



CHALMERS



Design och konstruktion av självreglerande foilande båt

Kandidatarbete inom Automation och Mekatronik samt Maskinteknik

Johan Bengtsson
Oliver Lundqvist
Gustaf Norlander
Alexander Reimer
Douglas Svensson
Olliver Åhs

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2026
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE INOM AUTOMATION OCH
MEKATRONIK SAMT MASKINTEKNIK

**Design och konstruktion av självreglerande
foilande båt**

JOHAN BENGTSSON
OLIVER LUNDQVIST
GUSTAF NORLANDER
ALEXANDER REIMER
DOUGLAS SVENSSON
OLLIVER ÅHS



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för Marin teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Design och konstruktion av självreglerande foilande båt
JOHAN BENGTSSON
OLIVER LUNDQVIST
GUSTAF NORLANDER
ALEXANDER REIMER
DOUGLAS SVENSSON
OLLIVER ÅHS

© JOHAN BENGTSSON, OLIVER LUNDQVIST, GUSTAF NORLANDER,
ALEXANDER REIMER, DOUGLAS SVENSSON, OLLIVER ÅHS, 2026.

Handledare: Nils Lundqvist, Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
Arash Eslamdoost, Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
Examinator: Arash Eslamdoost, Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2026
Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Slutgiltig prototyp av båten

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2026

Design och konstruktion av självreglerande foilande båt
JOHAN BENGTSSON, OLIVER LUNDQVIST, GUSTAF NORLANDER,
ALEXANDER REIMER, DOUGLAS SVENSSON, OLLIVER ÅHS
Institutionen för Mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för Marin teknik
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Syftet med detta kandidatarbete var att utveckla och utvärdera en prototyp av en foilande båt, även kallad bärplansbåt, med fokus på aktiv stabilisering och systemintegration.

Bärplansteknik utvecklades redan under tidigt 1900-tal, men begränsades länge av otillräckliga material och styrsystem. Med framsteg inom kompositmaterial, sensortechnik och reglerteori har tekniken åter blivit aktuell, särskilt inom tävlingssegling och elektrifierad sjötransport. Genom att lyfta skrovet ur vattnet reduceras den våta ytan och därmed det hydrodynamiska motståndet kraftigt, vilket möjliggör betydande energieffektiviseringar och gör tekniken relevant för eldrivna fartyg.

Den utvecklade prototypen består av tre huvudsakliga delsystem: en foilkonfiguration, ett elektriskt framdrivningssystem samt ett reglersystem. Skrovet utgörs av en modifierad wingfoil-bräda med en längd på cirka 1,5 meter. Foilen består av en huvudvinge som genererar huvuddelen av lyftkraften samt en bakre stabiliserande vinge. Regleringen implementeras med ett autopilotsystem baserat på ArduPilot, vilket möjliggör aktiv styrning av flyghöjd och dynamik.

Under designprocessen genomfördes tester i olika miljöer. Resultaten visade att systemet kan uppnå fullt lyft, vilket bekräftar dimensioneringen av foil och framdrivning. Stabil självreglering uppnåddes dock inte, främst på grund av störningar kopplade till elektriska komponenter och kablage i vattenmiljö.

Den viktigaste förbättringsåtgärden för framtida arbete är därför ökad robusthet i elektronik och signalöverföring i marina miljöer, där inträngande vatten, elektromagnetiska störningar och signalförluster måste hanteras systematiskt.

Nyckelord: Foilingbåt, Hydrofoil, Aktiv styrning, Sensorintegration, Systemkonstruktion.

Abstract

The aim of this bachelor's thesis was to develop and evaluate a prototype of a foiling boat, also known as a hydrofoil craft, with a focus on active stabilization and system integration.

Hydrofoil technology was first developed in the early 20th century but was long limited by insufficient materials and control systems. With advancements in composite materials, sensor technology, and control theory, the technology has regained relevance, particularly in competitive sailing and electrified marine transport. By lifting the hull out of the water, the wetted surface area is significantly reduced, thereby decreasing hydrodynamic drag and enabling substantial energy efficiency improvements, making the technology highly relevant for electric vessels.

The developed prototype consists of three main subsystems: a foil configuration, a propulsion system, and a control system. The hull is based on a modified wingfoil board with a length of approximately 1.5 meters. The foil system includes a main wing that generates the majority of the lift, as well as a rear stabilizing wing. Control is implemented through an autopilot system based on ArduPilot, enabling active regulation of ride height and dynamic behavior.

During the design process, iterative tests were conducted in both controlled and real-world environments. The results demonstrated that the system is capable of achieving full lift, confirming the validity of the foil and propulsion design. However, stable self-regulation was not achieved, primarily due to disturbances related to electrical components and cabling in a water environment.

The most critical area for future improvement is therefore increased robustness of electronics and signal transmission in marine environments, where water ingress, electromagnetic interference, and signal loss must be systematically addressed.

Keywords: Foiling boat, Hydrofoil, Active control, Sensor integration, System design.

Förord

Denna rapport presenterar resultatet av ett kandidatarbete, utfört vid Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper på Chalmers Tekniska Högskola, under perioden januari till maj 2026. Målet var att bygga en självreglerande båt som kunde lyfta över vattnet med hjälp av foiling-teknik.

Författarnas tack

Vi vill rikta ett stort tack till vår examinator, Universitetslektor Arash Eslamdoost, för ett konstant engagemang och för att alltid ta sig tid att besvara våra många frågor, oavsett tid på dygnet.

Ett särskilt tack riktas även till vår handledare, Doktorand Nils Marco Lundqvist, för värdefulla råd genom hela projektet och inte minst för det praktiska stödet i tillverkningsprocessen – från marintekniklabbet till 3D-utskriften hemma i lägenheten.

Vi vill också tacka personalen i FUSE – Peter, Henrik och Pelle – för deras hjälp och kunniga vägledning inom såväl fräsning och svarvning som elektronik och 3d-utskrift. Personalen i eXPerimentverkstaden skall även de tackas.

Rådasjöns Segelsällskap tackas för generöst lån av följebåt i samband med det första fälttestet, vilket bidrog till att testerna kunde genomföras på ett säkert och kontrollerat sätt.

Vi vill även tacka företaget Candela för inbjudan till studiebesök vid deras fabrik och huvudkontor, och Rolf Sörmans fond för finansiering av detta studiebesök. Besöket gav värdefulla insikter i hur tekniken tillämpas i en industriell kontext.

Slutligen vill vi rikta ett varmt tack till våra familjer, som visat stort tålamod under projektets gång, möjliggjort de många arbetstimmar och fungerat som ett bollplank i diskussioner kring konstruktion och tillverkning.

Författarna, Göteborg, maj, 2026

Innehåll

Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund och tidigare projekt	2
1.2 Syfte	4
1.3 Mål	4
1.4 Avgränsningar	4
2 Teori	5
2.1 Foiling	5
2.2 Rotationer och translationer	6
2.3 Ving- och flygteori	8
2.4 Mast	17
2.5 Propulsion	17
2.6 Reglersystem	20
2.7 Styr signaler och sensorer	21
3 Systemdesign	25
3.1 Foil	25
3.2 Skrov och överbyggnad	35
3.3 Framdrivning	38
3.4 Uppskattad vikt av systemet	42
3.5 Elektronik och mjukvara	42
4 Tester	51
4.1 Test av värmeutveckling i ESC	51
4.2 Propellertest	52
4.3 Hållfasthetstest av motorfästet	52
4.4 Första fälttestet	53
4.5 Vattentest av servomotorer	53
4.6 Andra fälttestet	54
5 Resultat	57

5.1	Värmeutveckling i ESC	57
5.2	Propellertest	58
5.3	Verifiering av motorfästets hållfasthet	61
5.4	Resultat från första fälttestet	61
5.5	Resultat från vattentest av servomotorer	62
5.6	Resultat från fälttest två	62
5.7	Slutgiltig konstruktion	63
6	Slutsatser	65
6.1	Tidiga tester vitala för designprocessen	65
6.2	Slutsatser från första fälttestet	66
6.3	Slutsats av andra fälttestet	66
6.4	Styrkor med båtdesignen	67
6.5	Framtida utveckling av båten	68
6.6	Jämförelse med tidigare projekt	69
6.7	Måluppfyllnad	70
6.8	Slutsats	70
	Litteraturförteckning	71
A	VESC-tool konfiguration	I
B	Fullständiga MissionPlanner parametrar	III
C	Komponentlista	V

Figurer

1.1	Artemis foilande arbetsbåt EF12 och den svenska AC40 från America's Cup. Foto: Artemis Technologies	2
1.2	Foilingbåtsprototyp från 2025 års projekt.	3
2.1	Rotationerna för en foilbåt (rullning, stigning och gir). Foto: egen illustration.	6
2.2	Schematisk illustration av de generella krafter som verkar på ett hydrofoilsystem. Figuren visar tyngdkraft, drivkraft, motståndskraft samt hydrodynamiska kraftbidrag från systemets bärande ytor, där W betecknar tyngdkraft, B flytkraft, T drivkraft, D motståndskraft, L_x lyftkraftskomponent och M_x momentkomponent. Bild hämtad från Isaly m. fl. (n.d.).	8
2.3	Illustration av tryckfördelningen runt en foilprofil vid given anfallsvinkel. De gröna pilarna representerar det lokala trycket vinkelrätt mot profilytan, där längre pilar motsvarar högre lokalt tryck. Figuren visar hur trycket varierar längs profilens över- och undersida och hur denna tryckskillnad ger upphov till den resulterande lyftkraften. Figuren är framtagen av författarna i Flow5.	9
2.4	Illustration av anfallsvinkel. Bild hämtad från NASA Glenn Research Center, använd enligt NASA:s riktlinjer för bilder och media (NASA, u. å-b; NASA Glenn Research Center, 2024a).	10
2.5	Översikt av vanliga roder- och klaffytor på ett flygplan. Bild hämtad från NASA Glenn Research Center, använd enligt NASA:s riktlinjer för bilder och media (NASA, u. å-b; NASA Glenn Research Center, 2024a).	12
2.6	Två huvudkategorierna: Ytgenomträngande bärplan och nedsänkta bärplan.	15
2.7	PWM signal med 67% Duty cycle	22
3.1	Tidigt designkoncept för foilsystemet med integrerade klaffytor i gult. Figuren är framtagen i programmet Flow5.	26
3.2	Exploderad vy av det främre bärplanets huvudkomponenter. Figuren är framtagen i CAD.	27
3.3	Monterat främre bärplan. Figuren är framtagen i CAD.	27
3.4	Graf för lyft och effektivt lyft till Eppler 817 samt Naca 0012	30
3.5	Vingprofiler i simuleringsprogram	31

3.6	Exploderad vy av fuselage och koppling till mast.	33
3.7	Monterad konstruktion av fuselage och koppling till mast i verklig implementation.	34
3.8	Förklaring av överbyggnadens delar	36
3.9	Förstärkning av sensorfäste med hjälp av kolfiber-laminering	38
3.10	Sprängskiss av ställdon för framvingen	39
3.11	Detaljskiss av axeltapp för aktre- och främre ställdon	40
3.12	Slutgiltig propeller	40
3.13	CAD-modell av ducted propeller-konstruktionen	41
3.14	Fullständigt kopplingschema	44
3.15	Modifiering av servomotor för förbättrad vattentäthet.	47
3.16	Blockdiagram över reglersystemets funktion	48
4.1	Testkonfiguration vid värmeutvecklingstest i vattentank	51
4.2	Servot nedsänkt i vatten	54
4.3	Fälttest 2, Björlanda Kile småbåtshamn	55
5.1	Temperaturutveckling i ESC och ström i motorn	57
5.2	Ventileringsfenomen vid test av tvåbladig aluminium-propeller	58
5.3	Samband mellan duty cycle och tillförd effekt för de tre propellertyperna.	59
5.4	Vridmoment som funktion av varvtal för de tre propellertyperna.	60
5.5	Sprickbildning vid bladets ytterkant på den tvåbladiga propellern efter test.	60
5.6	Båten i foiland läge under fälttest 1	62
5.7	Slutgiltig konstruktion av båten	64
5.8	Rendering i CAD av båten	64

Tabeller

3.1	Specifikationer för vald wingfoilbräda	37
3.2	Uppskattade vikter för delsystemen	42
3.3	Elektriska komponenter i systemet	43
3.4	Konfiguration av flygdatorns utgångar.	49
3.5	Flyglägen i ArduPlane	50
5.1	Resultat från hållfasthetstest med momentnyckel.	61
A.1	Konfiguration av motor- och appinställningar i VESC-tool	I
A.1	Konfiguration av motor- och appinställningar i VESC-tool	II
B.1	Parameteröversikt för reglersystem	III
C.1	Komponentlista	V
C.1	Komponentlista	VI

1

Inledning

Transporter står för en stor del av våra utsläpp av växthusgaser. För att minska transportsektorns klimatpåverkan har elektrifieringen av landbaserade fordon gjort betydande framsteg och under 2024 var 60 % av nyförsäljningen av stadsbussar elektrifierade bussar (International Energy Agency, u. å). Samtidigt ökade försäljningen av elektriska lastbilar med 80 % jämfört med 2023 (International Energy Agency, 2025), om än från en låg nivå. Ett alternativ för att minska belastningen på landbaserade transportsystem är att i större utsträckning använda sjötransporter för regional godstransport (European Commission, 2005). Sjötransporter har dock inte sett samma utveckling av elektrifiering, vilket till stor del beror på fartygens höga energibehov (Bengtsson & Pålsson, 2026).

För att möjliggöra elektrifiering av fartyg krävs kraftigt reducerat hydrodynamiskt motstånd. Detta kan uppnås genom optimerad skrovdesign eller genom tekniker såsom foils som reducerar den våta ytan och därmed friktionsmotståndet, såväl som vågmotståndet (International Maritime Organization, 2020). Foils är vingliknande bärplan som får ett fartygsskrov att lyfta ur vattnet vid högre hastigheter (Nationalencyklopedin, u. å). Med denna teknik kan motståndet reduceras med upp till 80 procent (Marimon Giovannetti m. fl., 2022). Den del av sjötransportsektorn där foilteknik bedöms ha störst potential är regionala transporter, exempelvis containertrafik, RoRo-trafik (lastbilar) och RoPax-trafik (passagerare och fordon) (Bengtsson & Pålsson, 2026).

Foiling är ingen ny teknik, utan de första lyckade testerna genomfördes redan under början av 1900-talet, bland annat av Graham Bell (Rickenbacher, 2021). Efter ett uppehåll i utvecklingen under krigstiden, började även den amerikanska marinen bygga foilande krigsfartyg under 70-talet, vilket resulterade i Pegasus-klassen. Därefter tog utvecklingen stopp, eftersom det blev för komplext, dyrt och för stora säkerhetsrisker (Chapin, 1986).

Foiling fick däremot sitt nya genombrott i den anrika seglingstävlingen America's Cup 2010 (Wheatley, u. å-b). America's Cup är till stor del en design tävling, där den senaste tekniken inom segling ställs på sin spets likt Formel 1 på land (Clifford, 2021). 2012 testade Emirates Team New Zealand att bygga foils i komposit som sedan skulle kunna användas för att lyfta den 72 fot långa katamaranen ur vattnet, och på så sätt få den att öka sin hastighet markant. Testet blev lyckat, och sedan

dess har tekniken förfinats mer, och de senaste upplagorna har alla avgjorts med olika foilandande båtar, både enskrov och flerskrov (Wheatley, u. å-a).

Från America's Cup har sedan tekniken förts vidare. Ur det svenska laget Artemis Racing, som utmanade om America's Cup 2013 och 2017, så bildades 2017 Artemis Technologies som ett försök att utveckla grönare transportmöjligheter till havs genom att dra nytta av den kunskap som hade uppstått i America's Cup-projektet. Artemis har därefter utvecklat foilandande färjor och arbetsbåtar för persontransport (Artemis Technologies, u. å).



Figur 1.1: Artemis foilandande arbetsbåt EF12 och den svenska AC40 från America's Cup. Foto: Artemis Technologies

Med inspiration från America's Cup startade även 2014 det svenska företaget Candela med utvecklingen av eldrivna, foilandande båtar, som bland annat har testats i kollektivtrafiken i Stockholm och Göteborg (Candela Technology AB, 2024). Sammantaget är intresset stort för att elektrifiera sjötransporter genom att reducera hydrodynamiskt motstånd och lyfta fartyget över vattenytan, med hjälp av nya teknologier såsom lättviktsmaterial och mikrodatorer som kan behandla datan från olika sensorer, enligt Jakob Kutteneuler, professor inom marin arkitektur (Green, 2025).

1.1 Bakgrund och tidigare projekt

Detta projekt utgör nästa iteration av tidigare genomförda arbeten vid Chalmers tekniska högskola inom området bärplansteknik. Utvecklingen har skett stegvis genom flera examensarbeten, där varje projekt har identifierat begränsningar och förbättringsområden som legat till grund för nästkommande arbete.

Det första arbetet i projektkedjan var ett masterarbete inom marin arkitektur och havsteknik (Lock Favrum & Lundqvist, 2022). Syftet med studien var att fördjupa

kunskapen om bärplansteknik samt analysera hur vingarnas positionering påverkade båtens hydrodynamiska egenskaper. Konstruktionen uppnådde dock aldrig fullt lyft, vilket huvudsakligen tillskrevs skrovets höga massa, betydande motståndskrafter samt otillräcklig genererad lyftkraft. Under dragtester i vattentank observerades dessutom ventilationsfenomen som gav upphov till turbulens och instabilitet.

Projektet vidareutvecklades därefter inom ramen för ett kandidatarbete i Mekanik och Maritima vetenskaper (Alfredsson m. fl., 2024). I detta arbete låg fokus inte på att konstruera en skalenlig modell, utan på att demonstrera konceptets genomförbarhet genom användning av ett aktivt kontrollsystem för att hålla skrovet lyft över vattenytan. Det använda skrovet utgjorde den nedre delen av en konstruktion framtagen inom ett tidigare Marine Design Project vid Chalmers (Barman m. fl., 2024).

Resultaten visade att modellen delvis lyckades uppnå stabilt lyft, vilket bekräftade konceptets potential. Samtidigt identifierades flera tekniska begränsningar. Stabiliteten var otillräcklig och konstruktionens robusthet bedömdes som bristfällig.

Nästa utveckling skedde också i ett kandidatarbete vid institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper (Björk m. fl., 2025). Projektet fokuserade på att vidareutveckla konstruktionen samt implementera ett mer avancerat autopilotssystem för aktiv reglering av flygstabiliteten. Genom att förändra hur anfallsvinkeln reglerades rent mekaniskt, med hjälp av en pushrod i stället för att vinkla hela staget, blev foilkonstruktionen betydligt mer motståndskraftig mot vibrationer. Utveckling av styrsystemet baserat på ArduPilot och Pixhawk hjälpte modellen att uppnå stabilt lyft under fälttester. Den färdiga modellen syns i figur 1.2.

Arbetet visade samtidigt att konstruktionen möjliggjorde vidare experiment med bärplanens och stagens position, vilket identifierades som ett område med betydande utvecklingspotential. Detta utgör en central utgångspunkt för föreliggande arbete.



Figur 1.2: Foilingbåtsprototyp från 2025 års projekt.

1.2 Syfte

Projektet syftar till att bidra till utvecklingen av mer energieffektiva och elektrifierbara sjötransporter genom att undersöka hur aktivt reglerade hydrofoilsystem kan användas för att minska fartygs hydrodynamiska motstånd. Genom att vidareutveckla tidigare projekt inom området avser arbetet att öka kunskapen kring konstruktion, stabilitet och design av mindre foilande farkoster.

Ett särskilt syfte är att undersöka potentialen hos alternativa foilkonfigurationer samt skapa en modulär plattform som möjliggör fortsatt utveckling, testning och forskning inom området.

1.3 Mål

Projektet har fyra huvudsakliga mål. Det första målet är att konstruera en foilingbåtsprototyp baserad på en surfbräda som skrov, utrustad med en foilkonfiguration bestående av två vingar och ett stag, samt ett autopilotssystem för aktiv reglering av flygstabilitet. Prototypen ska dimensioneras och utformas så att den kan lyfta och bibehålla sitt foilande läge under kontrollerade testförhållanden.

Vidare ska båten kunna uppnå en hastighet om minst 6 m/s (cirka 11 knop) samt bära en extern last på 30 kg utöver sin egen vikt, utan att stabilitet eller reglerbarhet försämras.

Det sista målet är att systematiskt dokumentera designval, konstruktionsprocess, tester och resultat för att möjliggöra att efterföljande projekt kan vidareutveckla arbetet och ta vid där detta projekt avslutas.

1.4 Avgränsningar

Projektet är avgränsat till utveckling och testning av en experimentell prototyp inom ramen för ett kandidatarbete, vilket innebär begränsningar i tid och resurser. Arbetet omfattar konstruktion och fälttest endast i kontrollerade miljöer med måttliga våg- och vindförhållanden. Projektet syftar inte till att utveckla en kommersiellt färdig produkt, utan fokuserar på konceptvalidering och utvärdering i prototypskala. Prototypen kommer därför att vara en kombination av kommersiellt tillgängliga delar, samt egenkonstruerade delar, för att få ut så mycket som möjligt av tillgänglig tid och resurser.

Vidare genomförs inga fullskaliga hydrodynamiska optimeringar med avancerade CFD-analyser, och inte heller någon omfattande strukturell hållfasthets- eller utmattningsanalys för långvarig drift. Regleringen baseras på anpassning av ett befintligt autopilotssystem, snarare än utveckling av nya reglerteoretiska metoder. Eftersom endast en konceptprototyp konstrueras, anpassas den ej till gällande regelverk för sjöfart. Ekonomiska analyser och industriell produktionsanpassning ligger också utanför projektets omfattning.

2

Teori

För att förstå de konstruktionsval, beräkningar och resultat som presenteras senare i rapporten krävs en grundläggande teoretisk bakgrund inom hydrodynamik, mekanik och reglerteknik. Prototypens funktion bygger på samspelet mellan verkande krafter, farkostens rörelser samt hur bärplan genererar lyftkraft i vatten. Även framdrivning, stabilitet och styrning påverkas av fenomen såsom anfallsvinkel, tyngdpunktsplacering, ventilering och kavitation. Vidare är förståelse för sensorer, styrsignaler och reglerprinciper central eftersom farkosten använder ett aktivt styrsystem för att reglera sin höjd och sitt beteende.

2.1 Foiling

I grunden är foiling när ett fordon lyfts upp ur vattnet av en hydrofoil (en vinge nedsänkt under vattnet). Fordonet fungerar som en vanlig båt tills dess att det uppnår den hastighet då hydrofoilen skapar tillräckligt med lyftkraft för att överkomma fordonets gravitationskraft. Då lyfts kroppen upp över ytan och den enda som har kontakt med vattnet är masten ner till vingen och vingen själv. Det här fenomenet minskar det motstånd som påverkar båten ofantligt och öppnar upp för enorma möjligheter synnerligen gällande hastighet och effektivitet (Green, 2025).

Foiling används för allt från personfärjor till tävlingsbåtar på grund av de fördelar tekniken erbjuder (Green, 2025). Färjor kan göras mycket energieffektiva samtidigt som de färdas i relativt höga hastigheter. Dessutom minskar skapandet av svall, vilket annars kan utgöra en stor störning för närmiljön. Med hjälp av foiling har man även lyckats utveckla elbåtar med prestanda jämförbara med konventionella fritidsbåtar, både avseende marschfart och räckvidd.

Många tävlingsbåtar använder också foiling, särskilt inom segling, för att uppnå hastigheter som hade varit omöjliga utan användning av hydrofoiler. Den kraftiga minskningen av vattenmotståndet gör att dessa segelbåtar kan nå hastigheter som de flesta motordrivna båtar inte kommer i närheten av.

2.2 Rotationer och translationer

En farkost i vatten kan beskrivas med sex frihetsgrader, varav tre är translationer och tre är rotationer. Translationerna beskriver farkostens linjära rörelse längs de tre koordinataxlarna, medan rotationerna beskriver hur farkosten vrider sig kring dessa axlar. I denna rapport ligger fokus främst på rotationsrörelserna, eftersom de har stor betydelse för hydrofoilsystemets stabilitet och reglering.

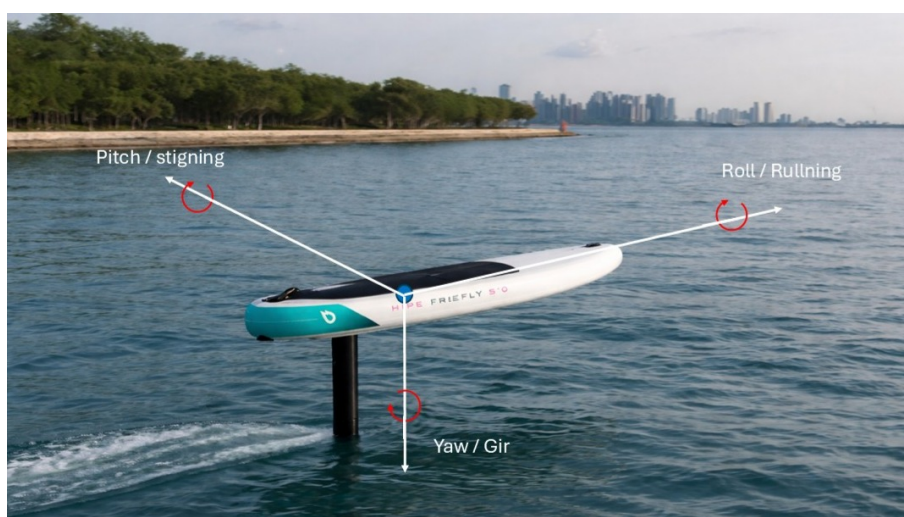
2.2.1 Rotationer

För att enklare förstå runt vilken axel båten roterar har de olika rotationsrörelserna benämnts *roll*, *pitch* och *yaw* på engelska, vilket motsvarar *rullning*, *stigning* och *gir* på svenska (Ibrahim & Grace, 2010). Samtliga tre rotationsrörelser visas i Figur 2.1.

Rullning beskriver bärplansbåtens rotation kring farkostens längdaxel. Det innebär att farkosten kan luta åt styrbord eller babord. Detta kan exempelvis uppstå när vågor eller andra störningar påverkar bärplanens kraftgenerering i vattnet. Rörelsen kan regleras genom geometri eller genom att justera kraftfördelningen mellan bärplanen.

Stigning beskriver rotation kring farkostens tvärsaxel, det vill säga axeln mellan vingspetsarna. Den innebär att farkostens för kan röra sig uppåt och nedåt. Den kan regleras på liknande sätt som rullning och är särskilt viktig för hydrofoilsystem, eftersom den i stor utsträckning påverkar farkostens höjd över vattenytan.

Gir beskriver rotation kring farkostens vertikala axel, vilket gör att farkosten kan vrida sig åt styrbord eller babord i färdriktningen. Rotationen påverkar farkostens kurs och riktning och kan regleras med hjälp av skillnader i krafter eller moment mellan farkostens sidor.



Figur 2.1: Rotationerna för en foilbåt (rullning, stigning och gir). Foto: egen illustration.

2.2.2 Statisk jämvikt

För att analysera ett hydrofoilsystem är det nödvändigt att identifiera de huvudsakliga krafter som verkar på farkosten under drift, se Figur 2.2. De krafter som i allmänhet är mest relevanta är *lyftkraft*, *motståndskraft*, *drivkraft* och *tyngdkraft*. Tillsammans bestämmer dessa farkostens rörelse, jämviktsläge och stabilitet.

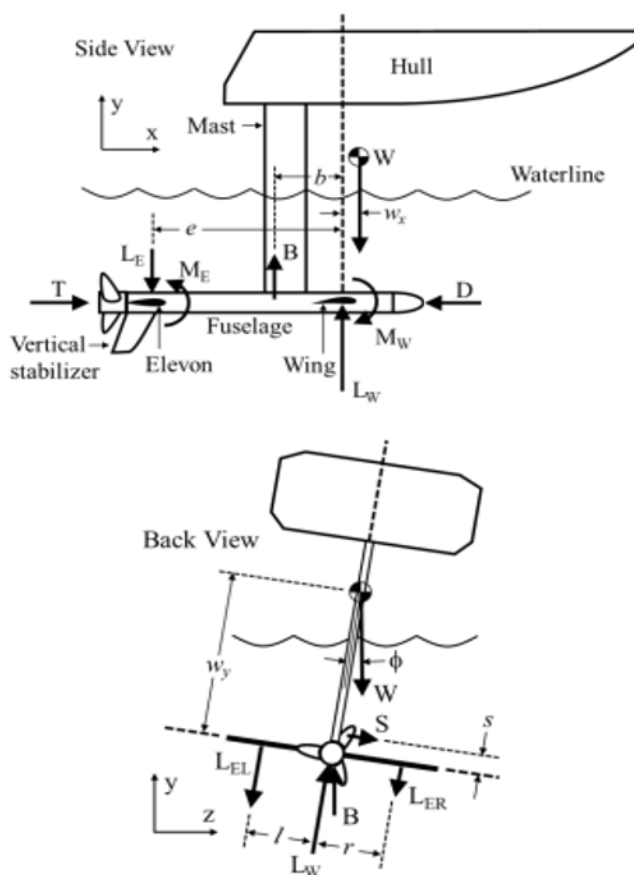
Lyftkraften definieras här som den vertikala komponenten av de hydrodynamiska krafter som genereras av de bärande ytorna i hydrofoilsystemet. Den totala lyftkraften kan därför beskrivas som summan av bidragen från samtliga bärplan. Beroende på systemets konfiguration och aktuella drifttillstånd kan dessa kraftbidrag vara olika stora. I vissa fall kan en bärande yta dessutom vara belastad så att dess resulterande vertikala kraftkomponent verkar nedåt i stället för uppåt, exempelvis för att bidra till momentbalans och stabilitet i stigning.

Motståndskraften uppstår när systemet rör sig genom vatten och kan delas upp i bidrag från de nedsänkta komponenterna, såsom bärplan, stag, mast eller andra bärande och förbindande strukturer. Den totala motståndskraften utgör summan av dessa bidrag och verkar i motsatt riktning mot farkostens rörelse relativt vattnet. Motstånd kan även påverkas av omgivande luft, men i detta sammanhang avses främst det hydrodynamiska motståndet från vattnet.

Drivkraften genereras av farkostens framdrivningssystem. Denna kan exempelvis komma från en eller flera motorer, propellrar eller andra drivande system, beroende på farkostens utformning. Den totala drivkraften utgör summan av dessa framåtriktade bidrag och verkar i samma huvudsakliga riktning som farkostens önskade rörelse. För färd med konstant hastighet måste drivkraften balansera den totala motståndskraften.

Tyngdkraften verkar nedåt genom systemets tyngdpunkt och motsvarar farkostens totala vikt. För att farkosten ska kunna lyftas ur vattnet måste denna kraft balanseras helt eller delvis av hydrodynamiska krafter från de bärande ytorna. Vid låga hastigheter eller innan farkosten lyfts upp ur vattnet kan även flytkraften bidra till kraftbalansen, och bör därför beaktas i en fullständig beskrivning av systemets vertikala jämvikt.

Utöver kraftbalansen är även momentbalansen central. Eftersom de olika kraftbidragen angriper i olika punkter längs och tvärs farkosten uppstår moment kring systemets tyngdpunkt. För ett stabilt hydrofoilsystem krävs därför inte bara att summan av krafterna är i balans, utan även att summan av momenten är balanserad.



Figur 2.2: Schematisk illustration av de generella krafter som verkar på ett hydrofoilsystem. Figuren visar tyngdkraft, drivkraft, motståndskraft samt hydrodynamiska kraftbidrag från systemets bärande ytor, där W betecknar tyngdkraft, B flytkraft, T drivkraft, D motståndskraft, L_x lyftkraftskomponent och M_x momentkomponent. Bild hämtad från Isaly m. fl. (n.d.).

2.3 Ving- och flygteori

Denna del behandlar de hydrodynamiska principer som ligger till grund för foilingbåtens funktion. När bärplanen rör sig genom vatten uppstår krafter som möjliggör övergången från displacementläge till foilande läge. Dessa krafter påverkas av hastighet, geometri och strömningens egenskaper.

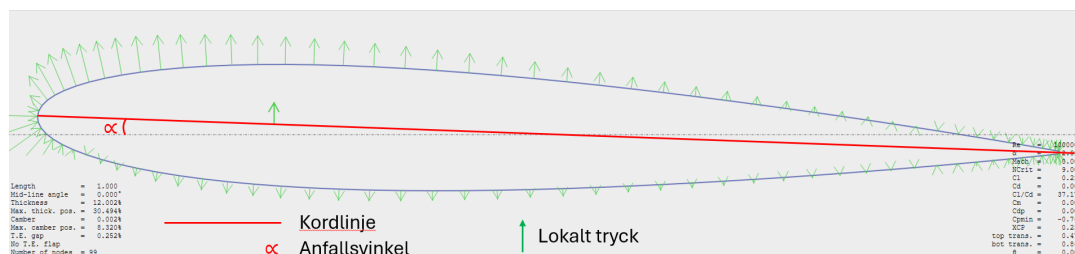
För att kunna dimensionera bärplanen och analysera stabiliteten krävs förståelse för sambandet mellan anfallsvinkel, vingprofil och de resulterande lyft- och motståndskoefficienterna. Även dimensionslösa tal, såsom Reynolds-tal och Froude-tal, är centrala eftersom de används för att karakterisera flödet i relation till den studerade geometrin och för att möjliggöra jämförelser mellan olika fall.

2.3.1 Lyftkraft

Lyftkraften hos en hydrofoil uppstår genom hur foilens geometri påverkar fluidflödet runt profilen. När hydrofoilen rör sig genom vattnet delas strömningen upp längs profilens över- och undersida. På grund av profilens form och anfallsvinkel accelereras flödet olika mycket på de två sidorna. Med hjälp av Bernoullis ekvation kan detta beskrivas som att en högre lokal strömningshastighet motsvarar ett lägre statiskt tryck. Därmed uppstår en tryckskillnad mellan foilens över- och undersida, vilket ger upphov till en resulterande kraft vinkelrät mot strömningens riktning, det vill säga lyftkraft (Massachusetts Institute of Technology, u. å).

Tryckfördelningen runt en profil illustreras i Figur 2.3. Figuren visar schematiskt hur trycket varierar längs profilens yta, där ett lägre tryck typiskt uppstår över den övre ytan och ett högre tryck över den undre ytan. Det är denna tryckskillnad, integrerad över profilytan, som ger upphov till lyftkraften. Figuren används här som en illustrativ visualisering av den tryckfördelning som uppstår till följd av strömningen runt profilen.

Ur ett flödesdynamiskt perspektiv kan lyftkraften också förstås som att hydrofoilen avlämnar vattnet nedåt när den rör sig framåt. För att åstadkomma denna riktningförändring krävs en kraftpåverkan på fluiden, och enligt Newtons tredje lag uppstår då en lika stor motriktad kraft på hydrofoilen. Denna kraft bidrar tillsammans med tryckfördelningen runt profilen till att farkosten kan lyftas upp ur vattnet (Massachusetts Institute of Technology, u. å).



Figur 2.3: Illustration av tryckfördelningen runt en foilprofil vid given anfallsvinkel. De gröna pilarna representerar det lokala trycket vinkelrätt mot profilytan, där längre pilar motsvarar högre lokalt tryck. Figuren visar hur trycket varierar längs profilens över- och undersida och hur denna tryckskillnad ger upphov till den resulterande lyftkraften. Figuren är framtagen av författarna i Flow5.

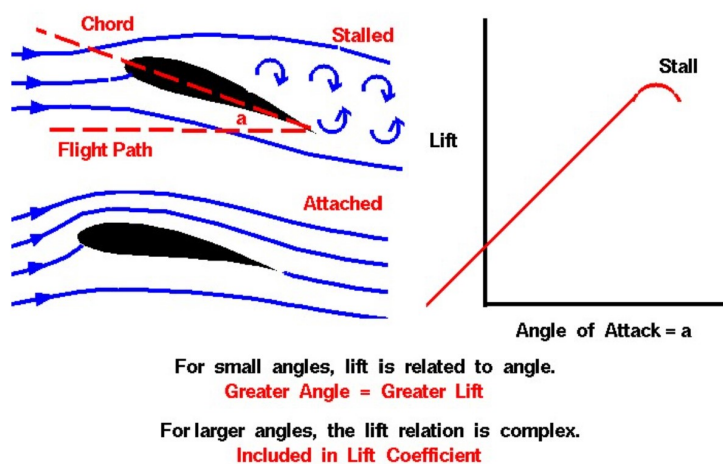
2.3.2 Anfallsvinkel

Anfallsvinkeln definieras som vinkeln mellan profilens kordlinje och den inkommande fluidens strömningens riktning, se Figur 2.4. Anfallsvinkeln har stor betydelse för den genererade lyftkraften. För små till måttliga vinklar ökar lyftkraften generellt med ökande anfallsvinkel, eftersom profilen då avleder strömningen mer och därmed skapar en större tryckskillnad över profilen (NASA Glenn Research Center, 2024a).

Vid högre anfallsvinklar blir sambandet mer komplext. En viktig orsak är utveck-

lingen av gränsskiktet, det tunna skikt av fluid närmast profilytan där viskösa krafter är betydelsefulla. Om anfallsvinkeln blir tillräckligt stor kan gränsskiktet inte längre följa profilens geometri, utan lossnar från ytan. Detta fenomen kallas *separation*. När separation uppstår förändras den effektiva strömningsbilden runt profilen, vilket vanligtvis leder till försämrad lyftgenerering och ökat motstånd (NASA Glenn Research Center, 2024a).

Om anfallsvinkeln ökas ytterligare kan profilen drabbas av *stall*. Stall innebär att lyftkraften minskar kraftigt till följd av omfattande separation över profilen. Samtidigt blir flödet mer instationärt, vilket innebär att lyftkraften kan variera snabbt över tid. Detta medför försämrad prestanda och kan även leda till försämrad stabilitet hos systemet (NASA Glenn Research Center, 2024a).



Figur 2.4: Illustration av anfallsvinkel. Bild hämtad från NASA Glenn Research Center, använd enligt NASA:s riktlinjer för bilder och media (NASA, u. å-b; NASA Glenn Research Center, 2024a).

2.3.3 Vingprofiler

Det finns många olika typer av vingprofiler som används i hydrofoilsystem. En vingprofil beskriver vingens tvärsnittsform och kan ha flera olika geometrier och storlekar. Formen på vingprofilen har en avgörande betydelse och påverkar hur vattnet strömmar runt vingen. Beroende på strömningsförhållandena kring profilen genereras olika stor lyftkraft. Lyftkraften måste vara tillräckligt stor för att bära upp farkostens egenvikt och lyfta skrovet ur vattnet (Massachusetts Institute of Technology, u. å).

Vid val av vingprofil är det viktigt att analysera vilken profil som är mest lämplig för ändamålet. Vingprofiler har olika egenskaper och används därför för olika syften. Det finns profiler som är asymmetriska och utformade för att generera hög lyftkraft, vilka ofta används som huvudvinge i hydrofoilsystem. Det finns även symmetriska profiler (t.ex. NACA-profiler), vilka ofta används som stabiliserande ytor (Massachusetts

Institute of Technology, u. å).

Ett hydrofoilsystem består vanligtvis av två vingar samt ett eller flera stag. För att uppnå god prestanda kombineras ofta asymmetriska och symmetriska profiler. Denna kombination möjliggör hög lyftkraft samtidigt som systemets stabilitet förbättras. Den asymmetriska profilen används vanligtvis på huvudvingen för att generera hög lyftkraft, medan den symmetriska profilen ofta används på stabilisatorn eftersom den ger liknande egenskaper vid både positiva och negativa anfallsvinklar. Detta är fördelaktigt då stabilisatorn behöver kunna motverka rörelser i flera riktningar. Det är dock även möjligt att använda symmetriska profiler på båda vingarna beroende på systemets krav på stabilitet, reglering och styrbarhet. (Massachusetts Institute of Technology, u. å).

2.3.4 Lyft- och motståndskoefficienter

I detta avsnitt presenteras de grundläggande ekvationer som används för att beskriva lyftkraft och motståndskraft hos en hydrofoil. Fokus ligger på definitionen av lyft- och motståndskoefficienterna C_L och C_D , samt hur dessa används tillsammans med fluidens densitet, hastigheten och en vald referensarea för att beräkna de hydrodynamiska krafterna. Detta knyter därmed an till den tidigare diskussionen om lyftgenerering, vingprofiler och anfallsvinkel.

2.3.4.1 Definitioner: C_L , C_D och referensarea A

Lyft- och motståndskoefficienterna är dimensionslösa storheter som används för att beskriva hur en viss profil genererar lyftkraft respektive motstånd under givna flödesförhållanden (NASA Glenn Research Center, 2024c, 2025). Genom att uttrycka krafterna i koefficientform blir det möjligt att jämföra olika profiler och driftfall oberoende av skala.

Koefficienterna definieras med hjälp av det dynamiska trycket q och en vald referensarea A enligt

$$C_L = \frac{F_L}{qA}, \quad C_D = \frac{F_D}{qA} \quad (2.1)$$

Här betecknar F_L lyftkraften och F_D motståndskraften. Referensarean A väljs normalt som foilens planformarea, medan q betecknar det dynamiska trycket. Koefficienten C_L beskriver därmed hur effektivt profilen genererar lyft, medan C_D beskriver det motstånd som uppstår till följd av tryckfördelning, friktion och andra förlustmekanismer (NASA Glenn Research Center, 2024b, 2024c). Eftersom krafterna definieras med hjälp av det dynamiska trycket följer också att både lyftkraft och motståndskraft varierar med kvadraten på hastigheten. Detta är en central egenskap hos hydrofoilsystem, eftersom även små förändringar i fart kan ge stora förändringar i genererad kraft och därmed påverka farkostens stabilitet och beteende.

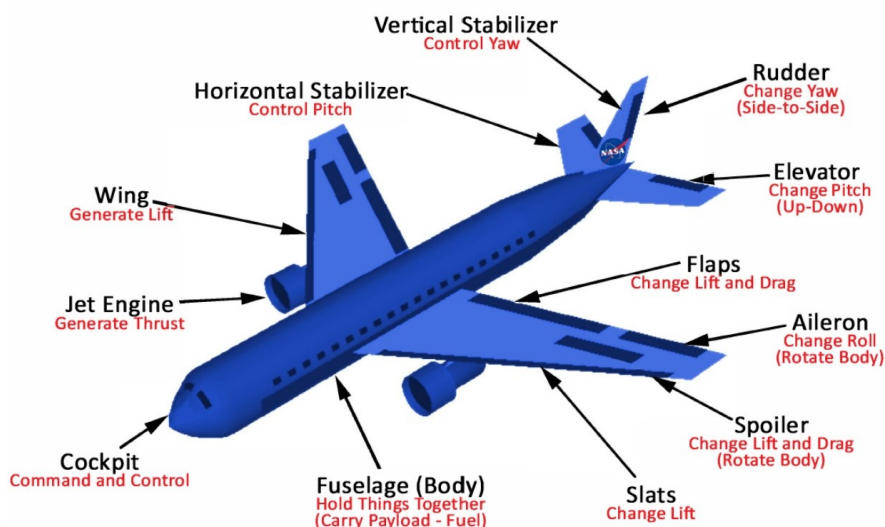
2.3.4.2 Kvalitativa beroenden: anfallsvinkel och Reynolds tal

Lyft- och motståndskoefficienterna C_L och C_D är inte konstanta, utan varierar beroende på bland annat profilens geometri, anfallsvinkeln och Reynolds tal. För små till måttliga anfallsvinklar ökar lyftkoefficienten vanligtvis med ökande anfallsvinkel, medan motståndskoefficienten också ökar men ofta i lägre takt. När anfallsvinkeln närmar sig området där separation uppstår förändras dock detta samband, och både lyft- och motståndsegenskaperna kan ändras snabbt (Gregory & O'Reilly, 1970; NASA Glenn Research Center, 2024a; Sheldahl & Klimas, 1981).

Även Reynolds tal påverkar koefficienternas värden eftersom det beskriver förhållandet mellan tröghetskrafter och viskösa krafter i flödet (NASA Glenn Research Center, u. å-b). Detta innebär att gränsskiktets beteende, övergång mellan laminärt och turbulent flöde samt benägenheten för separation påverkar både lyftkraft och motstånd. Vid analys och dimensionering av hydrofoils är det därför viktigt att använda koefficienter som motsvarar relevanta driftförhållanden.

2.3.5 Kontrolltytor

För att styra ett luft- eller hydrofoilsystem används olika typer av rörliga ytor som påverkar den lokala tryckfördelningen och därmed de krafter och moment som verkar på systemet. Vilken typ av yta som används beror på vilken rörelse som ska påverkas, exempelvis Rullning, Stigning eller Gir. På konventionella flygplan används ofta separata roderytor, medan mer integrerade lösningar förekommer på farkoster med annan geometri. Exempel på vanliga roder- och klaffytor visas i Figur 2.5 (Federal Aviation Administration, 2023; NASA, u. å-a; NASA Glenn Research Center, u. å-a).



Figur 2.5: Översikt av vanliga roder- och klaffytor på ett flygplan. Bild hämtad från NASA Glenn Research Center, använd enligt NASA:s riktlinjer för bilder och media (NASA, u. å-b; NASA Glenn Research Center, 2024a).

En *aileron* är en rörlig yta placerad nära vingens bakkant, vanligtvis långt ut mot vingtippen. Ailerons används i första hand för att styra farkostens rullrörelse. Detta sker genom differentiell deflektion, där den ena ytan vinklas uppåt och den andra nedåt. Därmed förändras lyftkraften på respektive sida, vilket skapar ett moment kring farkostens längdaxel (Federal Aviation Administration, 2023; NASA Glenn Research Center, u. å-a).

En *elevator* är en rörlig yta som normalt är placerad på den horisontella stabilisatorn. Dess huvudsakliga funktion är att påverka stigningrörelsen genom att förändra den aerodynamiska eller hydrodynamiska kraften längst bak på farkosten. Genom denna kraftförändring uppstår ett moment kring tyngdpunkten som får nosen att rotera uppåt eller nedåt (Federal Aviation Administration, 2023; NASA Glenn Research Center, u. å-a).

Ett *rudder* är placerat på den vertikala stabilisatorn och används för att påverka girrörelsen. När rodret deflekteras uppstår en sidkraft som skapar ett moment kring farkostens vertikalaxel (Federal Aviation Administration, 2023; NASA Glenn Research Center, u. å-a).

En *flap* skiljer sig från ovanstående roderytor genom att dess primära syfte normalt inte är att direkt styra farkostens orientering, utan att förändra vingens eller foilens lyft- och motståndsegenskaper. Genom att fälla ned en flap ökar normalt både den effektiva välvningen och den genererade kraften, men även motståndet ökar. Flaps används därför ofta för att öka bärformågan vid låga hastigheter eller för att förändra ett systems kraft- och momentbalans (Federal Aviation Administration, 2023; NASA Glenn Research Center, u. å-a).

En *elevon* är en kombinerad roderyta som förenar funktionerna hos en elevator och en aileron. Den används ofta på farkoster med deltaformad planform eller andra konfigurationer där separata höjd- och skevroder inte är praktiska. När båda elevons deflekteras lika mycket påverkas främst Stigning, medan differentiell deflektion ger ett rullningmoment (NASA, u. å-a).

Skillnaden mellan dessa ytor ligger alltså främst i vilken typ av kraftförändring de åstadkommer och därmed vilket moment de genererar kring farkostens tyngdpunkt. Ailerons används huvudsakligen för rullning, elevators för stigning, rudders för gir, flaps för att förändra lyft- och motståndsegenskaper, och elevons kombinerar funktionerna hos elevator och aileron i en och samma yta (Federal Aviation Administration, 2023; NASA, u. å-a; NASA Glenn Research Center, u. å-a).

2.3.5.1 Momentberäkning för roder- och klaffytor

När en roder- eller klaffyta deflekteras förändras kraftfördelningen på den aktuella bärande ytan. Denna kraft angriper i en viss punkt och ger därmed upphov till ett moment kring farkostens tyngdpunkt eller kring en vald referenspunkt. Ett moment beskriver en krafts tendens att orsaka rotation och bestäms av kraftens storlek samt dess vinkelräta avstånd till rotationscentrum (Baker m. fl., u. å).

I sin enklaste form kan momentets belopp beräknas som

$$M = Fd_{\perp}, \quad (2.2)$$

där F är kraftens storlek och d_{\perp} är det vinkelräta avståndet mellan kraftens verkningslinje och den punkt eller axel kring vilken momentet beräknas (Baker m. fl., u. å).

I vektorform kan samma samband skrivas som

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}, \quad (2.3)$$

där \mathbf{r} är positionsvektorn från referenspunkten till kraftens angreppspunkt och \mathbf{F} är kraftvektorn. Med denna formulering kan både momentets storlek och riktning bestämmas (Baker m. fl., u. å).

För en farkost med flera bärande eller styrande ytor bestäms det totala momentet som summan av momentbidragen från samtliga krafter:

$$\sum \mathbf{M} = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i. \quad (2.4)$$

Detta innebär att varje bärplan, roderyta, klaffyta, framdrivningsenhet och även tyngdkraften kan bidra till det totala momentet beroende på var kraften angriper.

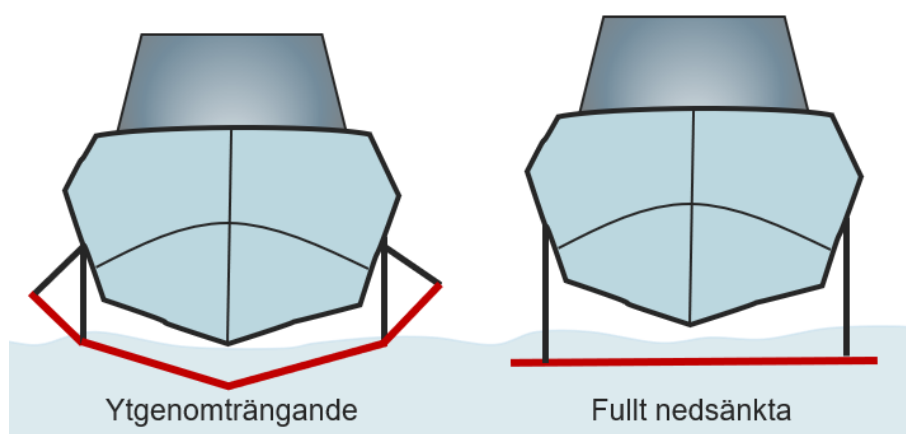
Vid analys av ett hydrofoilsystem är detta särskilt viktigt eftersom en förändring i lyftkraft på en enskild yta inte bara påverkar den totala vertikala kraftbalansen, utan även systemets stigning-, rullning- eller girmoment. En nedåtriktad kraft på en bakre yta kan exempelvis ge ett stabiliserande stigningsmoment, medan differentiella kraftändringar mellan vänster och höger sida kan skapa ett rullningsmoment. På motsvarande sätt kan sidokrafter eller asymmetriska motståndsbidrag ge upphov till girmoment.

Momentanalysen bygger därför på två steg: först bestäms kraften som varje yta genererar, och därefter beräknas respektive krafts momentbidrag utifrån dess angreppspunkt i förhållande till tyngdpunkten eller annan vald referenspunkt. För att systemet ska vara i rotationsjämvikt krävs att summan av dessa moment är noll. Om summan inte är noll kommer farkosten att börja rotera kring den aktuella axeln (Baker m. fl., u. å).

2.3.6 Hydrofoilkonfiguration

När en båt färdas genom vattnet påverkas den av flera olika rörelser. Det blir därför extra viktigt för en farkost med bärplan att kunna kontrollera rörelserna och stabilisera sig under färd. Det finns tre huvudsakliga rotationsrörelser i det tredimensionella koordinatsystemet som en bärplansbåt behöver beakta, vilket är rullning, stigning och gir, som beskrivet under rubrik 2.2.1.

Enligt (Johnston, 1985) kan konfigurationen av bärplan delas in i två huvudkategorier, nedsänkta bärplan och ytgenomträngande bärplan. Dessa två typer har olika egenskaper och är lämpliga för olika användningsområden. Se figur 2.6:



Figur 2.6: Två huvudkategorierna: Ytgenomträngande bärplan och nedsänkta bärplan.

Nedsänkta bärplan, är en av de två huvudkategorierna och är placerade helt under vattenytan, vilket gör dem mindre känsliga för vågor och andra variationer. Det nedsänkta bärplanen är inte självstabiliserande vilket innebär att dem kräver aktiv reglering för att kunna bibehålla en stabil och den önskade höjden.

Ytgenomträngande bärplan, är konstruerade så att en del av vingen är ovanför vattenytan. När båten stiger upp ur vattnet så minskar lyftkraften eftersom den delen av vingen som är i vattnet blir mindre. Detsamma gäller när båten sjunker, så kommer den få mer yta av vingen i vattnet vilket leder till ökad lyftkraft. Samma gäller om den lutar i sidled, då den kompenserar åt andra hållet eftersom vingens yta blir större i vattnet, vilket ökar lyftkraften på den sidan. Det gör att den under drift kommer kunna reglera sig själv och fungerar som passiv stabilisering, vilket innebär att den genom geometrin kan reglera sig själv utan avancerade styrsystem. Den är känslig för vågor och andra variationer på vattenytan, vilket gör att den minskar i stabilitet under en högre hastighet.

2.3.7 Statisk stabilitet

Placering av tyngdpunkt har stor inverkan på hur ett foilandande fordon upplevs i vattnet. Det är däremot inte bara tyngdpunktens placering som en ensam faktor, tyngdpunktens relation till lyftkrafternas tryckcentrum samt fordonets neutralpunkt, den punkt kring vilken stignings-momentet roterar runt, spelar också roll. Samspelet mellan det här punkterna får stor effekt på fordonets självstabiliserande egenskaper i vattnet (Deperrois, 2010).

För att få en självstabiliserande effekt placeras tyngdpunkten framför fordonets neutralpunkt. Det här gör att fordonet likt en flagga i vinden alltid vill lägga sig längs vindflödet, i detta fall vattnets flöde. Det här gör att så länge fordonet har tillräckligt flöde runt sin kropp kan det korrigera störningar som strömmar/turbulens i vattnet. Om istället tyngdpunkten ligger mitt på neutralpunkten kommer fordonet att amplifiera störningarna och fortsätta rotationen vid till exempel strömt vatten.

Om man till sist har tyngdpunkten bakom neutralpunkten blir kroppen också stabil men i motsatt håll vilket gör att den vill vända på sig till den motsatta riktningen. Det sista exemplet kan jämföras med att hålla flaggan så att den pekar mot vinden vilket inte fungerar när den släpps (Deperrois, 2010).

2.3.8 Ventilation och kavitation

Inom ramen för projektet är förståelsen för de hydrodynamiska fenomenen kavitation och ventilering avgörande för farkostens prestanda och stabilitet (Wang m. fl., 2025).

2.3.8.1 Kavitation

Kavitation utgör en övre gräns för systemets hastighet. När trycket på vingarnas ovansida sjunker tillräckligt mycket kan ångbubblor bildas i flödet. Bubblornas bildning och kollaps stör tryckfältet kring profilen, vilket kan leda till flödesseparation och ökad turbulens. Detta försämrar vingens hydrodynamiska egenskaper genom minskad lyftkraft och ökat motstånd. De kollapsande bubblorna kan dessutom orsaka materialskador på propellrar och vingar (NASA, 1998). Propellerbladens spetsar rör sig med betydligt högre hastighet genom vattnet än själva farkosten, vilket innebär att kavitation ofta uppstår på propellern innan den uppträder på masten eller vingarna. Detta kan leda till accelererat slitage på propellern (Kerwin, 2007).

2.3.8.2 Ventilering

Ventilering är en mer omedelbar risk vid ytnära foiling och innebär att luft suges ner längs masten och når bärplanen, vilket kan orsaka ett plötsligt och kraftigt tapp av lyftkraft. För att det autonoma styrsystemet ska kunna bibehålla en stabil flyghöjd krävs att mastens och vingarnas utformning minimerar risken för att luft introduceras i systemet (Anderberg, 2024). Propellern är särskilt utsatt för ventilering, då den vid exempelvis svängar kan befinna sig närmare vattenytan än övriga komponenter (Taghinia & Esmaeili, 2025).

2.3.8.3 Åtgärder för att undvika kavitation och ventilering

Att gå från en tvåbladig till en tre- eller fyrbladig propeller kan minska risken för både kavitation och ventilering. Med fler blad fördelas trycket över en större yta, vilket innebär att varje enskilt blad inte behöver generera lika stora tryckskillnader för att skapa framdrivning (Kerwin, 2007). Detta reducerar risken för att det lokala trycket sjunker under vätskans ångtryck och därmed att kavitation uppstår.

Ytterligare en metod för att motverka dessa fenomen är att använda två motroterande propellrar. Genom att låta propellrarna rotera i motsatta riktningar reduceras de roterande virvlar som annars uppstår i kölvattnet (Johansson, 2023). Detta minskar sannolikheten för att virvlarna når vattenytan och orsakar ventilering.

Man kan även minska risken för kavitation genom att använda en ducted propeller. Det är en propeller som omges av en kanal (duct) för att stabilisera tryckförhållanden på propellern och ge den ett jämnt flöde. Detta ger enligt (Donyavizadeh m. fl.,

2024): ökad effektivitet, förbättrad manövrerbarhet, högre dragkraft samt minskad kavitation och buller under vissa driftförhållanden.

2.4 Mast

Masten, på engelska *strut* eller även kallad vertikal, har som funktion att koppla samman foilsystemet med farkostens skrov. Dess primära uppgift är att överföra lyftkraften från vingarna till skrovet samtidigt som deformationer i form av böjning och vridning måste begränsas. Masten utgör därmed en kritisk komponent som kräver både hög strukturell styvhet och lågt hydrodynamiskt motstånd.

2.4.1 Hydrodynamisk utformning

För att minimera mastens motstånd genom vattnet används en tunn, symmetrisk vingprofil. En symmetrisk profil genererar ingen lyftkraft (sidokraft i detta fall) vid noll anfallsvinkel. En tunn profil minskar dessutom den mängd vatten som behöver accelereras undan, vilket påverkar motståndet enligt ekvation ?? (Anderson, u. å).

2.4.2 Strukturell styvhet

Masten fungerar som en hävarm, där belastningen ökar med avståndet från infästningen. Detta medför betydande krafter i mastens infästningar. För att undvika oönskade deformationer, såsom böjning och vridning, krävs hög böj- och vridstyvhet. Otillräcklig styvhet kan leda till kursavvikelse och förlust av lyftkraft (U.S. Navy Bureau of Ships, 1954).

2.5 Propulsion

Propulsion är ett engelskt begrepp som betyder framdrivning och beskriver hur en kropp accelereras framåt av en drivande kraft. Fenomenet baseras på Newtons tredje lag, vilket innebär att varje aktion ger upphov till en lika stor och motsatt reaktion. Den drivande kraften ger således upphov till en reaktionskraft som sätter fordonet i rörelse (OpenStax, n.d.).

I detta arbete innebär framdrivning att en kraft skapas genom att accelerera vatten (aktion), vilket i sin tur ger upphov till en reaktionskraft på båten som driver den framåt.

Den genererade kraften kan beräknas med följande ekvation (NASA, n.d.-b):

$$F = \dot{m}(v_{ut} - v_{in}) + A_{in}(p_{ut} - p_{in})[N] \quad (2.5)$$

Där \dot{m} är massflödet, i det här fallet av vatten. v_{ut} och v_{in} står för utlopp respektive inloppshastighet av vattnet. Sammanlagt fås då vattnets skillnad i rörelsemängd och därmed en drivande kraft. Det samma gäller även för p_{ut} och p_{in} som är storheter för

trycket i vattnet vid utlopp samt inlopp. Till sist används även A_{in} för att beräkna eventuell tryckskillnad som skapar ytterligare i framdrivande kraft.

Detta motsvarar den drivande kraft som, via reaktionskraften, accelererar kroppen framåt. Ekvationen kan förenklas genom att försumma tryckskillnaden mellan in- och utloppet:

$$F = \dot{m}(v_{ut} - v_{in}) \quad (2.6)$$

Vridmomentet från en elmotor kan beräknas utifrån sambandet mellan effekt och vinkelhastighet. Den grundläggande relationen ges av (Chapman, 2011)

$$P = M \cdot \omega [W] \quad (2.7)$$

där P är effekten, M är vridmomentet och ω är vinkelhastigheten. Vinkelhastigheten kan i sin tur uttryckas som en funktion av varvtalet n enligt

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} [rad/s] \quad (2.8)$$

Genom att kombinera dessa uttryck kan vridmomentet skrivas som en funktion av effekt och varvtal. Detta ger följande samband:

$$M = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P}{n} [Nm] \quad (2.9)$$

2.5.1 Propeller

Propellrar används inom flera områden för att skapa framdrivning. De vanligaste exemplen är flygplan och båtar, som sedan länge använder denna teknik för att generera en accelererande kraft. Propellern fungerar i grunden på samma sätt i båda fallen, med vissa skillnader, exempelvis ventilation som beskrevs ovan. Ventilation kan endast uppstå för marina propellrar, eftersom flygplanspropellrar enbart är omgivna av luft och saknar en fri vattenyta att bryta (Stone Marine Propulsion, 2021).

I grunden kan varje propellerblad betraktas som en roterande vinge. Utöver den kraft som genereras genom att accelerera vatten i motsatt riktning till farkostens rörelse uppstår även lyftkraft. Propellern har en sida med lägre tryck och en sida med högre tryck, och denna tryckskillnad genererar en dragkraft som accelererar kroppen framåt, mot lågtryckssidan (Stone Marine Propulsion, 2021).

Vid propellerdrivning finns flera faktorer som påverkar exempelvis genererad kraft, varvtal och verkningsgrad. Propellerbladens stigning är en central parameter som påverkar topphastighet, acceleration och erforderligt vridmoment (ePropulsion, n.d.). En lägre stigning ger snabbare acceleration men lägre topphastighet, medan högre

stigning möjliggör högre topphastighet på bekostnad av att ett större vridmoment krävs för att driva propellern (Massachusetts Institute of Technology, 2005) .

Ytterligare en viktig faktor är aspect ratio, vilket är förhållandet mellan vingspann och kordlängd hos ett propellerblad. En högre aspect ratio innebär ett längre spann och kortare kord, det vill säga en lång och smal geometri, medan en lägre aspect ratio motsvarar det motsatta. Fördelar med hög aspect ratio är minskade energiförluster och lägre inducerat motstånd (Embry-Riddle Aeronautical University, n.d.), vilket beror på reducerade tipvirvlar och därmed en större andel användbar framdrivande kraft (NASA, n.d.-a). Nackdelen är att hastigheten vid bladspetsen ökar, vilket ger lägre tryck på lågtryckssidan och därmed ökad risk för kavitation. Den smala geometrin medför även lägre strukturell hållfasthet.

Lägre aspect ratio innebär att trycket fördelas över en större kordlängd, alternativt att vingspannet är kortare, vid konstant area. Vilket reducerar extrema tryck på lågtryckssidan (Massachusetts Institute of Technology, 2005). Detta ger även bättre strukturell hållfasthet samt en mer stabil kraftöverföring och bättre "grepp" i vattnet. Nackdelarna är ökade tipvirvlar och därmed lägre verkningsgrad, särskilt vid högre hastigheter. Dessutom ligger en större del av bladytan nära navet, vilket medför större flödesstörningar och ytterligare effektivitetsförluster (NASA, n.d.-a).

Slutligen påverkar även antalet blad propellerns egenskaper i vattnet. Fler blad innebär att belastningen fördelas över flera blad, vilket minskar den kraft varje blad måste bära. Detta reducerar risken för kavitation, eftersom tryckskillnaden per blad blir lägre. Fler blad ger även en mer kontinuerlig kraftöverföring till vattnet, vilket kan förbättra greppet och accelerationen.

Samtidigt leder ett ökat antal blad till fler bladspetsar, vilket genererar fler tipvirvlar och därmed sämre verkningsgrad. En större total bladyta medför också ökat friktionsmotstånd. Färre blad ger därför generellt högre verkningsgrad, särskilt vid höga hastigheter, vilket kan resultera i högre topphastighet (Sinaga m. fl., 2022).

2.5.2 Jet-drivning

Ett annat, mer komplext exempel på framdrivning är jetdrivning. De jetsystem som används i vatten har, istället för en exponerad propeller, en inkapslad impeller som suger in vatten i systemet snarare än att accelerera det direkt bakåt. Impellern genererar ett tryck som används för att sätta vattnet i rörelse och accelerera det i önskad riktning, vilket skapar en framdrivande kraft (Jiang m. fl., 2025).

Det finns både för- och nackdelar med jetdrivning. En fördel är att impellern är skyddad och därmed inte riskerar att slå i föremål och skadas på samma sätt som en konventionell propeller. Systemet erbjuder även god manövrerbarhet, eftersom vattenstrålen kan riktas, vilket är svårare med en propeller (Wärtsilä, n.d.). Vidare minskar risken för kavitation vid höga hastigheter, då impellern är placerad i en kanal som är utformad för att ge ett jämnt flöde samt motverka de tryckfall som orsakar kavitation. Detta medför att jetsystem lämpar sig väl för fordon som opererar

vid högre hastigheter.

Nackdelar är att jetsystem generellt har låg verkningsgrad vid låga hastigheter samt att systemet innehåller fler komponenter, vilket bidrar till ökade energiförluster (Jiang m. fl., 2025).

2.6 Reglersystem

Bärplansfarkoster uppvisar särskilda stabilitetsutmaningar till följd av den starka kopplingen mellan lyftkraft, hastighet och anfallsvinkel. Eftersom lyftkraften varierar med kvadraten på hastigheten samt med vingens anfallsvinkel kan även små förändringar i dessa parametrar ge upphov till betydande variationer i farkostens höjd och längdstabilitet. I en marin miljö förstärks denna problematik av yttre störningar såsom vågor, vind och lastvariationer (Anderberg, 2024).

Ytpenetrerande bärplan kan i viss utsträckning uppnå passiv stabilitet genom geometrisk självreglering. För helt nedsänkta bärplan saknas denna mekaniska återkoppling, vilket medför att stabilitet måste säkerställas genom aktiv reglering (Meyer Jr., 2007). Ett återkopplat reglersystem används därför för att kontinuerligt justera styrsignaler baserat på uppmätta tillstånd.

Ett generellt återkopplat system består av ett börvärde, en mätning, en jämförelse som genererar ett reglerfel samt en regulator som påverkar systemet. Syftet är att reducera reglerfelet trots förekomst av störningar (Lennartson, 2002).

2.6.1 PID-reglering

För reglering av hastighet, höjd och orientering används i detta sammanhang en PID-regulator. Regulatorn genererar en styrsignal baserad på det momentana felet, dess tidsintegral samt dess tidsderivata enligt

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

där $e(t)$ definieras som skillnaden mellan börvärde och uppmätt värde, och K_p , K_i samt K_d utgör regulatorns förstärkningsparametrar (Lennartson, 2002).

Den proportionella termen ger en styrsignal som är direkt relaterad till felets storlek och påverkar systemets reaktionshastighet. Den integrerande termen eliminerar kvarstående stationära avvikelser genom att ackumulera felet över tid. Den derivande termen verkar dämpande genom att beakta förändringstakten hos felet och därigenom motverka snabba svängningar (Lennartson, 2002). Lämplig inställning av regulatorparametrarna är avgörande för att uppnå en stabil och tillräckligt snabb respons utan att systemet utvecklar oscillerande beteende.

2.6.2 Reglering av kontrolytor

Som tidigare nämnt under rubrik 2.3.2 kan man genom att ändra anfallsvinklarna på flapsen på vingarna ändra den lyftkraft som genereras. Denna reglering möjliggör kontinuerlig kompensation för yttre störningar och variationer i hastighet, vilket är nödvändigt för att bibehålla önskad höjd och längdstabilitet under drift (Faltinsen, 2005).

Regleringen av anfallsvinkeln sker därför kontinuerligt baserat på sensordata, exempelvis från IMU och höjdsensorer. Det uppmätta tillståndet jämförs med ett referensvärde, varpå regulatorn genererar en styrsignal som exempelvis kan justera vingens vinkel genom en servomekanism (Faltinsen, 2005).

Eftersom en foilande båt utgör ett dynamiskt system med tröghet och fördröjning måste regulatorn utformas med hänsyn till systemets tidskonstanter för att säkerställa tillräcklig dämpning och stabilitet (Åström & Murray, 2008).

2.6.3 Hastighetsreglering

Farkostens rörelse i längdled kan beskrivas med

$$m\dot{v} = T - D \quad (2.11)$$

där m är farkostens massa, \dot{v} betecknar tidsderivatan av hastigheten, det vill säga farkostens acceleration i längdled, T är framdrivningskraften och D är det hydrodynamiska motståndet. Motståndet ökar med hastigheten och kan antas vara proportionellt mot v^2 (von Ellenrieder, 2021).

Reglerfelet för hastigheten definieras som

$$e(t) = v_{\text{ref}} - v(t) \quad (2.12)$$

där v_{ref} är önskad hastighet och $v(t)$ är uppmätt hastighet.

Regulatorn använder detta fel för att justera motorpådraget, vilket påverkar propellerns varvtal och därmed framdrivningskraften. Eftersom hastigheten påverkar lyftkraften, och därmed farkostens höjd, är hastighetsregleringen nära kopplad till höjdregeringen. Systemet utgör således ett kopplat, icke-linjärt dynamiskt system där samverkan mellan delregulatorerna måste beaktas vid dimensionering och inställning (Anderberg, 2024).

2.7 Styrsignaler och sensorer

Elektroniksystemet utgör en central del av en foilingbåts funktion och ansvarar för framdrivning, styrning och datainsamling under drift. Genom ett integrerat system

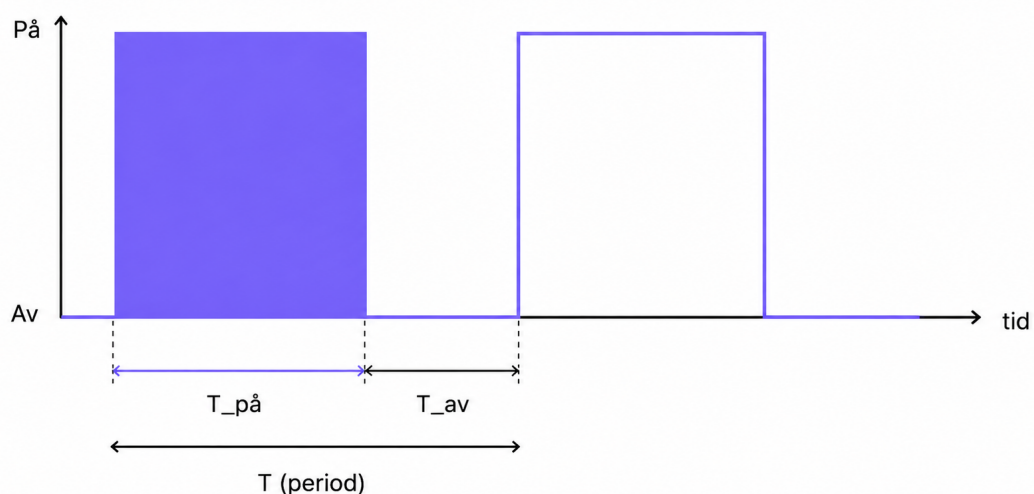
av sensorer, styrdator och aktuatorer kan farkostens rörelser övervakas och regleras i realtid. Sensorer mäter exempelvis orientering, acceleration och andra dynamiska tillstånd, vilket ger information om båtens position och rörelse i förhållande till vattenytan. Dessa signaler behandlas av ett styrsystem som beräknar nödvändiga korrigeringar och skickar styrsignaler till motorer och servon. På så sätt kan systemet aktivt stabilisera farkosten och anpassa dess beteende till förändringar i hastighet, belastning och omgivande förhållanden. Elektronikens uppbyggnad och tillförlitlighet är därmed avgörande för att möjliggöra stabil och kontrollerad drift av en foilande farkost (von Ellenrieder, 2021).

2.7.1 Ultraljudssensor

En ultraljudssensor mäter avstånd genom att sända ut ljudvågor med en frekvens över 20 kHz. Eftersom människan endast kan uppfatta ljud inom intervallet 20 Hz–20 kHz är signalen inte hörbar (Purves m. fl., 2001). Avståndet bestäms genom att känna till ljudets utbredningshastighet och mäta tiden det tar för signalen att reflekteras tillbaka till sensorn (RS Components, u. å).

2.7.2 PWM

En PWM-signal är en signal som består av pulser med varierande pulsbredd. PWM står för Pulse Width Modulation (pulsbreddsmodulering). Fysiskt innebär detta att spänningen i signalkabeln växlar mellan en hög nivå, exempelvis 5 V, under pulsen och en låg nivå, exempelvis 0 V, mellan pulserna. Förhållandet mellan hög och låg nivå kallas duty cycle (arbetscykel). Ultraljudssensorn exempelvis kommunicerar avståndet genom att variera pulsbredden. En bredare puls, eller högre duty cycle, motsvarar ett större uppmätt avstånd (NXP Semiconductors, u. å). Ett exempel på en puls finns i figur 2.7.



Figur 2.7: PWM signal med 67% Duty cycle

2.7.3 RC

RC står för Remote Control, vilket innebär fjärrstyrning. Fjärrstyrning fungerar genom att en sändare registrerar exempelvis en spaks position på en fjärrkontrollning. Denna data överförs trådlöst via en bärvåg, vanligtvis kring 2,4 GHz, till en mottagare. Mottagaren avkodar signalen och omvandlar den till ett signalformat som kan tolkas av efterföljande system, exempelvis en styrdator, motor eller annan aktuator. (Futaba Corporation, u. å).

3

Systemdesign

Systemdesignen beskriver hur prototypen designades och byggdes upp som ett sammanhängande system där mekaniska, elektriska och mjukvarubaserade delsystem samverkar för att möjliggöra stabil foilingdrift. Farkosten består av ett bärplanssystem med foil, mast och framdrivning, ett skrov med överbyggnad som bär last och komponenter, samt ett styr- och sensorsystem som reglerar farkostens rörelser. Utformningen av varje del har präglats av krav på låg vikt, tillräcklig hållfasthet, god hydrodynamisk prestanda och praktisk integration mellan komponenterna.

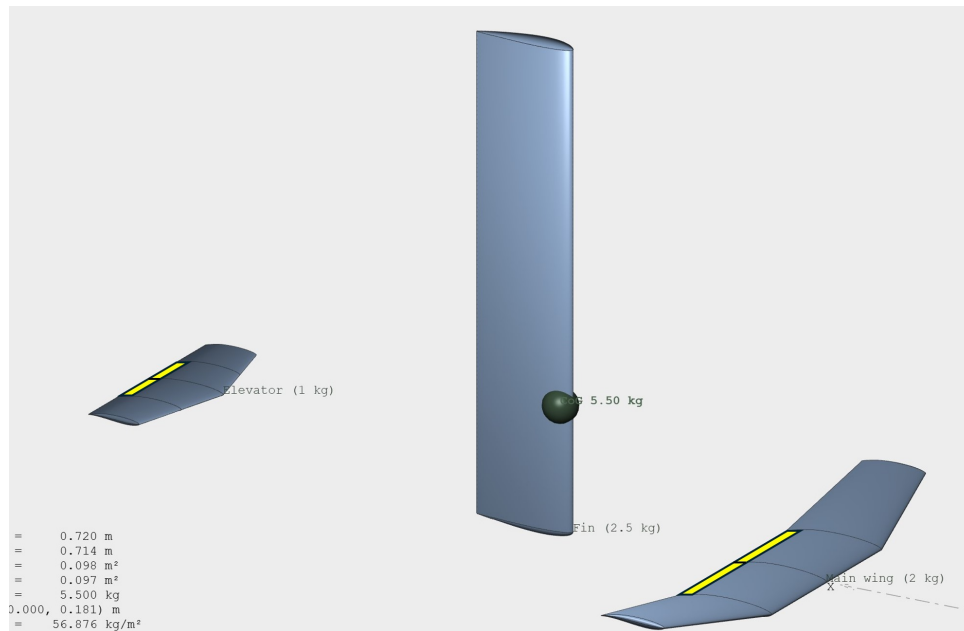
3.1 Foil

Utgångspunkten för foilkonceptet var en design med en mast, ett främre bärplan som genererar huvuddelen av lyftkraften samt en bakre stabilisator för kontroll av pitch. Utöver detta studerades lösningar för lateral styrning och stabilisering. Eftersom syftet med projektet var att undersöka en båt med endast en mast, innebar det att övriga delar av foilsystemet behövde anpassas till denna geometri och dess infästningar.

Vidare ville projektet undersöka både en lösning där det främre bärplanet huvudsakligen står för endast lyftgenerering, och där stabilisatorn används mer aktivt genom en kombination av styrbara ytor, exempelvis ailerons och elevatorfunktion. För att möjliggöra jämförelser mellan olika konfigurationer valdes därför en lösning där funktionalitet kunde byggas in i det främre bärplanet, men där denna även kan göras inaktiv beroende på vald systemkonfiguration. Detta gav flexibilitet i designen och gjorde det möjligt att utvärdera flera styr- och stabiliseringsstrategier inom samma övergripande plattform.

Efter diskussioner kring olika möjliga lösningar för styrning i gir valdes ett koncept med två motorer, där gir-reglering sker genom *differentiell motordrift*, det vill säga att motorerna genererar olika stor drivkraft på vardera sida för att skapa ett vridande moment. Detta valdes i stället för en separat kontrolllyta, såsom ett roder. Den huvudsakliga motiveringen till detta val var att minska systemets mekaniska komplexitet genom att undvika ytterligare rörliga ytor och tillhörande aktuatorer. För att maximera det gir-moment som kan genereras placerades motorerna längst ut på det främre bärplanet, vilket ger en större hävarm relativt farkostens centrumlinje

och därmed bättre förutsättningar för effektiv gir-styrning.



Figur 3.1: Tidigt designkoncept för foilsystemet med integrerade klaffytor i gult. Figuren är framtagen i programmet Flow5.

3.1.1 Främre bärplan

Det främre bärplanet dimensionerades för att generera den huvudsakliga lyftkraften i systemet och har därmed en avgörande betydelse för både prestanda och stabilitet. Ett centralt mål i designen var att uppnå hög hydrodynamisk effektivitet, vilket i detta sammanhang främst innebär ett högt förhållande mellan lyftkraft och motstånd, alltså ett högt C_L/C_D -förhållande. Samtidigt var det viktigt att välja en profil med ett förlåtande stallbeteende, eftersom ett abrupt stallförlopp kan ge kraftiga förändringar i lyftkraft och därmed försämra systemets stabilitet och reglerbarhet.

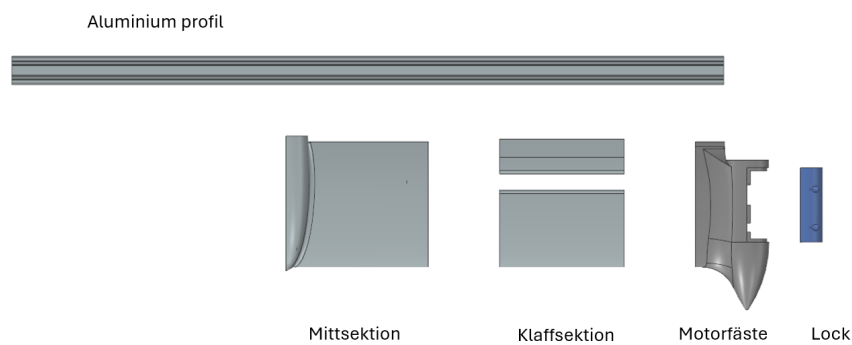
I ett tidigt skede undersöktes möjligheten att ge det främre bärplanet en viss dihedral för att erhålla en grad av passiv stabilitet, framför allt i roll. Tanken var att geometrin skulle kunna bidra till återställande moment vid små störningar och därigenom minska systemets känslighet. Eftersom farkosten avsågs använda ett aktivt regelsystem bedömdes dock ett rakt bärplan vara mer lämpligt, då detta ger ett mer direkt och reaktivt system utan att passiva geometriska effekter påverkar reglerresponser i samma utsträckning. Därtill motiverades valet av ett rakt bärplan av tillverkningsmässiga och strukturella skäl, eftersom en sådan geometri är enklare att implementera och tillverka.

Valet av vingprofil och geometri innebar därmed en avvägning mellan flera krav. Å ena sidan eftersträvades hög effektivitet och tillräcklig lyftkraft, medan å andra sidan utförbarhet, tillverkning och integration med övriga system också behövde beaktas. Konstruktionen behövde alltså utformas som en kompromiss mellan hydro-

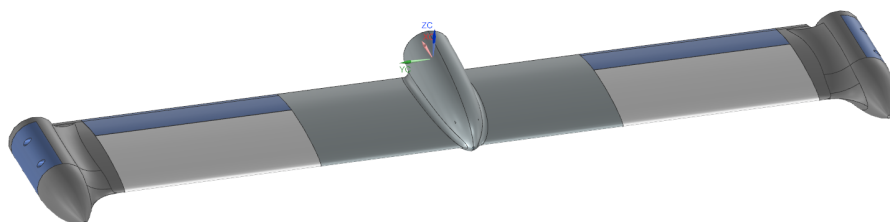
dynamisk prestanda och praktisk realiserbarhet. En mer detaljerad beskrivning av val av vingprofil ges i avsnitt 3.1.4.

Eftersom systemet baseras på differentiell motordrift placerades motorerna längst ut på det främre bärplanet. Detta gav gynnsamma möjligheter att skapa styrmoment, men medförde också konstruktionsmässiga konsekvenser. Bland annat behövde kablage kunna dras inuti vingprofilen, vilket ställde krav på profilens inre volym och geometriska utformning. Därtill tillverkades bärplanet som ett antal 3D-printade moduler, vilket innebar att konstruktionen behövde förstärkas internt. För detta ändamål integrerades en aluminiumprofil i vingens inre struktur för att öka styvhet och hållfasthet.

För profilval och preliminär dimensionering användes programvaran Flow5. Genom att analysera polärdata för olika profiler kunde förhållandet mellan C_L och C_D utvärderas över relevanta anfallsvinklar. Dessa resultat användes sedan för att dimensionera bärplanet så att tillräcklig lyftkraft kunde genereras inom det tänkta driftområdet, samtidigt som en lämplig säkerhetsfaktor kunde upprätthållas.



Figur 3.2: Exploderad vy av det främre bärplanets huvudkomponenter. Figuren är framtagen i CAD.



Figur 3.3: Monterat främre bärplan. Figuren är framtagen i CAD.

Det främre bärplanet konstruerades som en modulär struktur bestående av flera delkomponenter, se Figur 3.3. Samtliga delar utom aluminiumprofilen tillverkades genom 3D-printning i PETG (polyetentereftalatglykol). Materialvalet motiverades av att PETG erbjuder god kemisk beständighet och viss duktilitet, vilket gör att komponenterna får en viss flexibilitet före brott, samtidigt som materialet är relativt enkelt att tillverka med additiv tillverkning.

Aluminiumprofil: Aluminiumprofilen är en köpt standardkomponent som utgör den primära bärande strukturen i det främre bärplanet. Dess huvudsakliga funktion är att bidra med strukturell styrka och styvhet samt att förenkla montering av vingmodulerna längs bärplanet.

Mittsektion: Mittsektionen utgör den centrala delen av bärplanet och är utformad med en så kallad *bulb*. Denna geometri möjliggör att infästningen mellan aluminiumprofilen och masten får plats inuti konstruktionen. Mittsektionen är 3D-printad i PETG.

Klaffsektion: Klaffsektionen är uppdelad i två delar: en fast huvuddel och en rörlig klaff. Den fasta delen utgör den bärande grundstrukturen, medan klaffen möjliggör styrning och reglering genom att ändra profilens effektiva form och därmed det genererade kraftbidraget. Båda delarna är 3D-printade i PETG.

Motorfäste: Motorfästet är den yttersta modulen på bärplanet och fungerar som infästning för både motor och servon. Komponenten är utformad för att integrera framdrivningssystemet i bärplanet och samtidigt möjliggöra mekanisk koppling till de rörliga ytorna. Motorfästet är 3D-printat i PETG.

Lock: Locket är en separat komponent som används för att möjliggöra montering av servot i motorfästet samt för att underlätta kabeldragning och åtkomst vid installation. Även denna del är 3D-printad i PETG.

3.1.2 Bakre vinge

Det bakre planet skall fungera som en stabilisator för det sammansatta systemet. Istället för att bidra med en bärande lyftkraft används den för att skapa ett pitchmoment, alternativt för att reglera flyghöjden. Med det här i åtanke valdes att designa vingen över en tunn aluminiumprofil för att minimera systemets totalvikt samt för att ha en relativt rostbeständig konstruktion. I stabilisatorn används en L-profil längs vingspannet för att stärka bärplanet mot både horisontala krafter men även potentiella horisontalkrafter.

För att minimera motstånd används direktverkande servomotorer eftersom de kan gömmas inuti vingens konstruktion. Å ena sidan fås med den här lösningen en tjockare vinge vilket försämrar dess hydrodynamiska egenskaper. Å andra sidan så undkommer man att ha servomotorerna utanför vingen vilket avsevärt försämrar flödet. Bedömningen blir därav att vattnet får ett bättre flöde runt planet med den först nämnda lösningen vilket ökar vingens verkande kraft samt minimerar det inducera-

de motståndet. Vingen har designats så att det är relativt enkelt att vattentäta de viktigaste områden runt servomotorerna. Tätningen görs genom att försegla skarvar med packnings-silikon, täta axlar med o-ringar samt genom användning av marinfett för att ytterligare täta kring rörliga delar.

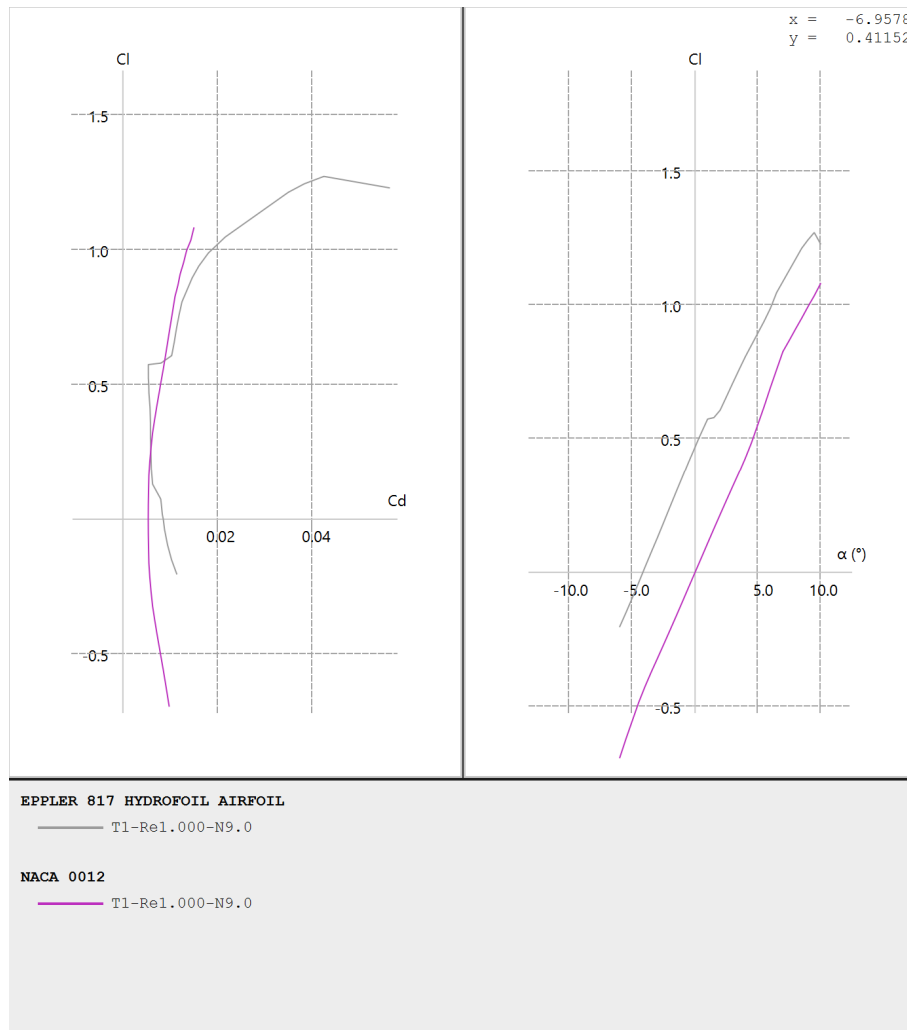
Den bakre vingens design inkluderar två aktiva kontrolllytor som kan kontrolleras gemensamt, alternativt var för sig. Kontrolllytorna upptar 50 procent av vingen och används för att justera de pitch-moment som stabilisatorn skapar. Vingen är även designad för att kunna justera kontrolllytornas vinkel upp till 20 grader åt varje håll vilket gör att vi lätt kan justera systemet anfallsvinkel för att uppnå den lyftkraft som krävs i varje tillfälle.

Både storleken på vingen samt kontrolllytornas dimensioner analyseras i Xflr5 för att ge en bättre förståelse av stabilisatorns kravbild. Analysen ger riktmärken på optimal incidence-vinkel (attack-vinkel) för bakvingen samt för dimensioneringen av såväl vingen och kontrolllytor för att skapa rätt hydrodynamiska krafter. Vidare kan även avståndet mellan tyngdpunkten och bakvingen fastställas för att uppnå det pitch-moment som eftersöks då stabilisatorn är i neutralt tillstånd.

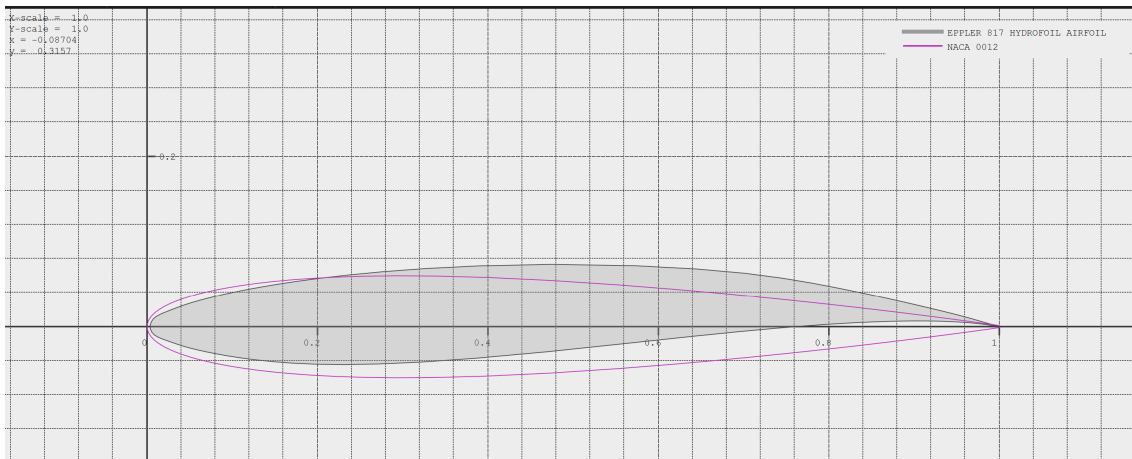
Vad gäller materialvalet var ett flertal krav etablerade. Delarna skall vara lätta att konstruera och arbeta med, krav på viss rostbeständighet samt att det måste tåla kontakt med vatten. Sammanlagt resulterade det här i att vingen konstruerades av PETG tillsammans med tidigare nämnd aluminium profil.

3.1.3 Vingprofiler

Val av vingprofil har mycket stor inverkan på hur den sammanställda vingen fungerar, exempelvis vid vilken anfallsvinkel den skapar mest lyft, bidrar med minst motstånd och tappar sin lyftkraft (när stall sker), se figur 3.4. Eftersom framvingen och bakvingen fyller helt olika syften har de även olika vingprofiler enligt figur 3.5.



Figur 3.4: Graf för lyft och effektivt lyft till Eppler 817 samt Naca 0012



Figur 3.5: Vingprofiler i simuleringsprogram

Det främre bärplanet, som tidigare nämnts, är till för att skapa lyftkraft och bära systemet samtidigt som det inte skapar motstånd. Här används därför en asymmetrisk vingprofil eftersom den har förmågan att skapa stora lyftkrafter vid en neutral och till och med negativ attack-vinkel. Eppler 817 är en tidigare beprövad asymmetrisk vingprofil inom hydro-foiling och analyserades därför. Under analys framkom att Eppler 817 visade god prestanda inom det valda arbetsområde vad gäller både stall och effektivitet. Simuleringar visade att den valda profilen gav tillräckligt med lyftkraft för att bära båten under de förhållanden som förväntats. Viktigt är också att lyftkraften skapas utan att inducera för stort motstånd, vilket är fallet för Eppler 817 med en anfallsvinkel av -1° till 4° . Detta ansågs vara ett mycket bra arbetsområde under stabil marschfart. Simuleringarna gjordes med beräknade Reynolds-tal (100 000-2 000 000), en fast hastighet på 6 m/s samt med en varierande anfallsvinkel mellan -2° till 10° . Utöver simuleringar ställdes även strukturella krav på det främre bärplanet, vilket påverkar valet av vingprofil. Kravet var att profilen skulle ha tillräcklig tjocklek för att ge plats åt förstärkningar, kabelkanaler och servo-axlar utan en överdimensionerad korda-längd, vilket Eppler 817 uppfyllde.

Till skillnad från den främre vingen, måste den bakre kunna skapa en negativ lyftkraft och en positiv lyftkraft för möjliggöra stabilisering av det sammansatta systemet. Med det här i åtanke används en symmetrisk vingprofil i designen. För att tillåta en design med integrerade servomotorer, som beskrivet i 3.1.2 används två olika vingprofiler: en tjockare i mitten av vingen och en tunnare närmare vingpetsarna för optimera systemets totala hydrodynamiska egenskaper. Vingprofilerna valdes ut till två Naca-profiler: Naca 0012 och Naca 0018, efter simulering.

Till både fram- och bakvingen gjordes även statistiska analyser på hur kontrolllytorna reglerar vingarnas skapade kraft för de olika vingprofilerna samt hur de interagerar med varandra i ett sammansatt system. Det här gav värdefull insikt till huruvida vingprofilerna fungerar i ett system med aktiv reglering.

3.1.4 Motorfäste

Motorfästet utgör ett kritiskt delsystem i farkostens konstruktion. Komponenten tjänar både som strukturell infästning för drivsystemet och som inkapsling för framvingens styrsystem. Ur ett strukturellt perspektiv krävs att motorfästet kan överföra maximalt vridmoment till farkosten utan att deformeras. Fästets placering under vatten ställer höga krav på den hydrodynamiska utformningen, samtidigt som driv- och styrsystemen bestämmer de geometriska begränsningarna för storlek och form. Ytterligare ett fundamentalt krav är en absolut försegling mot fuktintrång för att skydda den inre elektroniken.

Geometriskt har motorfästet getts en strömlinjeformad profil för att minimera hydrodynamiskt motstånd och turbulens i vattnet. Detta är avgörande för att inte inducera kavitation eller ventilering kring propellern.

Motorfästena är placerade längst ut på framvingens respektive sida, vilket gör dem till centrala komponenter för vingens övergripande sammanhållning. Genom att fixera fästet med två M5-skruvar samt en genomgående gängstång i den centrala aluminiumprofilen, komprimeras framvingen vilket säkerställer minimalt glapp mellan vingsegmenten.

Motorfästet framställs via additiv tillverkning i materialet PETG. Valet av polymer grundar sig i materialets förmånliga förhållande mellan slagåtlighet och strukturell styrka. Komponentens hållfasthet och vattentäthet maximeras genom användandet av fyra solida ytterväggar i kombination med en Gyroid-fyllnadsstruktur. Valet av just Gyroid-mönster motiveras av dess isotropa egenskaper, vilket ger en jämn styrka i alla riktningar, samt dess utmärkta styrka-till-vikt-förhållande.

För att försegla den mikroporositet som naturligt kan uppstå mellan utskriftslagren vid tillverkningen, ytbehandlas produkten avslutningsvis med klarlack.

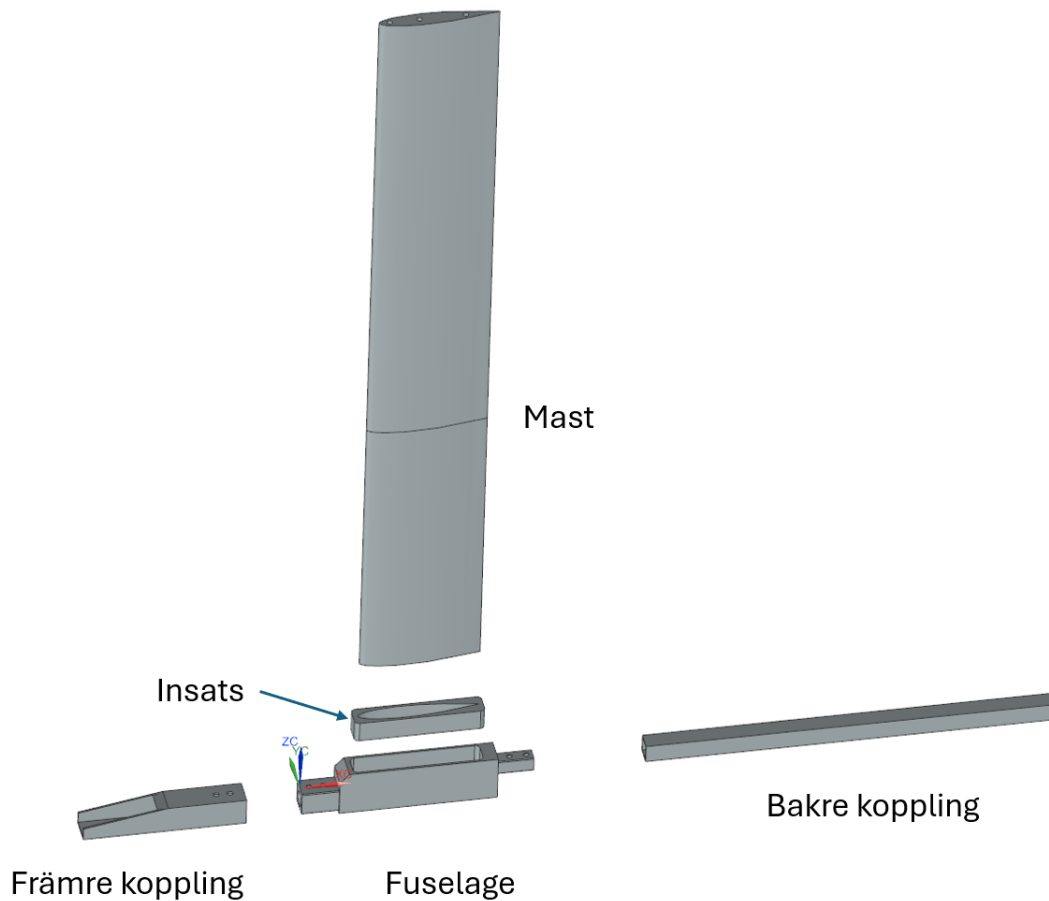
3.1.5 Kabelgenomföring

Högst upp på masten sitter en 3D-printad kabelgenomföring. Dess huvuduppgift är att täta urfräsningen i masten där kablarna leds ut, och fungera som en övergång till det rör som går vidare upp till elektronikboxen. Röret används för att inkapsla kablar och säkerställa att inget vatten leds in i masten. Eftersom genomföringen är placerad ovanför vattenytan när farkosten foilar, ställs det inte lika höga krav på strömlinjeform som för motorfästet. Designens primära fokus har istället legat på funktion och vattentäthet. Komponentens form är optimerad för att sluta tätt över mastens urfräsning och ge en stabil anslutning till röret. Den inre geometrin är utformad med en mjuk böjradie för kablarna, vilket minskar den mekaniska påfrestningen och förebygger slitage eller kabelbrott över tid.

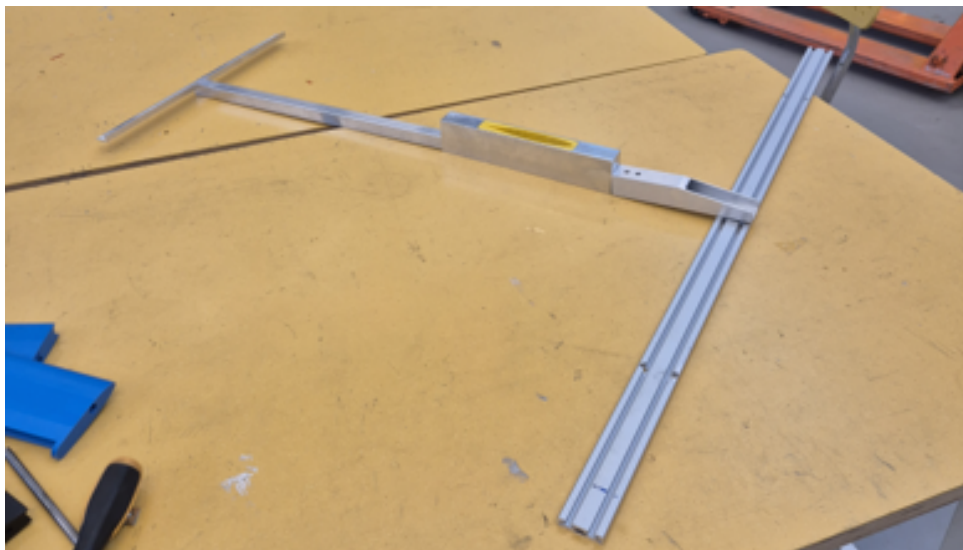
3.1.6 Fuselage och koppling till mast

För att foilsystemet ska fungera krävs en struktur som kopplar samman de främre och bakre bärande ytorna med masten. Denna struktur måste kunna överföra de

krafter och moment som uppstår i bärplanen vidare upp i masten, samtidigt som den behöver möjliggöra kabeldragning mellan masten, det främre bärplanet och stabilisatorn. Konstruktionen måste dessutom vara tillräckligt styv och i möjligaste mån spelfri för att inte försämra systemets stabilitet och reglerbarhet. Samtidigt behövde lösningen vara möjlig att tillverka med tillgängliga metoder och resurser. Den slutliga lösningen bestod därför av ett central fuselage, en 3D-printad insats samt separata kopplingar till främre och bakre bärplan, se Figur 3.6.

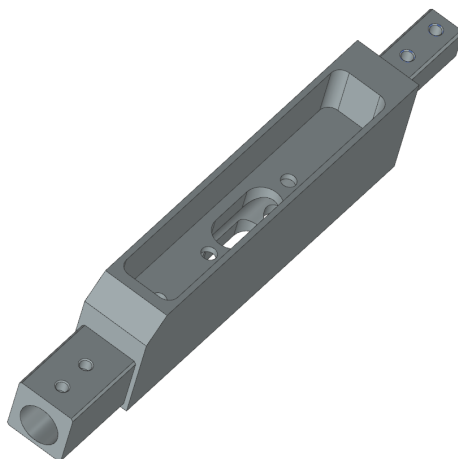


Figur 3.6: Exploderad vy av fuselage och koppling till mast.



Figur 3.7: Monterad konstruktion av fuselage och koppling till mast i verklig implementation.

Fuselage: Fuselagen utgör den centrala delen av konstruktionen och har som uppgift att ta upp de krafter och moment som överförs från bärplanen och vidarebefordra dessa upp i masten. Utmaningen i denna del låg i att ta fram en lösning som både var tillräckligt stark och styv, samtidigt som den möjliggjorde kabeldragning från mastens nederdel vidare ut till det främre respektive bakre bärplanet. Efter flera koncept valdes en lösning där fuselaget frästes ur ett solitt aluminiumblock, vilket gav god strukturell hållfasthet och styvhet.



Insats: Eftersom fuselaget tillverkades i en manuell fräs bedömdes mastens profil vara för komplex att fräsa direkt i aluminiumdelen. För att förenkla tillverkningen togs därför en solid 3D-printad insats fram, vars insida följer mastens geometri. Detta gjorde det möjligt att i stället tillverka ett rektangulärt urtag i fuselaget. Insatsen fungerar därmed som en passdel mellan masten och aluminiumkroppen. Eftersom krafterna huvudsakligen överförs via skruvförband från undersidan och insatsen främst utsätts för begränsade klämkrifter

bedömdes en 3D-printad komponent vara tillräcklig.

Främre koppling: Den främre kopplingen utgörs av en 30×30-profil som sammanfogar aluminiumprofilen i det främre bärplanet med fuselaget. En viktig funktion hos denna del är också att möjliggöra kabeldragning inuti konstruktionen. Den första iterationen tillverkades i aluminium och hade ett öppet tvärsnitt, men denna lösning visade sig vara otillräcklig i vridstyvhet, framför allt vid belastningar kopplade till rollrörelser. I den andra iterationen valdes därför en lösning i rostfritt stål med slutet tvärsnitt, vilket gav betydligt bättre vridstyvhet.

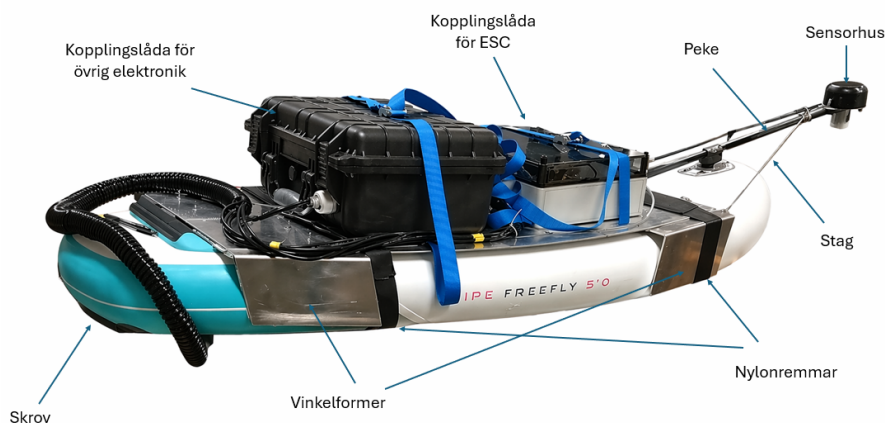
Bakre koppling: Den bakre kopplingen utgörs av en 20×20-profil som sammanbinder fuselaget med stabilisatorn. Eftersom denna del huvudsakligen dimensionerades för att överföra pitchmoment och belastningarna bedömdes vara lägre än i den främre kopplingen var aluminium tillräckligt starkt för denna applikation.

3.1.7 Mast

Masten är till för att koppla samman skrovet och dess last med fuselaget som sedan kopplas till båda fram- och bak-vingen. Det är därför synnerligen viktigt att masten är stum så att varje reglering av kraft får direkt inverkan på hela systemet. Eftersom alla motorer, båda servomotorer samt det drivande motorerna är placerade under vattnet krävs kanaler för eltillförsel från batteriet uppe på skrovet. Ytterligare en viktig egenskap är rostbeständighet eftersom delar av masten konstant är nedsänkt då båten är i användningen.

3.2 Skrov och överbyggnad

Skrov och överbyggnad utgör farkostens bärande struktur och fungerar som gränssnitt mellan hydrofoilsystemet och elektroniksystemet. En förklaring av de ingående delarna finns i figur 3.8. Konstruktionen ansvarar för att bära och fördela laster från samtliga komponenter samt möjliggör infästning av elektronik, batterier och nyttolast. Överbyggnaden är även grunden till fästet för höjdsensorn.



Figur 3.8: Förklaring av överbyggnadens delar

3.2.1 Skrov

Skrovet utgörs av en kommersiellt tillgänglig uppblåsbar wingfoilbräda. Surfbrädans dimensioner och specifikationer redovisas i tabell 3.1. Med en intern volym om 90 liter genererar skrovet en flytkraft på ungefär 900 N, vilket begränsar den totala systemmassan inklusive farkost och nyttolast till cirka 90 kg.

Valet att använda ett färdigt kommersiellt skrov gjordes för att minska utvecklings- och tillverkningskomplexitet, samt för att möjliggöra fokus på projektets primära utvecklingsområden: hydrofoilsystem, reglering och systemintegration. Ett egenutvecklat skrov bedömdes inte ge tillräcklig nytta relativt den ökade arbetsinsatsen.

En ytterligare fördel med det valda skrovet är att det är utvecklat för wingfoil-applikationer och därmed konstruerat för att bära betydande laster genom en centrerad foilinfästning. Skrovet är därför utrustat med integrerade foil tracks, vilket möjliggör robust och justerbar infästning av hydrofoilsystemet.

Den uppblåsbara konstruktionen medför dock flera begränsningar. Framförallt saknas styva strukturer för direkt infästning av övriga delsystem såsom elektronik, batterier och nyttolast. Den lokala styvheten är även begränsad, vilket gör brädan svag för punktlaster utan risk för deformation. För att hantera detta utvecklades en separat överbyggnadsstruktur som fördelar laster över en större yta på skrovet och möjliggör infästning av övriga komponenter.

Tabell 3.1: Specifikationer för vald wingfoilbräda

Längd	152,4 cm
Bredd	60,0 cm
Tjocklek	12,7 cm
Volym	90 L
Bredd vid för (OFO nose)	53,1 cm
Bredd vid akter (OFO tail)	48,6 cm
Vikt	4,5 kg

3.2.2 Överbyggnad

För att möjliggöra infästning av elektronik, höjdsensor och nyttolast på det uppblåsbara skrovet utvecklades en separat överbyggnadsstruktur bestående av en bottenplatta i aluminium.

Bottenplattan skars ut på en vattenskärare, vilket ledde till en symmetrisk form. Den fungerar som en styv och robust bas för de vattentäta kopplingslådor som innesluter farkostens elektronik. Aluminium valdes som material tack vare dess goda förhållande mellan styvhet och vikt samt dess enkla bearbetbarhet.

För att fixera plattan mot skrovet utformades fyra fästen som bockades efter brädans geometri. Dessa begränsar plattans rörelse i längs- och sidled. Konstruktionen spänns därefter fast mot skrovet med två slingor tillverkade av 50 mm bred polyesterrem i kombination med 3 mm tjock Dyneema-lina. Den breda remmen valdes för att fördela inspänningskraften över en större yta och därmed minska risken för lokal deformation av det uppblåsbara skrovet.

Två längsgående spår integrerades i bottenplattan för att möjliggöra flexibel placering av elektroniklådorna. Detta möjliggör justering av systemets tyngdpunkt under testning och trimning, vilket bedömdes viktigt för att kunna optimera farkostens längdstabilitet. Efter första fälttestet fästes även två L-profiler i aluminium på vardera sida, för att hjälpa lådorna att behålla sin plats i mitten av brädan.

3.2.3 Sensorfäste

Ultraljudssensorn som används för höjdmätning kräver fri sikt mot vattenytan framför farkosten och måste enligt sensorspecifikation placeras minst 20 cm framför skrovet samt minst 30 cm över vattenytan när farkosten befinner sig i displacementläge. För att uppfylla dessa krav utvecklades ett separat sensorfäste i form av ett peke monterat i farkostens för.

Peket tillverkades av ett återbrukat kolfiberskaft från en innebandyklubba, vilket valdes tack vare dess låga massa och höga styvhet. Skaftet förstärktes, slipades och UV-skyddsbehandlades innan montering.

I pekets bakre ände monterades en 3D-printad vinkeladapter i PETG för att skapa korrekt vinkel för peket. Denna adapter limmades mot peket med epoxi och kolfiber, enligt figur 3.9. På bottenplattan monterades slutligen ett mottagarfäste i form av en bockad aluminiumplåt, i vilket peket kan föras ned och fixeras.

För att skapa en främre infästningspunkt utan att modifiera det uppblåsbara skrovet utvecklades ett stöd som monteras i surfbrädans luftventil. Detta stöd tillverkades genom additiv tillverkning i PETG och består av en ventiladapter, ett uttag för peket samt en klämfunktion för fastspänning. För att öka strukturell hållfasthet förstärktes ventilfästet med en genomgående 2 mm kolfiberstav samt ett lager kolfiberväv runt om. Klämkomponenten förstärktes på motsvarande sätt med två lager kolfiberväv.



Figur 3.9: Förstärkning av sensorfäste med hjälp av kolfiber-laminering

För att reducera sidledsrörelser stagades peket upp med två dyneema-linor som splitsades och spändes mellan peke och bottenplatta. Detta minskar vibrationer och förbättrar sensorns riktningsstabilitet under drift.

Sensorn monterades i ett separat skyddshus utformat för att skydda elektroniken från vatteninträngning och stänk. Skyddet 3D-printades i PETG i två delar och tätades med en O-ring av gummi mellan halvorna. Sensorhuset monterades därefter på en 2 mm aluminiumplåt som bockades till önskad vinkel för att rikta sensorn korrekt mot vattenytan. Aluminiumplåten fästes med popnitar mot peket efter att ha ytbehandlats med akrylfärg och klarlack.

3.3 Framdrivning

Farkostens framdrivningssystem består av två elektriska motorer där varje motor driver en separat propeller. Systemet används både för framdrivning och gir-styrning genom differentiell motordrift, vilket innebär att framdrivning och manövrering integreras i samma delsystem. Valet av två oberoende drivlinor möjliggör därmed en mekaniskt enklare lösning utan behov av separat roder eller ytterligare undervattensaktuatorer.

3.3.1 Motorer och styrning

Två elektriska motorer valdes som framdrivningskälla med hänsyn till enkel integration, god reglerbarhet och hög effekttäthet. Elektrisk framdrivning möjliggör snabb respons vid varvtalsändringar, vilket är fördelaktigt både för acceleration och för styrning genom differentiell motordrift.

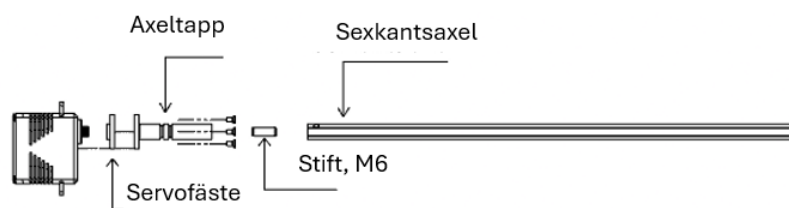
Valet av två motorer istället för en central motor gjordes främst för att möjliggöra girstyrning utan separat roder. Differentiell motordrift innebär att dragkraften ökas på ena sidan och minskas på den andra, vilket skapar ett vridande moment kring farkostens vertikalexel.

Det huvudsakliga skälet till detta val var att minska systemets mekaniska komplexitet, antalet rörliga undervattenskomponenter samt behovet av ytterligare länkar, tätningar och aktuatorer. Lösningen innebär även färre komponenter som riskerar slitage eller vatteninträngning.

Innan motorerna monterades justerades parametrar i motorstyrningen för att bättre anpassa drivsystemet till farkostens användningsområde. Framför allt modifierades PID-parametrar för att reducera ryckig gång och ojämn respons vid låga varvtal, vilket observerades vid initiala tester. Full lista över alla parametrar finns i appendix A.

3.3.2 Axlar

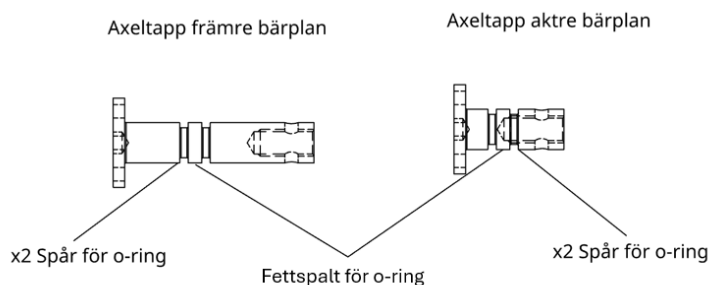
För att möjliggöra direktstyrning mellan servomotor och flaps utvecklades en specialanpassad komponent. Denna komponent har som huvuduppgift att överföra vridmomentet från motorn till roderytan, samtidigt som den utgör en vattentät genomföring genom motorfästet.



Figur 3.10: Sprängskiss av ställdon för framvingen

Axeltappen monteras direkt på servomotorns befintliga fäste. För att sammanfoga axeltapparna med de sexkantiga axlarna är båda parter gängade, vilket möjliggör montering med hjälp av ett M6-gängstift och ett fjäderstift för att hindra lösgöring. Denna konstruktion säkerställer en styv och mekaniskt stabil kraftöverföring.

För att garantera en vattentät tätning i genomföringen används en dubbel o-ringsdesign. Genom att fylla spalten mellan de två o-ringarna med smörjmedel skapas en barriär som minskar friktionen och förhindrar vatteninträngning under drift.

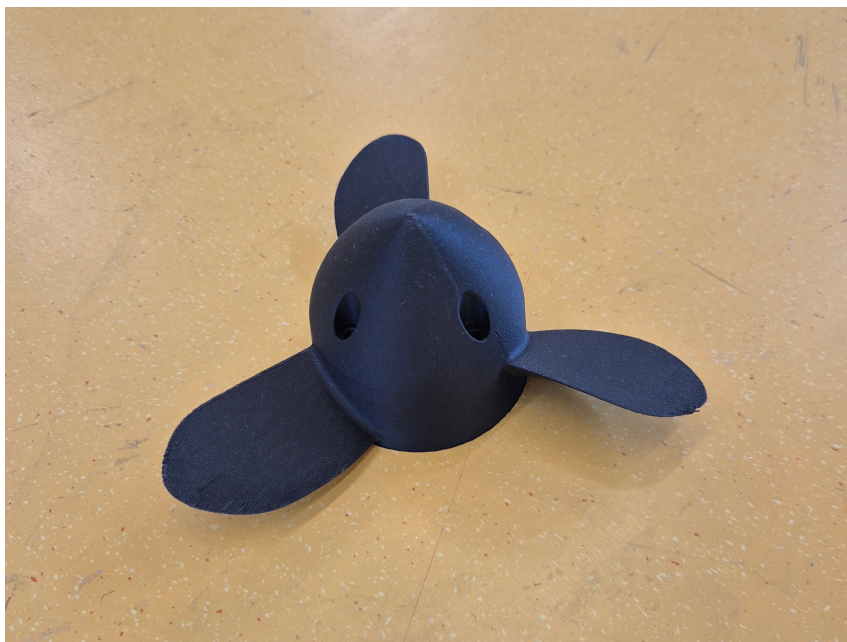


Figur 3.11: Detaljskiss av axeltapp för akre- och främre ställdon

3.3.3 Propeller

Propellrarna är 3D-printade i kolfiberförstärkt material och har tre blad. Geometrin visas i figur 3.12. Additiv tillverkning valdes för att möjliggöra snabb utveckling av geometri, diameter och stigning under projektets utvecklingsfas.

Valet av tre blad baserades på en avvägning mellan verkningsgrad, hållfasthet och kavitationsegenskaper efter tester i vattentank.



Figur 3.12: Slutgiltig propeller

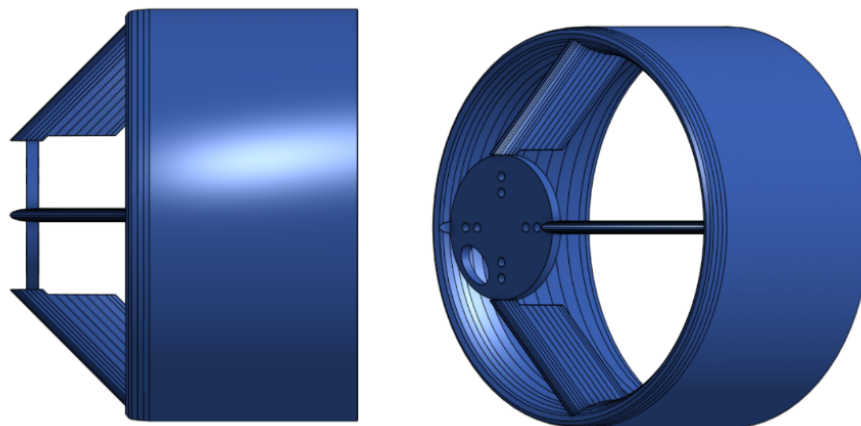
För att ytterligare förbättra prestandan designades en ducted propeller-lösning. En ducted propeller består av en propeller som omges av en kanal, vilken under vissa driftförhållanden kan ge ökad effektivitet, högre dragkraft samt minskad kavitation och buller (Stark m. fl., 2021).

Ducten stabiliserar tryckförhållandena kring propellern och ger ett jämnare inflöde.

Detta bedömdes särskilt relevant då farkosten vid foilande drift arbetar nära vattenytan, där variationer i våghöjd och lutning annars kan öka risken för ventilering och ojämn kraftproduktion.

Ducten utformades med ett tvärsnitt inspirerat av en osymmetrisk vingprofil för att ge gynnsamma strömningsegenskaper. Armarna mellan motorfäste och duct gavs symmetriska profiler för att minimera motstånd samtidigt som tillräcklig hållfasthet bibehölls. Armarna vinklades cirka 50 grader bakåt för att förbättra flödet genom konstruktionen.

Denna konstruktion byggdes aldrig i verkligheten utan togs endast fram som en CAD-modell, vilket visas i figur 3.13. Arbetet med ducten propellern började efter att ventilationsfenomen observerats under testerna vilket skulle kunna försämra båtens prestanda i vattnet. På grund av begränsad tid prioriterades dock andra delar av systemet som ansågs viktigare för den slutgiltiga prototypens funktion och kvalitet.



Figur 3.13: CAD-modell av ducted propeller-konstruktionen

3.3.4 Motorplacering och integration

I detta projekt används två propellrar monterade längst ut på den främre vingen, där varje propeller drivs av en egen elmotor placerad i ett separat motorfäste. Denna konfiguration valdes utifrån både hydrodynamiska och systemtekniska överväganden.

Placeringen längst ut på framvingen ger ett stort lateralt avstånd mellan motorerna, vilket förbättrar möjligheten att generera gir-moment vid differentiell motordrift. Samtidigt bibehålls en symmetrisk massfördelning kring farkostens centerlinje, vilket minskar risken för oönskade moment kring längd- och vertikalaxlarna.

En ytterligare fördel är att propellrarna arbetar i relativt ostörd strömning. När de placeras framför mast och bakre vinge minskar påverkan från turbulens och virvlar från övriga komponenter, vilket kan bidra till högre verkningsgrad och jämnare kraftproduktion.

3.3.5 Fördelar och begränsningar

Den valda framdrivningslösningen ger en kompakt och integrerad kombination av framdrivning och styrning. Antalet mekaniska delsystem reduceras samtidigt som flexibiliteten i regleringen ökar genom individuell motorstyrning.

En begränsning med differentiell motordrift är att styrverkan är beroende av tillgänglig dragkraft, vilket innebär att gir-kontrollen generellt är svagare vid låga hastigheter än vid högre fart. Vid kraftiga svängar eller rollrörelser kan även den yttre propellern närma sig vattenytan, vilket ökar risken för ventilering och försämrade dragkraft.

Trots dessa begränsningar bedömdes lösningen ge den bästa avvägningen mellan prestanda, enkelhet och tillförlitlighet inom projektets ramar.

3.4 Uppskattad vikt av systemet

Den uppskattade vikten för prototypens olika delsystem sammanställdes tidigt i konstruktionsprocessen för att ge en översikt av systemets totala massa och massfördelning. Viktuppskattningen användes som underlag vid dimensionering av foilkonfigurationen, uppskattning av erforderlig lyftkraft samt val av framdrivningssystem. De uppskattade vikterna för respektive delsystem presenteras i Tabell 3.2.

Som framgår av tabellen utgör elektroniksystemet en stor del av den totala vikten, vilket främst beror på batteri och motorer. Den uppskattade totalvikten för systemet uppgick till cirka 42 kg, vilket användes vid vidare konstruktionsberäkningar.

Tabell 3.2: Uppskattade vikter för delsystemen

Delsystem	Uppskattad vikt [kg]
Främre foil	3,0
Bakre foil	1,5
Mast	5,0
Bräda	5,0
Överbyggnad	7,0
Elektronik	15,5
Kablar	5,0
Totalt	42,0

3.5 Elektronik och mjukvara

Farkostens elektroniksystem består av ett antal samverkande komponenter för styrning, mätning och framdrivning. Systemet är uppbyggt kring en central flygdator som hanterar sensordata och genererar styrsignaler till aktuatorer.

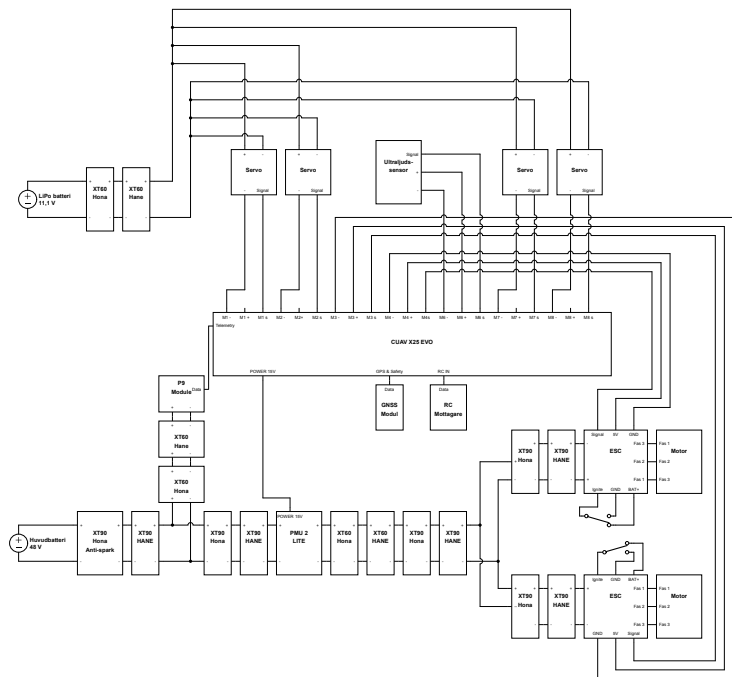
3.5.1 Elektriska komponenter

Tabell 3.3 ger en översikt av samtliga elektriska komponenter som ingår i systemet samt deras huvudsakliga funktioner och specifikationer. Komponenterna indelas efter funktionella delsystem för att tydliggöra deras roll i helheten.

Tabell 3.3: Elektriska komponenter i systemet

Kategori	Specifikation	Antal
Styrsystem		
Flygdator	480 MHz ARM STM32H743XI-processor	1
RC-mottagare	2,4 GHZ 500-1500M räckvidd	1
Kraftelektronik		
Li-ion Batteri	48V 50AH	1
Li-po Batteri	11,7V	1
BEC	5V 1A	2
BEC	14V	1
ESC	Trefas 200A kontinuerligt	2
Sensorer		
Avståndssensor	Ultraljudssensor 7Hz	1
GPS	GNSS-mottagare	1
Drivsystem		
Motorer	Kontinuerlig: 2800W, peak: 4400W	2
Servon	14V, 70kg/1cm (7Nm)	4
Övrigt		
Kablage	Kablar(0,1 mm ² - 6 mm ²) och kontakter (dupont, XT60, XT90)	–
Inkapsling ESC	Elektroniklåda	1
Inkapsling Batteri och flygdator	Elektroniklåda	1
Kabelgenomföringar	Vattentäta kabelförskruvningar	1

Figur 3.14 visar hur dessa komponenter är sammankopplade, inklusive signalvägar mellan flygdator, sensorer och framdrivningssystem. Tillsammans ger detta en helhetsbild av systemets uppbyggnad och interna kopplingar.



Figur 3.14: Fullständigt kopplingschema

Systemets funktion beskrivs nedan med fokus på de viktigaste komponenterna och deras samverkan.

- **Flygdator** Flygdatorn utgör systemets centrala styrenhet och ansvarar för all reglering. Den baseras på en 480 MHz ARM STM32H743XI-processorer och innehåller flera redundanta sensorer. Den tar emot data från sensorer, uppskattar farkostens tillstånd och genererar styrsignaler till servon och motorregulatorer.
- **Inbyggda sensorer** Flygdatorn innehåller tre accelerometer/gyroskop-enheter som används för att bestämma farkostens orientering och rörelse. Systemet kan automatiskt växla mellan dessa vid fel (*trippel redundans*) (PX4 Development Team, u. å). Den innehåller även två barometrar som dock inte kan används i denna applikation eftersom höjdvariationerna är för små. En magnetometer, även känt som kompass, används för att bestämma riktning med hjälp av jordens magnetfält.
- **Externa sensorer** En ultraljudssensor används för att mäta avståndet till vattenytan. Denna används för att korrigera drift i höjdestimeringen från accelerometer/gyro. Sensorn används inte direkt i regleringen eftersom dess svarstid på cirka 1 sekund är för lång tid för att kunna reglera i realtid.

- **Servomotorer** Fyra servomotorer används för att styra farkostens kontrolltor. Varje yta har en direktkopplad motor, vilket ger snabb respons. Servomotorerna har ett maximalt vridmoment på cirka 7 Nm och drivs av ett separat batteri på 11,1 V. Vid hög belastning kan strömmen uppgå till cirka 10 A per servo. Styrningen sker via PWM-signaler där pulsbredden motsvarar önskad vinkel.
- **Motorer** Framdrivning sker med två borstlösa trefasmotorer. Dessa driver varsin propeller och möjliggör styrning genom differentiell motordrift. Motorernas märkspänning är 22,2–59,2 V. I denna applikation drivs motorerna på 48 V. Motorerna utvecklar 3,8 Nm vid märkströmmen 59 A och klarar att leverera 2,8 kW kontinuerligt. Under en kort stund klarar motorerna att dra 88 A och utveckla 4,4 kW. Vikten är 1,27 kg per styck och de har klassningen IP58, vilket innebär att de klarar att vara nedsänkta i vatten.
- **Hastighetsregulatorer (ESC)** *Electronic Speed Controller (ESC)*, eller elektronisk hastighetsregulator, används för att styra varvtalet hos de borstlösa elmotorerna. ESC-enheterna reglerar trefasiga spänningen som matas till motorerna och möjliggör därmed reglering av både varvtal och vridmoment.

ESC-enheterna som används i systemet är utrustade med en inbyggd *Battery Eliminator Circuit* (BEC), vilket är en integrerad spänningsomvandlare som levererar en spänning på 5 V med en maximal ström på 1 A. Denna spänning används för att driva flygdatorns pinnar M1-M14.

ESC-enheterna matas från ett batteri med en spänning på 48 V, men är dimensionerade för ett inspänningsintervall på 14–84 V. De kan leverera upp till 200 A kontinuerligt vid 50 V samt upp till 300 A under korta tidsperioder. Detta möjliggör höga effekttoppar vid den kraftiga acceleration som uppstår när båten ska gå upp i foilandande läge.

Utgången från ESC-enheten består av en trefasig spänning som matas till de borstlösa motorerna via tre kablar. Eftersom motorn drivs med växelspanning saknar kabelanslutningarna fast polaritet. Det innebär att fasordningen kan ändras utan att påverka funktionen permanent. Rotationsriktningen kan vid behov justeras genom omkoppling av två faser eller via mjukvarukonfiguration.

Konfigurering och övervakning av ESC-enheterna sker med programvaran *VE-SC Tool*, som möjliggör inställning av motorparametrar, polaritetsjustering samt realtidsavläsning av data såsom ström, spänning, temperatur och varvtal.

- **Strömförsörjning** Systemet använder flera spänningskällor:
 - 48 V Li-ion batteri till ESC enheter
 - 14 V till flygdator via BEC

- 11,1 V LiPO batteri till servomotorer gjort för höga strömmar
- 5 V till flygdatorns pinnar via BEC
- **RC-mottagare** RC-mottagaren möjliggör manuell styrning trådlöst. Den kommunicerar via 2,4 GHz med en räckvidd på cirka 500–1500 meter.
- **GNSS** GNSS som ofta felaktigt kallas GPS används för positionering och möjliggör autonom körning på hela jorden. GNSS är ett samlingsnamn för det Amerikanska GPS, Ryska Glonass, Europeiska Galileo och kinesiska Beidou (Lantmäteriet, n.d.)

3.5.2 Anpassning av elektronik till marin miljö

Elektronik och vatten utgör en kritisk kombination, då fuktinträngning snabbt kan leda till kortslutning, korrosion och funktionsstopp. För att säkerställa driftsäkerhet i den marina miljön lades därför stor vikt vid vattentätning och skydd av samtliga elektriska komponenter.

Styr- och kraftsystem placerades i vattentäta kopplingsboxar för att skydda känslig elektronik från direkt exponering mot vatten. För att möjliggöra kabeldragning in i dessa boxar användes vattentäta kabelgenomföringar, vilket minimerar risken för läckage vid genomföringspunkter.

Kablar förlängdes vid behov med vattentäta skarvar och förseglades ytterligare med krympslang. Denna lösning minskar risken för att vatten tränger in i ledarna och orsakar kortslutning eller degradering av signal- och kraftöverföring.

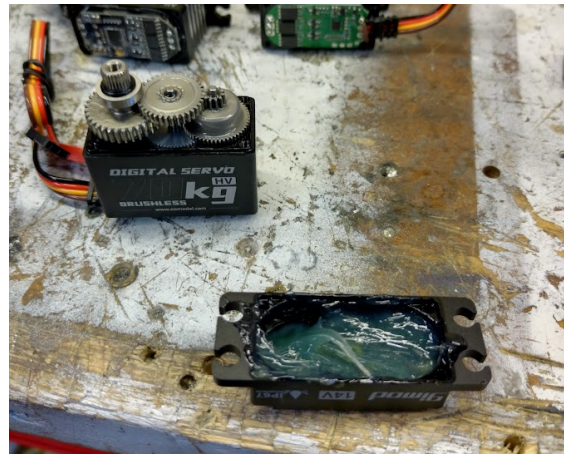
Vid det första fälttestet användes servomotorer med kapslingsklass IP67. Dessa visade sig dock inte vara tillräckligt täta för att tåla nedsänkning under vattnet. För att åtgärda detta modifierades servomotorerna inför fälttest två.

Den slutliga lösningen bestod i att fylla den nedre delen av servohuset med epoxi, vilket kapslade in kretskortet och skapade en permanent barriär mot vatteninträngning. Den övre delen av servot fylldes med marinfett för att förhindra att vatten tränger in längs axeln, samtidigt som mekanisk rörelse fortfarande möjliggörs. För att tät kabelgenomföringen användes epoxi blandat med mikroglasballonger, vilket gav en lättare och mer formbar tätning kring kabeln. Utförandet av tätningsarbetet visas i Figur 3.15.

Anledningen till att servomotorerna tätades internt, snarare än genom externa kapslingar, var begränsat installationsutrymme i vingen. En extern kapsling bedömdes öka den geometriska komplexiteten och påverka både hydrodynamik och integration negativt.



(a) Nedre delen fylld med epoxi



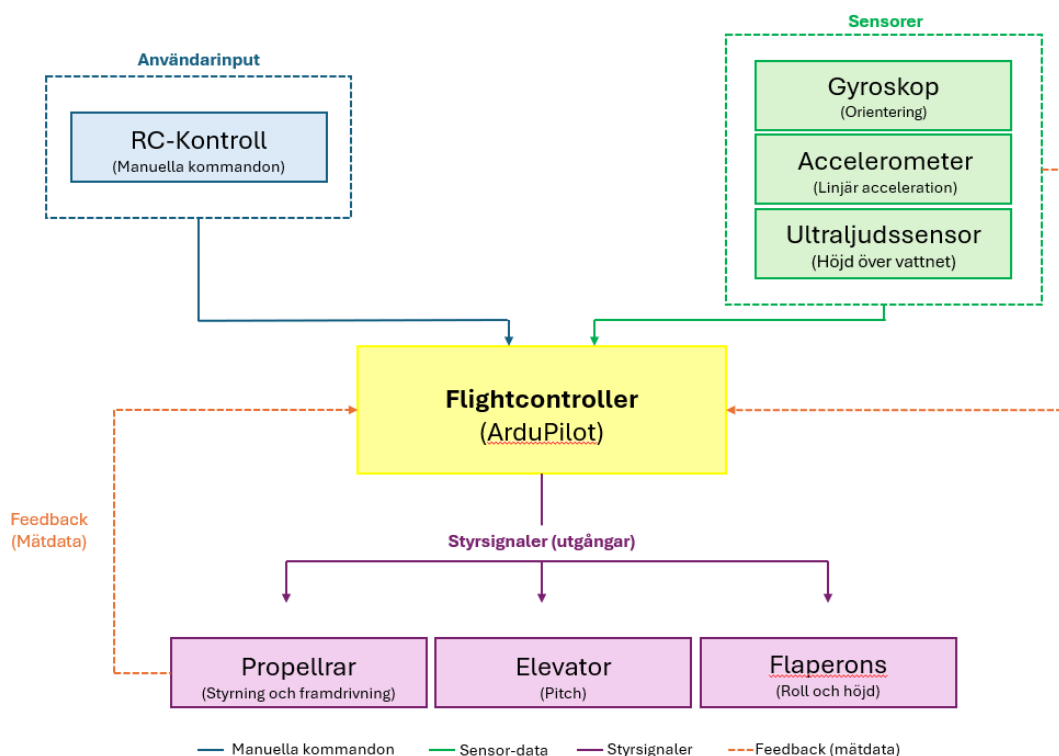
(b) Övre delen fylld med marinfett

Figur 3.15: Modifiering av servomotor för förbättrad vattentätthet.

3.5.3 Reglersystem

Farkostens reglersystem bygger på återkoppling, där sensordata kontinuerligt används för att justera styrsignalerna och därmed stabilisera farkosten. Målet med regleringen är att upprätthålla en stabil flyghöjd över vattenytan samt kontrollera farkostens orientering under drift.

Reglersystemets uppbyggnad illustreras i Figur 3.16. Systemet består av tre huvudsakliga delar: användarinput, sensorer samt en flygdator (Flightcontroller) som beräknar styrsignaler till aktuatorerna.



Figur 3.16: Blockdiagram över reglersystemets funktion

Användaren ger kommandon via en RC-kontroll, vilka tolkas av flygdatorn. Dessa kommandon kan exempelvis avse önskad hastighet eller riktning. Samtidigt tillhandahåller sensorer kontinuerligt mätdata om farkostens tillstånd. Gyroskopet mäter orientering, accelerometern mäter linjär acceleration, och ultraljudssensorn används för att uppskatta höjden över vattenytan.

Denna sensordata skickas till flygdatorn (ArduPilot), som utgör systemets centrala enhet. Här jämförs det uppmätta tillståndet med önskat tillstånd, och avvikelsen används för att generera styr signaler. Denna process utgör en återkopplad reglerloop, där systemet kontinuerligt korrigerar sig själv baserat på mätdata.

Styr signalerna skickas till tre typer av funktioner: propellrar, elevator samt flaperons. Propellrarna används både för framdrivning och gir-styrning genom differentiell motordrift. Elevatorn används för att reglera farkostens pitch, vilket direkt påverkar anfallsvinkel och därmed lyftkraft. Flaperons används för att kontrollera både rullning och höjd genom att ändra anfallsvinkeln på framvingen.

Regleringen implementeras med PID-regulatorer, där proportionell-, integrerande- och deriverande termer används för att uppnå stabil och snabb respons. Den proportionella delen ger en direkt respons på avvikelsen, den integrerande delen eliminerar stationära och den deriverande delen reagerar på felets förändringshastighet och motverkar snabba förändringar vilket minskar översläng och bidrar till stabilitet.

3.5.4 Mjukvarukonfiguration

Flygdatorn är hjärnan i båten och ska styra drivsystem och servomotorer på ett sådant sätt att farkosten på ett kontrollerat och förutsägbart sätt kan foila fram över vattnet. För att möjliggöra detta krävdes noggrann konfiguration i den inbyggda mjukvaran ardupilot. För att konfigurera och även möjliggöra realtidsoptimering av parametrar användes programmet Mission Planner. I det elektriska systemet som presenteras i kopplingsschemat 3.8 är det synligt hur alla komponenter kopplats in till flygdatorn.

Som grund användes firmwaretypen *ArduPlane*, vilken är avsedd för flygplan. Efter att ha valt *ArduPlane* kunde flygdatorn konfigureras utefter systemets önskade funktioner alltså så att det går att koppla in ESC, GPS, servomotorer, ultraljudssensor, och telemetri. För att få ultraljudssensorn att fungera krävdes omfattande modifieringar av mjukvaran eftersom flygplan inte har någon sådan typ av sensor i vanliga fall.

Vidare definierades hur de elektriska komponenterna skulle samverka i styrsystemet. Utgångarna tilldelades enligt tabell 3.4.

Port	Ansluten komponent	Inställning	Inverterad
M1	Servo Höger flaperon	FlaperonRight	Ja
M2	Servo Vänster flaperon	FlaperonLeft	Ja
M3	Propeller Höger ESC	ThrottleRight	–
M4	Propeller Vänster ESC	ThrottleLeft	–
M5	–	Disabled	–
M6	Ultraljudssensor	GPIO	–
M7	Servo Vänster elevador	Elevator	–
M8	Servo Höger elevador	Elevator	Ja
RC-kontakt	RC-mottagare	–	–
telem1	Telemetrienhet	–	–
power in	14V BEC	–	–

Tabell 3.4: Konfiguration av flygdatorns utgångar.

En funktion är en grupp komponenter som tillhör en specifik kontrollyta eller drivsystemet. De funktioner som användes är propellrar, elevador och flaperons. Även RC-kontrollens olika spakar och knappar tilldelades styrfunktioner (flaperons, propellrar, elevador, differentiell motordrift samt byte av flygläge). De olika flyglägena med beskrivning finns i tabell 3.5. Rotationsriktningar och servoutslag justerades också för korrekt respons och så att inget ska gå utanför dess fysiska gräns.

Tabell 3.5: Flyglägen i ArduPlane

Flygläge	Beskrivning
Manual	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 medan piloten styr riktning. Önskad höjd och hastighet kan ändras av föraren.
AUTOTUNE	Systemet identifierar och justerar PID-parametrar baserat på hur farkosten flygs.
TAKEOFF	Helautomatisk startsekvens där autopiloten reglerar gaspådrag och pitch för att genomföra start.

4

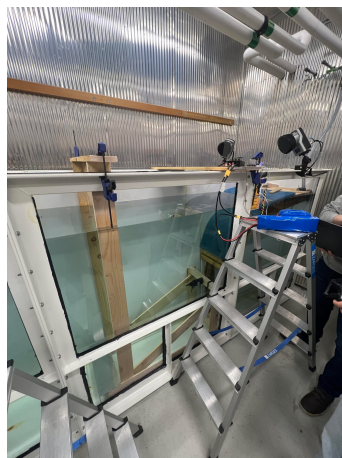
Tester

Flera tester genomfördes under projektets gång för att verifiera funktion och prestanda hos enskilda delsystem innan integrering i det fullständiga systemet. Genom att testa komponenter under kontrollerade förhållanden kunde konstruktionsval valideras och eventuella brister identifieras i ett tidigt skede. Detta minskade risken för fel vid senare system- och fälttester. Testerna gav också upphov till idéer för framtida konstruktionsval.

4.1 Test av värmeutveckling i ESC

Ett inledande test genomfördes för att undersöka temperaturutvecklingen i den elektroniska hastighetsregulatorn (ESC) vid ökande motorström under kontrollerade förhållanden. Syftet var att verifiera att ESC:n kunde hantera upp till 60 A utan att nå kritiska temperaturer över 90 grader.

Testet utfördes i en vattentank där en motor med monterad propeller fixerades i en testrigg av trä. Propellern var helt nedsänkt i vattnet medan ESC och elektriska anslutningar placerades ovanför vattenytan. En bild av testkonfigurationen kan ses i figur 4.1. Temperaturen i ESC avlästes via en inbyggd temperatursensor i VESC Tool.



Figur 4.1: Testkonfiguration vid värmeutvecklingstest i vattentank

Motorströmmen ökades stegvis via manuell reglering i VESC Tool tills den specificerade maxgränsen 60 A uppnåddes. Temperaturen övervakades kontinuerligt under hela förloppet.

4.2 Propellertest

För att utvärdera vilken propellermodell som var mest lämplig för applikationen genomfördes ett jämförande experiment med tre olika propellertyper. Syftet med testerna var att undersöka hur de olika propellrarna påverkade systemets belastning, med särskilt fokus på förhållandet mellan duty cycle och uppnått varvtal. En propeller som kan generera ett högt varvtal vid låg duty cycle anses mer effektiv, då den kräver mindre effekt från systemet för samma prestanda.

Testerna utfördes i samma testrigg som användes vid undersökningen av värmeutveckling, där motorn monterades fast och kördes i vatten under kontrollerade förhållanden. Data loggades kontinuerligt med hjälp av VESC Tool, vilket möjliggjorde analys av parametrar såsom varvtal, inspänning och ström.

Varje propeller testades individuellt för att säkerställa jämförbara resultat. De två propellrarna tillverkade med kolfiber kunde köras upp till cirka 1800 RPM utan tecken på strukturella problem. Propellern tillverkad i PETG begränsades däremot till cirka 1400 RPM, då högre varvtal bedömdes innebära risk för mekaniskt haveri.

Resultaten från testerna användes för att jämföra hur effektivt respektive propeller omvandlar tillförd elektrisk effekt till rotationshastighet, och därmed identifiera den mest lämpliga propellern för vidare användning.

4.3 Hållfasthetstest av motorfästet

För att säkerställa att motorfästet klarar de krafter det utsätts för under drift behöver dess hållfasthet verifieras. Detta kan göras med hjälp av antingen FEM-analys eller fysiska tester. Eftersom motorfästet är 3D-printat är det mycket resurskrävande att genomföra en FEM-analys som tar hänsyn till komplex geometri samt materialets anisotropa egenskaper.

Därför valdes istället att tillverka en testjigg som kan belastas med hjälp av en momentnyckel. Genom att använda en momentnyckel kan det applicerade momentet bestämmas med god noggrannhet. Jiggen fästs i motorinfästningen och har en mutter svetsad på baksidan för att möjliggöra testförfarandet.

För att undersöka hur stor dragkraft (thrust) fästet klarar av att uppta genomfördes även ett belastningstest med vikter. Detta utfördes medan motorfästet var monterat på den aluminiumprofil som binder samman båtens foilsegment, för att efterlikna verkliga förhållanden.

4.4 Första fälttestet

Det första fälttestet genomfördes vid Rådasjön för att testa hur systemet fungerade i verkliga förhållanden. Inledningsvis valdes en testplats med relativt stora vågor, men denna bedömdes som olämplig för ett första test. Anledningen var att vågor och vind gjorde det svårt att särskilja om systemets beteende påverkas av yttre störningar eller av konstruktionen. För en mer kontrollerad utvärdering flyttades testet därför till en plats med lugnare vatten och mindre vindpåverkan.

Som säkerhetsåtgärd användes en gummibåt som fölgebåt för att snabbt kunna ingripa vid eventuella och plötsliga händelser, exempelvis om båten skulle välta.

Innan sjösättning genomfördes ett funktionstest på land. Under detta test kontrollerades alla elektriska komponenter och nödvändiga begränsningar genomfördes för att få en lämplig drift i vatten. Begränsningarna innebar att flapsen justerades till rätt intervall för att få en stabil drift i vattnet. Sensorn kalibrerades även till en lagom referensnivå för att möjliggöra en önskad höjd under foliande drift.

Efter sjösättning uppstod initialt ett fel där motorerna inte roterade när foilen befann sig i vattnet. Systemet togs därför upp för felsökning. Felkoden identifierades och åtgärdades, varefter motorfunktionen återställdes.

Vid fortsatt felsökning isolerades även styrsystemets delsystem genom att sensorer och servon kopplades ur stegvis. Detta möjliggjorde fortsatt provkörning i manuellt läge utan aktiva kontrolltytor.

4.5 Vattentest av servomotorer

Ett flertal vattentester genomfördes på servomotorerna efter att de hade vattentätats med epoxi och marinfett, för att till slut säkerställa att deras funktion återstod efter en längre tids nedsänkning under vatten. Till en början testades motorerna innan och efter en snabb nedsänkning på några centimeters djup. Det övergick snabbt till ett aktivt test där servomotorns axel justerades med hjälp av en servotestare samtidigt som motor var nedsänkt. Vidare gjordes ett nytt kortare men aktivt test i en större vattentank för att testa om vår vattentätning klarar tryckskillnaden som blir vid en ca meters djup. Det här gjordes för att simulera det förhållanden som servomotorn upplever när de integreras i det hopmonterade systemet.

Till sist gjordes även ett slutgiltigt statistiskt långtidstest relativt projektets mål. Servomotor sänktes ned till ett djup av 122 cm för att sedan lämnas statisk i cirka 15 timmar, enligt figur 4.2. Det här testet gav betydande information om hur servomotorerna kan förväntas prestera under ett fälttest. Eftersom ett fälttest innebär att servomotorerna är nedsänkta under några timmar i kombination med att alla servomotorer kan ha olika bra vattentäthet gjordes testet för ge en överväldigande säkerhetsmarginal. Fortsatt bidrar det här till säkrare fälttester samt undvikande av trasiga servomotorer som tar tid att både inhandla, modifiera och montera.



Figur 4.2: Servot nedsänkt i vatten

4.6 Andra fälttestet

Med fungerande servon var målet att testa självregleringen och få upp båten i ett foilande tillstånd. Det andra fälttestet genomfördes i havsmiljö med bräckt vatten och mild sjö. En havsmiljö valdes för detta test på grund av tillgång till följebåt, men även eftersom servomotorerna med hög säkerhet bedömdes vara vattentäta. Saltet i vattnet ger en högre ledningsförmåga, men bedömningen var att detta inte skulle påverka testets resultat, då vattnet i Björlanda förväntades hålla låg salthalt.

Under testet genomfördes tre försök att få de drivande motorerna att samverka med servomotorerna via flight controllern för att därigenom möjliggöra foiling. Vid varje försök testades även samtliga lägen på kontrollern: fly-by-wire (manuell gasstyrning medan flight controllern hanterar övriga funktioner) samt helt manuell styrning. Systemet testades även med en servo i taget urkopplad samt med samtliga servomotorer urkopplade, i syfte att felsöka eventuell kabel- eller servorelaterad kortslutning.

Likt det första fälttestet kontrollerades alla systemfunktioner på land innan varje sjösättningsförsök. Detta underlättar felsökning genom att tydligare kunna fastställa vad, hur och när eventuella fel uppstår, vilket i sin tur förenklar åtgärd av problemen.

Slutligen genomfördes ett separat test för att undersöka eventuella kabelskador som kan leda till kortslutning, alternativt om felet ligger i mjukvaran. Testet utfördes genom att koppla in en reservservo till flygstyrenheten. Därefter sjösattes båten, servomotorn sänktes ned i vattnet och funktionen verifierades i fly-by-wire-läget.



Figur 4.3: Fälttest 2, Björlanda Kile småbåtshamn

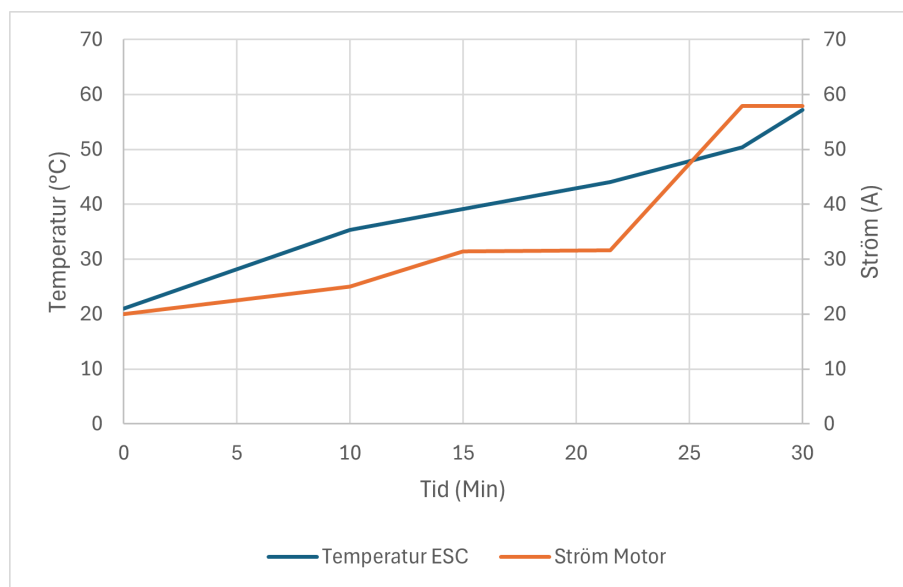
5

Resultat

Projektets resultat bygger på en kombination av laboratorietester, konstruktionsarbete och praktiska fälttester. De inledande försöken fokuserade på att verifiera centrala delsystem, där temperaturutvecklingen i ESC, propellrarnas prestanda samt hållfastheten i motorfästet undersöktes för att ge underlag till fortsatt utveckling. Dessa tester skapade en tidig förståelse för systemets begränsningar och möjligheter, samtidigt som de låg till grund för de lösningar som senare implementerades i prototypen. Resultaten från fälttesterna visar därefter hur systemet fungerade som helhet i verklig miljö, medan den slutgiltiga konstruktionen sammanfattar de designval som växte fram genom projektets samlade erfarenheter.

5.1 Värmeutveckling i ESC

Värmeutvecklingen och motorströmmen redovisas i figur 5.1. Temperaturen ökade från cirka 20 °C vid testets start till cirka 58 °C efter 30 minuter. Under samma period höjdes motorströmmen stegvis upp till 60 A.



Figur 5.1: Temperaturutveckling i ESC och ström i motorn

Temperaturökningen var relativt jämn vid konstant strömnivå och ökade tydligare i samband med att strömmen höjdes vid cirka 25 minuter. Någon tydlig avplaning av temperaturen observerades inte under testperioden.

Syftet med belastningstestet var att undersöka om ESC:n riskerade att överhettas vid belastning upp till 60 A. Under testet uppmättes en maximal temperatur på cirka 58 °C, vilket ligger under den definierade gränsen 90 °C.

Testet fick även ett oförutsett resultat, då den med motorn medföljande aluminiumpropellern skapade ett ventilationsfenomen vid högre hastigheter, som visat i figur 5.2. Detta gjorde att egenutvecklade propellrar fick designas och testas.



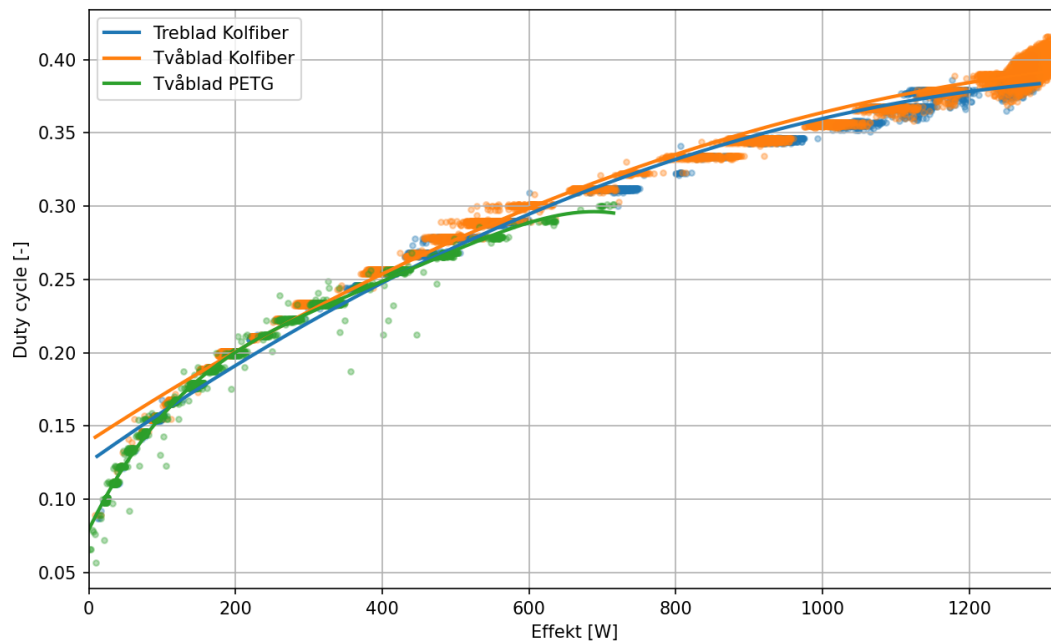
Figur 5.2: Ventileringfenomen vid test av tvåbladig aluminium-propeller

5.2 Propellertest

Resultaten från propellertesterna presenteras i Figur 5.3 och Figur 5.4. Figur 5.3 visar sambandet mellan tillförd effekt och duty cycle, medan Figur 5.4 visar vridmoment som funktion av varvtal för de tre propellertyperna. Vridmomentet beräknas från sambandet mellan effekt och varvtal enligt ekvation 2.9.

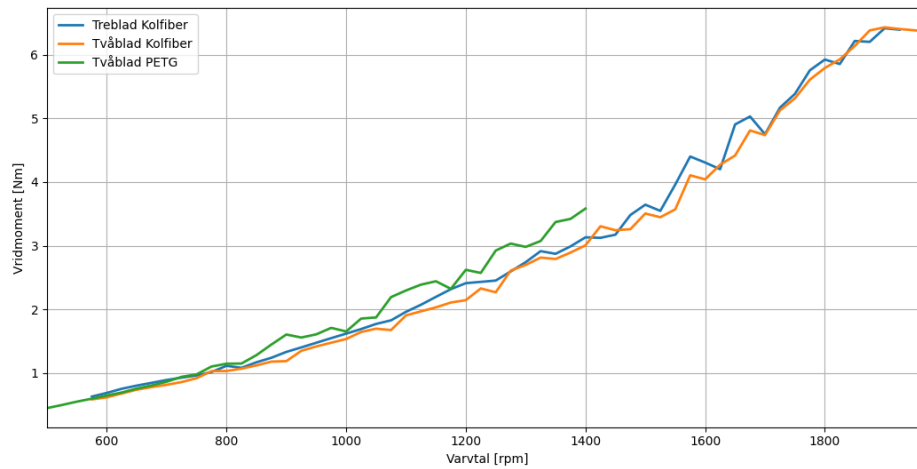
Av Figur 5.3 framgår att samtliga propellrar uppvisar ett ökande samband mellan

effekt och duty cycle. De två kolfiberpropellrarna följer liknande trender över hela det testade området upp till cirka 1300 W. Den trebladiga kolfiberpropellern ligger genomgående något lägre i duty cycle vid motsvarande effekt jämfört med den tvåbladiga, särskilt vid högre effektnivåer. PETG-propellern uppvisar en liknande trend vid lägre effekter, men når ett tydligt maximum kring cirka 600–700 W, vilket motsvarar det begränsade varvtalsområdet upp till cirka 1400 RPM.



Figur 5.3: Samband mellan duty cycle och tillförd effekt för de tre propellertyperna.

I Figur 5.4 visas hur vridmomentet ökar med varvtalet för samtliga propellrar. För de två kolfiberpropellrarna sträcker sig mätområdet upp till cirka 1900 RPM, där vridmomentet når ungefär 6–6,5 Nm. PETG-propellern är begränsad till ett lägre varvtalsintervall upp till cirka 1400 RPM, med ett maximalt uppmätt vridmoment på cirka 3,5 Nm. Den trebladiga kolfiberpropellern uppvisar genomgående något högre vridmoment än den tvåbladiga vid samma varvtal.



Figur 5.4: Vridmoment som funktion av varvtal för de tre propellertyperna.

Resultaten i figur 5.4 visar att den 3D-printade PETG-propellern genererade ett högre vridmoment vid motsvarande varvtal jämfört med kolfiberpropellrarna. En möjlig förklaring är att PETG-propellern hade en mindre styv konstruktion än kolfiberpropellrarna. Under belastning deformeras därför bladen mer, vilket kan förändra den effektiva stigningen och bladgeometrin under drift. Detta kan leda till ett ökat hydrodynamiskt motstånd och därmed ett högre belastningsmoment på motorn.

Under testerna observerades även skador på den tvåbladiga propellern. En spricka uppstod vid bladets ytterkant, vilket framgår av Figur 5.5. Skadan inträffade vid högre varvtal och indikerar en begränsning i propellerns strukturella hållfasthet inom det testade driftområdet. På grund av detta, och att en tidigare tvåbladig propeller upplevt ventilationsfenomen, valdes därför den trebladiga propellern till båten, eftersom den trebladiga propellern sprider ut kraften över tre propellerblad istället för enbart två.



Figur 5.5: Sprickbildning vid bladets ytterkant på den tvåbladiga propellern efter test.

5.3 Verifiering av motorfästets hållfasthet

Resultaten från hållfasthetstesterna utföll enligt plan och presenteras nedan. För att verifiera motorfästets vridstyvhet monterades det på aluminiumprofilen tillsammans med testjiggen. Därefter belastades konstruktionen stegvis med förutbestämda momentnivåer om 6, 10, 20, 30, 40, 50 och 60 Nm.

Tabell 5.1: Resultat från hållfasthetstest med momentnyckel.

Moment [Nm]	Observation
6	Ingen visuell påverkan.
10	Ingen visuell påverkan.
20	Ingen visuell påverkan.
30	Begynnande elastisk deformation noterad.
40	Begynnande elastisk deformation noterad.
50	Tydlig elastisk deformation noterad.
60	Elastisk deformation, ingen kvarstående plastisk deformation.

Som framgår av Tabell 5.1 uppvisades ingen märkbar påverkan upp till 20 Nm. Vid 30 Nm noterades begynnande elastisk deformation och vid 50–60 Nm var deformationen så stor att tätningen riskerar att påverkas, vilket kan möjliggöra vatteninträngning. Efter avlastning återgick komponenten till sin ursprungliga form, vilket visar att ingen plastisk deformation uppstod inom det testade intervallet. Resultatet indikerar att motorfästet har tillräcklig vridstyvhet för de belastningar som förväntas under normal drift.

För att även verifiera motorfästets förmåga att uppta dragkraft genomfördes ett separat belastningstest. Ett rep lastades med 78 kg, motsvarande cirka 766 N, medan motorfästet var monterat på aluminiumprofilen så att även infästningen inkluderades i provningen. Under testet observerades inga missljud, deformationer eller andra tecken på skada. Motorfästet klarade därmed en dragkraft på 766 N utan observerbar påverkan, vilket bedöms vara tillräckligt för att hantera motorkraften.

5.4 Resultat från första fälttestet

Sjösättningen av båten var lyckad, och båten hade ett plant lut. Vid försök till framdrift uppkom däremot en felkod i ArduPilot, som stoppade hela systemet. Efter åtgärdad felkod genom omstart av elektroniken, fungerade motorerna åter normalt. Vid fortsatt testning identifierades dock att servomotorerna till flapsen hade utsatts för vatteninträngning, vilket medförde att de slutade fungera, varpå de kopplades ur för att undvika upprepnin av samma felkod som innan.

Eftersom flapsen utgör en central del i systemets självreglering kunde båten därmed inte köras i autonomt stabiliserat läge. Testet fortsatte därför i manuellt läge utan fungerande kontrolllytor, där endast de två elektriska motorerna användes för framdrivning.

I denna konfiguration observerades att foilen genererade tillräcklig lyftkraft för att lyfta hela skrovet ur vattnet under en mycket kort stund, vilket syns i figur 5.6. Efter det föll båten tillbaka ner i vattnet då aktiv reglering saknades.

Det observerades även att kopplingslådorna på brädan kunde röra sig fram- och bakåt, även i sidled när brädan lutade. Detta kan leda till små massförskjutningar som påverkar båtens beteende och bidrar till en ojämn gång i vattnet. Rörelserna kan även ge upphov till mindre kast i sidled, vilket försämrar stabiliteten.



Figur 5.6: Båten i foilande läge under fälttest 1

5.5 Resultat från vattentest av servomotorer

Resultaten från vattentesterna visar att servomotorerna fungerade enligt förväntan efter genomförd vattentätning. Ingen funktionsförlust, störning i rörelse eller avvikelser i respons kunde observeras, varken under aktiv drift i vatten eller efter långvarig nedsänkning. Servomotorerna bibehöll full funktionalitet även efter statistiskt långtidstest på cirka 15 timmar vid 122 cm djup. Detta indikerar att den valda vattentätningmetoden är tillräcklig för de driftförhållanden som förväntas under fälttester.

5.6 Resultat från fälttest två

Det andra fälttestet gav liknande resultat som det första. Det initiala intrycket vid sjösättning var positivt och allt verkade fungera. De drivande motorerna fungerade dock endast under ett kort ögonblick innan all framdrift försvann, samtidigt som

servomotorerna initialt fungerade som förväntat. Under detta test erhöles inga felkoder som indikerade något fel. Detta ledde till att, likt vid första testet, servomotorerna kopplades ur en efter en samtidigt som driftsmotorernas funktion kontrollerades. Först när samtliga servomotorer var urkopplade återfick systemet framdrift i helt manuellt läge.

Efter det första försöket togs båten upp på land enligt figur 5.7 för att återigen kontrollera systemets funktioner utan påverkan av vatten. Det konstaterades att allt fortfarande fungerade som det skulle.

Under det andra sjösättningsförsöket kopplades alla servomotorer återigen in. När systemet kördes i fly-by-wire samtidigt som båten sänktes ned i vattnet observerades att framdriften försvann direkt när konstruktionen kom i kontakt med vatten. När motorerna kördes utan att påverka servokontrollen noterades även att servomotorerna rörde sig oavsiktligt. När båten därefter togs upp på land hade höger motor dålig kontakt och servon bak till höger slutat fungera.

Slutligen genomfördes ett test med enbart reservservon, vilket gav ett svårförklarat resultat. I fly-by-wire-läge fungerade både servon och motorer som förväntat på land. Vid sjösättning, så länge servon var ovan vattenytan, fungerade systemet fortsatt korrekt. Så snart antingen servokablarna eller servon kom i kontakt med vattnet slutade elmotorerna generera framdrift och servomotorerna slutade ge utslag. När servon och kablarna därefter lyftes upp ur vattnet återgick systemet till normal funktion. Detta upprepades flera gånger med samma resultat vid varje försök.

5.7 Slutgiltig konstruktion

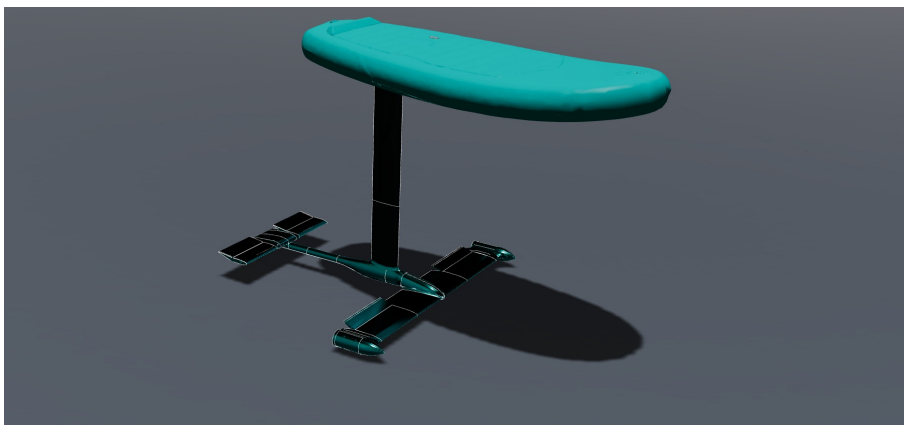
Figur 5.7 visar den slutgiltiga versionen av båten efter färdig montering, medan figur 5.8 visar en CAD-rendering av konstruktionen. Den färdiga båten innehåller samtliga mekaniska, elektriska och elektroniska system som användes under testningen.

CAD-renderingen innehåller endast de komponenter som konstruerats inom projektet och används för att tydligare visualisera den mekaniska konstruktionen. Detta omfattar bland annat foilstruktur, motorfäste samt olika infästningar och inre strukturella delar. Elektronik, överbyggnad och vissa standardkomponenter har inte modellerats, då fokus låg på de egenutvecklade konstruktionslösningarna, främst de som skulle 3D-printas.

Båtens slutgiltiga vikt blev 42,5 kg, vilket stämmer överens väl med den uppskattning på 42 kg som gjordes under designprocessen.



Figur 5.7: Slutgiltig konstruktion av båten



Figur 5.8: Rending i CAD av båten

6

Slutsatser

Projektets resultat och erfarenheter visar hur utvecklingsarbetet successivt drevs framåt genom en kombination av konstruktion, tester och kontinuerliga förbättringar. De slutsatser som kan dras från arbetet grundar sig både i hur genomförda tester påverkade centrala konstruktionsval och i hur den slutliga prototypen presterade under fälttester. Resultaten sätts även i relation till tidigare projekt för att tydliggöra vilka framsteg som uppnåtts och vilka begränsningar som kvarstår. Utifrån detta bedöms graden av måluppfyllnad samt vilka möjligheter som finns för fortsatt utveckling av konceptet.

6.1 Tidiga tester vitala för designprocessen

De tidiga testerna var avgörande för projektets designprocess, då de möjliggjorde verifiering av kritiska delsystem innan den fullständiga farkosten färdigställdes. Genom att i ett tidigt skede testa framdrivningssystemet och bärande konstruktioner kunde flera konstruktionsbeslut baseras på mätdata istället för antaganden, vilket minskade risken för sena omkonstruktioner.

Testet av värmeutvecklingen i ESC visade att regulatorn kunde belastas upp till 60 A utan att nå kritiska temperaturer. Den maximalt uppmätta temperaturen på cirka 58 °C låg med god marginal under den definierade gränsen på 90 °C. Resultatet gav därför stöd för att vald ESC kunde användas utan ytterligare kylåtgärder i den planerade applikationen. Detta var en viktig verifiering, eftersom överhettning hade kunnat innebära både driftsstörningar och behov av omfattande omkonstruktion av elektronikplacering eller kylsystem.

Propellertesterna gav samtidigt värdefull information om samspelet mellan propellergeometri, effektbehov och mekanisk hållfasthet. De två kolfiberpropellrarna visade högre möjlig prestanda än PETG-propellern, som behövde begränsas till lägre varvtal av hållfasthetsskäl. Att den tvåbladiga kolfiberpropellern dessutom sprack vid högre belastning visade tydligt vikten av att inte enbart optimera för verkningsgrad, utan även beakta strukturell integritet. Testerna bidrog därmed till valet av propeller för fortsatt drift och gav en bättre förståelse för vilka komponenter som klarar verkliga laster.

Även hållfasthetstestet av motorfästet fyllde en central funktion i utvecklingsarbetet. Genom att verifiera att konstruktionen kunde motstå de vridmoment och krafter som uppstår från motorn skapades förtroende för att infästningen skulle fungera under drift. Ett otillräckligt motorfäste hade kunnat orsaka vibrationer, felställning av drivlinan eller i värsta fall haveri under fälttest.

Sammanfattningsvis visar de tidiga testerna hur experimentell verifiering kan driva designprocessen framåt. Istället för att vänta till slutmontering kunde svagheter identifieras och centrala komponentval bekräftas i ett tidigt skede. Detta sparade både tid och resurser samt ökade sannolikheten för att den slutliga prototypen skulle fungera vid senare fälttester.

6.2 Slutsatser från första fälttestet

Det första fälttestet gav flera viktiga insikter kring konstruktionens styrkor och svagheter. Den tydligaste svagheten var att vattentätningen inte var tillräcklig. Vatten trängde in både i motorfästet och i servomotorerna trots tidigare tätning och angivnen IP67-klassning. Detta visade att tätningen behövde förbättras för drift i denna miljö.

Även de rörliga kopplingslådorna identifierades som en svaghet, då förskjutning av massa kan påverka tyngdpunkt och stabilitet negativt.

Samtidigt gav även testet positiva resultat. Det observerades att systemet kunde generera tillräcklig lyftkraft för att uppnå foilande läge även utan fungerande flaps. Dock blev systemet instabilt vid uppnått foilande läge, vilket beror på att flapsen inte kunde bidra till stabilisering. Detta visar att foilens dimensionering och design är tillräcklig ur ett hydrodynamiskt perspektiv.

Sammanfattningsvis visar testet att grundkonceptet fungerar och att tillräcklig lyftkraft genereras, men att vattentätningen behöver förbättras eftersom den är avgörande för att foilen ska kunna fungera korrekt och uppnå ett stabilt foilande läge.

6.3 Slutsats av andra fälttestet

Slutsatserna från det andra fälttestet är att konstruktionen nu är hållfast och tillräckligt torsionsstyv, vilket tidigare var ett problem, samt att övriga konstruerade delar fungerar som förväntat. Servomotorerna klarade även att motstå vatten under hela testet, vilket är ett positivt resultat. Vidare kunde en mer stabil tyngdpunkt upprätthållas, då överliggande elboxar monterats med L-profiler i aluminium samt kardborreband för att fixera komponenterna.

Det konstateras dock att det finns ett större el- eller mjukvaruproblem i systemet som förhindrar samverkan mellan de drivande motorerna och servomotorerna. Detta är kritiskt, eftersom stabil foiling kräver att dessa delsystem fungerar tillsammans. Efter testet har två huvudsakliga teorier identifierats. Den första är att felet kan

bero på mekanisk påverkan på kablage, exempelvis skav på en motorkabel i kabelkanalen genom masten. Detta kan ha uppstått vid installation, där begränsat utrymme i kombination med skarpa kanter kan ha skadat isoleringen och därmed orsakat kortslutning eller störningar.

Den andra teorin baseras på vidare analys av kablage i marin miljö. Det framkom att kablar som inte är anpassade för marina förhållanden kan ge upphov till störningar. Detta stöds även av att problem observerades vid test med en hel, oskarvad kabel, vilket indikerar att felet inte enbart är lokalt utan kan vara kopplat till signalkvalitet eller elektromagnetiska störningar i systemet.

Ett naturligt nästa steg i projektet hade därför varit att systematiskt se över hela elsystemet samt vid behov ersätta befintliga kablar med marinklassade alternativ. Därefter bör ett nytt fälttest genomföras för att verifiera systemets samverkan och funktion.

6.4 Styrkor med båtdesignen

Även om fullständig självreglering inte uppnåddes finns flera tydliga styrkor i konstruktionen, framför allt kopplade till robusthet, systemintegration och praktisk funktion i verklig miljö.

Genom att använda vattentäta servomotorer möjliggörs placering av aktuatorer nära kontrollytorna under vattenytan. Detta minskar behovet av komplexa mekaniska överföringar, såsom push-rods, vilket i sin tur reducerar glapp, friktion och förluster i systemet. Resultatet är en mer direkt och responsiv styrning, samtidigt som systemet blir mindre känsligt för mekaniska fel.

Motorfästet är dimensionerat för att hantera höga krafter från framdrivningssystemet utan deformation. Detta är avgörande för att bibehålla korrekt riktning på dragkraften, vilket direkt påverkar båtens stabilitet och verkningsgrad. Ett styvt motorfäste minskar även vibrationer och bidrar till mer reproducerbara testresultat.

Den inre strukturen i foilen är utformad för att klara de betydande hydrodynamiska laster som uppstår vid högre hastigheter. Detta minskar risken för deformation av vingprofilerna, vilket annars skulle försämra lyftkraft och stabilitet. En styv struktur ger även bättre förutsättningar för noggrann reglering, då geometrin förblir konstant under belastning.

Överbyggnaden är konstruerad för att vara styv och vibrationsfri, vilket är särskilt viktigt för sensorer som används i reglersystemet. Ett stabilt sensorfäste minskar mätbrus och förbättrar kvaliteten på återkopplingen till styrsystemet, vilket är en förutsättning för att kunna utveckla fungerande aktiv stabilisering.

Designen möjliggör även enkel förflyttning av komponenter, vilket ger flexibilitet att justera båtens tyngdpunkt. Detta är en viktig parameter för både statisk och

dynamisk stabilitet, och möjligheten att snabbt testa olika konfigurationer är en stor fördel i utvecklings- och testfasen.

6.5 Framtida utveckling av båten

För att uppnå fullständigt lyft och testa självreglering finns några nödvändiga utvecklingspunkter. Det finns även andra optimeringar att göra. Nedan presenteras de mest framträdande.

6.5.1 Elektronik och elsystem

En central del i det fortsatta utvecklingsarbetet är att vidareutveckla elsystemet för att minska känsligheten för störningar och öka systemets robusthet. Under projektet identifierades att signalintegritet och jordning är viktiga områden att förbättra, särskilt eftersom flera komponenter är placerade på avstånd från varandra och är sammankopplade genom långa kabeldragningar i en mycket begränsad geometri.

En möjlig förbättring är att se över jordningslösningen och skapa en mer genomtänkt och robust jordningskoppling mellan systemets olika delar. Detta kan minska risken för spänningsskillnader och elektriska störningar mellan komponenter. Vidare bör möjligheten att använda givarkablar där signalledare och minusledare är ihoptvinnade mellan flight controller och servon undersökas, eftersom detta kan bidra till förbättrad störimmunitet. En annan möjlig åtgärd är att gå från 3.3 V till 5 V styrsignal för PWM, vilket kan ge bättre marginaler och göra signalöverföringen mindre känslig för störningar.

Det bör även undersökas hur elsystemet kan göras mer modulärt. I nuvarande lösning är kabeldragningen genom masten mycket platsbegränsad, vilket försvårar både montering och felsökning. En framtida utveckling skulle därför kunna fokusera på lösningar där delar av systemet kan separeras och kopplas isär utan att all kabeldragning behöver gå genom samma begränsade utrymme. Ett mer modulärt elsystem skulle kunna förenkla både integration, service och vidareutveckling.

6.5.2 Vattentäthet

Vattentäthet är ett annat område där ytterligare utveckling krävs. Även om den metod som användes för att vattensäkra servon, baserad på epoxy, visade lovande resultat, bör mer ingående tester genomföras för att bättre utvärdera metodens långsiktiga tillförlitlighet. Särskilt viktigt är att undersöka hur lösningen påverkas av upprepad användning och långvarig exponering för vatten.

Vidare bör även andra metoder för att vattensäkra servon och känslig elektronik undersökas och jämföras experimentellt. Genom att testa flera alternativa lösningar kan en bättre förståelse erhållas för vilka metoder som erbjuder bäst kombination av täthet, hållbarhet, servicebarhet och tillverkningsbarhet.

6.5.3 Design och konstruktion

Det finns även flera möjligheter att vidareutveckla den övergripande designen och konstruktionen. En viktig del är att optimera flödet runt de bärande ytorna och vidareutveckla vingprofilerna för att undvika överdimensionering av bärplanen. Ett mer optimerat bärplan skulle kunna minska det hydrodynamiska motståndet och därmed förbättra systemets totala effektivitet.

Vidare finns potential att utveckla lösningen för att förändra anfallsvinkeln på det främre bärplanet. En sådan funktion skulle kunna ge större flexibilitet vid trimning och anpassning till olika drifttillstånd, samt skapa bättre möjligheter att optimera systemets lyftkraft och stabilitet under varierande förhållanden.

Slutligen finns tydliga utvecklingsmöjligheter i att gå ifrån den upplåsbara brädan och i stället utveckla ett eget styvt skrov. Ett styvt skrov skulle kunna bidra till högre strukturell styvhet i hela systemet, vilket i sin tur kan minska oönskade deformationer och förbättra reglerbarheten. Dessutom skulle ett egenutvecklat skrov möjliggöra mer specialanpassade lösningar för elektroniklådor, infästningar och integrering av övriga systemkomponenter.

6.6 Jämförelse med tidigare projekt

Eftersom projektet syftade till att testa en ny foiluppsättning med endast en vertikal mast finns få direkta likheter med tidigare projekt inom området. Projektets båt har dessutom skalats upp i storlek, vilket har medfört högre laster och därmed ökade krav på komponenternas hållfasthet, dimensionering och infästningar.

De likheter som finns återfinns främst i elektronik- och reglersystemet, där implementeringen av ArduPilot samt användningen av differential thrust i stort sett följer tidigare upplagor. Detta innebär att den övergripande systemarkitekturen är beprövad, även om den nu tillämpas på en mer krävande mekanisk plattform.

Tidigare projekt har använt katamaranskrov, vilket ger god initial stabilitet. I detta projekt används istället en enskrovsbåt, vilket minskar den passiva stabiliteten och därmed ökar kraven på det aktiva reglersystemet för att uppnå stabil flygning.

I och med syftet att endast använda en vertikal mast har även metoden för att reglera anfallsvinkeln förändrats. Tidigare projekt har antingen reglerat hela staget eller använt push-rods inuti masten, vilket möjliggör att servomotorer och elektronik kan placeras ovanför vattenytan. I detta projekt används istället kontrolllytor under vattenytan, vilket innebär att servon och mekanik exponeras för vattenmiljön, men samtidigt ger snabbare och mer direkt styrning.

Ur ett tillverkningsperspektiv är projektet också mer komplext. Tidigare projekt har, på grund av lägre belastningar, kunnat använda 3D-utskrift i större utsträckning för bärande komponenter. I detta projekt har istället fräsning och svarvning använts för kritiska delar såsom inre strukturer och servoaxlar, vilket ökar tillverkningsarbetet

men möjliggör högre precision och hållfasthet.

Sammanfattningsvis kan projektet ses som ett tydligt steg bort från tidigare designlösningar och kan betraktas som den första iterationen i en ny projektkedja, där fokus ligger på en enmastad foilkonfiguration och aktiv styrning av kontrolllytor under vattenytan.

6.7 Måluppfyllnad

I detta avsnitt utvärderas projektets resultat mot de fyra huvudsakliga målen som sattes upp i början av arbetet.

Det första målet var att konstruera en prototyp baserad på en surfbräda med en foilkonstruktion samt ett autopilotssystem som ska kunna lyfta och bibehålla farkosten stabilt i ett foilande läge. Arbetet lyckades framgångsrikt bygga och integrera det mekaniska och elektriska systemet i båten. Vid det första fälttestet bevisades att foilen var hydrodynamiskt korrekt dimensionerad, då farkosten lyckades lyfta hela skrovet ur vattnet. Dock kunde båten inte bibehålla stabilitet i luften på grund av att vattentätningen av servona inte fungerade som planerat, vilket ledde till att kontrolllytorna slutade fungera. Målet anses därmed vara delvis uppfyllt.

Ett ytterligare mål var att framföra farkosten i 6 m/s och samtidigt bära en nettolast på 30 kg. Eftersom båten förlorade sin förmåga till aktiv reglering kunde ett stabilt foilande läge inte upprätthållas. Därmed kunde inga slutsatser kring dessa två mål dras.

Systematisk dokumentation för framtida utveckling utgjorde det fjärde målet. Detta formulerades för att noggrant dokumentera designval, tester och resultat så att framtida projekt kan ta vid där detta arbete avslutas. Detta mål anses vara väl uppfyllt. Genom rapporten har gruppen utförligt redovisat hela konstruktionsprocessen, teorin bakom systemdesignen samt de mjukvaruinställningar som använts. Tester i labbmiljö har gett en tydlig bild av komponenternas kapacitet och begränsningar. Dessutom har gruppen identifierat kritiska förbättringsområden, vilket ger en god plattform för framtida arbeten att bygga vidare på.

6.8 Slutsats

Den övergripande slutsatsen är att gruppen framgångsrikt har visat att foilkonceptet fungerar ur ett mekaniskt och hydrodynamiskt perspektiv, samt att det under begränsad tid var möjligt att konstruera och tillverka en självreglerande foilande båt. För att en framtida version ska kunna flyga stabilt bör fokus ligga på att öka systemets robusthet, särskilt inom elektronik och systemintegration. Eftersom stabil foiling inte uppnåddes är gruppen naturligtvis besviken, men samtidigt nöjd och stolt över det arbete som har genomförts. Projektet har dessutom väckt ett stort intresse för foilingbåtar, och gruppens förhoppning är att framtida projekt kan bygga vidare på dessa resultat och uppnå stabil foiling.

Litteraturförteckning

- Alfredsson, H., Börjesson, L., Hansson, F., Kongstad, A., Palm, I., & Sundström, H. (2024). *Bärplansbåt - Från koncept till konstruktion* [Kandidatarbete]. Chalmers tekniska högskola. <http://hdl.handle.net/20.500.12380/307775>
- Anderberg, E. (2024). *Stabilizing a Single Strut Hydrofoil Using Linear-Quadratic Control and Gain Scheduling* [Masteruppsats]. Kungliga Tekniska högskolan. Hämtad 25 februari 2026, från <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1853074/FULLTEXT01.pdf>
- Anderson, J. D. (u. å). Fundamentals of Aerodynamics (Part 1). <https://www.cedeengineering.com/userfiles/Fundamentals%20of%20Aerodynamics-Part%201%20R1.pdf>
- Artemis Technologies. (u. å). *Mission*. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.artemistechnologies.co.uk/mission/>
- Baker, D., Haynes, W., & West, D. (u. å). *Statics: Moment of Force*. Engineering Statics. Hämtad 12 april 2026, från <https://engineeringstatics.org/moment-of-force.html>
- Barman, A., Mischke, S., Ouahid Hessissen, A., Sörfeldt, A., & Varvne, M. (2024). *HSC Vinga Electric Hydrofoiling Passenger Ferry for Styröbolaget, sailing in the Southern Archipelago of Gothenburg* (Marine design project). Chalmers Tekniska Högskola.
- Bengtsson, N., & Pålsson, C. (2026 januari). *Europe in Transition* (Konferenspresentation). maritime-insight Executive Meeting, Göteborg, Sverige.
- Björk, C., Classon, G., El-Haddad, O., Netz, S., Nordström, A., & Strid, N. (2025). *Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp* [Kandidatarbete]. Chalmers tekniska högskola. Hämtad 24 februari 2026, från <http://hdl.handle.net/20.500.12380/310023>
- Candela Technology AB. (2024, 29. oktober). *World's First Electric Hydrofoil Ferry Line Takes Off in Stockholm*. Hämtad 24 februari 2026, från <https://candela.com/sv/newsroom/worlds-first-electric-hydrofoil-ferry-line-takes-off-in-stockholm/>
- Chapin, S. R. (1986). History of the PHM. *Proceedings*, 112(9). Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.usni.org/magazines/proceedings/1986/september/history-phm>
- Chapman, S. J. (2011). *Electric Machinery Fundamentals* (5. utg.). McGraw-Hill.

- Clifford, P. (2021, 9. mars). *How F1 Technology Is Leading America's Cup Boat Development*. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.redbull.com/int-en/how-f1-technology-is-leading-americas-cup-boat-development>
- Deperrois, A. (2010 november). Stability and Control Analysis using XF5R5 [Revision 2.1].
- Donyavizadeh, N., Bensow, R., & Eslamdoost, A. (2024). Open Water Performance of Two Different Ducted Propellers in Oblique Flow. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Marine Propulsors (smp'24)*. <https://doi.org/10.15480/882.9341>
- Embry-Riddle Aeronautical University. (n.d.). Finite Wing Characteristics. Hämtad 23 mars 2026, från <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/finite-wing-characteristics/>
- ePropulsion. (n.d.). Propeller Diameter and Pitch Guide. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www.epropulsion.com/news-media/electric-boating-blog/prop-diameter-pitch-guide>
- European Commission. (2005). *Motorways of the Sea* (Information brochure Nr Priority Axis No 21) (Accessed 2026-04-22). European Commission. <https://ec.europa.eu/>
- Faltinsen, O. M. (2005). *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press.
- Federal Aviation Administration. (2023). *Chapter 6: Flight Controls*. FAA. Hämtad 12 april 2026, från <https://www.faa.gov/regulationspolicies/handbooksmaterials/aviation/phak/chapter-6-flight-controls>
- Futaba Corporation. (u. å). *User Manual*. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.rc.futaba.co.jp/downloads/W8C833N2408291423ak6wp.pdf>
- Green, M. (2025 oktober). 'The sound completely changes': To electrify boats, make them fly. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.bbc.com/future/article/20251023-how-hydrofoil-boats-could-cut-emissions-from-water-transport>
- Gregory, N., & O'Reilly, C. L. (1970). *Low-Speed Aerodynamic Characteristics of NACA 0012 Aerofoil Section, including the Effects of Upper-Surface Roughness Simulating Hoar Frost* (Reports and Memoranda No. 3726) (Tillgänglig via Cranfield University AERADE repository. Tryckt utgåva anges även som (1973) i rapporten.). Aeronautical Research Council. Hämtad 23 mars 2026, från <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826.2/3003/arc-rm-3726.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Ibrahim, R. A., & Grace, I. M. (2010). Modeling of Ship Roll Dynamics and Its Coupling with Heave and Pitch. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010(1), 934714. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2010/934714>
- International Energy Agency. (u. å). *Trucks and Buses*. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.iea.org/energy-system/transport/trucks-and-buses>
- International Energy Agency. (2025). *Global EV Outlook 2025*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- International Maritime Organization. (2020). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020: Full Report and Annexes*. International Maritime Organization. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>

- Isaly, A., Deleon, S., Diaz, A., Divaker, M., Earl, R., Murphy, L., & Ortega, A. (n.d.). *UF Foil: Prototyping of a Single-Mast Electric Hydrofoil* (Faculty advisor: Peter Ifju). University of Florida, Unmanned Aircraft Systems Research Program.
- Jiang, J., Ding, J., & Eslamdoost, A. (2025). Energy conversion and performance analysis of the submerged waterjet relative to the conventional waterjet in self-propulsion. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120699>
- Johansson, M. (2023). *Hydrofoil Vessel Design and Analysis* [examensuppsats, Lunds universitet]. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=9204778&fileId=9204898>
- Johnston, R. J. (1985). Chapter V: Hydrofoils [Special issue (Vol. 97, No. 2 of Naval Engineers Journal)]. I P. Colwell & R. Hurst (Red.), *Modern Ships and Craft: A Special Edition of the Naval Engineers Journal* (s. 142–199). American Society of Naval Engineers. Hämtad 29 mars 2026, från <https://foils.org/wp-content/uploads/2017/12/Naval-Engineers-Journal-Modern-Ships-and-Craft-71242.pdf>
- Kerwin, J. E. (2007). Hydrofoils and Propellers Lecture Notes. https://ocw.mit.edu/courses/2-23-hydrofoils-and-propellers-spring-2007/6f698ed019180565602e04d6a7a71856_kerwin_notes.pdf
- Lantmäteriet. (n.d.). *GPS och andra GNSS*. Lantmäteriet. Hämtad 4 maj 2026, från <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/GPS-och-satellitpositionering/GPS-och-andra-GNSS/>
- Lennartson, B. (2002). *Reglerteknikens grunder* (4. utg.). Studentlitteratur.
- Lock Favrum, E., & Lundqvist, N. (2022). *Hydrodynamic Design, System Design and Control System for a Model-Scale Foiling Boat* [Master's thesis]. Chalmers tekniska högskola. <https://hdl.handle.net/20.500.12380/305595>
- Marimon Giovannetti, L., Farousi, A., Ebbesson, F., Thollot, A., Shiri, A., & Eslamdoost, A. (2022). Fluid-Structure Interaction of a Foiling Craft. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/jmse10030372>
- Massachusetts Institute of Technology. (u. å). *How a Hydrofoil Works*. MIT. Hämtad 23 mars 2026, från <https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>
- Massachusetts Institute of Technology. (2005). *Propeller Performance (Reading 10)* (Course notes). Massachusetts Institute of Technology. Hämtad 23 mars 2026, från <https://web.mit.edu/2.016/www/handouts/2005Reading10.pdf>
- Meyer Jr., J. R. (2007). *Hydrofoil Overview – A Brief Tutorial* [Teknisk handledning]. Hämtad 25 februari 2026, från <https://www.foils.org/wp-content/uploads/2018/01/HY-Tutorial.pdf>
- NASA. (u. å-a). *The Aeronautics of the Space Shuttle*. National Aeronautics och Space Administration. Hämtad 12 april 2026, från <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/langley/the-aeronautics-of-the-space-shuttle/>
- NASA. (u. å-b). *Images and Media*. National Aeronautics och Space Administration. Hämtad 12 april 2026, från <https://www.nasa.gov/nasa-brand-center/images-and-media/>

- NASA. (1998). *Hydrodynamic Characteristics of Hydrofoils* (tekn. rapport). NASA. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19980228299/downloads/19980228299.pdf>
- NASA. (n.d.-a). Propeller Thrust. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/propth.html>
- NASA. (n.d.-b). Thrust Force. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-force/>
- NASA Glenn Research Center. (u. å-a). *Airplane Parts and Function*. National Aeronautics och Space Administration. Hämtad 12 april 2026, från <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/airplane-parts-function/>
- NASA Glenn Research Center. (u. å-b). *Reynolds Number*. National Aeronautics och Space Administration. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/reynolds.html>
- NASA Glenn Research Center. (2024a, 18. juli). *Fluid Dynamics Interactive*. National Aeronautics och Space Administration. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foiling/>
- NASA Glenn Research Center. (2024b, 19. juli). *Drag Coefficient*. National Aeronautics och Space Administration. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-coefficient/>
- NASA Glenn Research Center. (2024c, 23. juli). *Lift Coefficient*. National Aeronautics och Space Administration. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/lift-coefficient/>
- NASA Glenn Research Center. (2025, 1. juli). *Drag Equation*. National Aeronautics och Space Administration. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/>
- Nationalencyklopedin. (u. å). *Bärplansbåt*. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/b%C3%A4rplansb%C3%A5t>
- NXP Semiconductors. (u. å). *AN1734 Application Note*. NXP Semiconductors. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN1734.pdf>
- OpenStax. (n.d.). Newton's Third Law. Hämtad 23 mars 2026, från <https://pressbooks.bccampus.ca/universityphysicssandboxbook1/chapter/newtons-third-law/>
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., m. fl. (2001). *The Audible Spectrum*. I *Neuroscience* (2. utg.). Sinauer Associates. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10924/>
- PX4 Development Team. (u. å). *CUAV X25-EVO*. PX4 Autopilot Project. Hämtad 13 april 2026, från https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/cuav_x25-evo
- Rickenbacher, J.-L. (2021 maj). *Flying boats* – Swiss National Museum - Swiss history blog. Hämtad 24 februari 2026, från <https://blog.nationalmuseum.ch/en/2021/05/flying-boats/>
- RS Components. (u. å). *Datasheet*. Hämtad 24 februari 2026, från <https://docs.rs-online.com/9885/0900766b8153438a.pdf>

- Sheldahl, R. E., & Klimas, P. C. (1981 mars). *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines* (tekn. rapport Nr SAND80-2114). Sandia National Laboratories. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www.osti.gov/servlets/purl/6548367>
- Sinaga, N., Dhande, D. Y., & Yunianto, B. (2022). A numerical investigation of the effect of blade number on the performance of an INSEAN E779A marine propeller in a cavitating flow using computational fluid dynamics. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112063>
- Stark, C., Shi, W., & Atlar, M. (2021). Hydrodynamic Performance of a Ducted Propeller in Oblique Flow and Wave Conditions. *Ocean Engineering*, 225, 111249. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.111249>
- Stone Marine Propulsion. (2021). *Cavitation of Propellers* (Technical report). Stone Marine Propulsion Ltd. Hämtad 23 mars 2026, från <https://stonemarinepropulsion.com/wp-content/uploads/2021/08/Cavitation-of-Propellers-NL.pdf>
- Taghnia, G., & Esmaeili, A. (2025). Computational Fluid Dynamics Analysis of Cavitating Hydrofoils Near the Sea Surface in Supercritical Open Channel Flows. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 19(2), 76–91. <https://doi.org/10.47176/jafm.19.2.3703>
- U.S. Navy Bureau of Ships. (1954). *Hydrofoil Handbook, Volume I*. U.S. Government Printing Office. https://www.foils.org/wp-content/uploads/2018/01/HFhd_bkVol_I_1954.pdf
- Wang, Y., Xiao, Y., Fang, B., Li, W., Duan, C., Zhang, W., & Hu, J. (2025). Effect of Blade Number on Tip Vortex Cavitation of Propeller. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/jmse13050915>
- Wheatley, M. (u. å-a). *America's Cup History*. Hämtad 24 februari 2026, från <https://www.americascup.com/history>
- Wheatley, M. (u. å-b). *The Birth of Foiling in the Cup*. Hämtad 24 februari 2026, från https://www.americascup.com/history/74_THE-BIRTH-OF-FOILING-IN-THE-CUP
- von Ellenrieder, K. D. (2021). *Control of marine vehicles*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-75021-3>
- Wärtsilä. (n.d.). Waterjet Propulsion. Hämtad 23 mars 2026, från <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/waterjet-propulsion>
- Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press.

A

VESC-tool konfiguration

Tabell A.1: Konfiguration av motor- och appinställningar i VESC-tool

Motorkonfiguration		Appkonfiguration	
Parameter	Value	Parameter	Value
conf_general_version	2	controller_id	33
motor_type	2	timeout_msec	1000
sensor_mode	0	timeout_brake_current	0
l_current_max	85.33	send_can_status	1
l_current_min	-85.33	can_baud_rate	2
l_in_current_max	60	pairing_done	0
l_in_current_min	-200	permanent_uart_enabled	1
l_abs_current_max	127.99	shutdown_mode	0
l_min_erpm	-100000	app_to_use	4
l_max_erpm	100000	app_ppm_conf.ctrl_type	0
l_max_erpm_fbrake	30000	app_ppm_conf.pid_max_erpm	15000
l_max_erpm_fbrake_cc	1500	app_ppm_conf.hyst	0.15
l_min_vin	12	app_ppm_conf.pulse_start	1
l_max_vin	72	app_ppm_conf.pulse_end	2
l_battery_cut_start	40	app_ppm_conf.median_filter	1
l_battery_cut_end	21	app_ppm_conf.safe_start	1
l_slow_abs_current	1	app_ppm_conf.throttle_exp	0
l_temp_fet_start	85	app_ppm_conf.throttle_exp_brake	0
l_temp_fet_end	100	app_ppm_conf.ramp_time_pos	0.4
l_temp_motor_start	85	app_ppm_conf.ramp_time_neg	0.2
l_temp_motor_end	100	app_ppm_conf.multi_esc	0
sl_min_erpm	250	app_adc_conf.ctrl_type	0
sl_min_erpm_cycle_int_limit	1100	app_adc_conf.hyst	0.15
sl_max_fullbreak_current_dir_change	10	app_adc_conf.voltage_start	0.9
sl_cycle_int_limit	62	app_adc_conf.voltage_end	3
sl_phase_advance_at_br	0.8	app_adc_conf.use_filter	1
sl_cycle_int_rpm_br	80000	app_adc_conf.safe_start	1
sl_bemf_coupling_k	600	imu_conf.type	1
hall_table__0	255	imu_conf.sample_rate_hz	200
hall_table__1	255	imu_conf.mode	0

Tabell A.1: Konfiguration av motor- och appinställningar i VESC-tool

Motorkonfiguration		Appkonfiguration	
hall_table__2	255	imu_conf.mahony_kp	2
hall_table__3	255	imu_conf.mahony_ki	0
hall_table__4	255	imu_conf.madgwick_beta	0.1
hall_table__5	255	can_status_rate_1	50
hall_table__6	255	can_status_rate_2	5
hall_table__7	255	can_status_msgs_r1	15
foc_current_kp	0.024103	can_status_msgs_r2	0
foc_current_ki	22.8916		
foc_f_sw	20000		
foc_dt_us	0.12		
foc_encoder_inverted	0		
foc_encoder_ratio	7		
foc_motor_l	0.00002408		
foc_motor_r	0.036017		
foc_motor_flux_linkage	0.005291		
foc_observer_gain	8.32E7		
foc_observer_gain_slow	0.05		
foc_pll_kp	2000		
foc_pll_ki	30000		
foc_openloop_rpm	1500		
foc_sat_comp	0		
foc_temp_comp	0		
foc_fw_current_max	0		
foc_fw_duty_start	0.9		
foc_position_pid_kp	0.025		
foc_position_pid_ki	0		
foc_position_pid_kd	0		

B

Fullständiga MissionPlanner parametrar

Tabell B.1: Parameteröversikt för reglersystem

Parameter	Funktion
EK3_RNG_USE_HGT	Anger att höjdsensorn (rangefinder) används som primär höjdkälla när mätvärden ligger inom det giltiga mätintervallet.
EK3_RNG_USE_SPD	Anger att höjdsensorn (rangefinder) 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	TAKEOFF-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 rangefinder 1.
RUDD_DT_GAIN	Justerar förhållandet mellan roder och framdrivnings-differential vid gir.
TECS_TKOFF_IGAIN	Denna parameter avser integrerande verkan i återkopplingen i läget TAKEOFF.
TERRAIN_FOLLOW	Tillåter terrängföljning i autolägena CRUISE och FBWB.
TERRAIN_LOOKAHD	Kontrollerar hur lång sträcka fram som höjden läses av för att undvikas.

Parameter	Funktion
TERRAIN_MARGIN	Avståndsmarginal för data att accepteras från styrenheten i lägen där TERRAIN_FOLLOW används.
TKOFF_ALT	Avser önskad höjd att nå i läget TAKEOFF.
TKOFF_DIST	Avser önskat avstånd att cirkulera från punkten där TAKEOFF aktiverades.
TKOFF_FLAP_PCNT	Justerar hur många procent av total flapsvinkel som används vid läget TAKEOFF.
TKOFF_LVL_ALT	Under denna höjd hålls samtliga vingar i neutralt läge under flygning i läget TAKEOFF.
TKOFF_LVL_PITCH	Avser önskad stigningsvinkel under flygning i läget TAKEOFF.
TRIM_THROTTLE	Bestämmer procentuell andel av motoreffekt för att användas i lägen där automatisk gaspådrag används.

C

Komponentlista

Tabell C.1: Komponentlista

ID	Komponent	Material	Antal
Foil			
1.01	Mast	Aluminium	1
1.02	Mastkoppling till bräda	Aluminium	1
1.03	Kabelskydd	PETG	1
1.04	Urfräst profil	Aluminium	1
1.05	Inre struktur främre vinge	Aluminium	1
1.06	Koppling främre vinge 30x30	Aluminium	1
1.07	Inre struktur bakre vinge	Aluminium	1
1.08	Bulb främre vinge	PETG	2
1.09	Vingprofil främre vinge	PETG	2
1.10	Flap främre vinge	PETG	2
1.11	Flap bakre vinge	PETG	2
1.12	Motorfäste	PETG	2
1.13	Propellrar	PETG m Kolfiber	2
1.14	Servohus bakre vinge	PETG	2
1.15	Vingprofil bakre vinge	PETG	2
1.16	Koppling bakre vinge 30x30	Aluminium	1
1.17	Fueselage	PETG	3
1.18	Skruv M6	Stål	6
1.19	Mutter M6	Stål	4
Skrov och överbyggnad			
2.01	Surfbräda	Aluminium	1
2.02	Bottenplatta	Aluminium	1
2.03	Fäste till platta för	Aluminium	1
2.04	Fäste till platta akter	Aluminium	1
2.05	Maskinskruv M4 20 mm	Rostfritt stål	16
2.06	Låsmutter Nyloc M4	Rostfritt stål	16
2.07	Metallskydd	PVC	
2.08	Rem under bräda	Polyester	2
2.09	Dyneemalina för fastspänning	Polyester	2
2.10	Kopplingslåda	PE plast	2

Tabell C.1: Komponentlista

ID	Komponent	Material	Antal
Sensorfäste			
3.01	Peke	Kolfiber	1
3.02	Adapter till luftskruv	PETG	1
3.03	Stötta till peke	PETG	1
3.04	Kolfiberstav 2 mm	Kolfiber	1
3.05	Klämma peke	Kolfiber	1
3.06	Vinkeljärn 20x50 mm	Aluminium	2
3.07	Fäste sensorskydd	Aluminium	1
3.08	Sensorskydd botten	PETG	1
3.09	Sensorskydd lock	PETG	1
3.10	O-ring tätning sensorskydd	Gummi	1
3.11	Bygel 4 mm	Rostfritt stål	1
3.12	Stag	Dyneema	2
3.13	Maskinskruv M4 40 mm	Rostfritt stål	15
3.14	Låsmutter Nyloc M4	Rostfritt stål	15

**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2026

www.chalmers.se



CHALMERS