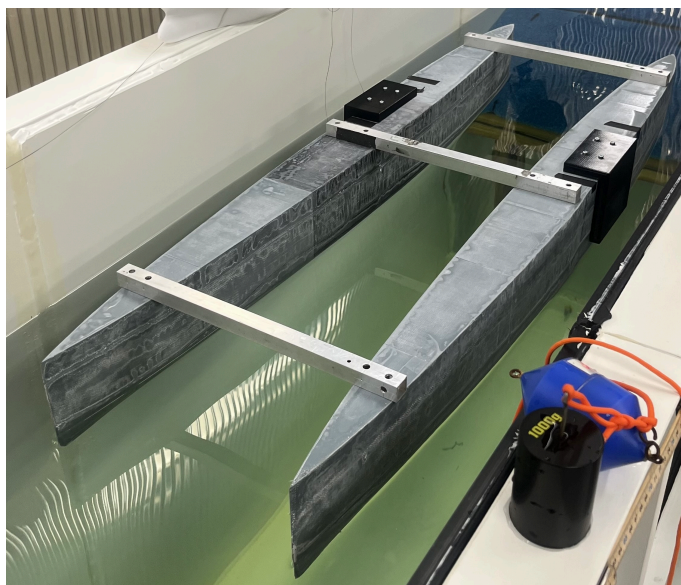
Flygläge	Beskrivning
<i>Manual</i>	Fullt manuell styrning utan någon stabilisering från autopiloten.
FBWA	Autopiloten stabiliserar roll och pitch, men höjd och fart styrs av piloten.
FBWB	Autopiloten håller både höjd och fart automatiskt, piloten styr riktning. Önskad höjd och hastighet kan ändras efter begäran från förare.
<i>AUTOTUNE</i>	Lär sig rätt PID-värden baserat på hur piloten flyger planet.
<i>TAKEOFF</i>	Helautomatisk startsekvens som styr gas och pitch för att lyfta.

4 Tester

Genomförandet av tester så tidigt som möjligt har varit en central del av projektets utvecklingsprocess. Det är först vid dessa tester som systemdesignen kan valideras. Tester tidigt in i projektet möjliggör identifiering av brister och tillåter justeringar innan designen etableras och vidareutveckling begränsas. De två fälttesterna fungerade därför inte bara som en validering av systemets funktionalitet, utan också som ett verktyg för iterativ förbättring.

4.1 Test av flytkraft och sensor

Det första testet genomfördes den 22 april i vågtanken vid Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper, belägen i källaren på Maskinhuset. Testet bestod av två delar. Inledningsvis placerades de två sammanfogade skroven i vågtanken, vilket illustreras i figur 4.1. Notera att stag med bärplan inte är med i detta test då enbart skrovets dynamik undersöktes.



Figur 4.1: Båtens skrov placerade i vågtanken.

I den första delen av testet utvärderades skrovets flytförmåga genom att successivt belasta det med vikter. För att uppskatta lastkapaciteten observerades dess djupgående i två fall: dels obelastat, dels lastat med vikter upp till 8 kg, motsvarande en uppskattad maximal totalvikt för överbyggnad, stag och bärplan.

Djupgående uppmättes genom visuell avläsning mot linjaler fastsatta vertikalt på insidan av tankens glasvägg. Eftersom båten befann sig flera decimeter innanför glaset där linjalerna satt, uppstod ett parallaxfel i mätningen: skrovets vertikala position i bilden avvek från dess verkliga position sett i sidled, vilket ledde till en systematisk

underskattning av djupet.

Genom att använda en enkel skalningsmetod, korrigerades detta fel enligt följande. En känd referenslängd på båten, skrovets totala höjd på 14 cm, användes som kalibreringsfaktor mot den visuellt totalt uppmätta höjden i vardera fall. En skalningsfaktor k kunde därmed beräknas enligt

$$k = \frac{\text{Verklig Referenshöjd}}{\text{Uppmätt Referenshöjd}} \quad (4.1)$$

Samtliga observerade djupgåendevärden multiplicerades med faktorn k för att ge en korrigerad uppskattning av verkligt djupgående.

Den andra delen av testet fokuserade på sensorns funktion. Sensorn hängdes fast inspänd ovanför vågtanken. Den kopplades därefter till en Pixhawk-enhet, som i sin tur anslöts till en bärbar dator via programvaran *Mission Planner*. Genom detta system kunde loggfiler med sensordata extraheras. För att generera varierande mätvärden genomfördes en sekvens bestående av två omgångar med mindre vågor, följt av en omgång med större vågor. Utifrån visuell observation av vågorna, antecknades amplitud samt period för båda typerna av vågor. I figur ?? visas vågornas puls samt hur amplitud och frekvens räknats ut med hjälp av linjal samt tidtagning av våglängder via mobilkamera.

4.2 Fälttester

Det första fälttestet genomfördes i Stensjön, Mölndal, den 29:e april 2025. Förutsättningarna var goda med sol, vindstill och mindre vågor. Till testet medtogs en verktygslåda för att möjliggöra eventuella justeringar samt en SUP-bräda. Höjdreglering med hjälp av sonar var inte inkopplad, (kanske lite vidareutveckling på varför det inte va så.)

Det andra fälttestet genomfördes även det i Stensjön, Mölndal, den 5:e maj 2025. Förutsättningarna var liknande som vid det första testet, om något mer blåsig. Till testet medtogs en verktygslåda samt en SUP-bräda.

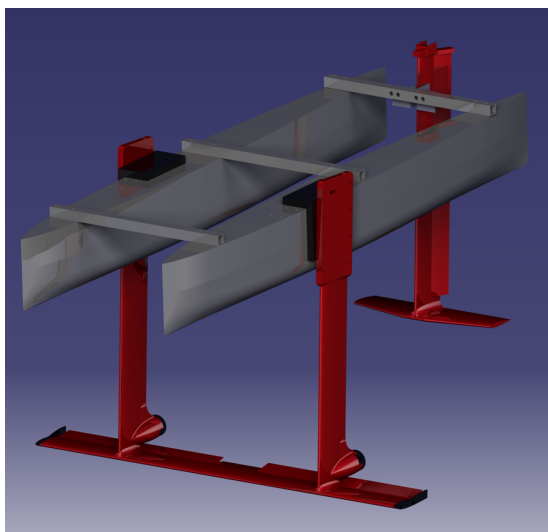
5 Resultat

5.1 Slutgiltig konstruktion

Två figurer presenteras nedan, 5.1 samt 5.2. Den vänstra visar en renderad bild av konstruktionen i CAD, medan den högra illustrerar den färdigställda fysiska modellen. Den färdiga konstruktionen inkluderar samtliga komponenter som återfinns i CAD-modellen. Skillnaden mellan de två bilderna ligger i omfattningen av de komponenter som representeras.

CAD-renderingen är begränsad till komponenter som konstruerats av projektgruppen, vilket omfattar den främre vingkonstruktionen, skroven, roderenheten inklusive dess delkomponenter, vinkeljärnen till framvingarna samt överbyggnaden. De komponenter som saknas i renderingen – såsom elektriska system, plexiglasskiva ovanpå överbyggnaden, servofästen på framstagen, propellrar samt fäste för höjdsensor – har inte modellerats i CAD. Orsaken till detta är att dessa delar antingen saknade tillgängliga CAD-resurser eller bedömdes som irrelevanta att återskapa i detalj, då detta inte bidrog till projektets konstruktiva eller analytiska syfte.

Den totala vikten av den färdigställda konstruktionen, inklusive samtliga komponenter, uppmättes till 10,2 kg, vilket var i linje med vad som används för beräkningar.



Figur 5.1: CAD-rendering av konstruktionen



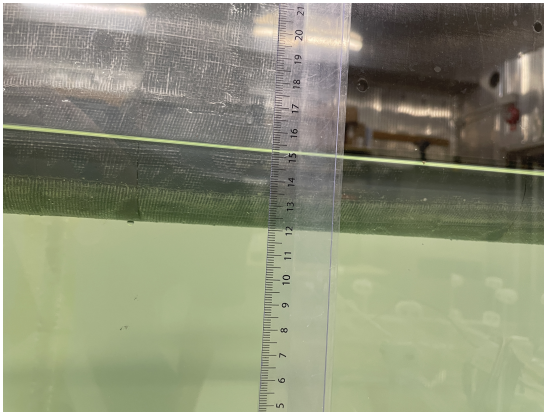
Figur 5.2: Verklig modell av konstruktionen

5.2 Resultat av tester

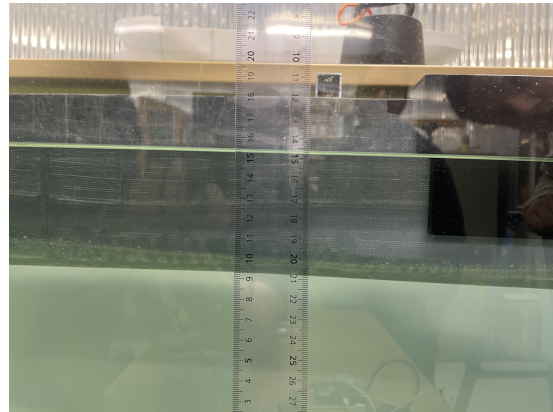
Nedan presenteras resultatet av de tester som beskrivs i kapitel 4.

5.2.1 Resultat av flyt- och sensortest

I del ett av testet, där båten lastades för att undersöka flytkraften togs uppmätta referenshöjden fram. I figur 5.3 och 5.4 visas totalt uppmätta höjden av skrovet, vilket uppgick till 9 respektive 10 cm. Dessa värden användes i 4.1.



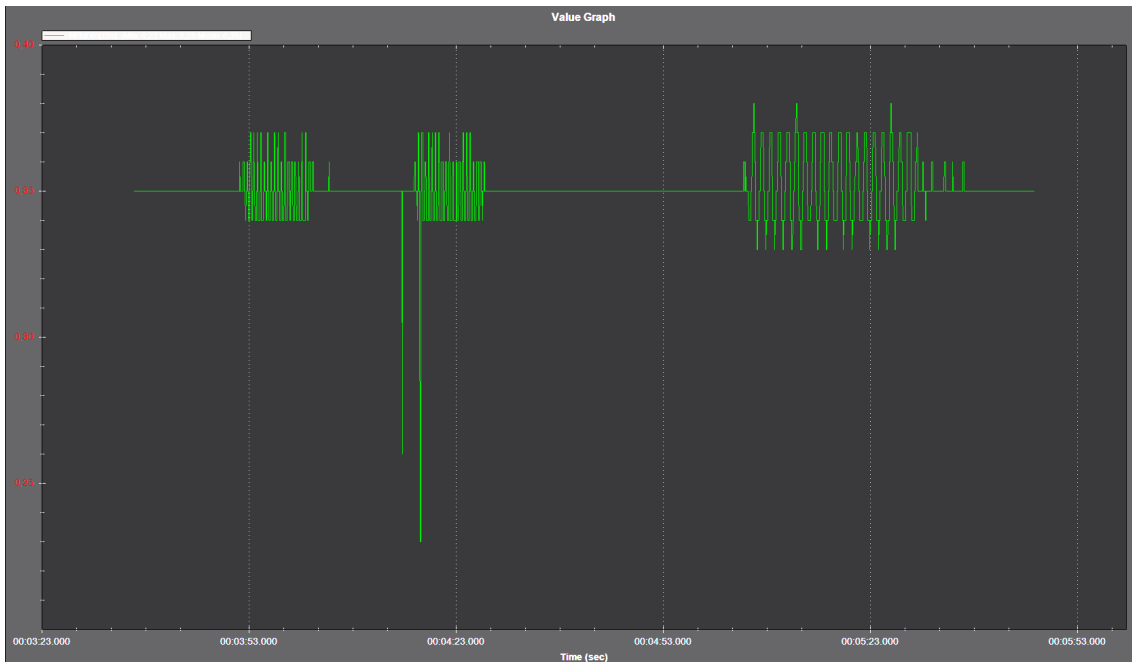
Figur 5.3: Visuell mätning av djupgående av obelastat skrov



Figur 5.4: Visuell mätning av djupgående av fullt belastat skrov

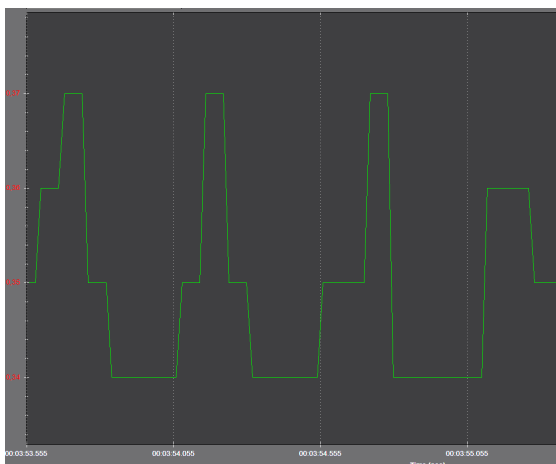
Efter korrigerig enligt ekvation 4.1 resulterade det obelastade skrovet i ett djupgående på 4.5 cm, medan det fullt lastade skrovet genererade ett djupgående på 9.5 cm. Trots osäkerheter i mätmetoden bedöms resultaten vara tillräckligt tillförlitliga för att analysera skrovets bärförmåga i relation till aktuell last.

I den andra delen av testet, där sensorn utvärderades, extraherades en loggfil från *Mission Planner*. Denna logg innehåller bland annat mätdata från sensorn. Nedan presenteras resultaten från den sekvens som beskrivs i kapitel 4.1. Den fullständiga loggen från sensorn för hela testförloppet återges i figur 5.5.

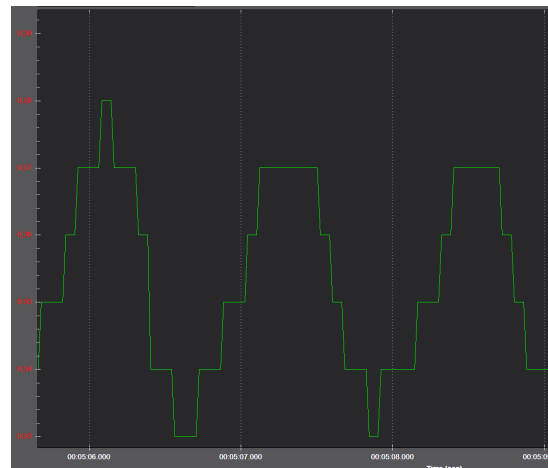


Figur 5.5: Hela logen från sekvensen för sensorns värden.

Mission Planners verktyg för att generera grafer tillåter inga manuella justeringar, utan alla grafer skapas automatiskt. Som en konsekvens av detta renderades sonarns grafer i grön färg, vilket ger låg kontrast mot den svarta bakgrunden och försvårar avläsningen. Ett försök gjordes att extrahera värdena från filen med hjälp av Python, men då filen är binärt kodad misslyckades detta. Det går tydligt att se läsningarna med lägre vågor samt den med högre. Det går även att notera en plötslig dipp i grafen där mätvärdet sjunker till 0,24 m samt en lite mindre dipp strax innan.

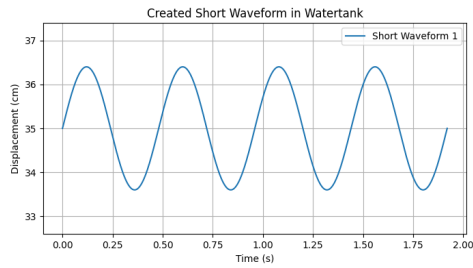


Figur 5.6: Inzoomning på första låga vågen.

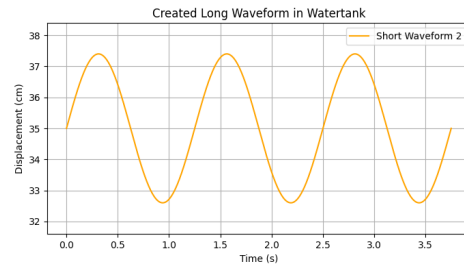


Figur 5.7: Inzoomning på höga vågen.

5. Resultat



Figur 5.8: Genererad sinusvåg baserad på visuellt estimerad amplitud och period från test i vågtank. Denna våg motsvarar den sensoravlästa signalen i figur 5.6.



Figur 5.9: Genererad sinusvåg baserad på visuellt estimerad amplitud och period från test i vågtank. Denna våg motsvarar den sensoravlästa signalen i figur 5.7.

I figurerna 5.6 och 5.7 visas inzoomningar av graferna för respektive omgång med låg och hög vågintensitet. I figur 5.8 och 5.9, genererade av Python-koden i bilaga C.1, framgår det tydligt att vågorna har en i huvudsak sinusformad karaktär. Graferna i figur 5.6 och 5.7 uppvisar dock en mer kantig och hackig profil, där kurvorna approximativt följer en sinusformad kurva men i ett trappstegsliknande mönster.

5.2.2 Resultat av fälttest 1

Vid första fälttestet kördes båten med inställning FBWA med avsikten att det skulle stabilisera båten och underlätta den manuella körningen.

Båten låg med väl fördelad tyngdpunkt vid första sjösättning, se figur 5.10. Som tidigare nämnts var den initiala anfallsvinkeln inställd på sex grader. Vinkeljärn med alternativa hålbilder för andra anfallsvinklar hade vid detta tillfälle ännu inte 3D-printats. När båten väl kördes märktes det tidigt att det inte krävdes hög hastighet för att båten skulle börja stegra. Detta berodde på att de främre vingarna genererade för mycket lyftkraft naturligt, det vill säga utan att anfallsvinkeln ökats med hjälp av vingklaffarna. Samtidigt gav den aktere vingen inte tillräckligt mycket lyft i förhållande till den främre vingen.



Figur 5.10: Sjösättning av båten

Åtgärden som gjordes då var att vingklaffarna drogs upp i syfte att genererade maximal nedkraft när servomotorerna befann sig i sitt neutrala läge. Detta tillsammans med att stenar, med en uppskattad vikt på ett kilo, tejpades fast med silvertejp centralt i fören för att ytterligare kontra den kraftiga lyftkraften från den främre vingen. Efter dessa modifikationer var båten synligt framtung stillaliggande i vattnet men vid ökad hastighet planade den gradvis ut. Se figur 5.11 för provisorisk lösning för att sänka fören.



Figur 5.11: Tillfällig lösning för att justera positionen av tyngdpunkten

5.2.2.1 Körbeteende och upplevelser under fälttest 1

Vid inledande körning observerades att båten snabbt stegrade vid gaspådrag, vilket resulterade i att den tappade lyftkraft och sjönk tillbaka till vattenytan, likt i figur

5.12. Ett jämnt och kontrollerat gaspådrag visade sig vara svårt att uppnå, vilket försvårade en stabil övergång till bärplansläge. Efter att tyngdpunkten justerats genom placering av en vikt framtill (en sten), förändrades körbeteendet. Uppgången på bärplan skedde då långsammare och med en mer gradvis stegring, vilket förbättrade stabiliteten under acceleration. Trots detta kvarstod ett betydande lyftmoment över framvingen, vilket fortsatte att generera en tendens till överdriven stegring.



Figur 5.12: Stegning som resulterade i tappad lyftkraft

För att motverka detta testades manuell justering av rodrets anfallsvinkel. Detta möjliggjorde att båten kunde upprätthålla ett flygande läge under längre perioder. Dock krävdes kontinuerlig manuell korrigerande av attackvinkeln för att undvika oönskad stegring, vilket indikerar en brist på automatisk höjdstabilisering. Under svängar noterades ytterligare instabilitet: båten tenderade att tappa rullstabilitet och samtidigt stegra, vilket försvårade styrningen.

Efter att framvingens vingklaff låstes i sitt översta läge förlorades förmågan att kontrollera rullning. Detta medförde en märkbar ökning av instabilitet i sidled, särskilt i samband med svängmanövrar.

Efter de nämnda modifikationerna lyckades båten upprepade gånger lyfta över vattenytan i drygt 10 sekunder. Däremot krävdes det skicklig manuell styrning av föraren. Figur 5.13 visar båten i flygande läge från fälttest 1. Fälttest 1 fick avbrytas på grund av att hastighetsregulatorn som användes gick sönder under körning. Felet medförde att motorerna betedde sig oförutsägbart.



Figur 5.13: Båten i flygande läge från fälttest 1

5.2.3 Resultat av fälttest 2

Inför det andra fälttestet justerades reglersystemet. Den befintliga gemensamma hastighetsregulatorn som användes till båda propellrarna byttes ut till två hastighetsregulatorer. Till följd av detta implementerades även en sorts differentialframdrivning vid gir. Detta ledde till att de två propellrarna hade olika effekt i svängar. Ett ytterligare flygläge infördes även, nämligen *AUTOTUNE*, som användes för att automatiskt justera värdena för den proportionella, integrerande och deriverande verkan för samtliga rotationsaxlar. Den initiala anfallsvinkeln var även nedsatt från sex grader till fyra grader. De silvertejpade stenarna byttes ut mot vikter i en låda som fästes med kardborre på plexiglasen.

Resultatet var att båten flög över vattenytan där föraren enbart justerade hastigheten av propellern. Detta gjorde den tills föraren själv valde att stanna. Se figur 5.14 för stabil flygande färd av båten. Vid för högt hastighetspådrag av föraren lyfte båten tills att den tappade lyftkraft och därefter föll skrovet till vattenytan.



Figur 5.14: Båten i stabilt flygande läge från fälttest 2

5.2.3.1 Körbeteende och upplevelser under fälttest 2

Vid inledande körning i *AUTOTUNE*-läge uppvisade båten viss instabilitet, men propellrarnas respons var tydligt förbättrad jämfört med tidigare test. Rörelser från RC-kontrollen följdes snabbt och precist. Under denna fas krävdes manuell justering av anfallsvinkeln för att systemet skulle lära sig båtens beteende vid gir och acceleration. Efter att *FBWA*-läge aktiverats uppnåddes omedelbar stabilitet, med god höjdhållning genom justering av gaspådraget. Rullstabiliteten var hög, och båten upplevdes lättstyrd i rak körning. Större girar hanterades väl, medan snabba svängar fortfarande kunde orsaka stegring och tappad lyftkraft. Överlag upplevdes båten som mycket stabil och lätthanterlig i samtliga moment.

6 Diskussion

Följande kapitel syftar till att analysera och tolka resultaten från genomförda experimentella försök i relation till studiens syfte, forskningsfrågor samt tidigare relevant forskning. Därtill behandlas identifierade begränsningar och osäkerhetsfaktorer, liksom etiska överväganden som aktualiserats under arbetets gång. Kapitlet inkluderar även förslag på framtida utveckling grundade i de erfarenheter och insikter som genererats.

6.1 Tolkning av resultat

Efter genomförandet av ett vågtankstest samt två fälttester analyseras i detta avsnitt hur resultaten från dessa försök kan tolkas, med särskilt fokus på farkostens dynamiska egenskaper och systemets reglerprestanda. Syftet är att identifiera både styrkor och brister i den nuvarande prototypens utformning och styrsystem.

Vågtankstestet genomfördes i syfte att verifiera både skrovets bärighet under last och sensors förmåga att mäta vattenytans variation. Testet visade att det framtagna skrovet klarade den planerade belastningen. När farkosten lastades till sin maximala vikt bibehölls en god flytnivå utan tecken på överdriven nedsjunkning eller instabilitet, vilket bekräftar att skrovets volym och formgivning var tillräckliga för att hantera de krafter som förväntades under drift.

Under testet utvärderades även höjdsensors funktionalitet. Sensoravläsningarna visade en tydlig sinusformad respons som följde vågtankens genererade vågrörelse. Det noterades dock att sensors toppar och dalar ibland avvek något från den faktiska vågformen, med överdrivna amplituder. Dessa avvikelser kan sannolikt förklaras av störningar i mätsignalen samt att sensorn har en upplösning om hela centimeter, vilket även resulterade i en kantig mätkurva snarare än en helt jämn sinusform. I det aktuella tillämpningsområdet bedöms dock denna begränsning som försumbart, då den övergripande variationsbilden fortfarande fångas på ett tillfredsställande sätt. Det bör även noteras att graferna i figur 5.8 och 5.9 endast utgör en uppskattad visualisering baserad på antagen våglängd och amplitud, och speglar därför inte exakt den verkliga vågformen. I verkligheten gav vågorna även upphov till vissa störningar som resulterade i mindre avvikelser av vågtoppar, vågdalar, samt våglängd. Detta kan varit en medverkande faktor till varför även sensorn gav upphov till mindre avvikelser i dess vågtoppar och vågdalar.

Sammanfattningsvis kan vågtankstestet betraktas som lyckat. Både skrov och sensor uppvisade önskad funktion. Sensors tydliga avläsning av vattenytan, som initialt var en osäkerhetsfaktor, bekräftades fungera i praktiken. Resultatet stärkte tilltron till att sensorn kunde användas för tillförlitlig höjddata under verkliga förhållanden.

Under det första fälttestet noterades att farkosten uppvisade en tydlig tendens att stegra i samband med övergången till foiland läge. Denna instabilitet bedömdes vara ett resultat av en oproportionerligt hög lyftkraft genererad av den främre vingen

i förhållande till den bakre, vilket resulterade i en obalanserad lyftfördelning. En bidragande orsak till detta bedömdes vara att anfallsvinkeln hos den främre vingen var för stor i förhållande till farkostens tyngdpunkt. Utöver detta uppvisade farkosten en generell instabilitet i stigningsled, vilket indikerar brister i regleringen av höjd. Den automatiska kontrollen av den bakre vingens anfallsvinkel visade sig inte ge tillräcklig respons, vilket ytterligare försvårade en stabil övergång till foilande läge. Trots detta kunde flygning uppnås under kortare perioder genom manuell styrning av stigning, vilket tyder på att de valda PID-parametrarna för höjdregeringen inte var optimalt kalibrerade. Ytterligare ett problem som identifierades under det första testet var bristande stabilitet i gir-led under foilande gång. Vid försök till girmanövrering tenderade farkosten att tippa i sidled, vilket antyder otillräcklig lateral stabilitet samt begränsad manövreringsförmåga.

Det andra fälttestet betraktades däremot som betydligt mer framgångsrikt. Genom att minska anfallsvinkeln på den främre vingen och samtidigt finjustera PID-parametrarna för reglering av både rullning och stigning kunde en markant förbättrad stabilitet uppnås. Farkosten kunde hållas i ett stabilt foilande läge under flera minuter, utan att påverkas nämnvärt av externa störningar som vågrörelser eller vindpåverkan. Den förbättrade prestandan antas vara en direkt följd av den reducerade lyftkraften från framvingen i kombination med ett mer effektivt och korrekt inställt reglersystem.

Under fälttestet observerades att om motoreffekten ökades för mycket kunde både vingar och propellrar hamna ovanför vattenytan. Detta ledde till ventilation och förlust av lyftkraft, vilket i sin tur orsakade instabilitet. Problemet kunde kopplas till att någon övre gräns för propellereffekten inte var aktiv. Ett begränsningsläge som var gjort för att behålla samma höjd baserat på sensordata fanns tillgängligt i programvaran, men fungerade inte under testtillfället. Trots detta visade prototypen god manöverbarhet, och farkosten kunde hålla sig stabil i foilande läge utan aktiv höjdstyrning. Detta var oväntat, då höjdläget baserat på höjdsensorn inte fungerade under själva testdagen. Båtens prestanda under dessa förutsättningar indikerar att den mekaniska utformningen och reglersystemets grundinställningar i viss mån kunde kompensera för utebliven höjdregering, då höjden gick utmärkt att reglera endast med hjälp av gaspådraget.

Vidare noterades att farkosten under det andra testet uppvisade god manövreringsförmåga även i gir-led under foilande gång. Denna förbättring bedöms ha möjliggjorts genom införandet av framdrivningsdifferential, en funktionalitet som introducerades mellan det första och andra testet. Detta medförde att riktning kunde kontrolleras genom differential styrning av de två propellrarna snarare än enbart genom hydrodynamiska ytor. Detta innebar en mer direkt och responsiv styrning i jämförelse med det första testet.

6.2 Styrkor och förbättringsområden

Sammanfattningsvis uppvisade prototypen god prestanda under de genomförda fälttesterna och uppfyllde i huvudsak de mål som fastställdes i projektets inledningskede. Detta delkapitel syftar till att belysa de centrala styrkorna i prototypens

konstruktion och funktion, samt att identifiera de förbättringsområden som framkommit under utvecklings- och testfasen.

6.2.1 Båtdesign

De skrov som tillverkades i projektet har visat sig vara funktionella och uppfylla sitt syfte på ett tillfredsställande sätt. Särskilt på grund av att skroven uppnått fullständig vattentätethet, vilket säkerställdes genom laminering med epoxi och glasfiber. Skroven bidrog med den nödvändiga lyftkraften för att hålla båten flytande när den inte befann sig i flygande läge samt möjliggjorde för infästning av elektriska komponenter och vingkonfigurationen. Tillverkningsprocessen av skrovet var mer resurskrävande än för övriga komponenter, främst på grund av långa 3D-utskriftstider, montering av flera delar och behovet av tätning för att uppnå vattentätethet. I förhållande till projektets mål, med fokus på att utveckla ett fungerande foil-system, kan arbetsinsatsen för skrovtillverkningen ifrågasättas. En enklare skrovdesign hade troligen kunnat ge liknande funktion och samtidigt frigjort tid och resurser för arbete med vingar och reglersystem.

Regleringen av anfallsvinkeln med hjälp av vingklaffar visade sig fungera väl och möjliggjorde dessutom valet att använda en stor sammanhängande framvinge i stället för två mindre. Detta designval bidrog till ökad strukturell robusthet, vilket i sin tur minskade vibrationer och reducerade risken för materialutmattning och brott. Dock medförde justeringen av anfallsvinkeln vissa tekniska utmaningar, särskilt kopplingen mellan vingklaffarna och en ytplacerad servo. Lösningen blev att använda en tryckstång för att överföra rörelsen, vilket visade sig vara ett tillförlitligt och praktiskt val.

Under projektets gång diskuterades möjligheten att integrera servon direkt i vingen, vilket hade kunnat förenkla den mekaniska överföringen mellan servo och vingklaff. Detta alternativ avstods dock från, då vingens begränsade storlek i förhållande till servons dimensioner skulle ha krävt en större vingprofil, vilket i sin tur hade ökat det hydrodynamiska motståndet och därmed energiförbrukningen. I en större skala, där vingens mått är mer generösa, kan denna lösning bli mer relevant. En ytterligare utmaning med en sådan konstruktion är kravet på en vattentät och tillförlitlig integrering, vilket medför ökad teknisk komplexitet. Den befintliga lösningen med tryckstänger och infästningen av servos ovanför vattenytan visade sig fungera väl.

Placeringen av propellrarna utgjorde ett annat kritiskt designbeslut. Om propellrarna placeras för högt ökar risken för ventilering när farkosten närmar sig vattenytan. Å andra sidan kan en alltför låg placering, nära vingen, leda till negativa interaktionseffekter och minskad lyftkraft. Efter överväganden valdes därför att placera propellrarna strax ovanför vingen, som en kompromiss mellan prestanda och praktisk konstruktion.

Ett alternativt koncept som övervägdes var att placera propellrarna i T-fogarna (T-junction), vilket ur hydrodynamiskt perspektiv hade varit fördelaktigt och dessutom

gett ett optimalt djup. Detta alternativ innebar dock flera praktiska utmaningar, såsom mer komplicerad kabeldragning, en mer komplex pushrod-konstruktion samt svårigheter vid 3D-printing. Mot bakgrund av dessa nackdelar valdes denna lösning bort.

6.2.2 Elektriska komponenter och reglersystem

De elektriska komponenterna i systemet fungerade generellt väl tillsammans, däribland flygkontrollern CUAV V5+ (Pixhawk) i kombination med GPS-enheten. Dessa enheter kunde integreras utan ytterligare konfigurering, vilket underlättade systemets initiala uppstart. En tydlig fördel var användningen av en kopplingslåda, som möjliggjorde ordnad och lättöverskådlig kabeldragning. Detta bidrog till både förbättrad felsökning och ökad robusthet. Systemet visade sig även tåligt mot vattenstänk, utan att några kortslutningar uppstod, vilket är av särskild vikt för operationer nära vattenytan.

En identifierad nackdel var att flera av de inköpta komponenterna, i synnerhet sensorn för höjdmätning, saknade tillförlitlig och officiell dokumentation. Många komponenter var beställda från kinesiska återförsäljare, där tillgänglig dokumentation ofta var begränsad till kinesiska, vilket försvårade integration och förståelse av funktionalitet.

Under testerna uppstod ett tydligt förbättringsområde kopplat till farkostens höjdkontroll. Vid högre gaspådrag kunde farkosten stiga så pass att bärplanen bröt vattenytan, vilket inte var önskvärt. Trots att en höjdsensor var installerad, visade det sig att mätningarna blev kraftigt opålitliga när propellrarna var aktiva. En trolig orsak till detta är att vibrationer eller elektriska störningar, såsom spänningsvariationer, påverkade sensorns noggrannhet.

Detta problem understryker behovet av förbättrad höjdvakning i framtida iterationer. En möjlig åtgärd är att ersätta den befintliga sensorn med en modell som är mindre känslig för vibrationer, alternativt att införa redundans genom användning av flera sensorer. Ytterligare förbättring kan uppnås genom att förse sensorn med en separat och stabil strömkälla, för att minimera risken för spänningsrelaterade avvikelser.

För att ytterligare förbättra regleringen hade en mer flexibel lösning för programmering av styrsystemet varit fördelaktig. Även om Mission Planner tillhandahåller ett användarvänligt gränssnitt för grundläggande konfiguration, erbjöds begränsade möjligheter att anpassa höjdstyrningen baserat på sensordata. Detta berodde till stor del på att ArduPlane och Mission Planner är open-source-projekt med varierande grad av dokumentation och användarstöd, vilket komplicerade tillgången till pålitlig information. För mer avancerade regleralgoritmer där sensorn implementeras hade extern programmering i form av egenskriven kod varit nödvändig och hade kanske även krävt en annan mjukvara än Mission Planner.

6.3 Jämförelser med tidigare projekt

Även om årets farkost till det yttre liknar förra årets projekt, skiljer den sig markant vid en närmare granskning av designval och deras effekt. Vingprofilen har behållits oförändrad då den tidigare visat goda egenskaper, men vingkonfigurationen har förändrats. Istället för två mindre framvingar används nu en enhetlig framvinge. Justeringen av attackvinkeln har också utvecklats; årets farkost använder vingklaffar på framvingen, till skillnad från tidigare lösningar som involverade hela vingens eller stagets justering. Bakvingen har även genomgått vissa förändringar, främst i form av en mer stabil infästning samt en ny metod för girjustering, där en lång vertikal vingklaff används.

Elektroniken och reglersystemet har också sett en rad förbättringar såsom införandet av *thrust vectoring* och implementation av sensoravläsningar. Det innehåller också en betydligt enklare och renare kabeldragning och inslutning. Det finns fortfarande mer att göra med att implementera sensorn, som tidigare nämnt, men projektet innehåller ändå många förbättringspunkter.

Skrovets geometri behölls oförändrad men med en ökad höjd på 4 cm, vilket visade positivt under tester. Vid 3D-printningen utformades även en plan yta för att kunna montera vinkeljärnen utan glapp. Denna designförändring möjliggjorde även så att stagen kunde skruvas fast i vinkeljärnen med fyra skruvar i respektive stag. Denna lösning av infästning av stag är en tydlig förbättring jämfört med tidigare års konstruktion, där attackvinkeln justerades genom att rotera hela staget kring en punkt, vilket ledde till instabilitet. Överbyggnaden har också förenklats, vilket ökat både robusthet och användarvänlighet. En tydlig förbättring är farkostens modularitet: möjligheten att justera stagets attackvinkel och position, samt höjden på både fram- och bakvinge och tyngdpunkten, har underlättat optimering efter testresultat. Även vattentätighet och hållfasthet hos 3D-printade komponenter har förbättrats genom högre infill och användning av kolfiberstavar.

Tack vare dessa förbättringar har årets projekt nått resultat som tydligt överträffar tidigare arbeten. Båten har visat förmåga att hålla sig stabilt flygande under obegränsad tid, något som inte uppnåddes i tidigare iterationer. Detta till följd av en mer optimerad konstruktion och ett förbättrat reglersystem.

6.4 Måluppfyllnad

Projektets huvudsakliga mål var att utveckla en radiostyrd bärplansbåt med ett automatiserat reglersystem, kapabel att hålla ett stabilt flygande läge minst 5 cm ovanför vattenytan i minst 20 sekunder utan aktiv styrning från användaren. Denna målsättning uppfylldes under det andra fälttestet, där farkosten kunde bibehålla stabil flyghöjd under flera minuter utan yttre manuell påverkan. Detta demonstrerade att reglersystemet fungerade enligt avsikt, även utan fungerande höjdsensor vid

just detta testtillfälle.

Förkraven till huvudmålet innefattade stabil flytförmåga i stillastående tillstånd, acceleration till minst 1 m/s, svängar med högst 2 meters radie samt kontrollerat lyft från vattenytan. Samtliga dessa krav kunde verifieras under testkörningar: båten visade god flytförmåga vid stillaliggande, uppnådde nödvändig hastighet för upplyft, genomförde styrda svängar inom specificerad radie och kunde lyfta kontrollerat från vattenytan.

Målet om förbättrad stabilitet och manövrerbarhet jämfört med tidigare års prototyper uppfylldes också. Den nya prototypen uppvisade mer än fördubblad flygtid och markant förbättrad stabilitet jämfört med tidigare versioner.

Vad gäller höjddreglering uppnåddes tillfredsställande höjdstabilitet även utan aktiv höjdsensor, vilket tyder på att både konstruktion och reglersystem bidrog till farkostens inneboende stabilitet. Förväntningen är att höjdsensorn kan förbättra denna ytterligare vid framtida fälttest.

Målet att minska ventilering i propellrarna uppnåddes i det andra fälttestet, där ingen ventilation observerades under stabil foilande gång. Detta berodde på de förlängda stag och en framåtlutande vinkel på den främre staget bidrog till att propellrarna hölls tillräckligt djupt under vattenytan under flygning samt minskade risken för propagering av ventilation från stagen. Även om ett automatiskt effektbegränsningssystem inte var aktivt under testet, visade sig den mekaniska konfigurationen vara tillräcklig för att förhindra ventilation vid normal drift.

Slutligen dokumenterades projektets utvecklingsprocess systematiskt. Alla konstruktioner, testresultat, programvaruinställningar och justeringar beskrivs i rapporten med syftet att möjliggöra vidareutveckling av framtida projektgrupper.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att projektets mål i huvudsak uppnåddes, särskilt vad gäller farkostens stabilitet, manövrerbarhet och reglersystemets funktion. Vissa förbättringsområden kvarstår, så som vidare implementation av höjdsensor, men resultaten visar att den tekniska lösningen var både fungerande och lovande som grund för vidare utveckling.

6.5 Slutsats

De genomförda testerna visar att projektets mål till stora delar har uppnåtts. Prototypen uppvisade god bärighet, manövrerbarhet och stabilitet i *foilande* läge, särskilt efter justeringar av vingarnas anfallsvinklar och PID-parametrar. De identifierade bristerna i höjddregleringen och vissa komponenters begränsningar pekar dock på behovet av fortsatt utveckling, särskilt vad gäller sensorsystemet och mjukvaruuppgradering med mer flexibilitet för programmering. Sammanfattningsvis har projektet resulterat i en tekniskt välfungerande farkost med utvecklingspotential i framtida iterationer.

Avslutningsvis är gruppen väldigt nöjda med projektet och det resultat som uppnåddes. Ett stort intresse för bärplansteknik har väckts och gruppen ser fram emot att se framtida projekt lyfta från vattenytan.

Litteratur

- Airfoil Tools. (2025). NACA 0012 (n0012-il) Airfoil Data [Hämtad 2025-05-08]. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>
- Alfredsson, H., Börjesson, L., Hansson, F., Kongstad, A., Palm, I., & Sundström, H. (2024). Bärplansbåd: Från koncept till konstruktion.
- Anderson, D., & Eberhardt, S. (1999). How airplanes fly: A physical description of lift. *Sport Aviation*.
- Anderson, F. P., & Liu, A. (2005). *The Art of Digital Design* [Covers PWM encoding in digital control systems]. Prentice Hall.
- Audronis, T. (2017). *Designing Purpose-built Drones for Ardupilot Pixhawk 2.1: Build Drones with Ardupilot*. Packt Publishing Ltd.
- Barden, T., & Binns, J. (2012). On the road to establishing ventilation probability for Moth sailing dinghies. *18th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 394–397.
- Barman, A., Mischke, S., Ouahid Hessissen, A., Sörfeldt, A., & Varvne, M. (2024). HSC Vinga: Electric Hydrofoiling Passenger Ferry for Styrsöbolaget, sailing in the Southern Archipelago of Gothenburg.
- Brassaw, B. (2024). *Airplane Flaps – What are They, and How Do They Work?* [Accessed: 2025-02-20]. <https://www.thrustflight.com/airplane-flaps/>
- Candela. (2024). Foiling vs. Floating: Understanding the Differences Between Hydrofoil Boats and Other Boats [Hämtad 2025-01-30]. <https://candela.com/foiling-vs-floating-understanding-the-differences-between-hydrofoil-boats-and-other-boats>
- Duncan, I., Goodman, T., Cocard, M., Day, S., & Dai, D. (2023). An investigation into the effect of ventilation, bulbs and flow turbulence on lifting T foil performance. *the 6th international conference on Innovation in High Performance Sailing yachts and Wind-Assisted Ships*.
- Eslamdoost, A., Marimon Giovannetti, L., Farousi, A., Ebbesson, F., Thollot, A., & Shiri, A. (2022). Fluid-structure interaction of a foiling craft. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3).
- Faltinsen, O. (2005). Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. *Cambridge University Press*, 3, 386–391.
- Godø, J. M. K., Steen, S., & Faltinsen, O. M. (2024). A resistance model for hydrofoil fast ferries with fully submerged foil systems. *Ocean Engineering*, 301, 117503.
- Harwood, C. M., Felli, M., Falchi, M., Ceccio, S. L., & Young, Y. L. (2023). Wave effects on the hydroelastic response of a surface-piercing hydrofoil. Part 1. Fully wetted and ventilated flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 963, A37.
- Hillman, A. (2018). *The Foiling Dinghy Book*. Fernhurst Books.
- Jacobson, H. (2023). Simulations of a self-stabilizing fully submerged hydrofoil.
- Johnston, R. J. (1985). Hydrofoils. *Naval engineers journal*, 97(2), 142–199.
- Kerwin, J. E. (1986). Marine propellers. *Annual review of fluid mechanics*, 18(1), 367–403.

- Kinnas, P. S. (2025). Cavitation Photographs and Images [Courtesy of Professor S.A. Kinnas at UT Austin]. <https://cavity.caee.utexas.edu/kinnas/cavphotos.html>
- Larsson, L., Eliasson, R., & Orych, M. (2022). *Principles of yacht design*. Bloomsbury Publishing.
- Lennartson, B. (2002). *Reglerteknikens grunder*. Studentlitteratur.
- Lolck Favrum, E., & Lundqvist, N. (2022). Hydrodynamic design, system design and control system for a model-scale foiling boat.
- Magini, P., & Burroughs, J. (1967). Control of the Hydrofoil Ship. *Journal of Navigation*, 20(3), 292–303. <https://doi.org/10.1017/S0373463300024541>
- Merritt, R. G. (1962). Structural Design for Safety in High Speed Hydrofoil Ships. *SAE Transactions*, 70, 487–494.
- Molland, A. F. (2011). *The maritime engineering reference book: a guide to ship design, construction and operation*. Elsevier.
- Müller, J. (2006a). Airfoil angle of attack [modified image] [Modified from the original image on Wikimedia Commons]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airfoil_angle_of_attack.jpg
- Müller, J. (2006b). Airfoil lift improvement devices (flaps) [modified image] [Modified from the original image on Wikimedia Commons]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airfoil_lift_improvement_devices_%28flaps%29.png
- NASA Glenn Research Center. (2023). Winglets - Beginners Guide to Aeronautics [Hämtad: 2025-05-08]. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/winglets/#winglets>
- Nationalencyklopedin AB. (2025). *Bärplansbåt* [Hämtad 2025-02-20]. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/b%C3%A4rplansb%C3%A5t>
- Ogata, K. (2020). Modern control engineering.
- Savitsky, D. (1964). Hydrodynamic design of planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*, 1(04), 71–95.
- Valavanis, K. P. (Red.). (2007). *Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy* [Includes overview of RC system components and communication methods]. Springer.
- Van Walree, F. (2000). Computational methods for hydrofoil craft in steady and unsteady flow.
- van Dam, C. P., Holmes, B. J., & Pitts, C. (1981). Effect of winglets on performance and handling qualities of general aviation aircraft. *Journal of Aircraft*, 18(7), 587–591.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7. utg.). McGraw-Hill Education.
- White, F. M., & Xue, H. (2021). *Fluid Mechanics* (9. utg.). McGraw-Hill Education.
- von Ellenrieder, K. D. (2021). *Control of marine vehicles*. Springer.
- Yun, L., & Bliault, A. (2012). *High performance marine vessels*. Springer.

A. Mission Planner konfiguration

#	Position	Reverse	Function	Min	Trim	Max
1	1100	<input type="checkbox"/>	ThrottleRight	1100	1100	1900
2	1100	<input type="checkbox"/>	ThrottleLeft	1100	1100	2200
3	1500	<input checked="" type="checkbox"/>	RCIN4Scaled	999	1500	1999
4	1500	<input type="checkbox"/>	Elevator	1200	1500	2000
5	1500	<input checked="" type="checkbox"/>	Aileron	1300	1500	1700
6	1500	<input checked="" type="checkbox"/>	Aileron	1300	1500	1700
7	1100	<input type="checkbox"/>	Throttle	1100	1100	1899
8	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	1100	1498	1900
9	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	1100	1500	1900
10	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	1100	1500	1900
11	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	1100	1500	1900
12	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	1100	1500	1900
13	0	<input type="checkbox"/>	GPIO	1100	1500	1900
14	0	<input type="checkbox"/>	GPIO	1100	1500	1900
15	0	<input type="checkbox"/>	GPIO	1100	1500	1900
16	0	<input type="checkbox"/>	GPIO	1100	1500	1900

Current Mode: Manual		Current PWM: 5: 1971	
Flight Mode 1	AUTOTUNE	PWM 0 - 1230	
Flight Mode 2	FBWA	PWM 1231 - 1360	
Flight Mode 3	FBWA	PWM 1361 - 1490	
Flight Mode 4	FBWB	PWM 1491 - 1620	
Flight Mode 5	FBWB	PWM 1621 - 1749	
Flight Mode 6	Manual	PWM 1750 +	

A. Mission Planner konfiguration

Servo Roll Pid P: 0,080 I: 0,150 D: 0,003 INT_MAX: 0,00666	Servo Pitch Pid P: 0,160 I: 0,010 D: 0,009 INT_MAX: 0,00666	Servo Yaw Yaw 2 roll: 1,00 Integral: 0,00 Dampening: 0,00 Intergrator Max: 15
L1 Control - Tum Control Period: 17 Damping: 0,75		
TECS Climb Max (m/s): 5,0 Sink Min (m/s): 2,0 Sink Max (m/s): 5,0 Pitch Dampening: 0,3 Time Const: 5,0	Other Mix's P to T: -2,000 Rudder Mi: 0,500	Throttle 0-100% Cruise: 45 Min: 0 Max: 100 SlewRate: 100
	Navigation Angles Bank Max: 45 Pitch Max: 20 Pitch Min: -25	Airspeed m/s Cruise: 5 Min: 5 Max: 22 Ratio: 2,0

Tabell A.1: Inställningar i Mission Planners parameterlista

Parameter	Funktion
EK3_RNG_USE_HGT	Anger att höjdsensorn (<i>rangefinder</i>) används som primär höjdkälla när dess mätvärden ligger inom det giltiga mätintervall.
EK3_RNG_USE_SPD	Anger att höjdsensorn (<i>rangefinder</i>) används som primär höjdkälla enbart när hastigheten understiger detta mätvärde.
KFF_THR2PTCH	Reglerar attackvinkeln och stigning gradvis i takt med gaspådrag. Detta för att motverka ökad lyftkraft vid ökad hastighet.
RC6_OPTION	<i>TAKEOFF</i> -läge aktiveras via RC6.
RNGFND1_GNDCLEAR	Indikerar höjdsensorns höjd vid grundnivå.
RNGFND1_MAX_CM	Indikerar sensorns maximalt giltiga mätvärde.
RNGFND1_MIN_CM	Indikerar sensorns minimalt giltiga mätvärde.
RNGFND1_ORIENT	Indikerar vilket håll sensorn pekar mot.
RNGFND1_PIN	Anger vilken brygga på styrenheten sensorns styrsignal (trig) är inkopplad på.
RNGFND1_STOP_PIN	Anger vilken brygga på styrenheten sensorns återkopplingsignal (echo) är inkopplad på.
RNGFND1_TYPE	Anger vilken typ av sensor som används som <i>rangefinder 1</i> .
RUDD_DT_GAIN	Justerar förhållandet mellan roder och framdrivningsdifferential vid gir.
TECS_TKOFF_IGAIN	Denna parameter avser integrerande verkan i återkopplingen i läget <i>TAKEOFF</i> .
TERRAIN_FOLLOW	Tillåter terrängföljning i autolägena <i>CRUISE</i> och <i>FBWB</i> .
TERRAIN_LOOKAHD	Kontrollerar hur lång sträcka fram som höjden läses av för att undvikas.
TERRAIN_MARGIN	Avståndsmarginal för data att accepteras från styrenheten i lägen där <i>TERRAIN_FOLLOW</i> används.
TKOFF_ALT	Avser önskad höjd att nå i läget <i>TAKEOFF</i> .
TKOFF_DIST	Avser önskat avstånd att cirkulera från punkten där <i>TAKEOFF</i> aktiverades.
TKOFF_FLAP_PCNT	Justerar hur många procent av total flapsvinkel som används vid läget <i>TAKEOFF</i> .
TKOFF_LVL_ALT	Under denna höjd hålls samtliga vingar i neutralt läge under flygning i läget <i>TAKEOFF</i> .
TKOFF_LVL_PITCH	Avser önskad stigningsvinkel under flygning i läget <i>TAKEOFF</i> .
TRIM_THROTTLE	Bestämmer procentuell andel av motoreffekt för att användas i lägen där automatisk gaspådrag används.

B Komponentlista

	ID	Komponent	Material	Antal
Skrov och överbyggnad				
	1.01	Skrov Babord	PETG	1
	1.02	Skrov Styrbord	PETG	1
	1.03	Överbyggnad Fram	Aluminium	1
	1.04	Överbyggnad Mitten	Aluminium	1
	1.05	Överbyggnad Bak	Aluminium	1
	1.06	Skruvinsert M4	Mässing	32
	1.07	Skruv M4	Stål	26
	1.08	Mutter M4	Stål	6
	1.09	Skruvbricka	Stål	26
	1.10	Kolfiberstav, 5mm	Kolfiber	2
	1.11	Plexiglasskiva, 92cm x 22cm	Plexiglas	1
Framvingar med stag				
	2.01	Vingklaff	PETG	2
	2.02	Vinge	PETG	2
	2.03	Stag, med bulb	PETG	2
	2.04	Vingöron	PETG	2
	2.05	Homogen vinge	PETG	1
	2.06	Servofäste	PETG	2
	2.07	Lock till servofäste	PETG	2
	2.08	Servo, 40kg	-	2
	2.09	Tryckstång, 3mm	Aluminium	2
	2.09	Gänginsats M4	Mässing	6
	2.10	Mutter M4	Stål	8
	2.11	Skruv M4	Stål	14
	2.12	Skruvbricka	Stål	14
	2.13	Kolfiberstav, 5mm	Kolfiber	2
	2.14	Kolfiberstav, 3mm	Kolfiber	2
Roder				
	3.01	Stag	PETG	1
	3.02	Vinge	PETG	1
	3.03	Servofäste	PETG	1
	3.04	Servo, 40kg	-	2
	3.05	Vinkeljärn, 3mm bredd	Aluminium	2
	3.06	Infästningsplatta servo	Aluminium	1
	3.07	Platta	Aluminium	2
	3.08	Ihåligt rör, 16mm x 6mm	Aluminium	1
	3.09	Halvgängad skruv, M6	Stål	1
	3.10	Gänginsats M4	Mässing	6
	3.11	Mutter M6	Stål	8
	3.12	Skruv M6	Stål	8
	3.13	Skruv M4	Stål	6
	3.14	Skruv M3	Stål	4
	3.15	Skruvbricka	Stål	14
	3.16	Stor skruvbricka	Aluminium	2

Sensorfäste	3.17	Kolfiberstav 5mm	Kolfiber	1
	4.01	Utbyggnad till sensor	Aluminium	1
	4.02	Fäste till sensor	PETG	1
	4.03	Skruv M3	Stål	4
	4.04	Mutter M3	Stål	4
	4.05	Skruv M6	Stål	4
	4.06	Mutter M6	Stål	4
	4.07	Skruvbricka	Stål	8

C Python kod

Kod C.1: Vågplottning

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Parameters for first wave, all taken and estimated from film of
5   the experiment in the water tank
6 amplitude1 = 1.4 # cm
7 period1 = 0.48 # seconds
8 frequency1 = 1 / period1 # Hz
9 offset1 = 35 # cm
10
11 # Parameters for second wave, all taken and estimated from film of
12   the experiment in the water tank
13 amplitude2 = 2.4 # cm
14 period2 = 1.25 # seconds
15 frequency2 = 1 / period2 # Hz
16 offset2 = 35 # cm
17
18 # Time arrays
19 time1 = np.linspace(0, 4 * period1, 1000) # 4 cycles for
20   visualization
21 time2 = np.linspace(0, 3 * period2, 1000) # 3 cycles for
22   visualization
23
24 # Sinusoidal waves
25 wave1 = amplitude1 * np.sin(2 * np.pi * frequency1 * time1)
26 wave1 += offset1 # Adding offset to the first wave
27
28 wave2 = amplitude2 * np.sin(2 * np.pi * frequency2 * time2)
29 wave2 += offset2 # Adding offset to the second wave
30
31 # Plotting first wave
32 plt.figure(figsize=(8, 4))
33 plt.plot(time1, wave1, label="Short Waveform 1")
34 plt.title("Created Short Waveform in Watertank")
35 plt.xlabel("Time (s)")
36 plt.ylabel("Displacement (cm)")
37 plt.axhline(0, color='black', linewidth=0.8, linestyle='--')
38 plt.grid(True)
39 plt.legend()
40 plt.ylim(offset1 - amplitude1 - 1, offset1 + amplitude1 + 1) #
41   Adjust y-axis limits
42 plt.show()
43
44 # Plotting second wave
45 plt.figure(figsize=(8, 4))
46 plt.plot(time2, wave2, label="Short Waveform 2", color='orange')
47 plt.title("Created Long Waveform in Watertank")
48 plt.xlabel("Time (s)")
49 plt.ylabel("Displacement (cm)")
50 plt.axhline(0, color='black', linewidth=0.8, linestyle='--')
51 plt.grid(True)
```

C. Python kod

```
47 plt.legend()
48 plt.ylim(offset2 - amplitude2 - 1, offset2 + amplitude2 + 1) #
    Adjust y-axis limits
49 plt.show()
```

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se



CHALMERS