



CHALMERS



Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp

Hydrodynamisk design, framdrivning och reglering

Kandidatarbete inom Maskinteknik och Automation och Mekatronik

AXEL LASSESGÅRDEN
JONATAN LINGMERT
MARCUS NILSSON
ALVAR THUNBERG
HUGO THURHAGEN
ADRIAN WOLMARSSON

INSTITUTIONEN FÖR MECHANICAL ENGINEERING

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

KANDIDATARBETE VÅRTERMINEN 2026

Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp

Hydrodynamisk design, framdrivning och reglering

AXEL LASSESGÅRDEN
JONATAN LINGMERT
MARCUS NILSSON
ALVAR THUNBERG
HUGO THURHAGEN
ADRIAN WOLMARSSON



CHALMERS

Institutionen för Mechanical Engineering
Avdelningen för Marin teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp
Hydrodynamisk design, framdrivning och reglering
AXEL LASSESGÅRDEN
JONATAN LINGMERT
MARCUS NILSSON
ALVAR THUNBERG
HUGO THURHAGEN
ADRIAN WOLMARSSON

© AXEL LASSESGÅRDEN, JONATAN LINGMERT, MARCUS NILSSON,
ALVAR THUNBERG, HUGO THURHAGEN, ADRIAN WOLMARSSON, 2026.

Handledare: Arash Eslamdoost, Institutionen för Mechanical Engineering
Nils Marco Lundqvist, Institutionen för Mechanical Engineering
Examinator: Arash Eslamdoost, Institutionen för Mechanical Engineering

Kandidatarbete 2026
Institutionen för Mechanical Engineering
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Slutgiltig konstruktion av bärplansbåten

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2026

Bärplansbåt - Från koncept till självreglerande prototyp
AXEL LASSESGÅRDEN, JONATAN LINGMERT, MARCUS NILSSON,
ALVAR THUNBERG, HUGO THURHAGEN, ADRIAN WOLMARSSON
Institutionen för Mechanical Engineering
Avdelningen för Marin teknik
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Denna kandidatuppsats beskriver konstruktionen och utvärderingen av en självreglerande bärplansbåt. Arbetet är en del av ett flerårigt projektområde där målet för årets iteration har varit en betydande uppskalning av bärplansbåten. Fokuset har legat på att öka båtens fysiska dimensioner, framdrivningseffekt såväl marschfart för att undersöka hur bärplanstekniken fungerar i en större skala.

Tekniken bygger på att underliggande bärplan genererar lyftkraft i vattnet, vilket lyfter skrovet över ytan och drastiskt minskar det hydrodynamiska motståndet. Den minskade energiåtgång som uppstår när båten är i flygande läge bidrar till att reducera de räckviddsbegränsningar som tidigare har hämmat elektrifieringen av sjöfarten.

Båten består av ett främre och bakre bärplan samt ett roder på bakre masten, med kontroller för att justera båten runt dess tre rotationsaxlar. Kontrollsystemet, som är baserat på ArduPilot, använder det främre bärplanet för att reglera lyft och rullning, medan det bakre bärplanet och rodet ansvarar för stigning och gir. I projektet har ett färdigt skrov i form av en surfbräda avsedd för flygning använts. Detta har möjliggjort ett fördjupat fokus på andra kritiska aspekter och en modulär konstruktion anpassad för både vidareutveckling och större krafter.

Systemets funktionalitet har utvärderats genom tekniska belastningstester av drivlinan samt praktiska fälttester av konstruktionen som helhet. Resultatet visar att den uppskalade båten framgångsrikt kan uppnå stabil flygning, även med 20 kg extern last, vilket innebär att projektets mål delvis är uppfyllt. Vid fälttesten identifierades konstruktionsmässiga och systemtekniska begränsningar. Dessa observationer har analyserats och dokumenterats för att ligga till grund för framtida optimering av plattformens stabilitet och sensorprestanda.

Nyckelord: bärplansbåt, hydrofoiling, ArduPilot, Mission Planner, hydrodynamik, lyftkraft, regelsystem, XFLR5, modularitet

Abstract

This bachelor's thesis describes the design, construction and evaluation of a self-regulating hydrofoil boat. The work is part of a multi-year project where the goal for this year's iteration was a significant upscaling of the system. The focus has been on increasing the vessel's physical dimensions, propulsion power as well as cruising speed to investigate the functionality of hydrofoil technology on a larger scale.

The technology is based on underlying foils generating lift in the water, which raises the hull above the surface and drastically reduces hydrodynamic drag. The decreased energy consumption achieved during flight helps reduce the range limitations which for long has been the problem for the electrification of the maritime sector.

As previous years, the boat consists of a forward and a rear foil equipped with control surfaces to adjust the vessel's orientation across all three axes. The control system, based on ArduPilot, utilizes the forward foil to regulate lift and roll, while the rear foil is responsible for yaw and pitch. In contrast to previous years, a pre-existing hull in the form of a foil surfboard was used. This enabled deeper focus on other critical aspects such as custom manufactured propellers, optimized wing profiles, and a modular design adapted for both further development and increased forces.

The system's functionality was evaluated through technical load tests of the powertrain and practical field tests of the overall design. The results show that the boat successfully achieves stable flight, even with a 20 kg external payload, meaning the project's goals were partially met. During field testing, certain structural and technical limitations were identified. These observations have been analyzed and documented to serve as a foundation for future optimizations of platform stability and sensor performance.

Förord

Denna rapport är resultatet av ett kandidatarbete utfört vid Institutionen för Mechanical Engineering vid Chalmers Tekniska Högskola under våren 2026. Projektet ingår som en del av ett flerårigt projektområde rörande bärplansteknik och dess applikationer inom eldriven sjöfart.

Tanken med årets arbete har varit att vidareutveckla tidigare konstruktioner genom betydande uppskalning av systemet. Med utgångspunkt i tidigare års erfarenheter har målet varit att konstruera och utvärdera en radiostyrd modell av en självreglerande bärplansbåt, med ökad fysisk dimension och framdrivningseffekt. Rapporten beskriver hela processen från design och materialval till teknisk utvärdering genom fälttester.

Författarnas tack

Inledningsvis vill vi rikta ett stort tack till våra handledare, universitetslektor Arash Eslamdoost samt doktorand Nils Lundqvist, för deras stora engagemang och expertis. Deras råd och vägledning har varit ovärderlig genom hela projektets gång.

Vi vill även uttrycka vår tacksamhet till personalen i FUSE och prototyplabbet på Chalmers Tekniska Högskola. Deras stöd har haft en avgörande betydelse för den praktiska utvecklingen av projektet, och vi uppskattar särskilt möjligheten att ha fått utnyttja FUSE lokaler för förvaring och arbete. Ett varmt tack riktas även till Rådasjöns Segelsällskap för att vi fått bedriva fältstudier vid deras anläggning samt för lånet av följebåt.

Slutligen vill vi tacka båt företaget Candela för ett inspirerande studiebesök vid deras anläggning i Stockholm. Besöket gav oss värdefulla inblickar i branschen och bärplansteknikens framkant. Vi tackar även för möjligheten att använda bilder ur deras mediearkiv. Resan möjliggjordes tack vare generöst stöd från Rolf Sörmans Fond, vilket vi är mycket tacksamma för.

Författarna, Göteborg, Maj 2026

Innehåll

1	Bakgrund	1
1.1	Tidigare projekt	1
1.2	Syfte	3
1.3	Mål	3
1.4	Avgränsningar	4
2	Teori	5
2.1	Verkande krafter	5
2.2	Flygteori	6
2.3	Konfiguration	10
2.3.1	Positionering av master	12
2.4	Beräkningar	13
2.4.1	Ekvationer och samband	13
2.4.2	Programmet XFLR5	14
2.4.3	Computational Fluid Dynamics	15
2.5	Vingklaffar	15
2.6	Pulsbreddsmodulering	17
2.7	Framdrivning	17
2.7.1	Batteri	17
2.7.2	Electronic Speed Controller	19
2.7.3	Borstlös motor	20
2.7.4	Propellrar	20
2.8	Kavitation och ventiler	23
2.9	Kapslingsklassning	25
2.10	Reglersystem	25
2.10.1	PID-reglering	26
2.10.2	Ultraljudssensor	26
2.10.3	GNSS-modul	26
2.11	ArduPilot	27
3	Systemdesign	28
3.1	Mekanik och strukturella delar	28
3.1.1	Skrov	29
3.1.2	Överbyggnad	29
3.1.3	Mast	31
3.1.4	Servomotorinfästning	32
3.1.5	Motorinfästning	34
3.1.6	Propellrar	35
3.1.7	Bärplan	36
3.1.7.1	Bärplansprofil och dimensionering	36

3.1.7.2	Främre bärplan	41
3.1.7.3	Bakre bärplan	44
3.1.8	Kontrolllytor	45
3.2	Elektronik	45
3.2.1	ESC	46
3.2.2	Motorer	48
3.2.3	BEC	48
3.2.4	Styrenhet	49
3.2.5	Servomotor	49
3.2.6	GNSS	50
3.2.7	Ultraljudssensor	50
3.2.8	Trådlös telemetri	51
4	Test	52
4.1	Termisk utvärdering av ESC	52
4.2	Prestandatest och materialutvärdering av propellrar	53
4.3	Utvärdering av systemlatens och svarstider	53
4.4	Fälttest	53
5	Resultat	55
5.1	Resultat av tester	55
5.1.1	Resultat från termisk utvärdering av ESC	55
5.1.2	Resultat från prestandatest och materialutvärdering av propellrar	56
5.1.3	Resultat från utvärdering av systemlatens och svarstider	58
5.1.4	Resultat från fälttest	58
5.1.4.1	Fälttest 1	58
5.1.4.2	Fälttest 2	61
5.2	Slutgiltig konstruktion	65
6	Diskussion	66
6.1	Tolkning av resultat	66
6.1.1	Krafter och strukturell respons	66
6.1.2	Framdrivning	67
6.1.3	PID-reglering och kontrollrespons	68
6.1.4	Sensorprestanda	68
6.1.5	Ventilation och kavitation	68
6.1.6	Materialsitage och korrosion	68
6.2	Styrkor och förbättringsområden	69
6.2.1	Båtdesign	69
6.2.2	Elektriska komponenter och reglersystem	70
6.3	Jämförelser med tidigare projekt	71
6.4	Måluppfyllnad	72
6.5	Slutsats	73
	Referenser	74
	Appendix	76

A Basic tuning - Inställning i ArduPilot	76
B Full Parameter List - Inställning i ArduPilot	77
C Servo Output - Inställning i ArduPilot	78
D Beräkningsresultat XFLR5	79
E Beräkningsresultat CFD	80
F Pythonkod	86

Figurer

1.1	Koncept framtaget genom en masteruppsats (Lundqvist och Favrum, 2022)	2
1.2	Vidareutveckling av koncept från kandidatarbete (Alfredsson m. fl., 2024)	2
1.3	Vidareutveckling av koncept från kandidatarbete (Björk m. fl., 2025)	3
2.1	Illustration av verkande krafter på bärplansbåt (Candela, u. å-b, med egen illustration)	5
2.2	Illustration av lyftkraften genererad av flödet	6
2.3	Kordlängden, c	7
2.4	Vingspetsfenor	7
2.5	V-format bärplan med avtagande kordlängd enligt pilar	8
2.6	Anfallsvinkel	8
2.7	Skillnad mellan monteringsvinkel och anfallsvinkel	9
2.8	En förenklad figur över momentjämvikten som genereras från bärplanen (Candela, u. å-b, med egen illustration)	9
2.9	Negativ och positiv välvning mot dess stabila stigningsgrafer	10
2.10	Rotationsaxlar (Google Gemini med egen illustration)	11
2.11	Illustration av ytgenomträngande & nedsänkta bärplan	12
2.12	Vingkonfigurationer	12
2.13	Projicerad area A_p av bärplan, för ekvation 2.4	13
2.14	Rullningsvinkel 0 och 10 grader i XFLR5	15
2.15	Vingklaff jämförelse (NiD.29, 2011)	16
2.16	Jämförelse av två olika PWM-signaler	17
2.17	Trefas jämförelse med fyrkantsvågor och sinusvågor (Plot i Python, se bilaga F)	19
2.18	Visualisering av propellerparametrar (Chat-GPT samt egen illustration)	21
2.19	Bredd- och diameterförhållande för marin- och flygindustri	22
2.20	Ventilering & kavitation runt propeller	24
2.21	Ventilering runt ett bärplan (Duncan m. fl., 2023)	24
2.22	Kavitation runt ett bärplan (S.A.Kinnas, 1996)	25
3.1	Systemdesignen indelad i mekanisk och elektronisk design	28
3.2	CAD-modell av överbyggnad i aluminiumprofil (20×20 mm)	30
3.3	CAD-modell av bottenplatta, adapter mellan surfbrädan och aluminiumprofilen	30
3.4	Genomskärning av nedre del av främre mast	31
3.5	Bakre mastens tekniska konfigurationer	32
3.6	Nedre del av mast	32
3.7	CAD modell av servofäste för främre mast	33
3.8	Koppling mellan länkarm och servomotor	33
3.9	Motorfäste, motor och propeller monterad runt mast	34
3.10	Första urvalet av propellrar	35
3.11	Graf C_L/C_D mot α för analyserade profiler från XFLR5	37
3.12	FX84W097 profil	37

3.13	Graf C_D mot α för analyserade profiler från XFLR5	38
3.14	NACA 0010 profil	38
3.15	Modellering av den våta strukturen i XFLR5	39
3.16	Dimensioner av det främre bärplanet i XFLR5	39
3.17	Dimensioner av det bakre bärplanet i XFLR5	40
3.18	Stabilitetsgrafen C_m mot α från XFLR5 (grafen representerar båtens stabilitet vid 6 m/s med en vikt på 70 kg)	41
3.19	Främre bärplan	41
3.20	Främre bärplanets sida med hål för profiler	42
3.21	Illustration över modulär anfallsvinkel	42
3.22	Gångjärn för det främre bärplanet	43
3.23	Förstärkning för tryckstag	43
3.24	Vingspetsfena på främre bärplan	43
3.25	Bild på hela bakre bärplanet	44
3.26	Bakre bärplanets konstruktion	44
3.27	Tvärsnitt av bakre bärplan	45
3.28	Kopplingsschema över det elektriska systemet	46
3.29	Motorregulatorer i vattentät låda	47
3.30	Inställningar i VESC Tool	48
3.31	Kopplingsschema över BEC	49
3.32	Styrenheten	49
3.33	Servomotor	50
3.34	GNSS-modul	50
3.35	Ultraljudssensor	51
3.36	Trådlös sändare och mottagare för realtids telemetri	51
4.1	Belastningstest av ESC (värmeutveckling)	52
4.2	Propellrar som utvärderas under prestandatestet	53
5.1	Temperaturökning av ESC (Ström och temperatur som funktion av tiden) . . .	56
5.2	ESC-data, Vridmoment (Nm) som funktion av varvtal (RPM)	57
5.3	ESC-data, Duty Cycle (-) som funktion av effekt (W)	57
5.4	Deformation 2-bladig kolfiberförstärkt propeller	58
5.5	Båten stegrar	59
5.6	Servomotor slutar fungera	60
5.7	Justering av infästning av bakre mast	60
5.8	Båten i flygande läge med vibrationer	61
5.9	Väderförhållande under andra fälttestet	62
5.10	Ändring av överbyggnad inför fälttest två	62
5.11	Stillastående oscillationer i höjdroder (från datalogg i ArduPilot)	63
5.12	Misslyckat försök med 30kg extern last	64
5.13	Uttagen datalogg från ArduPilot	64
5.14	Slutgiltig konstruktion	65

1. Bakgrund

Den globala sjöfarten står inför ett omfattande omställningsarbete för att reducera sektorns klimatavtryck. Elektrifiering har identifierats som en nyckelfaktor för att uppnå nollutsläpp, men tekniken begränsas idag av batteriers relativt låga energidensitet jämfört med fossila bränslen. För mindre fartyg och passagerarfärjor innebär detta stora begränsningar i räckvidd och hastighet. För att möjliggöra en fullskalig elektrifiering krävs därför inte bara bättre lagring av energi utan framförallt en drastisk reduktion av fartygens energiförbrukning.

Den största utmaningen för traditionella fartyg är det hydrodynamiska motståndet. När ett skrov rör sig genom vattnet skapas ett friktionsmotstånd som kräver stora mängder energi för att övervinna. Inom specifika hastighetsintervall är planande skrov mer effektiva än icke-planande skrov, då de lyfter en del av konstruktionen och därmed reducerar kontaktarean med vattnet (Crosby, 2019). Denna minskning leder till reducerad friktion, men det höga motståndet är fortfarande kvar jämfört med bärplansteknik. Bärplansteknik tar detta koncept ett steg längre genom att använda vingar monterade under skrovet. Vid en viss hastighet genererar dessa bärplan tillräckligt mycket lyftkraft för att lyfta upp hela skrovet ovanför ytan. Eftersom vatten har betydligt högre densitet än luft, innebär detta att det våta motståndet begränsas till bärplanens yta istället för skrovets undersida.

Genom att implementera bärplansteknik kan farkostens totala energieffektivitet förbättras avsevärt. Den radikala minskningen av det hydrodynamiska motståndet medför att energiförbrukningen kan reduceras upp till 80% i jämförelse med konventionella skrov (Candela, u. å-a). Denna effektivisering är en förutsättning för att eldrivna fartyg ska kunna uppnå en försvarbar räckvidd utan orimligt stora och tunga batteripaket. Bärplanstekniken fungerar därmed som en möjliggörare för framtidens hållbara och eldrivna sjöfart.

1.1 Tidigare projekt

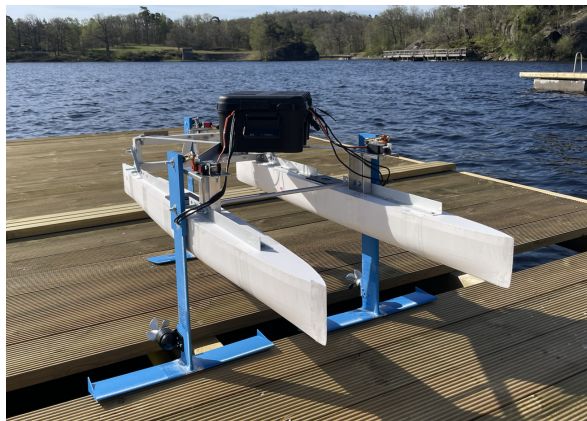
Detta projekt är en del av flerårig forskning vid Chalmers Tekniska Högskola. Forskningen består huvudsakligen av tre stycken studentprojekt av olika akademisk nivå. Varje iteration har bidragit med ny kunskap inom bärplansteknik att bygga vidare på i nästkommande projekt.

Kärnan till projektet skapades vid en masteruppsats inom marin arkitektur och havsteknik (Lundqvist och Favrum, 2022). Målsättningen med projektet var att undersöka och förstå hur positionen av bärplanen påverkade båtens egenskaper, samt bilda allmän kunskap av bärplansteknik. Detta projekt lyckades inte få båten att lyfta på grund av en kombination av för hög vikt, motstånd och för låg lyftkraft. Det upptäcktes även att mellanrummet mellan bärplanet och masten bidrog till att det fysikaliska fenomenet ventilation uppstod, vilket förklaras vidare i 2.8. Konstruktionen som användes visas i figur 1.1.



Figur 1.1: Koncept framtaget genom en masteruppsats (Lundqvist och Favrum, 2022)

Ytterligare ett arbete som genomförts inom detta område är ett kandidatarbete för institutionen för mekanik och maritima vetenskaper (Alfredsson m. fl., 2024). Detta projekt byggde vidare på tidigare års arbete (Lundqvist & Favrum, 2022) med mål att visa att konceptet var möjligt. Båtmodellen skulle få skrovet att lyfta över vattenytan via ett aktivt kontrollsystem. Till detta projekt tilldelades gruppen ett färdigt skrov, se figur 1.2. I arbetet lyckades de få båten att lyfta ur vattnet men inte hålla den stabil över ytan. Deras val att aktivt reglera hela anfallsvinkeln på bärplanet bidrog till att strukturen blev svag och skapade vibrationer, som i sin tur påverkade stabiliteten. Placeringen av tyngdpunkten påverkade stabiliteten negativt då den var placerad för långt bak, vilket resulterade i att båten stegrade.



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

Den senaste utvecklingen i projektserien genomfördes som ännu ett kandidatarbete vid Chalmers Tekniska Högskola (Björk m. fl., 2025). Syftet med detta arbete var att konstruera en radiostyrd, självreglerande bärplansbåt som tog upp de stabilitetsproblem och mekaniska svagheter som identifierats under tidigare år. I detta projekt övergavs konceptet med att vinkla hela masten för att reglera anfallsvinkeln så att konstruktionen blev mer robust, se figur 1.3. Istället infördes skevroder som gick att reglera aktivt under körning med hjälp av

servomotorer kopplade till tryckstänger som gick ner längs masten. Båten utrustades med ett mer avancerat reglersystem, baserat på Pixhawk och mjukvaran ArduPilot, vilket gav möjlighet till aktiv stabilisering av rull, stigning och gir. Genom optimering av Proportionella, Integrerande och Deriverande parametrar (PID) vid fälttest lyckades modellen för första gången uppnå en stabil flygning över vattenytan under flera minuter. Projektet visade dock att tillförlitligheten hos höjdsensorer i marina miljöer är en teknisk utmaning, då vibrationer påverkade ultraljudssensors precision och där även dess indata till systemet.



Figur 1.3: Vidareutveckling av koncept från kandidatarbete (Björk m. fl., 2025)

1.2 Syfte

Projektets huvudsakliga syfte är att designa samt konstruera en modulär obemannad bärplansbåt kapabel att bära extern last och flyga. Båten ska ha sensorstyrd höjddreglering med mål att bibehålla flygande läge under färd, det vill säga då skrovet lyfter från vattenytan. Projektet bygger på tidigare arbeten och syftar till att vidareutveckla arbetet kring bärplans-teknik.

1.3 Mål

Målet för arbetet är att vidareutveckla tidigare års radiostyrda bärplansbåt med ett autonomt reglersystem. Till skillnad från tidigare modeller ska denna kunna bära en extern last på 30 kg. Båten ska även kunna köra i en hastighet på minst 6 m/s och en önskad hastighet på 10 m/s. Reglersystemet ska även kunna hålla båten i flygande läge på en bestämd höjd utan aktiv styrning.

Vidare är målsättningen att ta fram systeminställningar som möjliggör stabil och tillförlitlig drift under varierande körförhållanden. Konstruktionen ska även vara modulär för att möjliggöra enkel vidareutveckling och tester av olika koncept. Båten ska också utformas med hänsyn

till vattentäthet, hållbarhet och estetik.

Ytterligare mål är att utföra ett väldokumenterat projekt som gör det enkelt för framtida års projekt att utveckla projektet ytterligare. Detta ska ske via rapportskrivning, videomaterial, insamlade mätdata samt loggfiler. På så sätt kan idéer och lärdomar under projektets gång föras vidare för kommande projekt.

1.4 Avgränsningar

Projektet är tidsbegränsat till vårterminen 2026, vilket innebär att arbetet huvudsakligen inriktas på utveckling samt verifiering av en fungerande prototyp. Vidare optimering för utökad produktion eller kommersiell användning ingår inte i projektets omfattning. Dessutom är budgeten begränsad, vilket påverkar val av material, tillverkningsmetoder och komponenter.

Skalningseffekter och överförbarhet till större eller mindre båtar analyseras inte. Skrovet utgörs av en befintlig uppblåsbar surfbräda som tillhandahålls projektet. Därför vidareutvecklas inte skrovets form, materialval eller strukturella uppbyggnad. Endast tillbyggnader till själva skrovet kommer att tas fram och utvecklas.

Projektet avgränsas från att undersöka eller utvärdera alternativa mastkonfigurationer, då den befintliga bärplanskonfigurationen, med två master framtill och en baktill, används som utgångspunkt för arbetet. Hydrodynamiska och strukturella analyser begränsas till förenklade analytiska metoder och numeriska verktyg anpassade för projektets omfattning. Vidare beräkningar samt analyser utförs av utomstående parter.

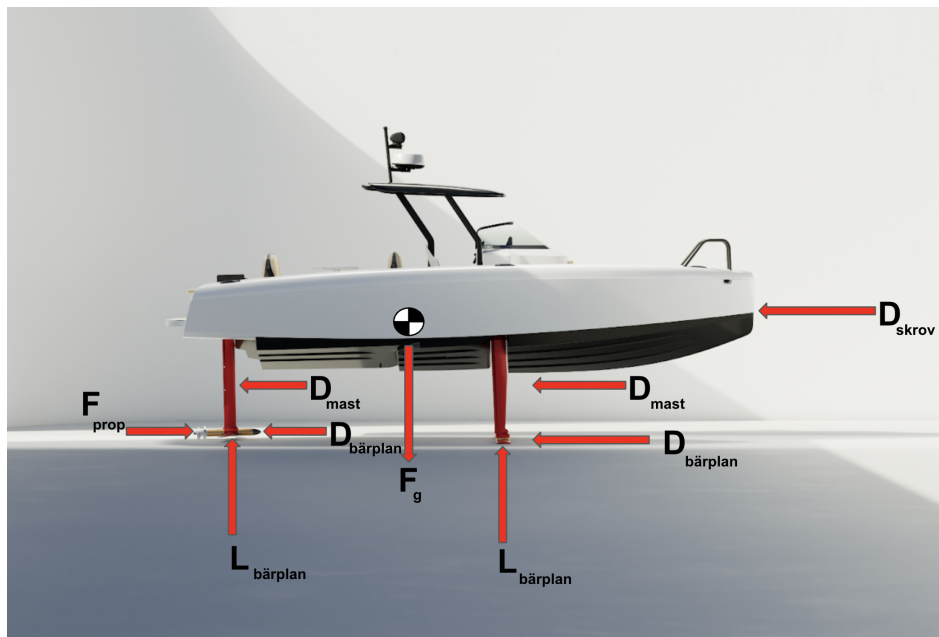
Elektroniska komponenter såsom servomotorer, regulatorer och sensorer utvecklas inte från grunden. Projektet avgränsas till användning av kommersiellt tillgängliga och beprövade komponenter. Det regler- och styrsystem som används i arbetet avgränsas till användning av mjukvaran ArduPilot.

2. Teori

I detta kapitel förklaras teorin som ligger till grund för konstruktionen och regleringen av en bärplansbåt. Genom att studera källor läggs grunden för designval och tillvägagångssätt för att skapa ett så effektivt samt väl fungerande koncept som möjligt.

2.1 Verkande krafter

När projektet bryts ner till sina mest väsentliga delar framgår det tydligt att hela konceptet bygger på att reglera de krafter som påverkar systemet. Dessa krafter har stark anknytning till grundläggande strömningsmekanik och visas i figur 2.1. Motståndskrafterna D_{mast} , $D_{bärplan}$ och D_{skrov} påverkar båten baserat på dess egen form och hastighet. Krafterna arbetar konstant för att minska båtens rörelse. F_g är hur jordens gravitationsfält påverkar båten och är konstant. F_{prop} är den framåt drivande kraften som uppstår av motorernas arbete och de roterande propellrarna. $L_{bärplan}$ är lyftkraften som genereras av bärplanen vilket får båten att lyfta.



Figur 2.1: Illustration av verkande krafter på bärplansbåt (Candela, u. å-b, med egen illustration)

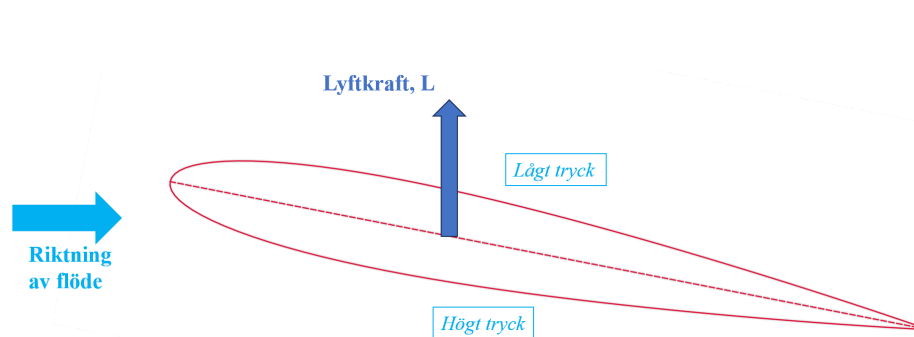
2.2 Flygteori

Ett bärplan fungerar likt en flygplansvinge, men i vatten istället för luft. På samma sätt skapar bärplanet en kraft som lyfter upp båten från vattenytan. När vatten strömmar runt bärplanets profil delas flödet upp i en övre och en undre del. På ovansidan rör sig vattnet snabbare, vilket resulterar i ett lägre tryck, medan undersidan har långsammare flöde och därmed högre tryck enligt Bernoullis ekvation (2.1), vars variabler presenteras i tabell 2.1. Denna tryckskillnad ger upphov till lyftkraften som verkar uppåt, se figur 2.2. En viktig del i designen är att optimera förhållandet mellan det hydrodynamiska motståndet relativt lyftkraften (Tina Rosado, 1998).

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = K \quad (2.1)$$

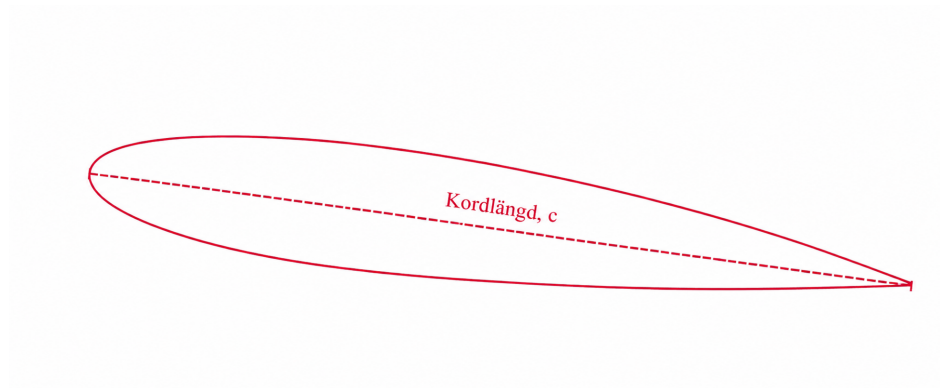
Tabell 2.1: Definition av variabler i Bernoullis ekvation (Ekvation 2.1)

Symbol	Beskrivning	Enhet
p	Statiskt tryck	Pa
ρ	Fluidens densitet	kg/m ³
v	Strömningshastighet	m/s
g	Tyngdacceleration	m/s ²
h	Höjd relativt referensnivå	m
K	Konstant	

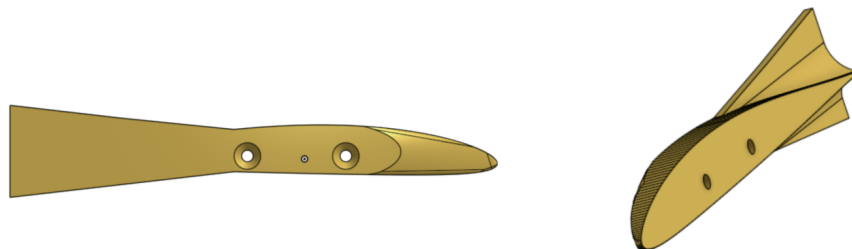


Figur 2.2: Illustration av lyftkraften genererad av flödet

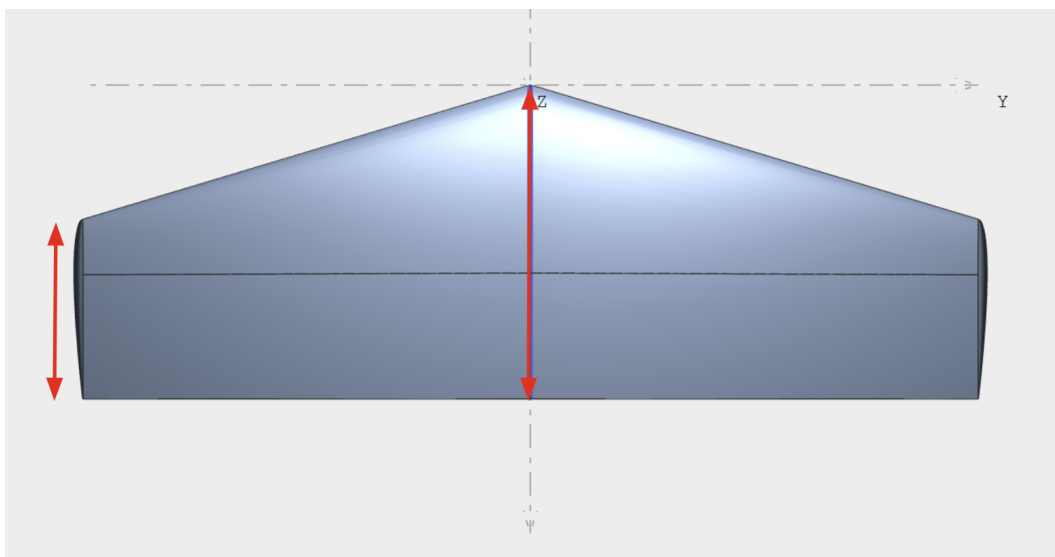
Kordlängd är ett centralt begrepp inom hydrodynamik och definieras som avståndet mellan framkanten och bakkanten på ett bärplan eller bärplansprofil (Raymer, 1992). Se figur 2.3 som förtydligar detta.

Figur 2.3: Kordlängden, c

Skillnaden i tryck mellan ovan- och undersidan gör att virvlar bildas när flödena möts. Detta sker främst vid vingpetsarna, vilket i sin tur genererar ett inducerat motstånd som bromsar båten ytterligare (Hall, 2025). För att minimera denna bromsande kraft kan vingpetsfenor användas för att särskilja trycket mellan trycksidorna. Dessa visas i figur 2.4. Vingen kan också utformas så att kordlängden avtar mot vingpetsen likt ett V, se figur 2.5. Detta ger liknande effekt som vingpetsfenor men båda lösningarna har sina hydrodynamiska och strukturella kompromisser enligt universitetslektor Arash Eslamdoost (personlig kommunikation, 2026).

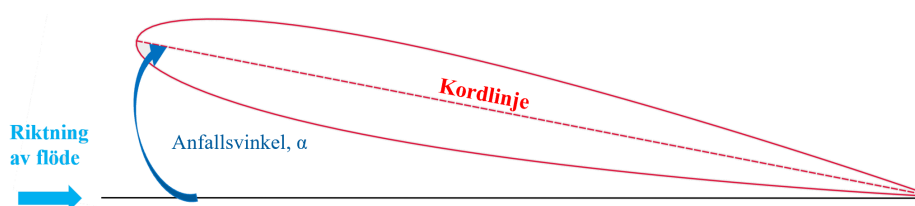


Figur 2.4: Vingpetsfenor



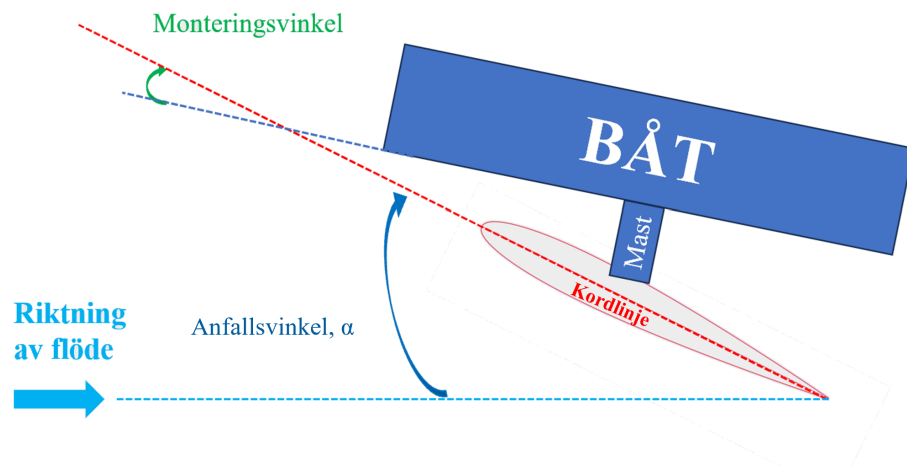
Figur 2.5: V-format bärplan med avtagande kordlängd enligt pilar

En central parameter är anfallsvinkeln, alltså vinkeln mellan bärplanets kordlinje och den inkommande strömningens riktning (figur 2.6). När anfallsvinkeln ökar, stiger även lyftkraften eftersom tryckskillnaden blir större mellan bärplanets sidor. Detta leder till större hydrodynamiskt motstånd, vilket påverkar energieffektiviteten. Vid för höga anfallsvinklar kan bärplanet ställa, vilket innebär att lyftkraften minskar kraftigt då flödet separerar från ytan (FAA, u. å.).



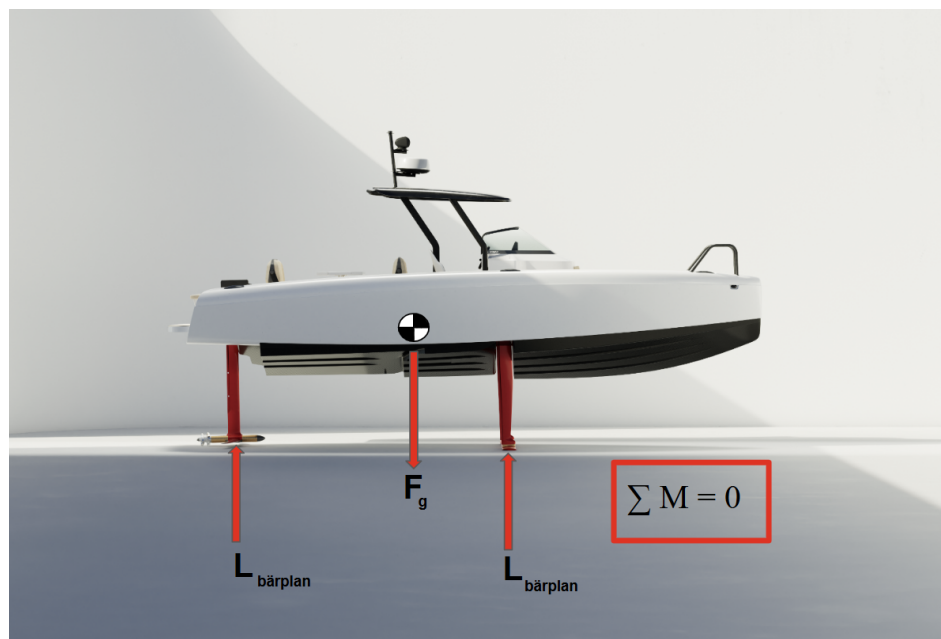
Figur 2.6: Anfallsvinkel

Det är vanligt att anfallsvinkel och monteringsvinkel förväxlas, trots att de definierar två tekniskt skilda begrepp. Monteringsvinkeln är den horisontella vinkeln mellan bärplanet och båtens kropp (Raymer, 1992). Detta redovisas samt förtydligas i figur 2.7.



Figur 2.7: Skillnad mellan monteringsvinkel och anfallsvinkel

För att flyga stabilt under förutsättningen att ingen acceleration sker, behöver summan av moment kring masscentrum vara noll (Etkin och Reid, 1996). Detta innebär att momenten från vardera vinge tar ut varandra och longitudinell balans uppstår, se figur 2.8. På samma sätt kan moment från rull och gir påverka stabiliteten.

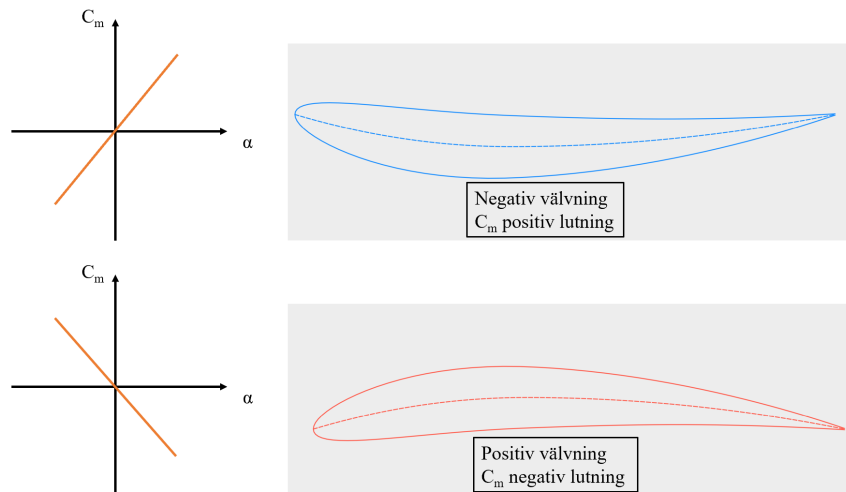


Figur 2.8: En förenklad figur över momentjämvikten som genereras från bärplanen (Candela, u. å-b, med egen illustration)

Flyget är stabilt vid en viss anfallsvinkel, men om denna störs vill man att det automatiskt ska gå tillbaka till sin ursprungliga jämviktspunkt och vinkel. Detta avgörs av lutningen på momentkurvan, där C_m är stigningskoefficienten och α är anfallsvinkeln.

$$\frac{\partial C_m}{\partial \alpha} \quad (2.2)$$

Lutningen på momentkurvan kan vara stabil både om den är negativ och positiv, vilket beror på utformningen av profilen. Detta innebär att en profil med positiv välvning endast uppnår stabilitet när momentkurvans lutning är negativ, medan en negativ välvning kräver en positiv lutning för att bibehålla jämvikt, se figur 2.9. Det går även att få en önskad lutning på kurvan genom att placera tyngdpunkten på en specifik plats. Tyngdpunktens position utgör alltså en viktig del för huruvida systemet är i balans eller ej (Etkin och Reid, 1996).



Figur 2.9: Negativ och positiv välvning mot dess stabila stigningsgrafer

2.3 Konfiguration

En bärplansbåt styrs utifrån dess tre rotationsaxlar: rull, stigning och gir. Rull är rotationen kring båtens längdaxel och styr båtens lutning i sidled. Stigning avgör rotationen kring båtens breddaxel och påverkar hur båten stiger eller sjunker i höjd relativt till vattenytan. Gir är rotationen kring båtens höjdaxel och styr vilken riktning båten färdas. Dessa rotationsaxlar utgör grunden till att kontrollera och styra en bärplansbåt för att åstadkomma stabilt flygande i önskad färdriktning. En illustration av de tre rotationsaxlarna visas i figur 2.10.

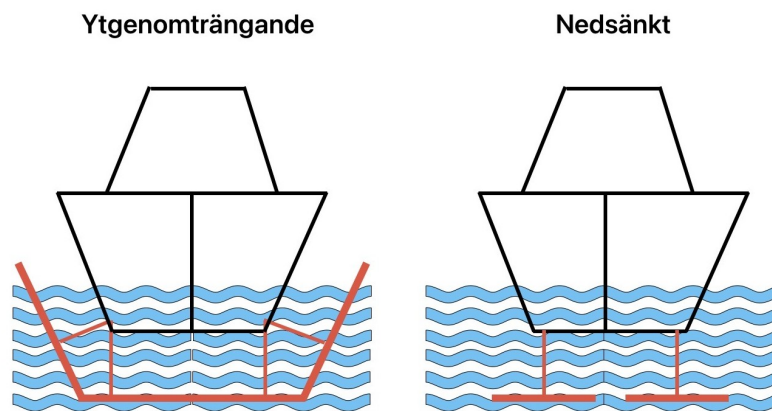


Figur 2.10: Rotationsaxlar (Google Gemini med egen illustration)

Konfigurationen av bärplan på en båt kan delas in i två övergripande kategorier, ytgenomträngande och nedsänkta bärplan (Johnston, 1985). De olika konfigurationerna illustreras i figur 2.11.

Ytgenomträngande bärplan är delvis nedsänkta under ytan och då båtens hastighet ökar, lyfter bärplanen upp båten över ytan och mängden nedsänkt vinge minskar. Båten stiger tills lyftkraften från vingarna motsvarar båtens tyngdkraft. Då båten påträffar vågor sänks bärplanen ner ytterligare under vattenytan och båten stiger. En väl utformad design med ytgenomträngande bärplan är därför självstabiliserande och behöver därmed ingen aktiv styrning för att kontrollera rull och stigning. Väderförhållanden med höga vågor och kraftiga vindar leder till en instabil flygning, eftersom båtens bärplan kan förlora kontakten med vattnet vid högre hastigheter när vattennivån varierar snabbt. Detta resulterar potentiellt i ett instabilt system.

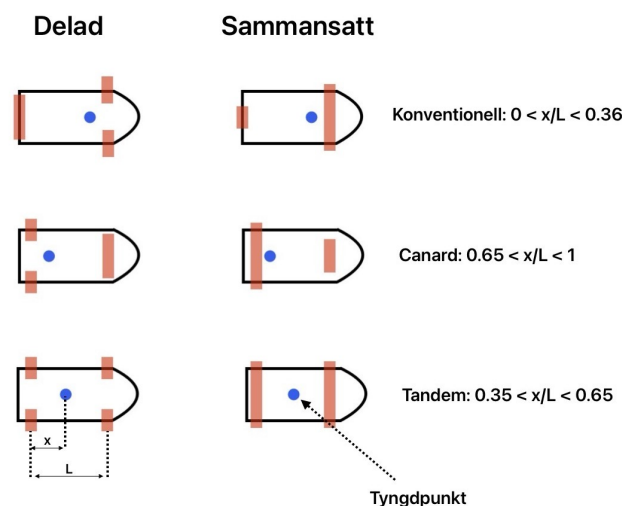
Nedsänkta bärplan befinner sig helt under ytan och fästs till båtens skrov med master. Detta innebär att bärplanen påverkas mindre av förhållanden på vattenytan såsom vågor och vind, vilket i sin tur leder till stabilare flygning i svåra förhållanden och högre hastigheter. Nedsänkta bärplan är, till skillnad från ytgenomträngande bärplan, inte självstabiliserande utan kräver aktiv reglering för att bibehålla stabilt läge vid flygning (van Walree, 1999).



Figur 2.11: Illustration av ytgenomträngande & nedsänkta bärplan

2.3.1 Positionering av master

Vingkonfiguration delas vanligtvis upp i tre kategorier: konventionell, canard och tandem (Johnston, 1985). Konventionell konfiguration har ett större främre bärplan som bär mer än 65% av lasten och har därmed ett mindre bakre bärplan enligt Johnston, 1985. Canard-positionering bär tvärtom mer än 65% av lasten på det bakre och större bärplanet och då är det främre bärplanet mindre till storleken. Tandem konfiguration har lika stora bärplan framtill som baktill och då bär de båda bärplanen lika stor del av lasten. Alla tre konfigurationer kan ha både delade och sammansatta vingar bak och fram för att uppnå olika effekter såsom ökad manövrerbarhet, stabilitet och styrka. De olika vingkonfigurationerna illustreras i figur 2.12.



Figur 2.12: Vingkonfigurationer

2.4 Beräkningar

I detta avsnitt presenteras beräkningarna som använts i konstruktionen av bärplanen. Detta är en kombination mellan enkla handberäkningar och datorsimuleringar.

2.4.1 Ekvationer och samband

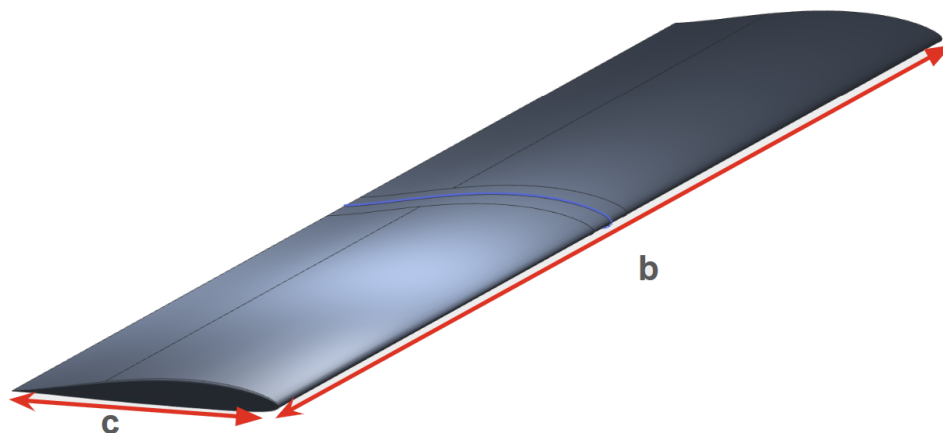
För att dimensionera bärplanen mot projektets uppsatta mål och utvärdera olika bärplansprofiler krävs en serie av fundamentala beräkningar. Centralt för denna process är beräkningen av Reynoldstal enligt ekvation 2.3, vilket beskriver strömningens karaktär kring profilen. Reynoldstal är en dimensionslös storhet som gör det möjligt att avgöra om strömningen är laminär eller turbulent, vilket i sin tur har en direkt inverkan på bärplanets lyftkraft och hydrodynamiska motståndet (Raymer, 1992).

$$Re = \frac{Vc}{\nu} \quad (2.3)$$

Tabell 2.2: Definition av ingående parametrar för ekvation 2.3

Beteckning	Storhet	Enhet
V	Strömningshastighet	m/s
c	Kordlängd	m
ν	Kinematisk viskositet	m ² /s

För att beräkna lyftkraft och det hydrodynamiska motståndet används ekvation 2.5 och 2.6 (White, 2011). Dessa ekvationer påverkas av referensarean A_p , enligt ekvation 2.4, som definieras av bärplanets planformsyta, se figur 2.13. De dimensionslösa talen C_L och C_D , som redovisas i tabellen 2.3, går att få via den analytiska mjukvaran XFLR5.



Figur 2.13: Projicerad area A_p av bärplan, för ekvation 2.4

$$A_p = bc \quad (2.4)$$

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A_p V^2 \quad (2.5)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A_p V^2 \quad (2.6)$$

Tabell 2.3: Definition av ingående parametrar för ekvation 2.4, 2.5 och 2.6

Beteckning	Storhet	Enhet
V	Strömningshastighet	m/s
ρ	Fluidens densitet	kg/m ³
c	Kordlängd	m
b	Spännvidd	m
ν	Kinematisk viskositet	m ² /s
C_L	Lyftkoefficient	–
C_D	Motståndskoefficient	–

2.4.2 Programmet XFLR5

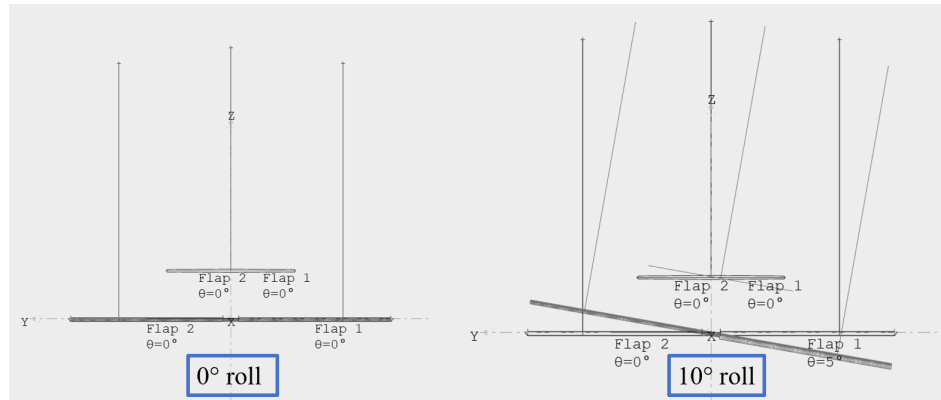
XFLR5 är en programvara som används för att analysera profiler, vingar och hela flygplan i låga Reynoldstal (XFLR5, 2026). Beräkningarna i programmet utförs av beräkningsverktyget XFOIL som analyserar vinprofiler visköst och ovisköst (drela och Youngren, 2026).

I programvaran importeras en 2D-profil av bärplansprofilen som sedan analyseras i olika Reynoldstal som profilen uppskattas utsättas för. Eftersom mjukvaran interpolerar mellan olika Reynoldstal, ger detta upphov till att programmet kan beräkna resultaten i 3D. Till följd av att det kan variera i Reynoldstal över vingarna i 3D-strukturen, behövs flertalet datapunkter för att säkerställa att det sker en korrekt interpolation.

Efter tvådimensionell analys, modelleras hela strukturen i tre dimensioner, med mast, bärplan samt höjdroder. Dessutom inkluderas massorna för strukturen för att sedan utgöra ett masscentrum. Därefter kan data som exempelvis motståndskraft, lyft och flertalet andra konstanter tas fram vilket gör det möjligt att estimerat resultatet för den avsedda designen. Det vill säga krafter och moment som verkar över strukturen.

Beräkningarna går att göra med tre olika metoder i programvaran; Lifting Line Theory (LLT), Vortex Lattice Method (VLM) samt Panelmetoden. LLT modellerar vingen som en linje och beräknar därefter lyftfördelningen längs spannet. VLM delar upp vingens yta i paneler där varje panel bär ett vortex och beräknar sedan flödet genom hastigheten som en tangent till ytan. Panelmetoden modellerar däremot hela geometrin och löser potentialflödet runt kroppen samt implementerar Kutta-villkoret (XFLR5, 2026).

I mjukvaran kan faktorer som hastighet och anfallsvinkel justeras för att undersöka olika möjliga scenarion. Vidare kan stabilitetsanalyser genomföras med programvaran. Detta är relevant för att se vilka specifika hastigheter eller vinklar som båten är stabil i. Exempelvis går det att undersöka för olika rullvinklar, se figur 2.14.



Figur 2.14: Rullningsvinkel 0 och 10 grader i XFLR5

2.4.3 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) gör det möjligt att förutspå olika fluider och gasers beteenden (Ansys, u. å-a). Med denna simuleringsmetod kan till exempel luftflöden kring flygplan, vattnets flöde genom ett rör eller kring ett bärplan visualiseras. Den datorbaserade beräkningsmetoden fungerar enligt följande; det finns en domän där man vill analysera flödet. Denna domän diskretiseras till ett beräkningsnät, det vill säga delar in domänen i små celler. Till sist delas hela processen in i olika regioner där man tillsätter olika processorer samt ekvationer som anses vara lämpliga för beräkningen. Till exempel för att modellera turbulens kan Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) användas med flera (Volupe, u. å).

Eftersom en fluids flöde är komplicerat i sig, blir det även svårt att modellera dess flöde i datorn. Detta till följd av att flertalet olika fysikaliska fenomen blandas, vilket innebär att en solid och en fluid påverkar varandra. Fluid-Structure Interaction (FSI) beskriver detta samspel och kan vanligtvis delas upp i envägskoppling och tvåvägskoppling (Ansys, u. å-b). Vid envägskoppling överförs krafter från fluiden till den fasta kroppen, men kroppens respons har försumbar inverkan på flödet. Detta innebär att till exempel en vinge kan generera kraft utan att deformeras. Till skillnad från envägskoppling har tvåvägskopplingen en ömsesidig interaktion. Alltså, fluidens krafter orsakar deformationer som i sin tur förändrar flödet, vilket leder till ett samspel där båda systemen påverkar varandra kontinuerligt.

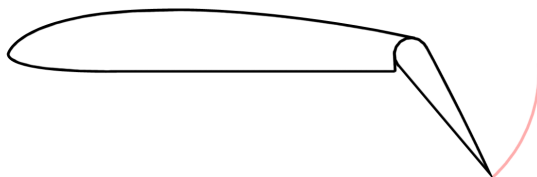
2.5 Vingklaffar

För att reglera lyftkraften som bärplanen genererar, används vingklaffar för att ändra på bärplansgeometrin. Vingklaffar är rörliga ytor, vanligtvis placerade längst bak på bärplanet, som vid rotation påverkar bärplanets effektiva anfallsvinkel, vilket möjliggör en ökning eller

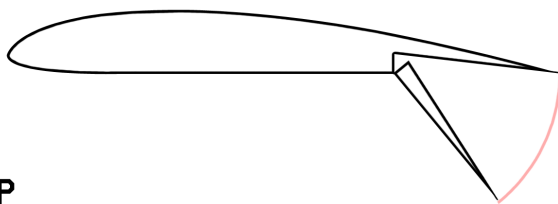
minskning av hydrodynamiska koefficienter. Detta gör det möjligt att generera varierande lyftkraft som i sin tur påverkar båtens olika rotationsaxlar för att uppnå önskad gir-, stignings- och rullvinkel.

Vingklaffar används inte enbart för flygstabilitet utan även för att generera mer lyft vid lägre hastigheter, detta för att lyfta tidigare från vattenytan. På så sätt kan bärplansgeometrin optimeras närmare den dimensionerade driftpunkten. Genom att dynamiskt justera vinkeln på vingklaffarna ökar lyftkraftskoefficienten, vilket resulterar i att tillräckligt med lyftkraft uppnås för att lyfta skrovet från vattenytan vid lägre hastigheter. De mest förekommande vingklaffstyperna är plain flap, split flap, slotted flap och fowler flap (Roberts, 2025). Dessa vingklaffar visas i figur 2.15.

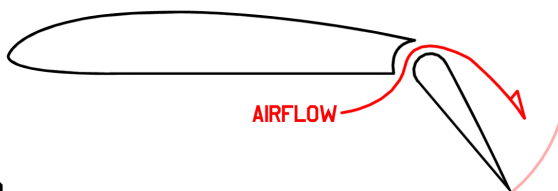
PLAIN FLAP



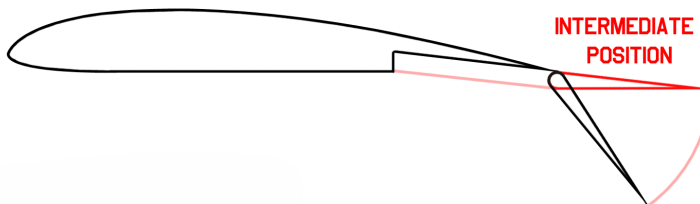
SPLIT FLAP



SLOTTED FLAP



FOWLER FLAP

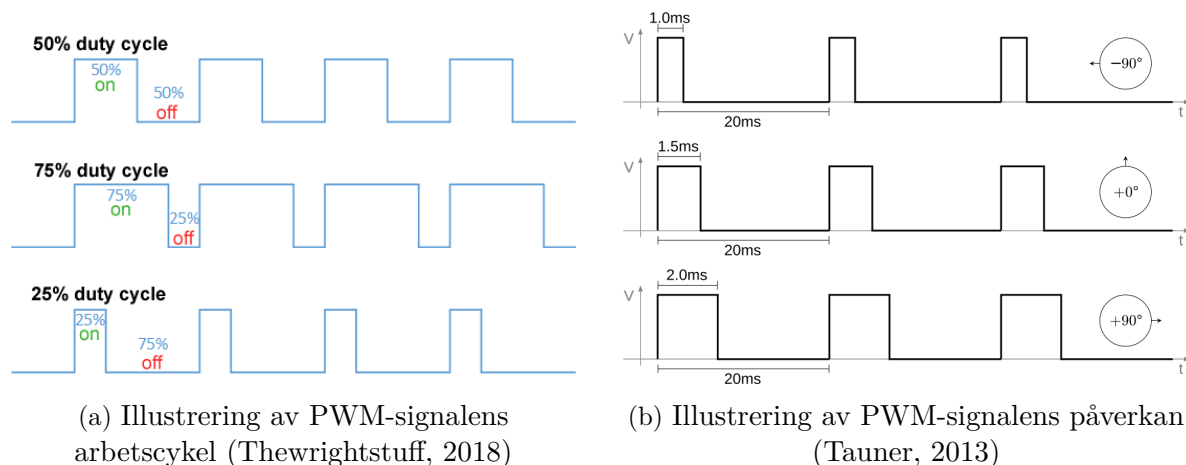


Figur 2.15: Vingklaff jämförelse (NiD.29, 2011)

Dimensionerna på bärplanens främre kontrolltytor ska vara mellan 15% – 25% medan bakre bärplanet ska ha kontrolltytor mellan 25% – 50%, relativt den totala arean av bärplanet, sett ovanifrån (Raymer, 1992).

2.6 Pulsbreddsmodulering

Pulsbreddsmodulering (PWM) är en metod för att skicka signaler mellan olika elektroniska komponenter. PWM fungerar genom att generera en konstant spänning under varierande tid. Från att inte generera någon spänning (minimiläge) till att alltid generera full spänning (maximiläge), så kan pulsernas bredd variera och ge mellanlägen, se figur 2.16a. Eller genom att en låg tid på pulsen motsvarar minimiläge och att en dubbelt så lång puls motsvarar maximiläge, se figur 2.16b.



Figur 2.16: Jämförelse av två olika PWM-signaler

2.7 Framdrivning

I detta avsnitt behandlas hur de komponenter som driver båten framåt fungerar. Dessa komponenter beskrivs del för del och hur de påverkar systemet i sin helhet.

2.7.1 Batteri

För att framdrivning av båten ska vara möjlig krävs en energikälla som vid detta projekt valdes till elektriska batterier. Det finns olika batterityper men de mest relevanta och lättillgängliga är Litium Polymer (LiPo), Lithium-ion (Li-ion) och Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄).

LiPo batteri används ofta för mindre elektriska komponenter som kräver hög energidensitet, snabb urladdningsförmåga och därmed hög urladdningsström (Gray & Smith, 2009). Li-ion är mer lämplig vid större applikationer där högre säkerhet krävs, i jämförelse med LiPo, samtidigt som hög urladdningsström, energidensitet och mångsidighet behövs (Bhawna m. fl., 2025). LiFePO₄ används vid större applikationer där säkerhet och hållbarhet är högt prioriterade då dessa batterier både har lägre energidensitet och urladdningsström jämfört med tidigare nämnda batterityper.

Tabell 2.4: Jämförelse mellan relevanta batterityper för elektrisk framdrivning

Batterityp	Typiska användningsområden	Fördelar	Nackdelar	Prioriterade egenskaper
LiPo	Mindre elektriska system och drönare	Hög energidensitet	Känslig för skador	Hög effekt
Li-ion	Medelstora fordon	Bra balans och säkerhet	Lägre urladdning än LiPo	Mångsidighet
LiFePO ₄	Större energilager	Hög säkerhet och lång livslängd	Lägst energidensitet	Hållbarhet

Ett batteri dimensioneras utifrån flertalet parametrar beroende på systemets krav. Centrala faktorer inkluderar spänningsintervall för systemet, maximal ström, drifttid, säkerhet, antal cykler, storlek och vikt.

Urvalet av batterier börjar med att analysera vilket spänningsintervall systemet kan arbeta på, detta ger en minimal spänning, $U_{sys,min}$, och maximal spänning, $U_{sys,max}$. Det valda batteriet behöver fungera inom detta intervall för att säkerställa korrekt funktion oberoende av laddning på batteriet. Antalet celler i ett batteri bestäms därför utifrån detta spänningskrav i kombination med effektkrav. För att uppnå rätt systemspänning kopplas flera celler i serie, där den totala spänningen beräknas som summan av varje cells individuella nominella spänning, U_{cell} . Antalet seriekopplade celler, N_s , väljs då så att batteriets totala spänning är inom systemets tillåtna spänningsintervall.

N_s bestäms så följande krav uppfylls:

$$U_{sys,min} \leq N_s \cdot U_{cell} \leq U_{sys,max} \quad (2.7)$$

Elektriska batteri levererar likström (DC) då en spänningsskillnad mellan batteripolerna driver strömmen, vilket genererar en effekt, P_{bat} , enligt:

$$P_{bat} = U_{bat} \cdot I_{bat} \quad (2.8)$$

Den maximala kontinuerliga effekten som batteriet kan leverera, $P_{bat,max}$, måste överskrida systemet maximala kontinuerliga effekt, $P_{sys,max}$, för att inte begränsa systemets funktionalitet. Då systemets tillåtna spänningsintervall bestämt batteriets spänningsintervall är det endast urladdningsströmmen, I_{bat} , i ekvation 2.8 som kan justeras så önskad effekt uppnås. För att uppnå önskad urladdningsström och kapacitet kopplas istället batteriets celler parallellt. Vid parallellkoppling ökar den totala kapaciteten och maximala urladdningsströmmen, $I_{bat,max}$, proportionellt med antalet parallella grenar, N_p , se ekvation 2.9. Valet av N_p baseras därför på systemets krav på kontinuerlig och momentan ström samt den önskade drifttiden.

Batteriets maximala urladdningsström beräknas enligt följande, där $I_{cell,max}$ är maximal urladdningsströmmen för en cell:

$$I_{bat,max} = I_{cell,max} \cdot N_p \quad (2.9)$$

Den estimerade drifttiden, t_{drift} , beräknas utifrån följande formel där Q_{cell} representerar varje individuella cells kapacitet:

$$t_{drift} = \frac{Q_{bat}}{I_{sys}} = \frac{Q_{cell} \cdot N_p}{I_{sys}} \quad (2.10)$$

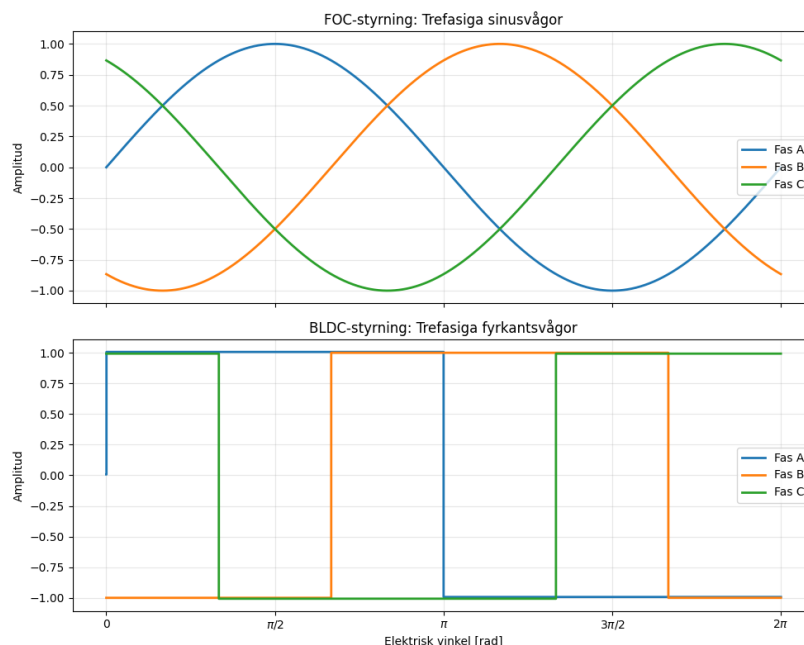
Utifrån ekvationerna 2.9 och 2.10 löses N_p ut och beräknas enligt:

$$N_p \geq \max\left(\frac{I_{bat,max}}{I_{cell,max}}, \frac{t_{drift} \cdot I_{sys}}{Q_{cell}}\right) \quad (2.11)$$

Kombinationen av serie- och parallellkoppling möjliggör att batteriet modelleras utifrån systemets tillåtna spänningsintervall, maximala effekt samt drifttid.

2.7.2 Electronic Speed Controller

En Electronic Speed Controller (ESC) omvandlar batteriets likström till växelström, detta med hjälp av integrerade MOSFET-enheter som via PWM genererar sinusformade signaler. Borstlösa motorer kräver tre faser som är fasförskjutna 120° för att motorn ska generera optimalt moment. Den växelströmmen kan antingen vara uppbyggd av fyrkantsvågor eller sinusvågor, se figur 2.17.



Figur 2.17: Trefas jämförelse med fyrkantsvågor och sinusvågor (Plot i Python, se bilaga F)

I detta arbete används primärt sinusformade spänningskurvor med Field Oriented Control (FOC) vilket optimerar driften. Eftersom dessa ger mjukare gång med högre verkningsgrad i jämförelse med fyrkantsvågor som används vid Brushless Direct Current (BLDC) styrning.

Den högre verkningsgraden med FOC beror på att spänningsmatningen till motorerna är optimerade för att generera ett roterande magnetfält, se ekvation 2.12, som kontinuerligt är i fas med rotorns position. Detta minimerar energiförluster, som BLDC-styrning har, samtidigt som det möjliggör högre utvecklat moment per tillförd ström.

2.7.3 Borstlös motor

Elektriska motorer drivs av elektromagnetiska fält som genereras då en ström flödar genom spolar inuti statorn. Genom varje spole där en ström flödar skapas ett elektromagnetiskt fält, B , enligt ekvation 2.12 med variabeldefinitioner enligt tabell 2.5.

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N}{L} I \quad (2.12)$$

Tabell 2.5: Definition av variabler för magnetisk flödestäthet (Ekvation 2.12)

Symbol	Beskrivning	Enhet
B	Magnetisk flödestäthet	T
μ_0	Permeabilitetskonstanten i vakuum	H/m
μ_r	Relativ permeabilitet	
N	Antal lindningsvarv	
L	Spolens längd	m
I	Elektrisk ström	A

De elektromagnetiska fält som genereras av strömflödet interagerar med permanenta magneter i rotorn där de antingen attraherar eller repellerar varandra, vilket då skapar en kraft. Denna kraft är, vid optimala fall, vinkelrät mot rotorns roterande axel vilket ger upphov till ett moment, M_{motor} , som får motorn att snurra.

Momentresultanten, M_{res} , beräknas utifrån M_{motor} och motstånd som propellern och motorns tröghetsmoment åstadkommer, det kallar vi momentförlust, $M_{förlust}$.

$$M_{res} = M_{motor} - M_{förlust} \quad (2.13)$$

Det resulterande momentet, M_{res} , gör att motorn och propellern roterar vilket skjuter vattnet bakåt.

2.7.4 Propellrar

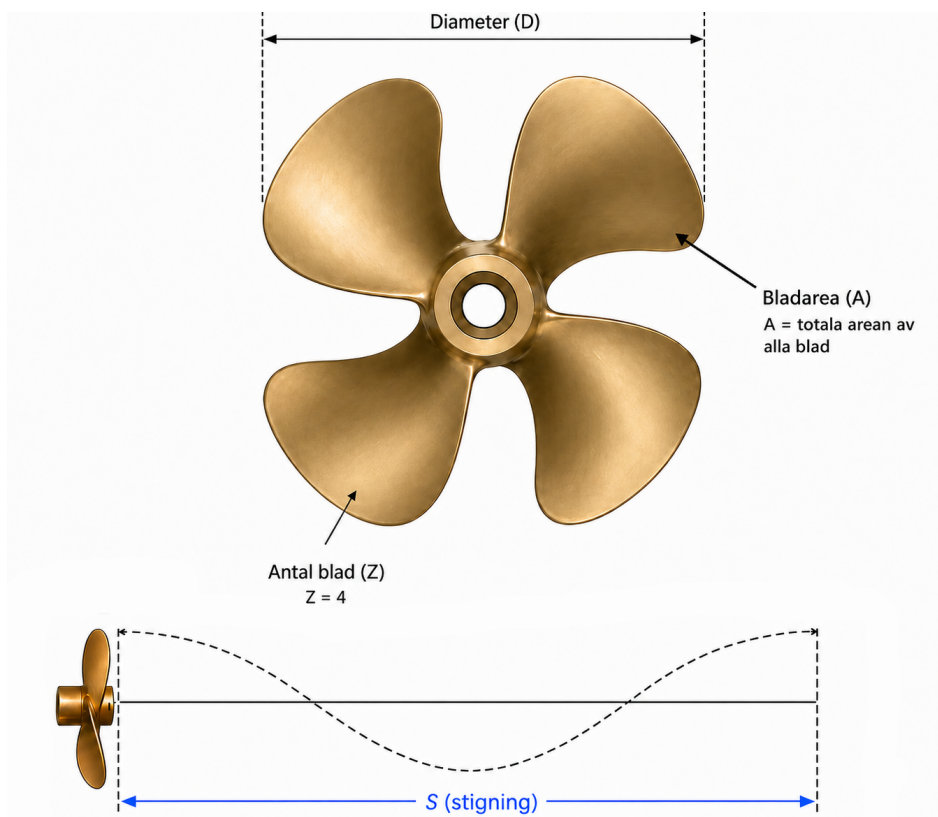
Då propellern accelererar vatten bakåt via den roterande propellern skapas även ett motverkande moment på båtens rullaxel. Denna rotation kan, på mindre båtar, bidra till en potentiellt oönskad lutning i rullaxeln, vilket försvårar reglering av alla styrsystem. För att

motverka detta används speglade propellergeometrier. Vid framdrivning skapar dessa propellrar moment som är motriktade varandra, vilket slår ut oönskad rull på båten, se ekvation 2.14.

$$M_{\text{propeller1}} + M_{\text{propeller2}} = 0 \quad (2.14)$$

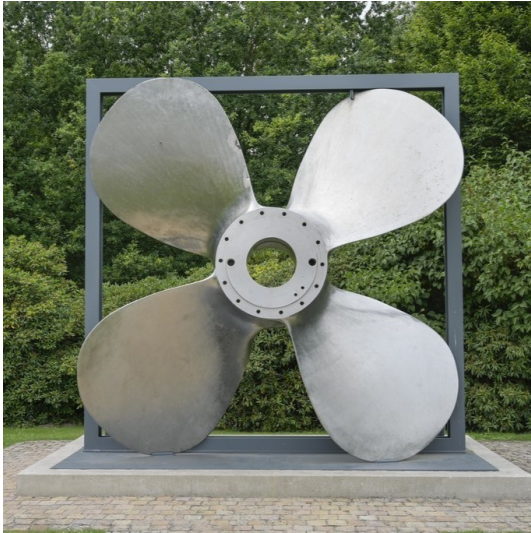
Framdrivningen av båten uppstår genom att vatten accelereras bakåt. Enligt Newtons tredje lag ger detta upphov till en lika stor motriktad reaktionskraft på propellrarnas blad, vilket accelererar båten framåt. Storleken på denna kraft kan beskrivas med en utveckling av Newtons andra lag, se ekvation 2.15, där den accelererande kraften beror på massflödet och hastighetsändringen av vattnet som skjuts bakåt. Vattnet skjuts bakåt genom att den roterande propellern skapar en låg- och högtryckssida där tryckskillnaden skapar ett bakåtriktat vattenflöde (Bal & Görener, 2014). Denna tryckskillnad blir olika stor beroende på propellerns designparametrar, se figur 2.18.

$$F = m \cdot a = \dot{m}(v_{\text{ut}} - v_{\text{in}}) \quad (2.15)$$



Figur 2.18: Visualisering av propellerparametrar (Chat-GPT samt egen illustration)

Några av de viktigaste propellerparametrarna är antal blad, bladarea, diameter och stigning. Valet av antal blad är främst baserat på hur stort behovet är att minimera vibrationer, då detta minimeras av fler blad på propellern (Kerwin, 1986). Kerwin beskriver även att propellrar inom marina användningsområde är bredare i förhållande till diametern jämfört med propellrar i flygindustrin, detta för att motverka kavitation och öka massflödet av vatten, vilket möjliggör ökad kraftutveckling. Jämförelse av propellrar från marin- och flygsektorn visas i figur 2.19.



(a) Fyrbladig marinpropeller (Britannica, 2026b)



(b) Tvåbladig flygplanspropeller (Britannica, 2026a)

Figur 2.19: Bredd- och diameterförhållande för marin- och flygindustri

Begreppet framdrivningstal (J) används för att beskriva en propellers arbetstillstånd. Det definierar förhållandet mellan hur långt propellern rör sig framåt under ett varv i förhållande till dess diameter enligt ekvation 2.16.

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (2.16)$$

Tabell 2.6: Definition av variabler för propellerns framdrivningstal (Ekvation 2.16)

Symbol	Beskrivning	Enhet
V_a	Hastighet genom vätska	m/s
n	Vinkelhastighet	varv/s
D	Propellerdiameter	m

Propellerns förmåga att generera och absorbera kraft uttrycks genom dimensionslösa koefficienter. Det vridmoment (M) som motorn måste leverera för att driva propellern definieras

enligt ekvation 2.17.

$$M = K_Q \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5 \quad (2.17)$$

där K_Q representerar vridmomentskoefficienten och ρ vätskans densitet. Propellerns vridmomentskoefficient når sitt högsta värde vid statisk belastning, det vill säga när $V_a = 0$ och $J = 0$. Detta beror på att propellern då utför maximalt arbete för att accelerera en stillastående vattenmassa (Tupper, 2013). I takt med att båten accelererar ökar V_a och därmed värdet på J . Detta innebär att vridmomentet som krävs för att bibehålla ett konstant varvtal minskar vid framdrift, jämfört med stationär drift.

2.8 Kavitation och ventilering

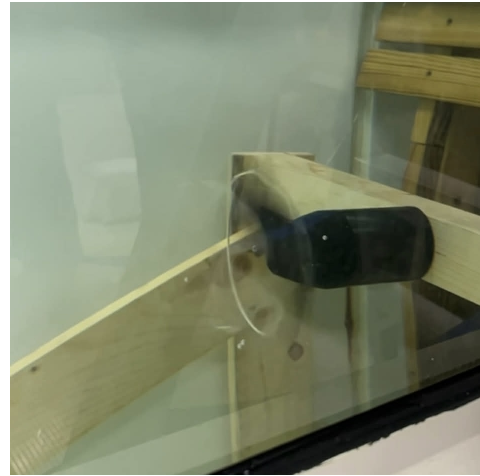
Ventilering och kavitation är två fenomen som reducerar propellerns verkningsgrad och förmåga att omvandla motorns vridmoment till framdrivningskraft (Califano & Steen, 2011). Båda fenomenen innebär att vattenflödet kring propellern störs, vilket medför att propellern tappar greppet och inte längre kan generera effektiv dragkraft. Detta gör att motståndet minskar signifikant och motorns varvtal ökar och framdrivningen avstannar.

Som tidigare nämnt, skapar en propeller en låg- och högtryckssida då den roterar (Bal & Görener, 2014). Ventilering uppstår då propellern befinner sig nära vattenytan och lågtrycket blir tillräckligt stort. Då kan luft från vattenytan sugas ner till propellerbladen vilket resulterar i minskat grepp om vattnet och framdrivningen avstannar. En bidragande orsak till detta är propellerns montering i förhållande till vattenytan. Vid rull och stigning minskar detta avståndet, vilket i kombination med hög belastning och en kritisk tryckskillnad initierar ventilation. Detta illustreras i figur 2.20a.

Kavitation är ett hydrodynamiskt fenomen som uppstår då det lokala trycket i en vätska sjunker under vätskans ångpunkt, vilket leder till ångfyllda håligheter och bubblor bildas (Califano & Steen, 2011). Vid hög belastning på propellern blir trycket så pass lågt på propellerns lågtryckssida, att vattnet byter aggregationstillstånd från flytande till gas. När dessa bubblor rör sig till områden med högre tryck på bladet, imploderar de med enorm kraft. Detta ger effekten att propellern tappar greppet om vattnet och att framdrivningen avstannar. De små implosionerna är så starka att de kan slå loss delar av propellern, vilket på lång sikt bidrar till att propellern slits ut och dess effektivitet samt funktion försämras. Dessutom kan kavitation leda till flödesseparation över propellerns blad vilket resulterar i en signifikant minskning av propellerns verkningsgrad. Orsaken till kavitation är en kombination av för högt varvtal, tidigare skador och bristfällig utformning av propellern. Kavitation runt propeller visas i figur 2.20b.



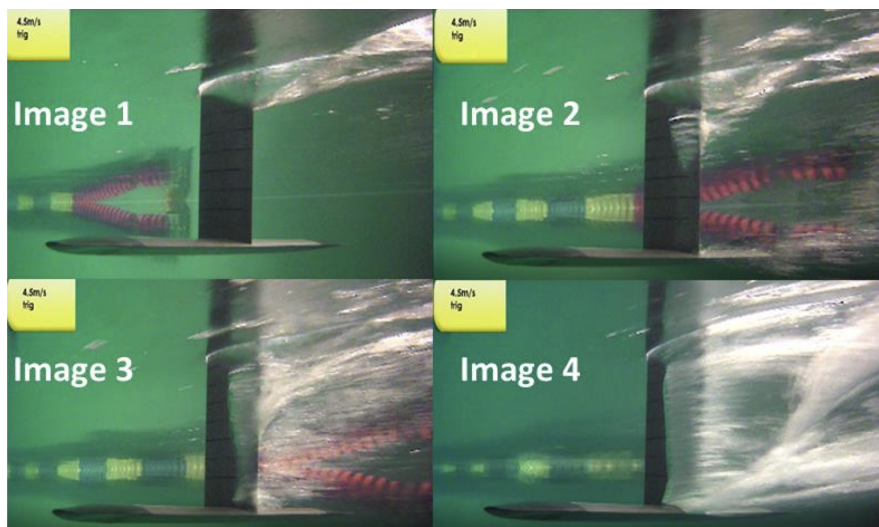
(a) Ventilering runt propeller



(b) Kavitation runt propeller

Figur 2.20: Ventilering & kavitation runt propeller

Kavitation och ventilering kan även uppstå runt bärplanen där en låg- och högtryckssida också uppstår. Ventilering runt bärplanen inträffar då luft infiltrerar den övre sidan av bärplanet med lägre tryck då det befinner sig nära vattenytan. Detta resulterar i ett ökat hydrodynamiskt motstånd samt minskad lyftkraft, vilket i sin tur försämrar båtens prestanda och stabilitet (Young m. fl., 2023). För att motverka ventilation runt bärplanet är utformningen av bärplansprofilen avgörande för att upprätthålla ett jämnt flöde. En korrekt strömlinjeformad profil minskar turbulenta flöden kring bärplanet vilket annars kan ge upphov till ventilering (Barden & Binns, 2012). I figur 2.21 illustreras händelseförloppet av ventilering kring ett bärplan.



Figur 2.21: Ventilering runt ett bärplan (Duncan m. fl., 2023)

Kavitation kring bärplan bildas vid inkorrekt utformad profil i kombination med hög hastighet och belastning kan vätskan på lågtryckssidan, på samma sätt som runt en propeller, sjunka under dess ångpunkt och övergå till gasform. De bubblor som bildas runt bärplanet orsakar då en drastisk minskning av lyftkraften och ökar motståndskraften. Även detta resulterar i sämre prestanda och stabilitet hos båten (van Walree, 1999). Kavitation runt ett bärplan illustreras i figur 2.22.



Figur 2.22: Kavitation runt ett bärplan (S.A.Kinnas, 1996)

2.9 Kapslingsklassning

Kapslingsklassning är en standardiserad klassificering som anger hur motståndskraftigt en elektronisk komponent är mot inträngande partiklar och vatten. Klassificeringen Ingress Protection gradering (IP) anges enligt formatet IPXX, till exempel IP67. Den första siffran anger graden av partikeltäthet och den andra siffran anger graden av vattentäthet. En högre siffra innebär en tätare elektrisk komponent.

2.10 Reglersystem

En bärplansbåt i flygande läge är ett instabilt system på grund av dess tyngdpunkt över vattnet, vågor och förändringar i båtens drivkraft. För att det instabila systemet av helt nedsänkta bärplan ska bli stabilt krävs ett aktivt reglersystem.

2.10.1 PID-reglering

En vanlig metod för reglering är PID-reglering. En PID-regulator justerar styrsignalen ($u(t)$) baserat på ett reglerfel ($e(t)$) enligt ekvation 2.18 (Lennartson, 2002).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.18)$$

Konstanterna K_p , K_i och K_d är proportionella, integrerande och deriverande förstärkningskonstanterna. Felet $e(t)$ definieras som skillnaden mellan börvärdet och det aktuella värdet. Förstärkningskonstanterna justeras beroende på ändamål och genom detta kan systemet optimeras och uppnå stabilt tillstånd enligt Lennartson.

2.10.2 Ultraljudssensor

En ultraljudssensor mäter avstånd med en högfrekvent ljudpuls, som överstiger 20 kHz, ljudet studsar mot en yta och sensorn lyssnar efter att ljudpulsen kommer tillbaka. Denna tiden mäts och omvandlas till avstånd enligt ekvation 2.19.

$$s = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.19)$$

Tabell 2.7: Definition av variabler för avståndet från ultraljudssensor)

Symbol	Beskrivning	Enhet
s	Avstånd från sensorn	m
v	Ljudets hastighet i luft	m/s
t	Tid från ut- till insignal	s

Detta avstånd omvandlas till en PWM-signal med hänseende på dess minsta och största avstånd i dess mätområde. Ett avstånd som är lägre eller lika med sensorns minsta avstånd resulterar i den lägsta PWM-signalen som sensorn kan skicka. Det fungerar likadant för det största avståndet.

2.10.3 GNSS-modul

Global Navigation Satellite System-modulen (GNSS) är en typ av satellitnavigation som används för att få en exakt position via GNSS-systemet som samlar flera internationella positioneringssystem som Global Positioning System och Galileo med flera.

Satellitnavigation i sin helhet fungerar genom kontakt med minst fyra satelliter för att lösa en ekvation med variablerna: latitud, longitud, altitud och tid. Satelliterna skickar radiovågor med information om variablerna och med hjälp av fyra signaler löser GNSS-modulen ekvationerna och får sin exakta position.

2.11 ArduPilot

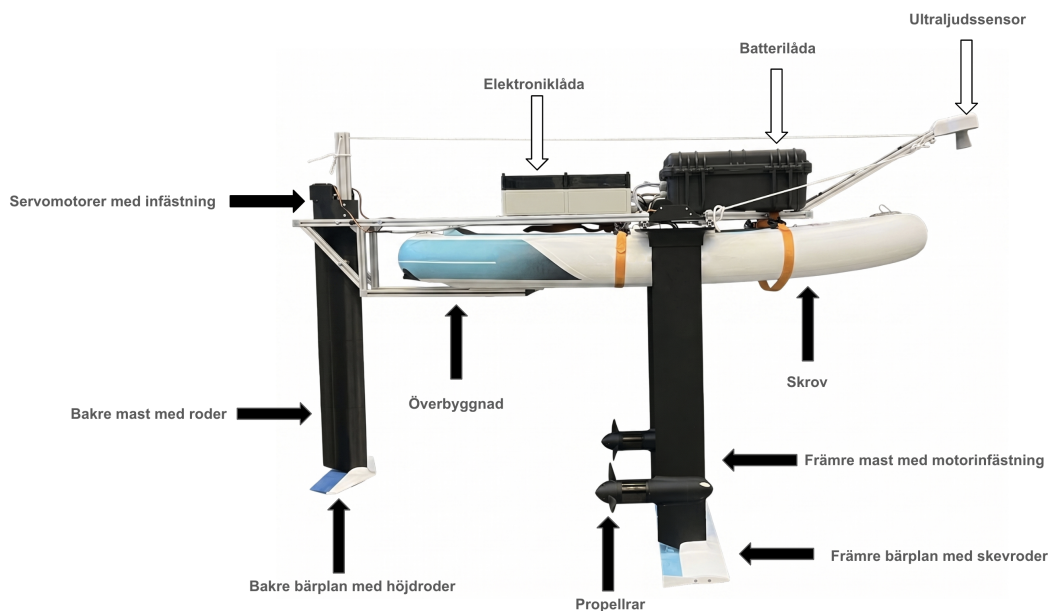
ArduPilot är ett flygsystem med öppen källkod som körs på styrenheten. ArduPilot hanterar indata från sensorer och radiokontroller och skickar sedan bearbetade utsignaler för att driva fordonet. För att optimera flygningen beroende på utformning och körförhållanden finns det justerbara parametrar. Detta görs via Mission Planner, ett program på datorn, som är ett gränssnitt för mjukvaran ArduPilot. I Mission Planner kan användaren se olika relevant data i realtid, bland annat rull- och stigningsvinkel, hastighet, höjd och vilket flygläge som används. Denna data loggas på en integrerad hårddisk i styrenheten, vilket möjliggör datautvärdering samt felsökning i efterhand.

I ArduPilot finns det olika flyglägen som kan användas för att köra fordonet: höjddreglerat läge, Fly by Wire A (FBWA) och manuellt. I manuellt läge styr föraren alla kontrolltytor och motorerna helt manuellt. FBWA är ett flygläge där styrenheten hjälper föraren att reglera rull och stigning för att hålla båten i rätt position, då behöver endast gas, gir och lyft styras. I höjddreglerat läget, implementerat av tidigare projektgrupper, erhåller föraren samma stöd som i FBWA, samtidigt som ArduPilot reglerar mot en förinställd flyghöjd.

3. Systemdesign

I detta kapitel presenteras designen av delsystemen för den utvecklade modellen. En central del i designen är att konstruktionen ska uppfylla kravet om att vara modulär, alltså att den ska vara designad för att komponenter enkelt ska kunna bytas ut eller justeras. En design med modult fokus möjliggör att testa nya koncept eller byta ut trasiga delar, utan att göra större ändringar i resterande konstruktion. Hur båten är konstruerad är baserad på de teoretiska grunderna som presenterades i tidigare kapitel. För vissa koncept har inspiration tagits från tidigare projekt som presenteras i avsnitt 1.1.

Systemets design delas upp i två delar: det mekaniska och det elektriska systemet. Det mekaniska består av: främre bärplan med skevroder, främre master, motorinfästning med propellrar, överbyggnad, bakre bärplan med höjdroder, bakre mast med roder och infästningar för servomotorer, se figur 3.1. Det elektriska systemet delas upp i ett antal mindre delsystem bestående av ultraljudssensor, batterier och ytterligare mekatroniska komponenter.



Figur 3.1: Systemdesignen indelad i mekanisk och elektronisk design

3.1 Mekanik och strukturella delar

Inledande delen av systembeskrivningen fokuserar på de komponenter som tillsammans skapar båtens mekaniska struktur. Detta inkluderar systemdesignen av: skrov, överbyggnad, mast, servomotorinfästning, motorinfästning, propellrar och bärplan.

3.1.1 Skrov

Till skillnad från tidigare arbeten har detta projekt inte involverat tillverkningen av ett eget skrov för båten. Genom att prioritera bort detta kunde projektets resurser istället koncentreras på de tekniska delmål som rör bärplanens funktion. Istället har en redan befintlig plattform valts i form av en surfbräda avsedd för flygning. Brädans integrerade mastinfästning i botten utnyttjas som en mekanisk fästpunkt för att fixera båtens överbyggnad.

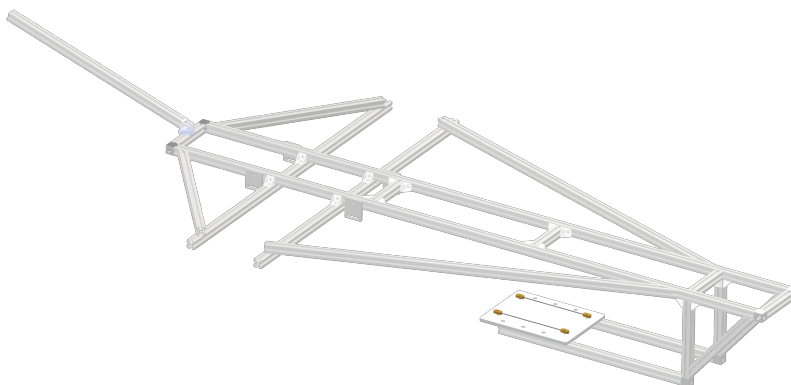
Surfbrädan har en volym på 90 liter, en egenvikt på 4,5 kg och dimensionerna $152,4 \times 60,0$ cm. Brädans flytförmåga kan härledas ur Arkimedes princip, som fastställer att ett föremål nedsänkt i vätska påverkas av en uppåtriktad lyftkraft motsvarande tyngden av den undanträngda vätskan (Molland, 2008). Vid full nedsänkning (maximal last) undantränger brädan en vattenmassa vars volym motsvarar dess egen, vilket med utgångspunkt i vattens densitet ($\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$) ger lyftkraften (F_l) enligt ekvation 3.1.

$$F_l = (V \cdot \rho) - m_{\text{bräda}} = (0,090 \cdot 1000) - 4,5 = 85,5 \text{ kg} \quad (3.1)$$

Detta innebär att båtens totalvikt, inklusive överbyggnad, master, bärplan och last, kan uppgå till maximalt 85,5 kg innan båten sjunker.

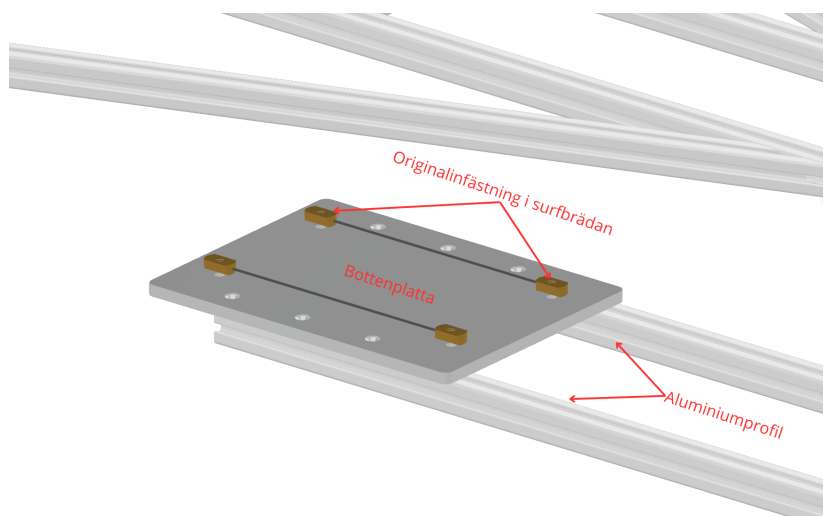
3.1.2 Överbyggnad

För att integrera och sammankoppla delsystemen med den befintliga surfbrädan används en överbyggnad bestående av aluminiumprofiler. Strukturen baseras på profiler med dimensionerna 20×20 mm, enligt figur 3.2. Valet av denna profil grundar sig främst i dess modularitet då möjligheten till snabba justeringar är avgörande för båtens konstruktion. Genom att lossa på ett fåtal skruvar går positionen på masterna, placeringen av elektronik-boxar och extern last att flytta för att kunna anpassa utformningen efter körförhållanden och önskad tyngdpunkt. Aluminium är även ett korrosionsbeständigt material, vilket är att föredra i maritima miljöer. Den naturliga oxidytan hos aluminiumlegeringen ger ett gott skydd mot saltvatten, vilket säkerställer konstruktionens hållbarhet över tid utan krav på omfattande ytbehandling.



Figur 3.2: CAD-modell av överbyggnad i aluminiumprofil (20×20 mm)

I delar av konstruktionen som befinner sig i vattnet används en egentillverkad bottenplatta för att sammankoppla surfbrädan med överbyggnaden. Bottenplattan utnyttjar surfbrädans originalinfästningar och fungerar som en adapter mot aluminiumprofilen, som visas i figur 3.3. För att minimera strömningsmotstånd som uppstår vid aluminiumprofilens infästning i bottenplattan, har hydrodynamiska kåpor konstruerats. Dessa kåpor dirigerar flödet längs profilen och minskar därmed risken för turbulens.



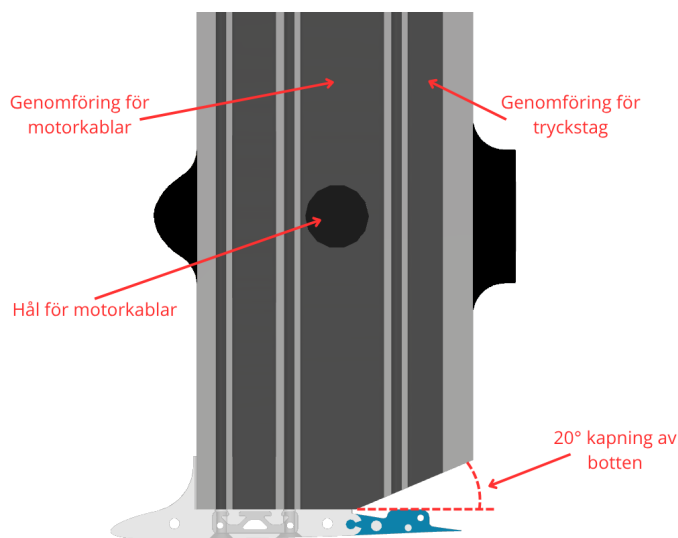
Figur 3.3: CAD-modell av bottenplatta, adapter mellan surfbrädan och aluminiumprofilen

I designprocessen gjordes en avvägning där vikt jämfördes mot hållfasthet. Aluminiumprofilerna som använts finns i flera olika dimensioner så ett val av en större profil hade kunnat öka konstruktionens styvhet och robusthet. Den första versionen av överbyggnaden modellerades

med profiler i dimensionerna 40×40 mm. Detta gav god styvhet men innebar en betydande viktökning med en massa på 1,5 kg/m, vilket är mer än tre gånger så tungt som 20×20 mm profilen. Då ett av projektets delmål är att hantera en extern last på 30 kg, konstaterades det att viktbesparingen med 20×20 mm-profilen, som endast väger 0,49 kg/m, är nödvändig för att inte göra båten för tung. För att kompensera för konstruktionens lägre styvhet utnyttjas istället tvärgående stag och spännband som fixerar strukturen mot surfbrädan för att bidra till ytterligare styrka.

3.1.3 Mast

För att placera bärplanen på rätt avstånd från vattenytan och föra kraften från bärplanen till resterande konstruktion, används tre master, två främre och en bakre mast. De två främre masterna är inköpta från samma tillverkare som surfbrädan. Mastens profil är 85 cm lång med en kordlängd på 17 cm och är tillverkad i aluminium. Dessa master har modifierats genom att kapa ut en vinkel på 20° i botten, för att ge utrymme för skevrodret vid fullt utslag uppåt. Ett runt hål har borrats i sidan av masten för att möjliggöra kabeldragning till motorn. Masterna har genomgående hål, vilket gör det enkelt att trä igenom kablar och tryckstag enligt figur 3.4.

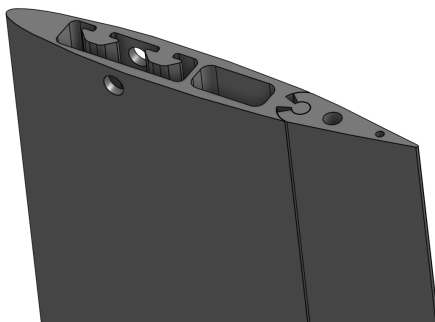


Figur 3.4: Genomskärning av nedre del av främre mast

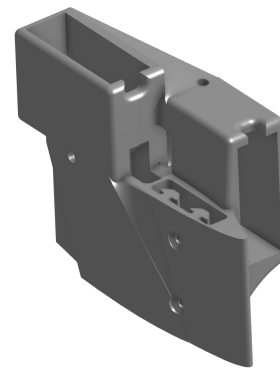
En utmaning i årets design var att möjliggöra både roder och höjdroder på den bakre masten, en teknisk lösning som tidigare år undvikits på grund av dess komplexitet. För att möjliggöra detta användes samma vingprofil som för de främre masterna, men med en anpassad konstruktion tillverkad i 3D-utskrivna PETG. För att kunna styra höjdrodret placerades en genomföring för ett tryckstag strax framför rodret som i figur 3.5a. Denna genomföring medför dock en försvagning av strukturen jämfört med en solid mast. För att kompensera för den minskade styvheten förstärktes hela masten med en integrerad, genomgående aluminiumpro-

fil. Denna lösning bidrar till en betydande stabilitetsökning då aluminiumprofilerna i mast, bärplan och överbyggnad kommer i direkt kontakt med varandra.

Bakre masten har även ett roder som är fäst med ett inbyggt gångjärn, vilket visas i figur 3.5a. Även rodret har förstärkts med kolfiberstavar i storleken 5mm och 2mm för att motverka skjuvning. I toppen av den bakre masten är servomotorer monterade för att kunna styra bakre kontrolllytor. Dessa är implementerade genom att modifiera en del av övre masten så att servomotorerna sitter stadigt. Servomotorernas positionering visas i figur 3.5b. Servomotorn som kontrollerar gir är direkt infäst i rodret, medan servomotorn som styr höjdrodret är kopplad till höjdrodret via tryckstaget.



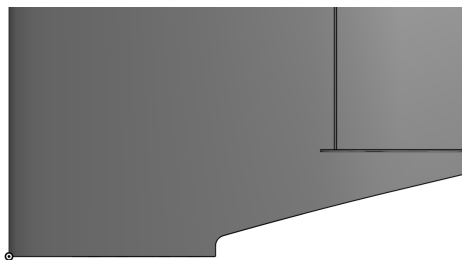
(a) Mast ovanifrån



(b) CAD-modell av bakre mast

Figur 3.5: Bakre mastens tekniska konfigurationer

Även bakre masten har modifierats liknande de främre masterna. Den är modellerad med en vinkel på 20° i botten för att möjliggöra höjdrodrets rörelse enligt figur 3.6.

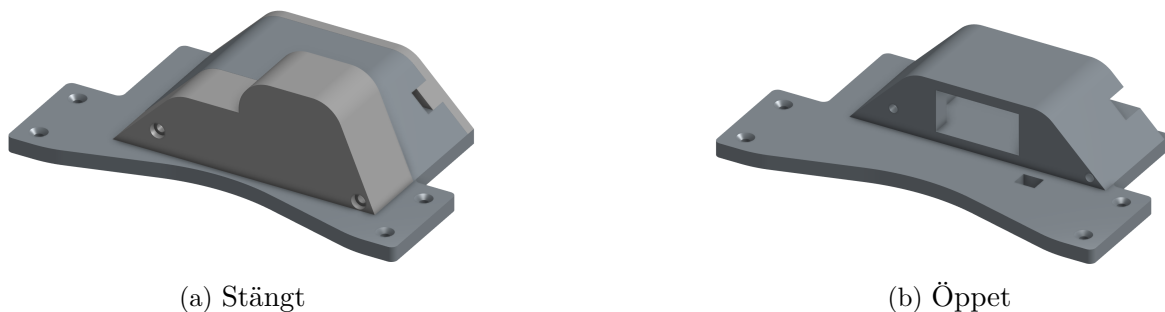


Figur 3.6: Nedre del av mast

3.1.4 Servomotorinfästning

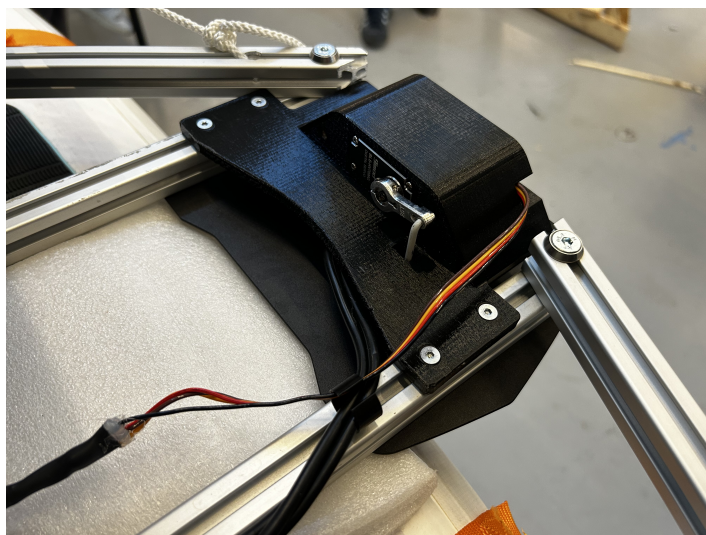
De främre servomotorerna är monterade på ovansidan av överbyggnaden, i höjd med toppen av höger respektive vänster mast. Servomotorerna är inkapslade i varsitt servofäste för att minska kontakt med vatten under körning, samt hålla servomotorn stabil. Delar av servofästet

är avtagbart för att komma åt servomotorn och göra justeringar. Detta illustreras i figur 3.7. Den avtagbara kåpan möjliggör även för enkelt utbyte av servomotor vid bristande funktion. Fästena är utskrivna i PETG med tjocka väggar för att öka hållfastheten.



Figur 3.7: CAD modell av servofäste för främre mast

På vardera servomotor är en 25 mm lång länkarm monterad för att överföra kraften från servomotorn till skevrodet. Tryckstagen som sträcker sig mellan servomotorernas länkarm och bärplanets skevroder är en 3 mm cylindrisk stång av stål som lackerats med rostskydd för att motverka korrosion. Tryckstag går igenom ett smalt hålrum i masterna mellan överbyggnaden och skevrodet. Det smala hålet begränsar tryckstagens rörelse i tangentens riktning relativt dess verkningslinje i syfte att minimera glapp under belastning. Tryckstagen hakar i skevrodet och servomotorernas arm med en 90° sektion i slutet på vardera sida av tryckstagen och låses i position vid montering som i figur 3.8.



Figur 3.8: Koppling mellan länkarm och servomotor

3.1.5 Motorinfästning

För att fästa motorerna till båten utformades två motorfästen med hydrodynamik och modularitet i åtanke. Fästena är hydrodynamiskt utformade och omsluter vardera främre mast med en strömlinjeformad design för att minimera påverkan av det ingående flödet i propellern. Fästena går att justera i höjddled på de främre masterna vilket kräver en noggrann avvägning mellan mekaniska moment och hydrodynamisk effektivitet. Genom att montera motorerna lägre ökar avståndet till båtens tyngdpunkt, vilket skapar en längre hävarm för den framdrivande kraften. Detta resulterar i ett kraftigare vridmoment som vill tvinga upp fören, vilket sätter högre krav på att bakre höjdroder kan generera tillräcklig motkraft för att stabilisera lyftet. Samtidigt begränsas möjligheten till en hög montering av risken för ventilation, då ett för kort avstånd till vattenytan gör att luft kan sugas ner och bryta propellerns grepp. Utöver dessa faktorer måste även hänsyn tas till den turbulenta propellerströmmen som uppstår efter propellrarna. Om motorerna placeras i höjd med det bakre bärplanet riskerar det att störa flödet och drastiskt minska bärplanets lyftkraft. Motorfästena är utskrivna i PETG med en ökad vägg tjocklek för att förbättra hållfastheten eftersom fästena utsätts för högt vridmoment.

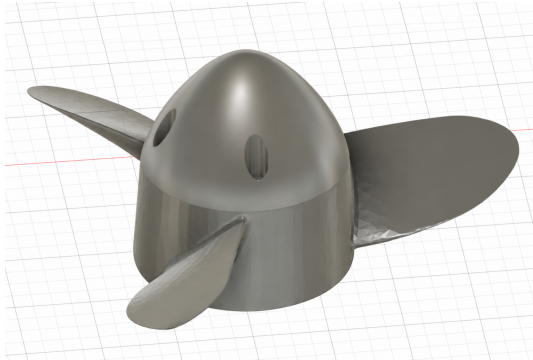
Motorn monteras i fästeanordningen enligt figur 3.9 och har gängade stänger som klämmer fast motorfästet till masten. Skruvhålen är täckta med pluggar för att hålla ytan jämn och inte orsaka turbulens. Motorfästet har interna gångar där kablarna kan dras igenom fästet, in i masten och upp till överbyggnaden för att sammanfogas med resterande elektronik. I motorn monteras sedan propellern med 4 skruvar.



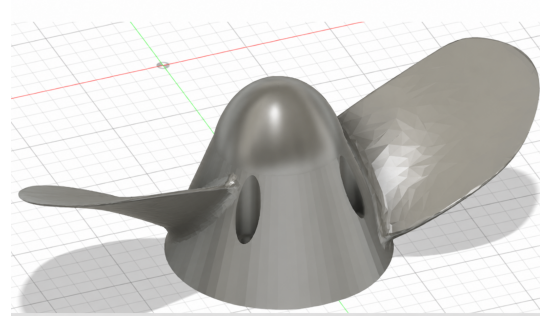
Figur 3.9: Motorfäste, motor och propeller monterad runt mast

3.1.6 Propellrar

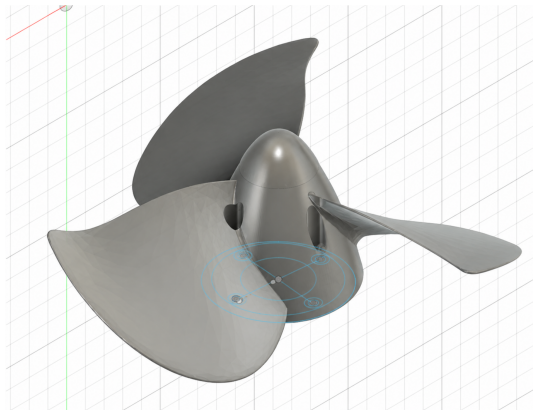
Motorns medföljande propellrar var endast gjorda för rotation medurs, och bärplansbåtens design kräver olika rotationsriktningar på de två propellrarna, behövdes egen design och tillverkning av propellrar utföras. Då propellerdesign inte är en huvudsaklig del av detta arbete, valdes färdiga CAD filer för propellrar med olika propellerparametrar. Dessa CAD-filer modifierades för att passa motorns bultmönster samt ha en mer hydrodynamisk form för ett minimerat motstånd. Se primärt utvalda propellrar i figur 3.10.



(a) Trebladig propeller med geometriskt stark konstruktion



(b) Tvåbladig propeller med hög stigning



(c) Trebladig propeller med stor diameter och tunna blad



(d) Ett av två propellerblad baserat på motorns medföljande propeller

Figur 3.10: Första urvalet av propellrar

Tillverkningsprocessen som valdes var 3D-utskrivning, vilket begränsade urvalet av propellrar för att ha en hållfast konstruktion. Propellrar har en geometriskt komplicerad form där godstjocklek på materialet varierar stort beroende på design. En av de främsta utmaningarna var att många propellrar har en begränsad godstjocklek, samtidigt som de behöver motstå högt tryck på dessa ytor. Därav valdes primärt propellerprofiler som ansågs ha en geometrisk

stark uppbyggnad.

Till skillnad från resterande komponenter, som är tillverkade i PETG, ställdes allt högre krav på både materialstyrka och ytfinitet, vilket ledde till att kolfiberförstärkt PETG användes. Detta material har betydligt starkare och styvare egenskaper än vanlig PETG, vilket krävdes för att motverka deformation av propellerbladen, se test i avsnitt 5.1.2.

3.1.7 Bärplan

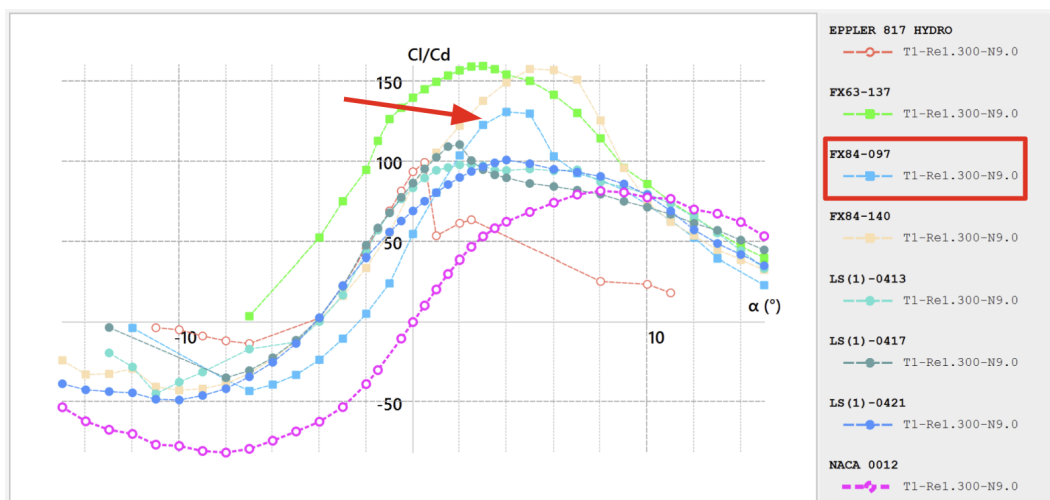
Utformningen av bärplanen är den mest centrala delen för att få båten att lyfta. Bärplanens design kan delas upp i två separata delar: främre och bakre bärplan. Det främre bärplanet är ansvarig för att skapa lyftkraft och bära största delen av båtens vikt. Det bakre bärplanet är till för att skapa moment, vilket reglerar stigningsvinkeln. Detta gör att delarna utformas på olika sätt och respektive bärplan måste uppfylla speciella kriterier.

3.1.7.1 Bärplansprofil och dimensionering

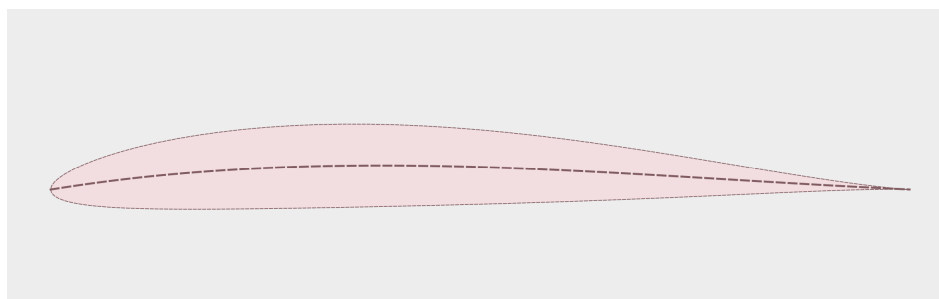
Initialt genomfördes en sökprocess för att identifiera lämpliga bärplansprofiler för främre och bakre bärplan, med önskemålet om en asymmetrisk främre profil. Databaser från UIUC Applied Aerodynamics Group (Selig, 1994) nyttjades för att finna profiler optimerade för låga Reynoldstal, vilka därefter importerades till XFLR5 för vidare analys. Inför detta genomfördes även en bedömning av profilernas producerbarhet och praktiska tillämplighet. Exempelvis konstaterades en profil med en alltför tunn bakkant kan medföra bristande strukturell hållbarhet.

I XFLR5 analyseras profilerna först i två dimensioner enligt kapitel 2.4.2. Reynoldstalen beräknades enligt ekvation 2.3 för hastigheter i vatten upp till cirka 12 m/s. Det vill säga ett spann upp till 2000000 i Reynoldstal. Kvoten C_L/C_D relativt α visualiseras i figur 3.11, alltså hur lyft- och drag-koefficienten påverkas av anfallsvinkeln. Detta för att se vilken profil som fick högst kvot och samtidigt inte minskar drastiskt. Ett kraftigt avtagande av datapunkter innebär högre risk för stallfenomen, vilket vill undvikas.

Efter att ha analyserat flertalet profiler valdes FX84W097 till det främre bärplanet, som visas i figur 3.12. Trots att den inte presterade bäst enligt grafen i figur 3.11, hanterar den alla begränsningar som satts på profilens geometriska egenskaper. De profiler som presterade bättre enligt grafen hade geometri som inte hade gått att producera enligt de tillverkningsmetoder som projektet är begränsade till. Att till exempel implementera gångjärn till skevroder samt få dessa hållfasta hade inte varit genomförbart med projektets tillverkningsmetoder. Dessutom bedömdes några av dessa profiler vara för tunna för att rymma en förstärkningsprofil invändigt. Bärplansprofilens optimala anfallsvinkel är då kvoten mellan lyft- samt drag-koefficienterna har nått sitt maximum. En mindre anfallsvinkel antogs för att skapa en säkerhetsmarginal, det vill säga att inte vara för nära gränsen av att motståndet ökar mer än lyftet. Enligt XFLR5 blir en optimal anfallsvinkel för FX84W097 kring 3 grader.

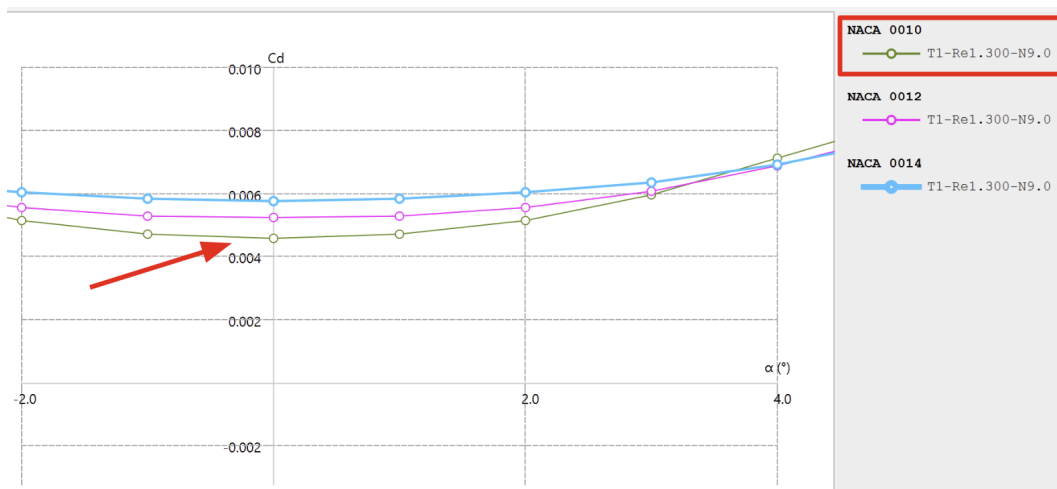
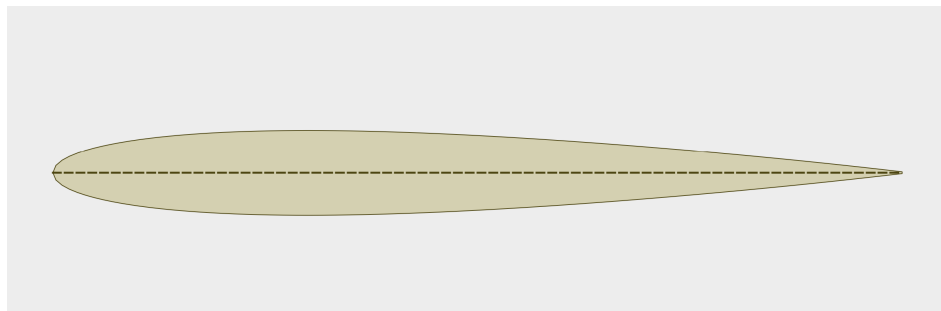


Figur 3.11: Graf C_L/C_D mot α för analyserade profiler från XFRLR5



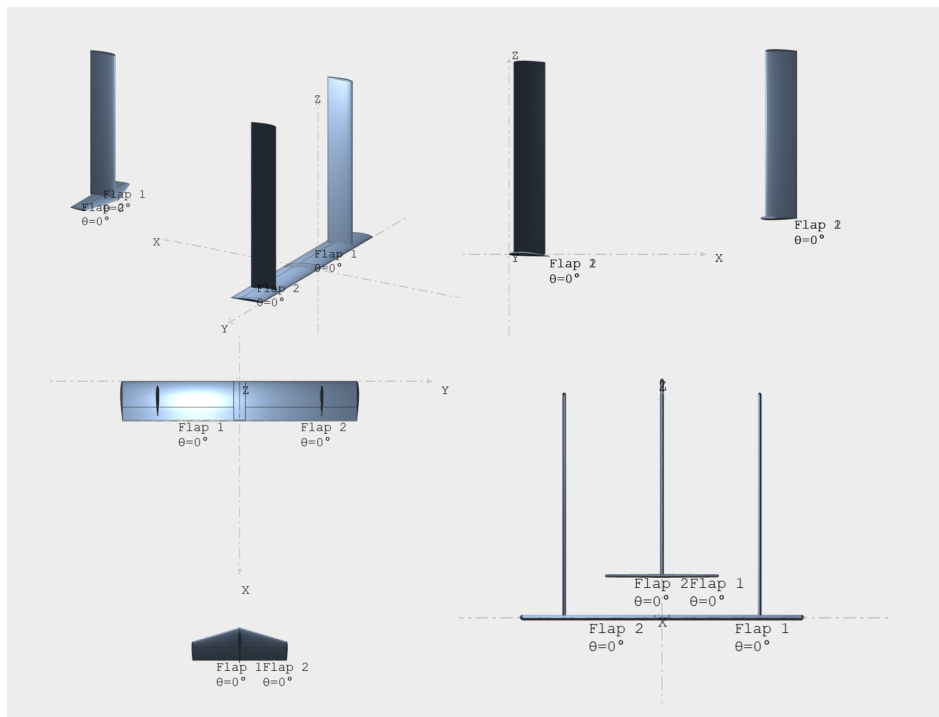
Figur 3.12: FX84W097 profil

Det bakre bärplanets profil bestämdes till att vara symmetrisk enligt projektets beskrivning. Eftersom det bakre bärplanet är tänkt att generera en betydligt mindre lyftkraft än det främre bärplanet, var det hydrodynamiskt motiverat att ha ett så lågt motstånd som möjligt. Några symmetriska profiler valdes därför ut och gav resultat enligt figur 3.13. NACA 0010 redovisas enligt figur 3.14 och var den profil som gav minst motstånd inom intervallet -2 till 3 grader. Till följd av detta valdes denna profil.

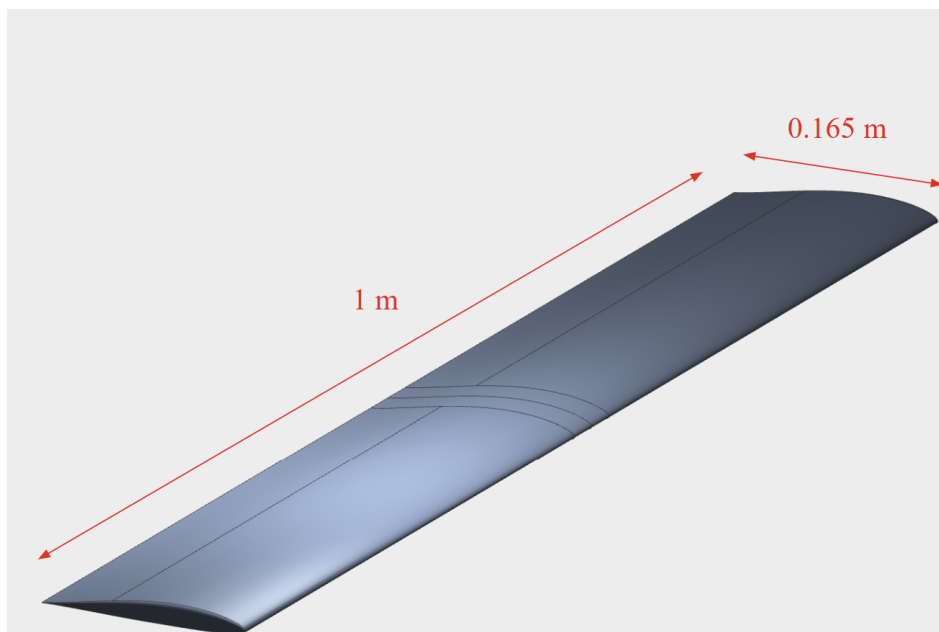
Figur 3.13: Graf C_D mot α för analyserade profiler från XFLR5

Figur 3.14: NACA 0010 profil

Med profilerna fastställda, dimensionerades den våta strukturen i tre dimensioner i XFLR5 enligt figur 3.15. Det vill säga det som kommer att vara under vattenytan och påverkas av dess flöde. Båtens skrov bortses för att enklare dimensionera och isolera strukturen under vatten. Båtens totala vikt, inklusive den tilltänkta externa lasten på 30 kg, beräknades vara omkring 70 kg. För att ha marginal och dimensionera för interaktionseffekter från övriga delar, användes en säkerhetsfaktor 2. Denna faktor gör alltså att lyftkraften måste vara cirka 130 kg. Utifrån detta dimensionerades det främre bärplanet enligt ekvation 2.5, då det ska generera majoriteten av lyftkraften. I XFLR5 beräknas denna lyftkraft att uppstå vid 6 m/s, med neutrala vinklar på höjd- samt skevroder. Resultatet från XFLR5 presenteras i bilaga D. Med en begränsning att bärplanet inte ska vara bredare än 1 m, men bibehålla dess lyftkraft, blev kordlängden 0,165 m vilket redovisas i figur 3.16. Dessutom utfördes en CFD beräkning av det främre bärplanet av Nils Lundqvist, doktorand inom marin teknik vid Chalmers Tekniska Högskola, för att få en jämförelse med XFLR5. CFD-beräkningens resultat återfås i bilaga E.



Figur 3.15: Modellering av den våta strukturen i XFLR5



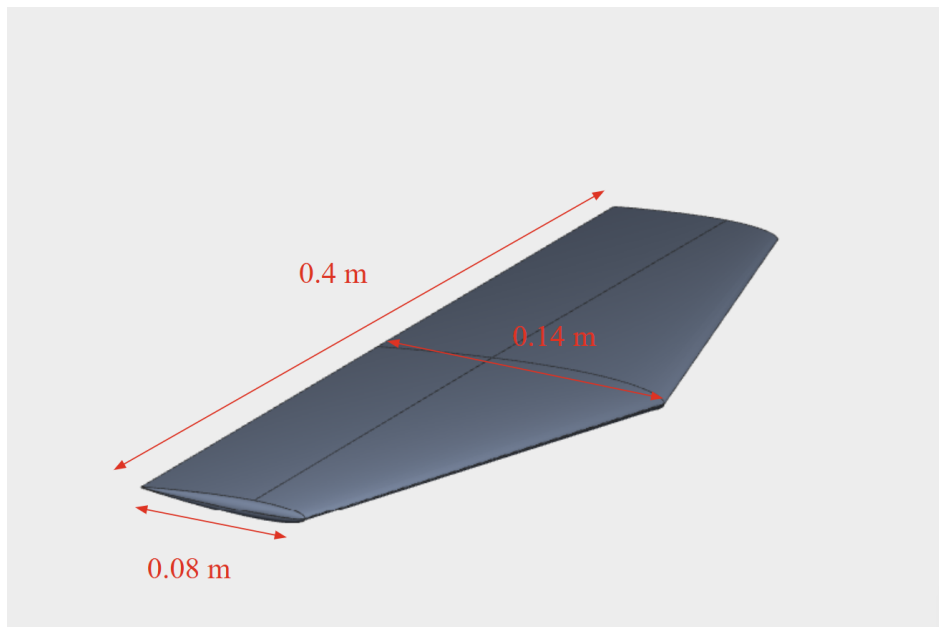
Figur 3.16: Dimensioner av det främre bärplanet i XFLR5

Det bakre bärplanet dimensioneras med en v-formad geometri till skillnad från det främre

bärplanet. Dess utformning begränsas av de främre masternas positionering för att minimera spetsvirlarnas inverkan på bärplanets prestanda. Areal ska samtidigt vara tillräckligt stor så att lyftkraften genererad från bakre bärplan bidrar till att uppnå momentjämvikt kring tyngdpunkten:

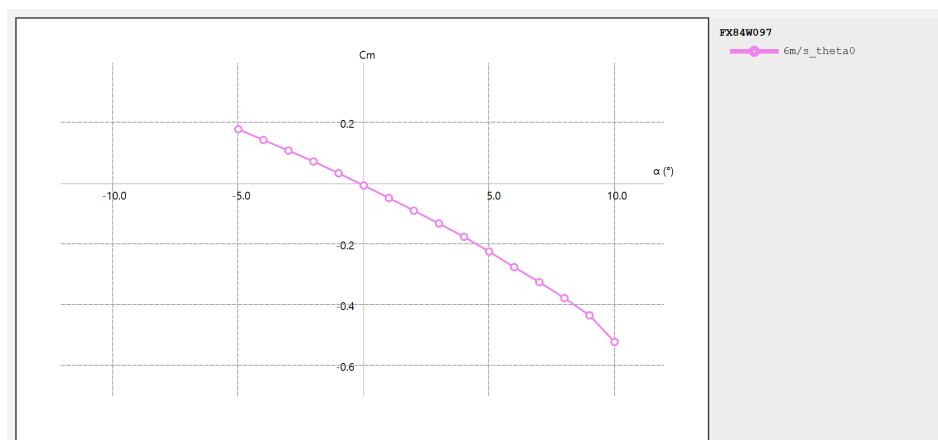
$$M_{\text{främrebärplan}} - M_{\text{bakrebärplan}} = 0 \quad (3.2)$$

Dessa krafter hämtas från XFLR5 och det bakre bärplanet överdimensioneras för att kunna kompensera för extremfall. Dimensionerna blir således en area $A_p = 0,044 \text{ m}^2$, ett vingspann på 0,4 m samt en kordlängd som avtar från 0,14 m till 0,08 m, vilket visas i figur 3.17.



Figur 3.17: Dimensioner av det bakre bärplanet i XFLR5

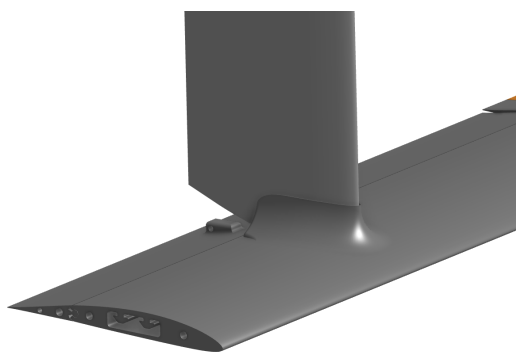
Kombinationen av bärplanen och båtens tyngdpunkt möjliggör en stabilitetsanalys som utfördes i XFLR5. Genom att placera tyngdpunkten mellan bärplanen, kan dess optimala position identifieras med hjälp av stabilitetsgrafen C_m mot α och iterativt förflytta tyngdpunkten. Där eftersträvas en negativ lutning samtidigt som kurvan skär y-axeln så nära origo som möjligt. Detta för att inte ha något stigande moment och att båten ska vara stabil. Ungefär 100 mm från framkanten av det främre bärplanet placerades tyngdpunkten, vilket genererade grafen i figur 3.18.



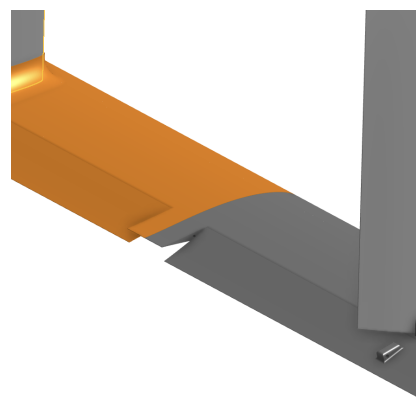
Figur 3.18: Stabilitetsgraf C_m mot α från XFLR5 (grafens representerar båtens stabilitet vid 6 m/s med en vikt på 70 kg)

3.1.7.2 Främre bärplan

Profilen FX84W097, se figur 3.19a, valdes till främre bärplanet trots att andra profiler uppvisade högre teoretisk prestanda. Valet motiverades främst av behovet att integrera en 40×10 mm förstärkningsprofil inuti bärplanet för att säkerställa ökad strukturell hållfasthet och modularitet. Vidare utformades bärplanets centersektion som ett neutralt parti utan skevroder, vilket framgår i figur 3.19b. Denna konfiguration valdes då skevroderplacering i bärplanets mitt ger minimal rullpåverkan eftersom hävarmen är liten relativt rullaxeln. Det riskerar dessutom att störa det hydrodynamiska flödet när skevrodererna ger fullt utslag i olika riktning (A. Eslamdoost, personlig kommunikation, 2026).



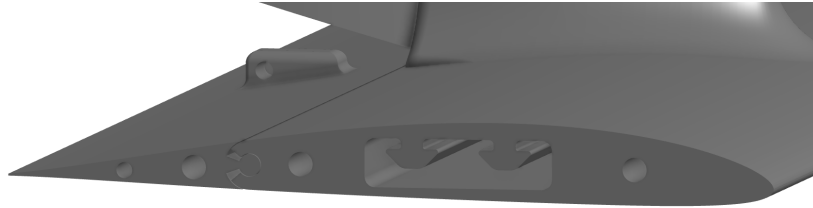
(a) Främre vingprofil med mastanslutning



(b) Neutralt parti

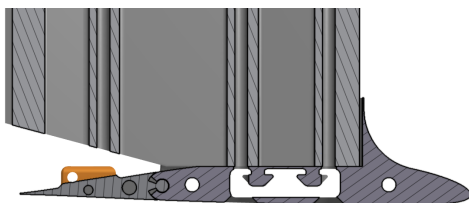
Figur 3.19: Främre bärplan

Bärplanet tillverkas genom 3D-utskrivning i PETG. Tillverkningsmetoden är storleksbegränsad beroende på 3D-skrivarens utskriftsvolym, därav har bärplanet delats upp i fyra segment som sedan sammanfogas med en aluminiumprofil, se figur 3.20. Bärplanet skrevs ut vertikalt för att uppnå hög ytfinhet och undgå problemet då 3D-skrivna stöd lämnar en ojämn yta. Detta medför även att modellen blir mer känslig för skjuvning mellan varje utskrivet lager PETG.



Figur 3.20: Främre bärplanets sida med hål för profiler

En central del i designen av bärplanet är att säkerställa optimal anfallsvinkel. För att möjliggöra optimering av anfallsvinkeln tillverkades bärplanen med en neutral, 0-gradig lutning, med möjlighet att justeras i efterhand. Anledningen till att 0° valdes som utgångsläge är för att glappet mellan bärplan och mast blir trängre desto mer man ökar anfallsvinkeln. Ett system där man måste minska anfallsvinkeln hade bidragit till ett ökat glapp i strukturen, som i sin tur påverkar flödet negativt. Justeringen av anfallsvinkeln sker genom att placera brickor, enligt figur 3.21b, mellan masten och kontaktytan till bärplanet. De tillverkade brickorna kan skapa anfallsvinklar på 1° , $1,5^\circ$, 3° och 4° . Detta gör, till skillnad från tidigare år, att man undgår att vinkla mast och motorer i samband med reglering av anfallsvinkeln. På så sätt är det endast själva bärplanet som ändras och mast med motorer förblir neutrala med en monteringsvinkel på 0° . Detta illustreras i figur 3.21.



(a) Genomskärning där bricka placeras

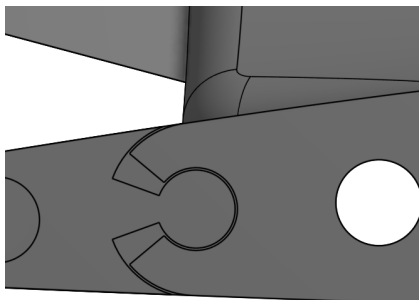


(b) Mellanbricka

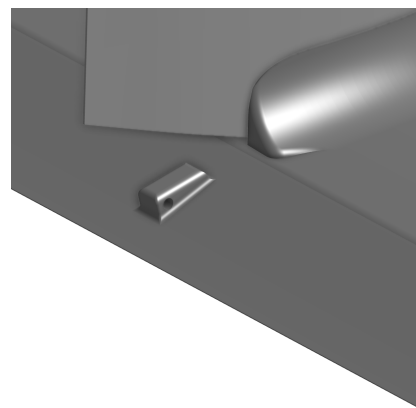
Figur 3.21: Illustration över modulär anfallsvinkel

Skevroderna är sammankopplade med bärplanet via egendesignade gångjärn, vilka är inspirerade från tidigare års lösning, se figur 3.22. På grund av bristande godstjocklek inuti skevrodret

har ett upphöjt parti konstruerats för att möjliggöra infästning av tryckstaget med bibehållen hållfasthet. I detta upphöjda parti har en ögla integrerats i vilken tryckstaget fixeras, se figur 3.23.



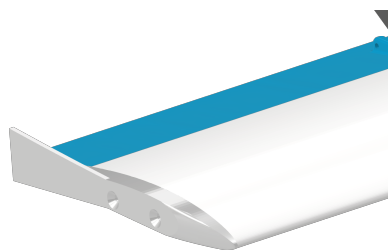
Figur 3.22: Gångjärn för det främre bärplanet



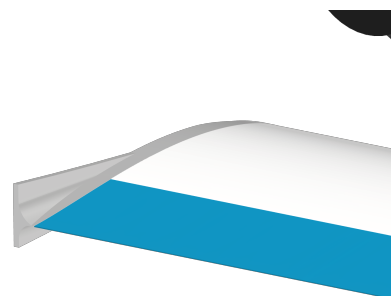
Figur 3.23: Förstärkning för tryckstag

För att förstärka konstruktionen ytterligare gjordes valet att integrera kolfiberstavar i strukturen. I bärplanet användes två 5 mm tjocka kolfiberstavar och i skevrodren en 5 mm och en 3 mm tjock kolfiberstav, se figur 3.20. Detta för att motverka skjuvning i strukturen. Dessa stavar bidrar även med att hålla samman skevroderna och bärplanen eftersom dessa är genomlöpande i strukturens alla segment.

För att förhindra turbulens appliceras vingspetsfenor vid ändarna av bärplanet (figur 3.24). Dess struktur sträcker sig över och under bärplanet samt går över skevrodret i dess maximala lägen. För att bibehålla bärplanets modularitet kan dessa enkelt bytas ut, då de är monterade med två skruvar gängade i den genomgående aluminiumprofilen.



(a) Vy framifrån

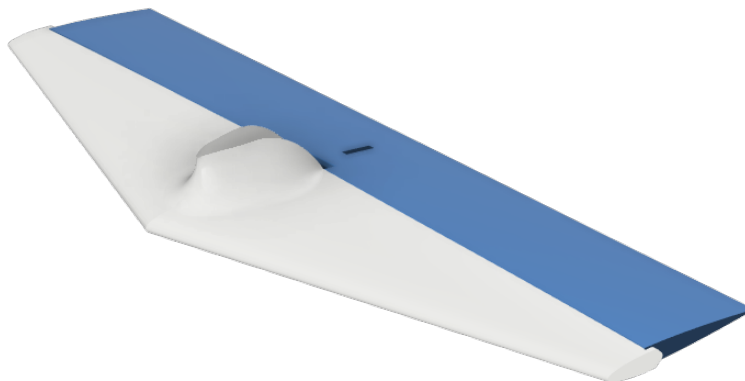


(b) Vy bakifrån

Figur 3.24: Vingspetsfena på främre bärplan

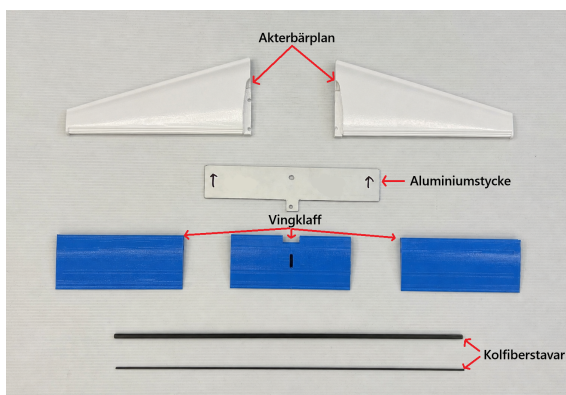
3.1.7.3 Bakre bärplan

Det bakre bärplanet är baserat på vingprofilen, NACA 0010, som XFLR5 simuleringarna utfördes med. Istället för att använda vingpetsfenor i syfte att minimera turbulens vid vingpetsarna, som dessutom försämrar lyftkraften vid gir, används en V-formad avsmalning av bärplanet. Detta, i kombination med den mindre vingbredden på 400 mm och smala vingprofilen, bidrar till ökad komplexitet vid förstärkning och design av kontrolllytor.

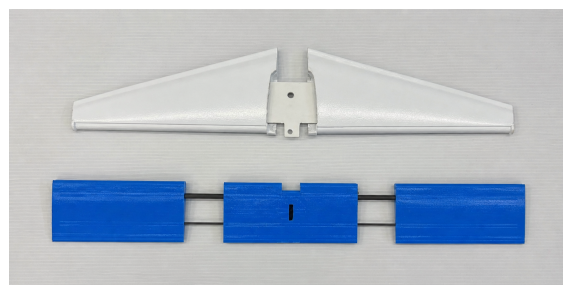


Figur 3.25: Bild på hela bakre bärplanet

Genom att integrera en 3×50 mm aluminiumprofil i vingen, för att ha en sammanhängande aluminiumstruktur, förstärks bärplanet. Vingklaffen var för tunn för att möjliggöra integration av ett aluminiumstycke trots att den är 50% av bärplansarean, därav användes 5 mm och 2 mm kolfiberstavar som förstärkning. Aluminiumstycket och kolfiberstavarna användes inte enbart för att förstärka de 3D-utskrivna delarna, utan även för att förenkla montering av komponenterna så att de passade in korrekt mot varandra, se figur 3.26b. Dessa sammanfogades slutligen med epoxi.



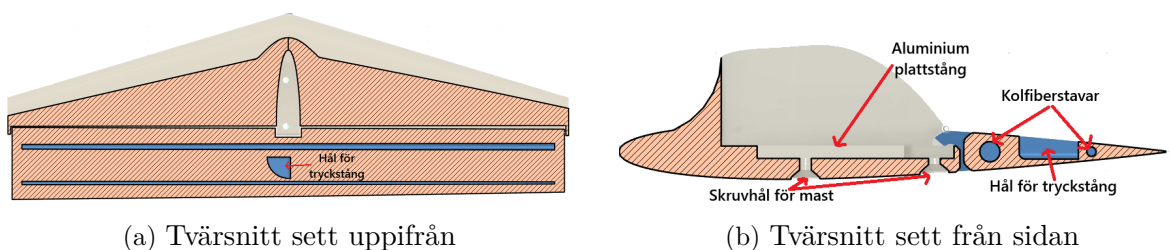
(a) Komponenter för bakre bärplan



(b) Delvis monterat bakre bärplan

Figur 3.26: Bakre bärplanets konstruktion

För att sammankoppla vingklaffen med servomotorn, som är fast monterad på överbyggnaden, användes ett tryckstag likt främre masterna. Tryckstaget fästes i vingklaffen genom att skjutas in och därefter roteras 90° medurs för att låsas fast, se figur 3.27.



Figur 3.27: Tvärsnitt av bakre bärplan

Detta bärplan designades med samma modularitet som det främre bärplanet där den fasta anfallsvinkeln går att justeras manuellt med mellanbrickor, se figur 3.21b. Detta möjliggör optimering för att anpassa båten utifrån olika förhållanden och krav som exempelvis olika last eller hastighet.

3.1.8 Kontrolllytor

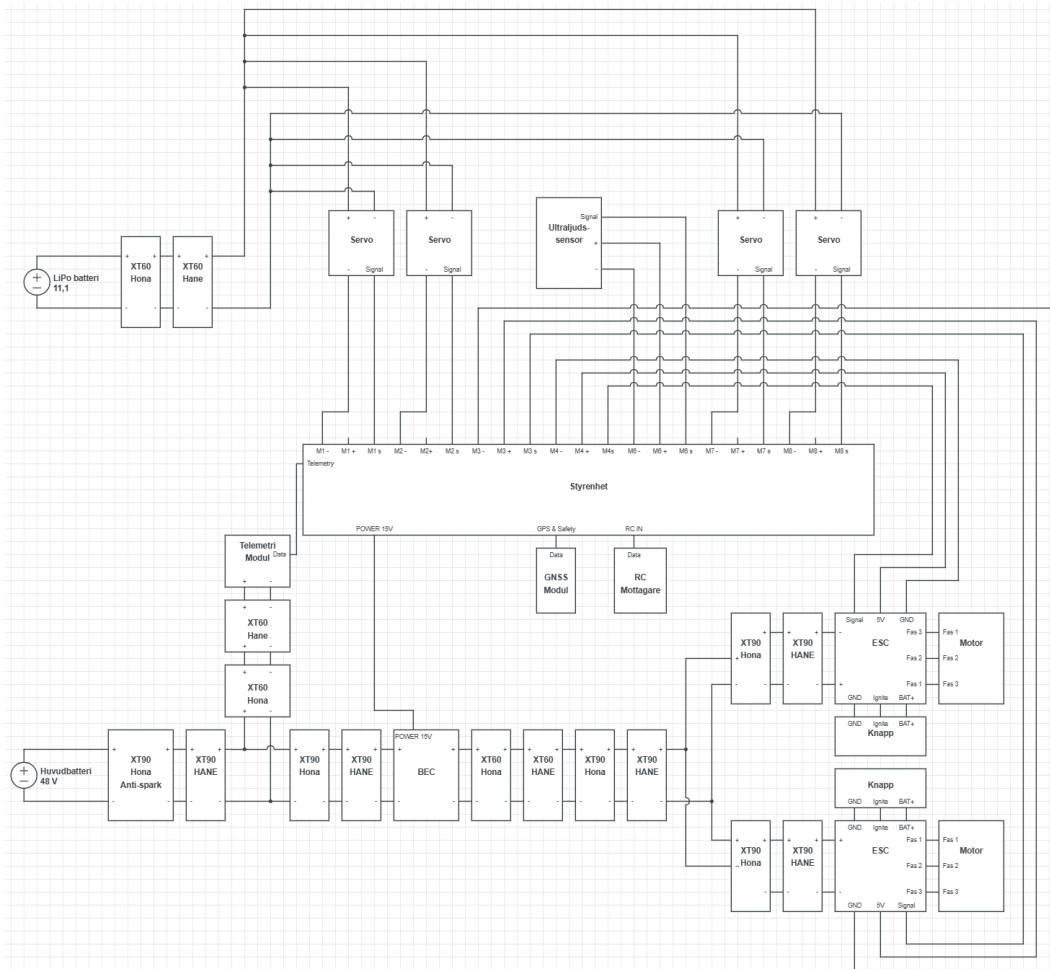
Kontrolllytorna är baserade på den bärplansgeometri som framtoogs vid simulering, därefter har bakre delen av den valda vingprofilen modellerats om i CAD för att effektivt användas som kontrolllytor för rull, stigning och gir.

Både främre och bakre bärplan använder integrerade gångjärn för att minimera antalet totala komponenter. Dessa är modellerade med en mekanisk maximal och minimal anfallsvinkel satt till $+20^\circ$ och -20° , vilket ger en god avvägning mellan hållfasthet och maximalt vinkelutslag.

Då god manövrerbarhet är viktigt för denna bärplansbåt, valdes kontrolllytorna vid främre bärplanet till 30% och det bakre bärplanets kontrolllytor till 50% för att säkerställa god kontroll vid låga hastigheter.

3.2 Elektronik

Detta kapitel behandlar båtens elektriska system och styrning. Uppbyggnaden av systemet beskrivs utifrån komponenternas funktion och inbördes verkan, med stöd av det detaljerade kopplingsschemat över det elektriska systemet på båten vilket beskriver hur alla elektriska komponenter är sammankopplade.



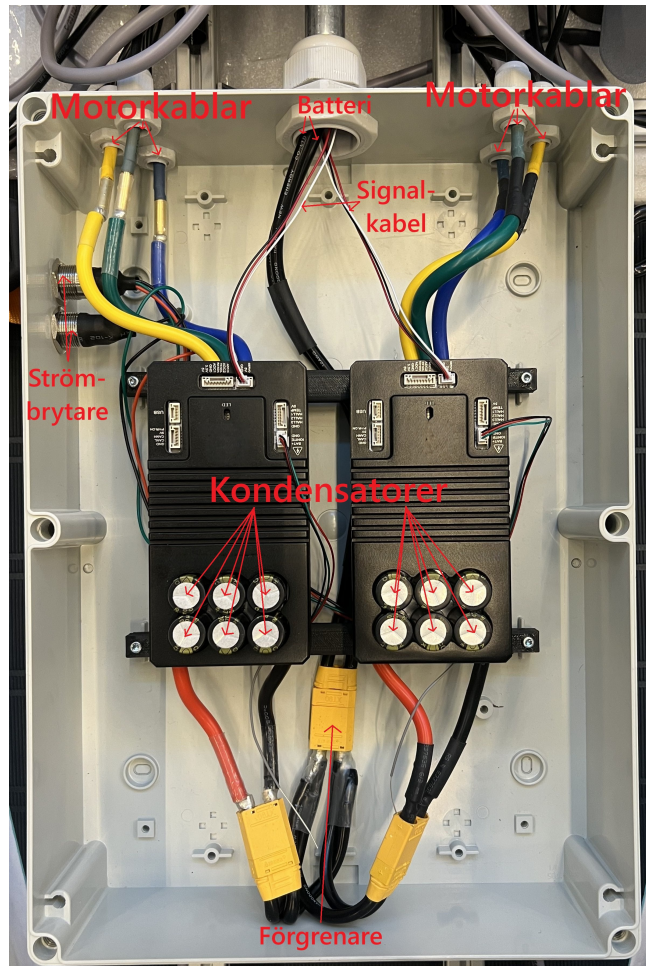
Figur 3.28: Kopplingsschema över det elektriska systemet

3.2.1 ESC

Två motorregulatorer används för att individuellt styra de borstlösa motorerna i framdrivningssystemet. Dessa regulatorer kan arbeta inom spänningsintervallet 14 – 84 V, vilket förenklar batterivalet tack vare det breda spänningsintervallet. Den maximala kontinuerliga strömmen genom regulatorer är 200 A vid 50 V, vilket gör att ESC-enheterna individuellt har en tillåten kontinuerlig effekt på $P = U \cdot I = 50 \cdot 200 = 10 \text{ kW}$. Den höga effektgränsen gör att de två 4,4 kW motorerna kan drivas utan att begränsas av regulatorerna.

Denna modell har inbyggda kondensatorer, se figur 3.29, som gör att strömspikar, över batteriets strömbegränsning, inte skadar batteriet. Detta fungerar genom att kondensatorer tillfälligt absorberar och levererar ström. På så sätt avlastas batteriet vilket bidrar till en jämnare batterispänning samt mindre störningar som spänningsfall annars kan orsaka. På grund av kondensatorernas höga urladdningsförmåga jämnar de ut strömflödet från batteriet till regulatorerna, vilket kortvarigt tillåter hög ström till motorerna vid acceleration.

Motorregulatorerna styrs med PWM-sigaler via signalkablarna, se figur 3.29, som är direkt kopplade till styrenheten. Dessa signaler skickar önskad motorhastighet som regulatorn sedan kompenserar, med olika ström och spänning till motorerna via FOC styrning, för att uppnå önskad vinkelhastighet.



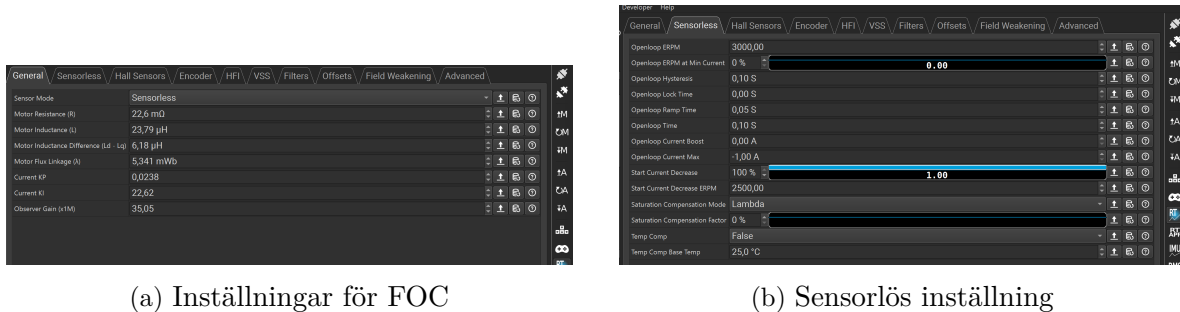
Figur 3.29: Motorregulatorer i vattentät låda

Motorregulatorerna konfigureras via mjukvaran VESC Tool där man justerar funktion och karaktäristik på trefasströmmen som går vidare till motorerna. Här ställs max- och min-värden in för insignalens PWM-värden och flertalet andra motorparametrar, exempelvis lindningsresistans, utifrån kalibrering samt motorernas datablad.

Motorerna som ESC-enheterna ska driva är sensorlösa vilket innebär att de saknar positions-givare, de kräver därför en liten rotation för att generera elektromotorisk kraft (EMK) som regulatorn sedan använder för att optimera drivningen av motorn. För att motorn ska rotera vid stillastående läge krävs därför ett annat styrsätt än FOC, detta kallas open-loop. Open-loop har en säkrare startfas fram tills EMK ökat tillräckligt så att sensorlös körning

3. Systemdesign

kan ta över. Denna startfas används under ett visst förutbestämt varvtal, justerbart i VESC Tool enligt figur 3.30, för att säkerställa fungerande sensorlös körning utan störningar och vibrationer vid låga varvtal.



Figur 3.30: Inställningar i VESC Tool

3.2.2 Motorer

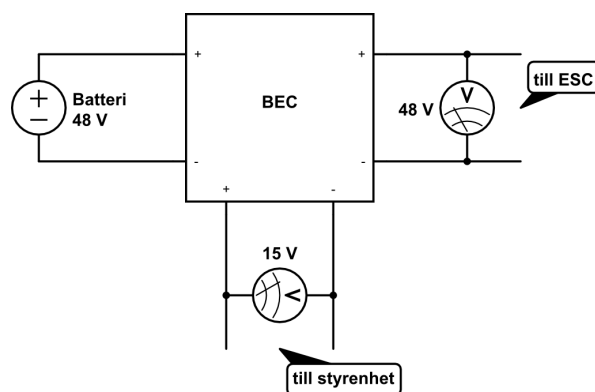
De valda motorerna var två borstlösa elmotorer på 4,4 kW vardera och är av modellen sensorlös. Sensorlösa motorer är mindre kontrollerbara vid låga varvtal, då motorerna behöver rotera för att veta sin vinkelposition som ESC-enheten kräver. Däremot ansågs detta inte som ett större problem, då motorerna snurrar i flera tusen Revolutioner Per Minut (RPM) under aktiv användning.

Motorerna används främst vid framdrivning av bärplansbåten och kräver därför en hög effekt innan skrovet lyfter, då motståndet från skrovet är stort. Då båten lyfter från vattenytan belastas motorerna avsevärt mindre och hastigheten ökar vid samma motoreffekt.

Systemets motorer används med separata ESC-enheter, vilket möjliggör individuell styrning av motorerna så att de roterar olika snabbt. Detta används, i kombination med rodret, för att kontrollera båtens gir. Att driva motorerna i olika hastighet skapar då en divergerande framdrivningskraft, vilket bidrar till ett roterande moment av farkosten längs giraxeln. Detta styrsätt heter differentiell framdrivning och kan justeras i ArduPilot relativt rodrets utslag, för att öka båtens manövrerbarhet.

3.2.3 BEC

Systemet använder Battery Eliminating Circuits (BEC) för att justera spänningen då olika elektroniska komponenter arbetar inom olika spänningsintervall. Exempelvis behöver ultraljudssensorn 5 V och styrenheten 15 V. En BEC är alltså en DC-DC omvandlare som används för att omvandla systemets huvudspänning till en stabil lägre spänning. Detta driver fler komponenter från samma batteri, vilket eliminerar behovet av ytterligare batterier och förenklar systemets uppbyggnad. Se figur 3.31 för en visualisering hur detta används för att ge styrenheten korrekt spänningsnivå. Då ultraljudssensorn kräver 5 V används en BEC som är integrerad i ESC-enheterna, detta för att undvika fler elektroniska komponenter.

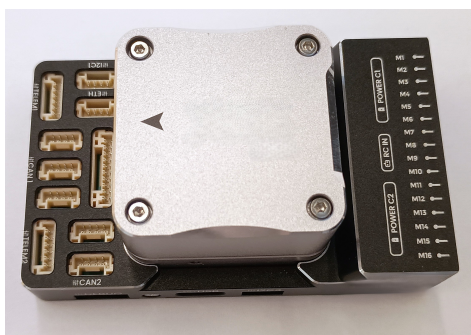


Figur 3.31: Kopplingsschema över BEC

3.2.4 Styrenhet

Systemets centrala styrenhet, se figur 3.32, är en avancerad autopilot som hanterar alla sensorinläsningar, beslut och utgångssignaler till servomotorer och ESC-enheter. Den har tre inbyggda interna mätenheter (IMU), som i sig innehåller accelerometrar och gyroskop, två barometrar och en magnetometer. Detta för att kunna veta hur styrenheten är orienterad, vilket den använder för att utföra beräkningar. Styrenheten har flera UART- och CAN-portar för att koppla in externa moduler som kan utvidga systemets funktionalitet. Via dessa portar kommunicerar styrenheten med GNSS-modulen och RC-mottagaren samt att den genererar PWM-sig-naler till ESC-enheterna och servomotorerna.

För att styra och övervaka styrenheten finns det olika program som är kompatibla med den, byggt på tidigare år har gränssnittet Mission Planner, som kör mjukvaran ArduPilot, använts. Via Mission Planner kan data visualisera och konfigureras för att justera och felsöka systemets elektroniska komponenter.

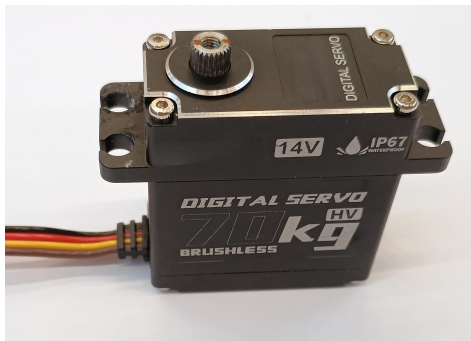


Figur 3.32: Styrenheten

3.2.5 Servomotor

Fyra stycken servomotorer, se figur 3.33, användes för att styra rörliga mekaniska delar: roder, höjdroder och skevroder. Dessa servomotorer är klassade till IP67 och utvecklar ett vridmo-

ment på 70 kg/cm vid 14 V, vilket ger marginal för projektets mål samt 180° rörelse. Servomotorerna kontrolleras med PWM-signaler från styrenheten och har en separat strömkälla från ett separat 11,1 V LiPo batteri.



Figur 3.33: Servomotor

3.2.6 GNSS

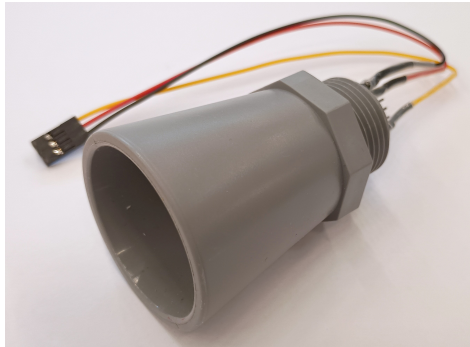
På båten används en GNSS-modul, figur 3.34, för att kunna avläsa riktning och positionering. Positioneringen ger även information som styrenheten använder för att beräkna hastighet, vilket kan avläsas i Mission Planner. För att bekräfta hastighetsmålet blir därför GNSS-modulen avgörande.



Figur 3.34: GNSS-modul

3.2.7 Ultraljudssensor

Valet av ultraljudssensor, se figur 3.35, gjordes primärt utifrån dess IP67 klassning, vilket var väsentligt då sensorn utsätts för vattenstänk i samband med körning. Den har en uppdateringsfrekvens på 6,67 Hz, vilket bedöms tillräckligt då data från ultraljudssensorn endast används för att reglera höjden som komplement till de högfrekventa justeringar vilket styrenhetens IMU utför. Sensorn används alltså primärt för att reglera lågfrekventa höjdändringar för att motverka ojämn flyghöjd, relativt vattenytan.



Figur 3.35: Ultraljudssensor

3.2.8 Trådlös telemetri

För att kunna avläsa telemetridata under tester användes en radiosändare i kombination med en mottagare som ansluts till en dator på land. Detta möjliggör trådlös övervakning av data samt ändring av parametervärden i Mission Planner, med en räckvidd upp till 40 km.



Figur 3.36: Trådlös sändare och mottagare för realtids-telemetri

4. Test

För att säkerställa båtens funktionalitet, tillförlitlighet och säkerhet genomfördes en serie av omfattande tester av systemets kritiska komponenter samt båtens helhet. Testarbetet delades upp i två faser, först verifierades varje delsystem för sig och därefter testades hela båtens funktion under verkliga förhållanden. Inledningsvis utfördes termiska belastningstester av motorernas ESC samt en utvärdering av de 3D-utskrivna propellrarnas styvhet och hydrodynamiska prestanda. Vidare genomfördes latensmätningar med höghastighetskameror för att fastställa systemets svarstid från både interna och externa sensorer till servomotorers fysiska respons. Dessa verifieringar lade grunden för de avslutande fälttesterna, där hela konstruktionen utvärderas under verkliga förhållanden.

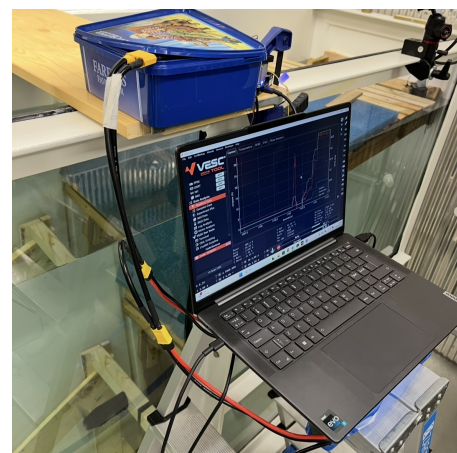
4.1 Termisk utvärdering av ESC

Eftersom motorernas ESC slutligen placeras i en sluten, vattentät låda, genomfördes ett belastningstest för att utreda behovet för ett externt kylsystem. Syftet var att säkerställa att komponenterna inte överhettas under framdrift. Vid testet monterades en av motorerna i en egentillverkad rigg och sänktes ner i en vattentank för att simulera belastningsförhållanden.

Under en tidsperiod på 30 minuter kördes motorn under en successivt ökande belastning medan värmeutvecklingen övervakades. Då testet genomfördes i ett tidigt skede av projektet var varken val av propellrar eller den slutgiltiga elektroniklådan fastställd. Istället användes motorns medföljande originalpropeller och en mindre plastlåda för att representera förhållandena (se figur 4.1). Även om testuppställningen inte helt motsvarar den slutgiltiga lösningen, ansågs den vara tillräckligt representativ för att ge en indikation på värmeutvecklingen.



(a) Motor nedsänkt i vatten och monterad i rigg



(b) ESC-konfiguration för temperaturövervakning

Figur 4.1: Belastningstest av ESC (värmeutveckling)

4.2 Prestandatest och materialutvärdering av propellrar

För att utvärdera prestandan hos de egentillverkade propellrarna genomfördes ett belastningstest. Metodiken följde samma princip som i den termiska utvärderingen av ESC-enheten, avsnitt 4.1, där varje propeller monterades sekventiellt på motorn och sänktes ner i bassängen. Motorns belastning ökade därefter successivt samtidigt som mätdata och visuella observationer av propellrarnas beteende under last dokumenteras.

Totalt utvärderades tre olika konfigurationer för att identifiera skillnader i prestanda och materialstyvhet, enligt figur 4.2.



Figur 4.2: Propellrar som utvärderas under prestandatestet

4.3 Utvärdering av systemlatens och svarstider

Det utfördes ett sensortest för att uppmäta latensen från ultraljudssensorns insignal till servomotorns utslag. Testet dokumenterades med en höghastighetskamera där differensen observerades och beräknades.

Ett liknande test utfördes där styrenhetens IMU istället användes. Då uppmättes differensen från att styrenhetens läge ändrades till utslag på servomotorn.

4.4 Fälttest

För att utvärdera konstruktionen som helhet genomfördes totalt två fälttester.

Det första fälttestet genomfördes den 20:e april 2026 i Rådasjön, Mölndal, under soliga men relativt blåsiga förhållanden. Vinden uppgick till 5 – 11 m/s med 5 – 10 cm vågor. Till hjälp hade en följbåt lånats för att enklare följa båten ute på sjön. Utöver detta medtogs verktyg för lättare justeringar av båten men även systemkamera och drönare för att dokumentera testet.

Det andra fälttestet genomfördes den 26:e april 2026 i Rådasjön, Mölndal, under liknade förhållanden som under fälttest 1 men med en vindstyrka på 7 – 14 m/s samt vågor på 15 – 20 cm. Denna gången medtogs verktyg och en uppblåsbar SUP-bräda istället för ribbåten.

5. Resultat

Kapitlet sammanställer de mätdata och observationer som genererats under projektets gång. Innehållet är uppdelat i teknisk utvärdering av delsystem, analys av systemintegration vid fälttest samt en presentation av den slutgiltiga konstruktionen.

5.1 Resultat av tester

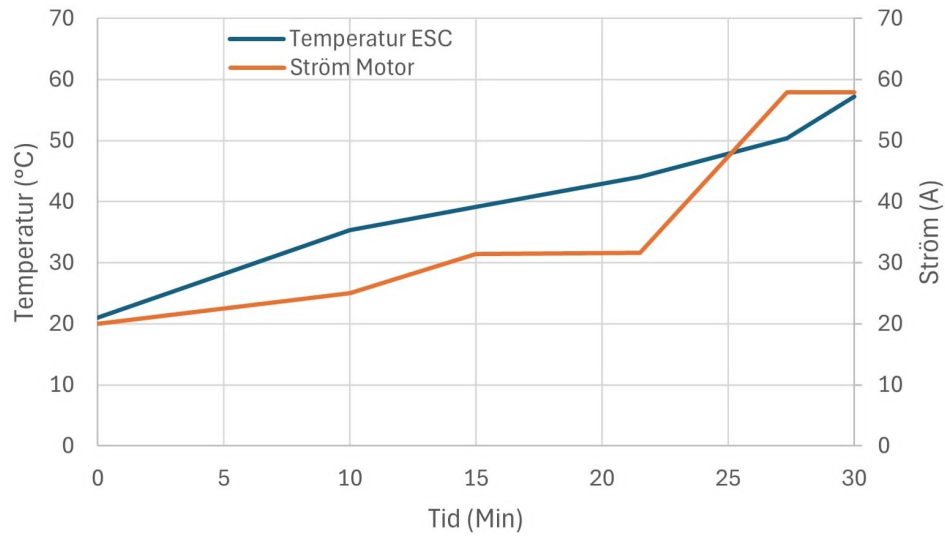
I detta kapitel presenteras resultatet från testerna i kapitel 4. Dessa resultat innefattar termisk utvärdering av ESC, prestandatest och materialutvärdering av propellrar, utvärdering av systemlatens och svarstider samt fälttest.

5.1.1 Resultat från termisk utvärdering av ESC

Gällande värmeutvecklingen i ESC-enheten kan det konstateras att ett extern kylsystem inte bedöms nödvändigt för den aktuella typen av belastning. Utifrån metodiken som presenterades i avsnitt 4.1 observerades en tydlig korrelation mellan strömstyrka och temperaturutveckling. Efter 30 minuters successivt stegrad belastning uppmättes en maximal motorström på cirka 60 A, vilket resulterade i en maximal temperatur på 57°C. Då ESC-enheten enligt tillverkaren är dimensionerad för en kontinuerlig ström på upp till 200 A, ligger de uppmätta värdena med god marginal under komponenternas kritiska gränsvärde.

Då testet utfördes i en stationär miljö utan framdrift, där propellern endast flyttar stillastående vatten, blir den hydrodynamiska belastningen signifikant högre än vid normal drift. Detta fenomen beror på att propellerns framdrivningstal är noll, vilket tvingar bladen att arbeta med maximalt vridmoment för att flytta det stillastående vattnet. Under verkliga arbetsförhållanden, när båten rör sig framåt, minskar den relativa belastningen på motorn då vattenflödet in i propellern underlättar accelerationen av vätskan (Tupper, 2013). Att motorn tvingas arbeta hårdare under en stationär miljö medför en ökad strömförbrukning, vilket i sin tur resulterar i en värmeutveckling som sannolikt överstiger de temperaturer som uppstår under operativ framdrift.

Resultatet från denna typ av test, i kombination med att den slutgiltiga båtkonstruktionen utrustas med dubbla drivlinor ger en betryggande säkerhetsmarginal för systemets termiska stabilitet. Genom att fördela den total belastningen på två separata ESC-enheter sänks den enskilda strömförbrukningen drastiskt i jämförelse med testscenariot. Detta medför att temperaturen under operativ framdrift kommer att ligga väl under de nivåer där komponenternas livslängd eller funktion riskeras, vilket eliminerar behovet av ett komplext och viktökande externt kylsystem.



Figur 5.1: Temperaturökning av ESC (Ström och temperatur som funktion av tiden)

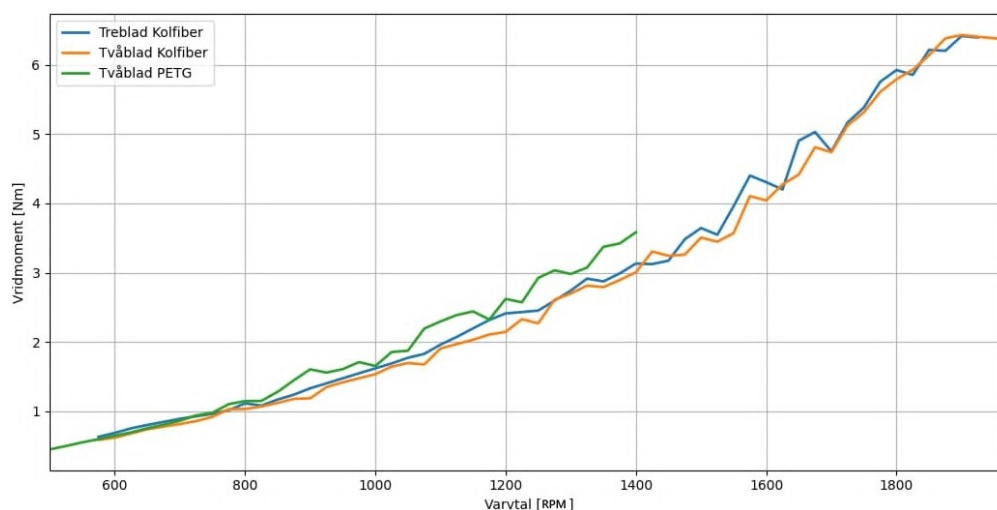
Vid tidpunkten för testet genomfördes datainsamlingen via manuella avläsningar med intervall om cirka 5 – 7 minuter i samband med belastningsökningarna. Även om mjukvaran medger loggning i realtid för en mer högupplöst analys av det termiska beteendet, bedömdes den valda metoden som tillräcklig för studiens syfte. Eftersom målet primärt var att utreda behovet av extern kylning, ligger det huvudsakliga fokuset på den maximala uppmätta temperaturen.

5.1.2 Resultat från prestandatest och materialutvärdering av propellrar

Bearbetningen av insamlad data från ESC-enhetens loggar möjliggjorde en jämförande analys av de olika propellerkonfigurationernas prestanda. För att fastställa motorns belastning beräknades vridmoment (Nm) utifrån loggad effekt (W) och varvtal (RPM) enligt följande samband:

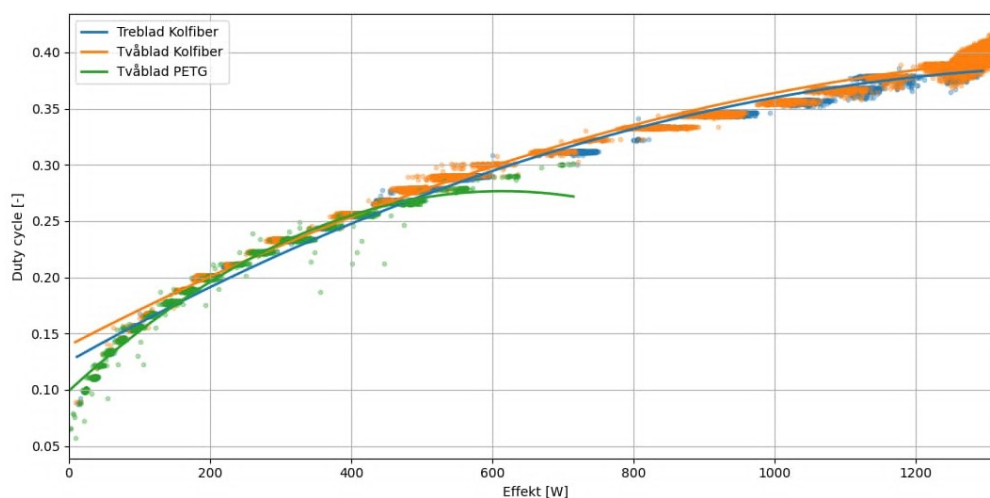
$$P = M \cdot \omega \quad \text{där} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \implies M = \frac{60P}{2\pi n} = \frac{30P}{\pi n} \quad [Nm] \quad (5.1)$$

Vid låga varvtal var det uppmätta vridmomentet i princip identiskt mellan de tre olika konfigurationerna. Det är först när vinkelhastigheten överstiger ungefär 800 RPM som anmärkningsvärd skillnad uppstår. Vid jämförelse mellan de två kolfiberförstärkta konfigurationerna, med två respektive tre blad, kunde ingen signifikant prestandaskillnad urskiljas. Men vid test av propellern i standard PETG (figur 4.2c) noterades däremot ett högre vridmoment vid högre varvtal (se figur 5.2). Under belastningstestet observerades en tydlig elastisk deformation av rotorbladen, denna elasticitet medförde att testet fick begränsas till 1400 RPM då risken för strukturellt brott bedömdes för hög. Det högre vridmomentet hos standard PETG kan sannolikt härledas till en högre bladstigning tillsammans med förändring av propellerns geometri. När propellern belastades ökade den effektiva diameter vilket medför att en större vattenmängd flyttas per varv och motorn arbetar hårdare.



Figur 5.2: ESC-data, Vridmoment (Nm) som funktion av varvtal (RPM)

Vid analys av belastning (duty cycle) i förhållande till effekt observerades inga märkbara skillnader mellan de olika propellerkonfigurationerna, detta presenteras i figur 5.3. Samtliga propellrar följer samma trend vilket indikerar att varken materialval eller bladantal gav upphov till någon signifikant prestandaavvikelse under rådande testförhållanden. Denna enhetliga trend bibehålls genom hela det gemensamma mätområdet fram tills dess att deformationen av propellern i standard PETG observerades och testet för den specifika modellen avbröts.



Figur 5.3: ESC-data, Duty Cycle (-) som funktion av effekt (W)

Resultatet från testet visar att 3D-utskrivna propellrar kommer att fungera för den tänkta applikationen. För att motverka risken för deformerade propellrar under framfart faller materialvalet på den kolfiberförstärkta PETG-varianten. Den uppvisade inga antydningar på deformation eller sprickbildning förutom några små flisor längst ut i kanten, enligt figur 5.4.

Detta har högst troligt ingenting med materialet i sig att göra utan snarare inställningar vid tillverkningstillfället. Genom att finjustera inställningar för ifyllnad, antal väggar, lagerhöjd och stöd i 3D-skrivaren är förhoppningen att ytfiniteten kommer att förbättras till den slutgiltiga modellen.



Figur 5.4: Deformation 2-bladig kolfiberförstärkt propeller

5.1.3 Resultat från utvärdering av systemlatens och svarstider

Sensortestet, som redovisas i tabell 5.1, påvisar en betydande latens hos ultraljudssensorn uppgående mellan 0,85 och 1 sekund. I kontrast uppvisar styrenhetens inbyggda IMU en väsentligt lägre latens, vilket möjliggör snabb respons vid förändringar. Detta tyder på att de integrerade sensorerna är tillförlitliga för högfrekventa korrigeringar av instabilitet i rullning och stigning. I praktiken resulterar detta i, vid 6 m/s, att båten färdas 6 meter innan en mekanisk justering sker från ultraljudssensorn.

Tabell 5.1: Resultat av sensortest

	Insignal (Ultraljud) [s]	Ut [s]	Diff [s]	Insignal (Styrenhet) [s]	Ut [s]	Diff [s]
Försök 1	1,40	2,25	0,85	0,29	0,33	0,04
Försök 2	5,60	6,60	1,00	2,27	2,32	0,05

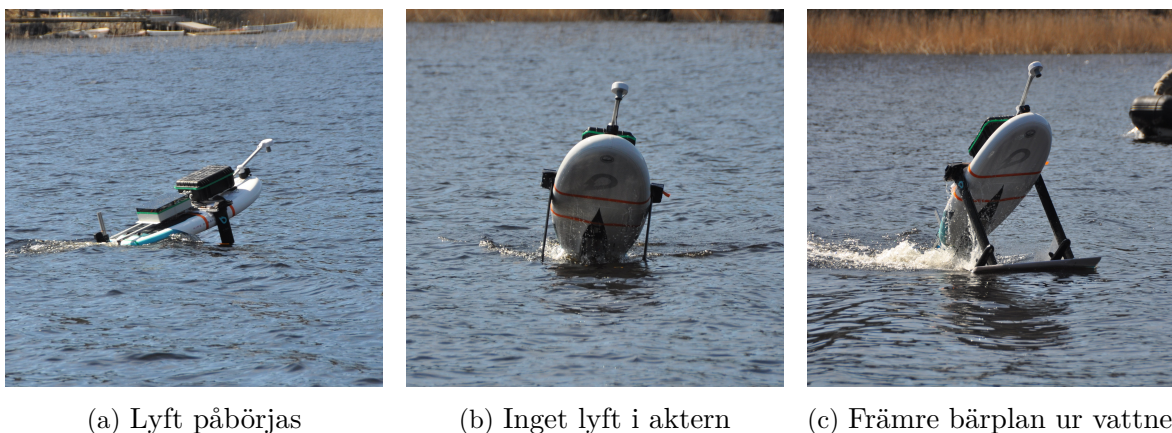
5.1.4 Resultat från fälttest

I detta avsnitt presenteras resultatet från de olika fälttesten. Dessa delas upp i två delavsnitt, ett för respektive utfört fälttest. Resultatet från testerna presenteras med mätdata från ArduPilot, bilder och skriftlig beskrivning över vad som observerades.

5.1.4.1 Fälttest 1

Under första fälttestet lyckades båten att lyfta och flyga relativt stabilt. Båten fungerade att köra helt självreglerande, med höjdreglerat läget, och testades med 10 kg extern last och levererade även då ett bra resultat. Under fälttestet gjordes dock ett antal justeringar innan båten faktiskt lyfte. Till en början hade båten problem att lyfta och hålla sig i upprätt läge,

se figur 5.5. När föraren av båten applicerar tillräckligt med gas för att få den att börja lyfta reser sig hela konstruktionen i fören och aktern lyftes ej ur vattnet.



Figur 5.5: Båten stegrar

Detta berodde på en rad olika faktorer, till en början konstaterades det att anfallsvinkeln på bärplanen kan vara för hög. Båten togs därför upp ur vattnet och vinkeln justerades ner med hjälp av mellanbrickorna som placeras mellan mast och bärplan. Till en början hade det främre bärplanet en mellanbricka på $1,5^\circ$ och det bakre bärplanet en mellanbricka på $1,0^\circ$. Detta justerades genom att avmontera mellanbrickorna, vilket resulterar i en mekaniska anfallsvinkeln på 0° på båda bärplanen. Ytterligare en justering som gjordes innan andra sjösättningen var att begränsa motorernas effekt. En faktor som kan ha legat bakom att båten reser sig är att motorerna helt enkelt är för starka. Med möjligheten att kunna leverera full effekt direkt kan göra att sensorerna inte hinner kompensera för momentet som uppstår kring stigningsaxeln under gaspådrag.

Under andra testet upplevdes ingen anmärkningsvärd förbättring, förutom att båten upplevdes något mindre baktung. När båten precis börjat lyfta från vattenytan iaktogs istället ett nytt problem, att båten alltid rullade över åt samma håll hela tiden. Från den medföljande mjukvaran kunde felkoden "internal error" utläsas och det kunde kort därefter konstateras att en av de främre servomotorerna hade slutat fungera. Detta medför att det endast är en sida som reglerar båtens rull-axel och båten faller automatiskt över åt sidan utan fungerande reglering. Även fast de utvalda servomotorerna som används är IP-klassade för att klara den maritima miljön, kan det vara så att dyken som båten upplevde i figur 5.6b var för påfrestande.



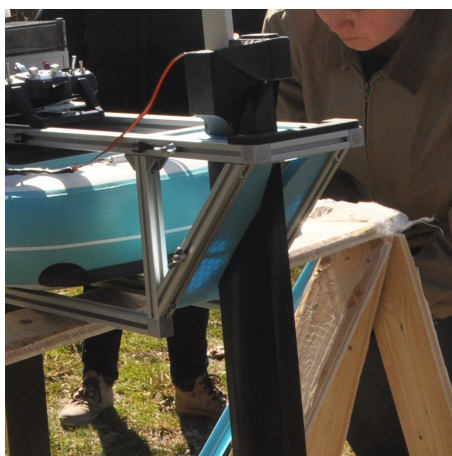
(a) Båten lutar under lyft



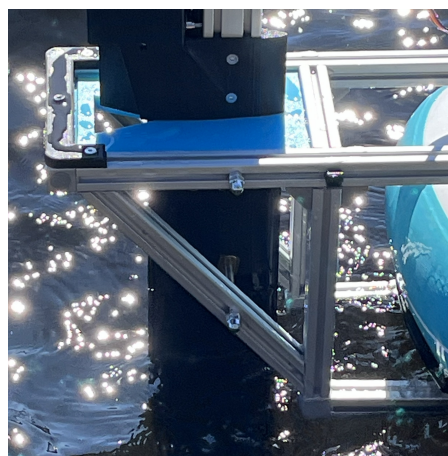
(b) Båten dränks vid misslyckat lyft

Figur 5.6: Servomotor slutar fungera

Inför det tredje försöket gjordes ytterligare justeringar. Eftersom det saknades servomotorer i reserv togs beslutet att ta servomotorn från rodret i aktern och byta mot den trasiga servomotorn i fören. Detta innebär att båtens styrande förmåga var helt beroende av differential framdrivning från de två motorerna. Vidare konstaterades det att konstruktionen som håller fast masten i aktern kan vara en del av problemet när det kommer till lyftet. Den ursprungliga konstruktionen bestod av två blå plattor som fästs mellan aluminiumprofilen för att låsa fast masten. Som synes i figur 5.7a har den nedre plattan en negativ lutning i förhållande till färdriktningen och kommer ploga vattnet så fort gas appliceras av föraren. Detta motverkades genom att montera av den nedre plattan och låsa fast masten med hjälp av muttrar som i figur 5.7b.



(a) Med blå infästningsplatta



(b) Utan blå infästningsplatta

Figur 5.7: Justering av infästning av bakre mast

Utöver modifieringen av infästningsplatta till bakre masten ändrades PID-värden för rull- och stigningsaxeln. I ArduPilot ändrades främst P-värdet i rull och stigning vilket gav större servoutslag vid avvikelse i rull och stigning. Efter dessa justeringar sjösattes båten och en tydlig förbättring kunde observeras. Då motoreffekten begränsades blev båtens acceleration och lyft från det främre bärplanet inte lika aggressiv, vilket gav servomotorerna möjligheten att reglera lyftkraften. I kombination med detta grävde aktern inte ner sig på samma sätt, vilket förenklade hastighetsökning innan skrovet lyfte från ytan. I samband med denna testkörning lyckades även båten att automatiskt reglera höjden till vattenytan med hjälp av ultraljudssensorn vid höjddreglerat läget på styrenheten, vilket under tidigare test inte fungerat. Trots att båten i detta skede lyfte från vattenytan och går att köra i flygande läge, utan några större problem, identifierades flera aspekter som behövde justeras ytterligare inför nästkommande fälttest. När båten befann sig i flygande läge, uppstod en vibrerande rörelse där hela konstruktionen, främst masterna, rör sig enligt figur 5.8. För att åtgärda detta måste överbyggnaden förstärkas och PID-regulatorns värden utvärderas.



Figur 5.8: Båten i flygande läge med vibrationer

Efter ungefär två timmars testkörningen kvarstod ungefär 85% av batteriet som driver alla elektroniska komponenter, förutom servomotorerna. Vid nedmontering hittades även en liten mängd vatten som trängt in i den svarta batterilådan.

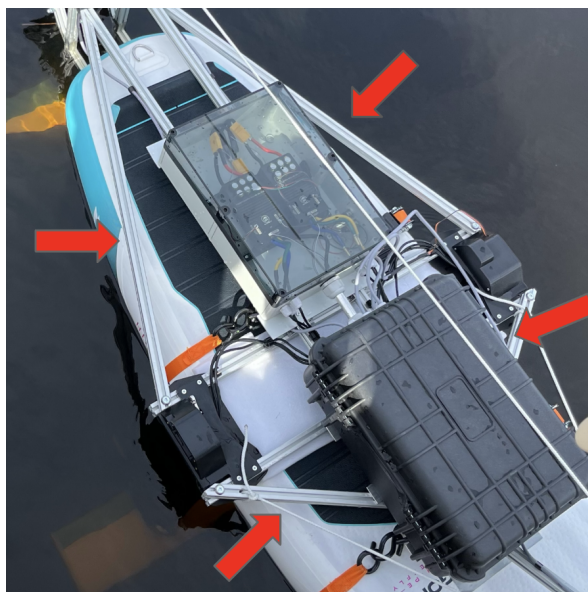
5.1.4.2 Fälttest 2

Det andra fälttestet hade tre tydliga syften: utvärdera förbättrad konstruktion, reglera PID-värden och testa vikt- och hastighetsmål. Till detta test förstärktes överbyggnaden genom implementering av en fackverksstruktur och infästningen för ultraljudssensorn stabiliserades. Det togs även med fler 10 kg vikter. Inledningsvis rädde nästintill vindstilla förhållanden, vilka senare övergick i vindbyar upp till 14 m/s och vågor på 15 – 20 cm som i figur 5.9.



Figur 5.9: Väderförhållande under andra fälttestet

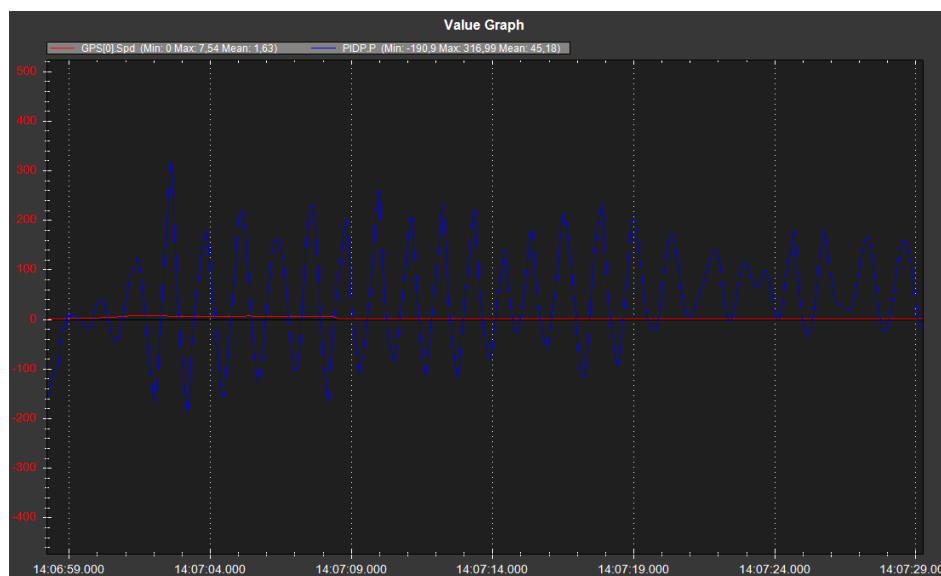
Fackverksstrukturen som syns i figur 5.10 och ombyggnationen av infästningen för ultraljudssensorn infördes för att minska vibrationer som upptäcktes under första fälttestet. Detta påvisades ha en positiv inverkan under andra fälttestet, då vibrationer i enskilda komponenter så som mast och ultraljudssensor eliminerades. Genom dessa förstärkningar uppnåddes en betydligt högre strukturell styvhet i hela konstruktionen. Däremot kvarstod vibrationer i det uppblåsbara skrovet.



Figur 5.10: Ändring av överbyggnad inför fälttest två

De kvarstående oscillationer i systemet ansågs bero på PID-värdena. Här undersöktes olika

värden på respektive P-, I- och D-värde. Både I- och D-värdena testades sättas till noll och därefter successivt ökas, främst D-värdet, för att motverka oscillationer kring bör-värdet, vilket troligen var ett resultat av högt P-värde, se datalogg i figur 5.11 då båten låg stilla. Dessvärre ledde inte detta till någon större förbättring och kort därefter slutade ultraljudssensorn att ge någon påverkan på systemet. Detta resulterade i att sensorns manövreringsläge inte fungerade, även fast den gav utdata. Under fälttest två kördes däremot motorerna på dubbel effekt jämfört med fälttest ett. Detta kan i sin tur ha påverkat reglersystemet negativt.



Figur 5.11: Stillastående oscillationer i höjdroder (från datalogg i ArduPilot)

Ytterligare test som gjordes var att testa två av projektets mål. Här uppfylldes hastighetsmålet på 6 m/s eftersom båten kom upp i 7,54 m/s i ett stabilt flygande läge vilket redovisas från flygloggen i figur 5.13. Vid hastigheten kördes motorerna på full effekt. Efter detta testades det att lasta båten med 30 kg extra vikt. Placeringen av vikter som visas i figur 5.12a, var inte optimal eftersom båten blev topptung. Detta i kombination med vindhastigheter upp till 14 m/s gjorde att båten välte och la sig upp och ner som i figur 5.12b. Utan vikter är båten självupprättande men på grund av den förhöjda tyngdpunkten förblev båten upp och ner tills den manuellt roterades till rätt håll. Därefter testades köregenskaperna med en extra last på 20 kg. Vid denna belastning och viktplacering blev tyngdpunkten betydligt lägre då viktplattorna placerades enligt figur 5.12a, men översta vikten uteslöts. En hastighet på över 6 m/s uppmättes även under dessa omständigheter. Det noterades dock att båten tenderade dra åt vänster vid högre gaspådrag.

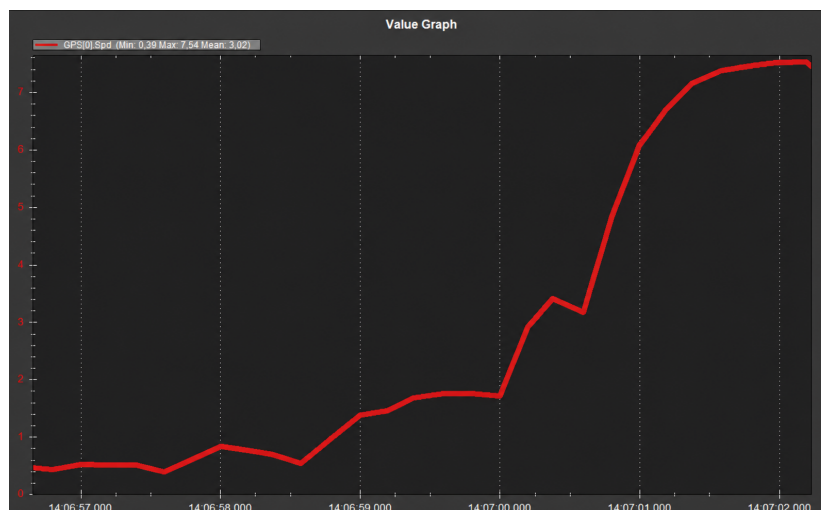


(a) Placering av vikter vid 30 kg last



(b) Båten upp och ner efter misslyckat vikt försök

Figur 5.12: Misslyckat försökt med 30kg extern last



Figur 5.13: Uttagen datalogg från ArduPilot

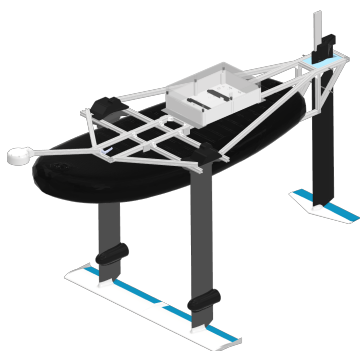
Under testet kapsejsade båten och elektroniklådan fylldes med cirka 2 cm vatten, trots dess IP-klassning och ytterligare vattentätningar. Detta gick att återställa genom att ta ut och torka utrustningen, efter var båten fullt funktionsduglig igen och inga skador skett på elektroniken. Då ytterligare körning utförts, upptäcktes det att en av servomotorerna fastnade i botten läget och ersattes därför med en reserv-servomotor. Kort därefter var båten återigen i drift. Resterande av testet gick åt att reglera PID-värden, detta var däremot utan större resultat eftersom det ultraljudsstyrda läget inte fungerade. Efter testet noterades endast minimal rost på tryckstag samt icke-rostfria detaljer. I övrigt höll alla egenproducerade komponenter utan större slitage.

5.2 Slutgiltig konstruktion

Den slutgiltiga konstruktionen presenteras i figur 5.14 i form av en renderad sammanställning samt en verklig bild. CAD-modellen innefattar de strukturella delar som beskrivits i avsnitt 3.1, samtliga elektriska komponenter har uteslutits ur renderingen. Valet att exkludera elektroniken grundar sig främst i tidsbegränsning samt bristande tillgänglighet på kompletta CAD-modeller för varje enskild komponent. Sammanställningen fokuserar därför på de egenkonstruerade delarna samt de komponenter som har funnits tillgängliga digitalt för användning.

Syftet med CAD modellen har inte varit att skapa en identisk representation av den fysiska båten, utan att fungera som ett verktyg för tidig visualisering av konstruktionen. Genom att integrera de bärande delarna digitalt innan tillverkningen, har geometriska felaktigheter identifierats och kostsamma misstag i tillverkningsfasen minimerats.

I figur 5.14b illustreras den verkliga sammanställningen där samtliga komponenter har monterats. I detta utförande är båten körduglig och redo för sjösättning.



(a) CAD-rendering av slutgiltig konstruktion



(b) Slutgiltig verklig konstruktion

Figur 5.14: Slutgiltig konstruktion

6. Diskussion

Detta kapitel tolkar och analyserar de resultat som framkommit under projektets gång och hur det relaterar till studiens syfte, mål och tidigare relevant forskning. Även tidigare begränsningar och osäkerheter som identifieras utreds och behandlas. Avslutningsvis presenteras förslag på fortsatt utveckling för projektet, baserade på de erfarenheter och insikter som har framkommit.

6.1 Tolkning av resultat

I detta avsnitt diskuteras samtliga iakttagelser som gjorts under de olika testerna och hur det har inverkat på projektets resultat.

6.1.1 Krafter och strukturell respons

De teoretiska beräkningar från XFLR5, bilaga D, samt CFD, bilaga E, visade intressanta resultat. En rättvis jämförelse blir dock svår att göra med dessa två resultaten eftersom CFD-modellen endast inkluderar det främre bärplanet och dess master. Även om det bakre bärplanet är avsedd att producera mindre lyftkraft kan dess frånvaro i CFD ändå påverka helheten. Dessutom inkluderades inte skevroden i CFD-beräkningen vilket skiljer modelleringen ytterligare. I XFLR5 är hela strukturen våt modellerad, enligt avsnitt 3.1.7.1, medan modelleringen i CFD endast är nedsänkt till 400 mm. Därför inkluderas även vattenytans interaktionseffekt med modelleringen i CFD. Dessutom är CFD-beräkningen flödesbaserad och gjord enligt en envägskoppling, vilket kan påverka det verkliga resultatet av fluid-solid-interaktionen.

Analysen av korrelationen mellan resultaten försvåras av att endast en datapunkt är gemensam för de två beräkningsmetoderna. En rättvis jämförelse blir därför vid en fast monteringsvinkel på 4° samt att det är en väldigt låg eller ingen vinkel på skevroder, för att skilja så lite som möjligt mellan metoderna. Mer specifikt redovisas dessa resultat urplockade från beräkningsresultaten i tabell 6.1. Om man endast ser till resultaten i tabell 6.1 går det dock att avläsa en viss koppling mellan beräkningsmetoderna. Lyftkraften är högre i XFLR5, specifikt vid den lägre hastigheten. Inget tydligt samband kunde identifieras för det hydrodynamiska motståndet, eftersom XFLR5- och CFD-beräkningarna visar olika motståndskraftsförändringar vid ökad hastighet. Dessa olikheter kan vara en direkt följd av hur olika interaktionseffekter påverkar flödet. Exempelvis hur respektive beräkningsmetod hanterar viskösa effekter eller interaktionseffekter mellan bärplanen och masterna. Jämförelsen kan avläsas i 6.1 där α är monteringsvinkel och θ är vinkel för skev- samt höjdroder.

Tabell 6.1: Jämförelse mellan XFLR5 och CFD för olika V_∞ (bilaga D samt E)

	$V_\infty = 4 \text{ m/s}$		$V_\infty = 6 \text{ m/s}$	
	XFLR5	CFD	XFLR5	CFD
Främre α [°]	4	4	4	4
Bakre α [°]	0	0	0	0
Främre θ [°]	2	0	0	0
Bakre θ [°]	0	0	0	0
F_L [N]	734,28	624,30	1423,11	1395,00
F_D [N]	107,22	48,94	79,71	106,67
C_L	0,541	0,459	0,466	0,456
C_D	0,079	0,036	0,0261	0,035

Under fälttest ett observerades att det främre bärplanet genererade mer lyft än förväntat, vilket resulterade i att båten stegrade vid låga hastigheter. Detta åtgärdades genom att sänka monteringsvinkeln på det främre bärplanet till 0°, vilket medförde en mer kontrollerad övergång till flygande läge. Bakre bärplanet visade sig dock vara för långsam i sin respons för att motverka kraften från det främre bärplanet vid lägre hastigheter. Vid högre hastigheter uppstod vibrationer i överbyggnaden och masterna, vilket indikerar att strukturen och framförallt överbyggnaden inte var tillräckligt styv. Trots detta kunde båten flyga stabilt även med en extra last på 10 kg. Däremot plogade skrovet mycket vatten på grund av flytkraftens placering, vilket tros ha påverkat båtens förmåga att lyfta. Detta korrigerades inför andra fälttestet, via framskjutning av skrovet, vilket gav god effekt då båten blev mer baktung vid flytande läge och resulterade i en lättare övergång till flygande läge.

Inför fälttest två förstärktes överbyggnaden, vilket direkt reducerade vibrationer. I hög sjö och stark vind uppvisade båten relativt god stabilitet i flygande läge. Däremot påverkades den mycket innan den kom upp i planande läge samt hade en frigång mellan skrov och vågor. Vid 20 kg last fungerade systemet fortfarande, men vid 30 kg blev tyngdpunkten för hög och båten kunde inte återta sin balans efter störningar. Då regleringen försökte kompensera med skevroderutslag var hastigheten för låg och tyngdmomentet för stort, vilket gjorde att det motverkande momentet från skevrodet blev för litet.

Eftersom konstruktionen är dimensionerad för cirka 70 kg totalvikt är tanken att högre hastigheter ska ge större lyftkraft och därmed kompensera för lasten. Detta gör att vid lägre last och högre hastigheten, genereras en för stor lyftkraft. I praktiken blir viktfordelningen problematisk, då tyngdpunkten måste hållas låg för stabilitet men samtidigt placeras korrekt längs längdaxeln.

6.1.2 Framdrivning

Båten uppnådde en maximal hastighet på cirka 7,54 m/s, men hade svårt att accelerera ytterligare. Detta bedöms delvis bero på propellrarna, då motorerna når sin maximala effekt innan högre hastigheter kan uppnås. En lägre acceleration men med en högre topphastighet hade därför varit önskvärd och troligtvis bidragit till ett mer kontrollerat lyft från vattnet.

Den vänstra propellern observerades vibrera vid test av motorerna på land och kan vara förklaringen till att båten tenderar att dra åt vänster, vid maximalt gaspådrag.

Det observerades även att motorernas effekt reduceras automatiskt av ArduPilot vid icke-manuellt flygande läge, vilket tyder på någon form av intern begränsning eller skyddsfunktion som påverkar prestandan.

6.1.3 PID-reglering och kontrollrespons

Kraftiga fluktuationer i det bakre bärplanets höjdroder observerades under test, vilket framgår av figur 5.11. Detta fenomen indikerar att regleringen inte var optimalt inställd för de rådande förhållandena. Även om både I- och D-verkan användes för att dämpa vibrationer bedöms P-delen vara den mest betydande delen för att uppnå snabb respons vid övergången till flygande läge, därför kunde inte dess värde sänkas ytterligare. När gaspådraget maximeras blir vibrationer desto värre och båten blir känsligare.

Under fälttest två gjordes större PID-justeringar och dessa försämrade prestandan jämfört med test ett. Ett mekaniskt glapp i bakre tryckstagen identifierades även. Något som sannolikt bidrog till de observerade fluktuationerna och instabiliteten i regleringen av höjdrodret. Dessa högfrekventa vibrationer grundas i de kompenseringar regulatorn försöker göra med höjdrodret för att uppnå önskad stigning på 0° .

6.1.4 Sensorprestanda

Höjdsensorn uppvisade märkbar fördröjning, men fungerade i övrigt som avsett, det vill säga att den justerade kontinuerligt höjden över vattenytan. Fördröjningen resulterade i en karaktéristiskt böljande rörelse. Fördröjningen påverkar dock regleringens precision och kan vara en bidragande faktor till problematiken med regleringen. Under fälttest 2 slutade det höjdregerade läget att fungera. Dock gick det inte att identifiera om det var sensorn i sig, testmiljön eller PID-värden som stod för detta problem.

6.1.5 Ventilation och kavitation

Trots att motorerna vid enstaka tillfällen hamnade över vattenytan i samband med stegring, observerades varken ventilation eller kavitation. Detta var oväntat eftersom fenomenen normalt uppstår vid liknande förhållanden. Dock är det svårt att avgöra detta eftersom båten alltid har framförts långt ifrån föraren. Det är fullt möjligt att den vänstra propellerns vibrerande blivit drabbad av kavitation som sedan gjort att den har tappat kraft och båten dragit åt vänster.

6.1.6 Materialsitage och korrosion

Viss korrosion noterades på tryckstag och icke-rostfria skruvar, vilket var mindre än förväntat. I havsvatten hade korrosionen sannolikt varit betydligt mer omfattande och bör beaktas vid framtida materialval samt tester. Trots utmanande tester har de komponenter som projektgruppen producerat förblivit i gott skick utan större slitage. Däremot har externa komponenter som servomotorer gått sönder och elektroniklådorna tagit in vatten. Trots IP-verifieringar

klaras de inte av omständigheterna, vilket kan vara en direkt följd av upprepade kollisioner med vattnet.

6.2 Styrkor och förbättringsområden

Överlag presterade båten väl under de genomförda fälttesten även om båten inte uppnått alla mål. Detta avsnitt syftar på att belysa styrkorna inom konstruktion och funktion samt att visa de förbättringsområden som har framkommit under konstruktion och tester.

6.2.1 Båtdesign

Designfilosofin bakom den slutgiltiga konstruktionen resulterade i ett välfungerande samspel mellan mekanik och elektronik, vilket lade grunden för båtens förmåga att uppnå stabil flygning. En av de mest framträdande styrkorna i årets iteration är den genomgående modulariteten i konstruktionen. Genom att dela upp båten i logiska och oberoende moduler har systemet blivit betydligt mer lättarbetat. Modellen är enkel att demontera, transportera och justera. Något som har varit avgörande under den intensiva tidsperioden som projektet har fortgått under. Ett av de tydligaste bevisen för detta är hur effektivt ett byte av vingprofil kan genomföras: genom att endast lossa fyra respektive två skruvar för det främre och bakre bärplan kan hela profilen snabbt bytas vid test av olika modeller.

Denna modularitet har inte bara underlättat logistiken, utan även möjliggjort en mer effektiv felsökningsprocess. Genom att enkelt kunna isolera och byta ut specifika delsystem, så som servomotorer, har tekniska problem kunnat åtgärdas fort, utan att påverka båtens övriga struktur.

Trots dessa styrkor visar utvärderingen på flera kritiska områden där konstruktionsvalen påverkade prestandan negativt. Den mest framträdande bristen var valet att använda en befintlig surfbräda som skrov. Även fast detta initialt sparade tid i tillverkningsfasen, medförde det betydande utmaningar vid integrationen av båtens övriga komponenter. Problemet grundas i att surfbrädan endast har en central fästpunkt placerad på den bakre delens undersida. Detta gjorde det svårt att förankra överbyggnaden i skrovet med tillräcklig styvhet, till skillnad från tidigare års egentillverkade skrov som erbjöd fästpunkter längs hela konstruktionen. Trots försök att stabilisera strukturen med spännband och tvärgående stag, var kopplingen mellan överbyggnaden och surfbrädan otillräcklig för att hantera de krafter som uppstår under körning.

Det resulterande vridmomentet ledde till att överbyggnaden började svikta, vilket i sin tur orsakade kraftiga vibrationer under flygning. Dessa strukturella vibrationer introducerade störningar i systemet som troligtvis gjorde båten betydligt svårare för kontrollsystemet att reglera. Arbetet med att förstärka konstruktionen under projektets gång visade förbättring, men slutsatsen är att problemet förblir olösligt så länge hela strukturens stabilitet vilar på en enda central fästpunkt i skrovet. För framtida iterationer bör därför ett solitt skrov med fler integrerade och strategiskt placerade fästpunkter prioriteras för att minimera risken för deformation och säkerställa en stabil plattform för reglering.

Utöver de strukturella utmaningarna i överbyggnaden bör valet av inkapsling för de elektriska komponenterna ses över. Den nuvarande konfigurationen bygger på två IP-klassade förvaringslådor som avsetts hålla tätt vid en eventuell nedsänkning i vatten. Under fälttesterna konstaterades dock vattenintrång i båda lådorna. Lådan för systemets ESC-enheter hade en integrerad lösning för att fästa lådan i överbyggnaden. En sådan infästning saknades i batterilådan vilket krävde mekaniska ingrepp i materialet för att möjliggöra montering. För att fixera lådan borrades hål i plasten som därefter tätades med o-ringar. Trots dessa åtgärder kunde vatten tränga in under båda testtillfällena, vilket tyder på att modifieringarna troligen försämrade lådans ursprungliga inkapslingsklass. För vidareutveckling av projekt rekommenderas därför att välja IP-klassade komponentlådor med fabriksfärdiga infästningspunkter. Genom att undvika egna modifieringar av höljet kan kapslingsklassningen bevaras fullt ut, vilket säkerställer systemets driftsäkerhet i fuktiga miljöer.

Slutligen bör även konstruktionen av den bakre masten ses över. Den nuvarande lösningen, som bygger på 3D-utskrivna PETG och en aluminiumprofil, har visat sig vara för vek vid hög belastning. Detta i kombination med att hålet som tryckstången rör sig i är för stort, har medfört glapp mellan servomotorn och kontrollytan vilket har försvårat regleringen. För framtida iterationer rekommenderas därför en styvare mastkonstruktion samt en genomföring med snävare toleranser för tryckstången för att minimera mekaniska förluster.

6.2.2 Elektriska komponenter och reglersystem

De elektriska komponenterna på båten fungerade generellt sett väl. Styrenheten kunde effektivt bearbeta data från IMU enheten, vilket gav en snabb responstid, detta är viktigt eftersom att båten i flygande läge är ett instabilt system. Styrenheten har också flera lättillgängliga kontakter vilket möjliggjorde enkel inkoppling av externa moduler och sensorer.

GNSS-modulen fungerade väl och kunde hitta flera satelliter även när den var instängd i elektroniklådan tillsammans med annan elektronik. GNSS-modulen var även den huvudsakliga metoden för hastighetsmätning, vilket var av stor vikt för att bekräfta vårt mål att uppnå en hastighet på minst 6 m/s .

Ultraljudssensorn fungerade väl i vissa aspekter, men hade tydliga brister i andra. Det som fungerade väl var både sensorns vattensäkerhet och pålitliga avståndsmätning. Sensorn var vid ett flertal gånger nere i vattnet under testerna, vilket aldrig påverkade fortsatt avståndsmätning. Bristerna hos ultraljudssensorn ligger i dess uppdateringsfrekvens samt höga responstid. Sensorn hade endast en uppdateringsfrekvens på 6,67 Hz, men detta fungerade ändå genom att endast tillåta den en liten påverkan vid varje ny uppdatering. Den höga responstiden ledde till att båten reagerade väldigt sent på viss indata, så som vågnivå och störningar i systemet. Den höga responstiden tros komma ifrån implementeringen av sensorn i ArduPilot och ineffektiv kod, vilket är ett tydligt förbättringsområde för hur detta kan göras bättre för att uppnå en lägre responstid.

Ytterligare en styrka var den implementerade trådlösa telemetri-modulen som gjorde det enkelt att uppdatera PID-värden under pågående test. Detta sparade mycket tid och gjorde fälttesten mer effektiva. Eftersom vi var trådlöst uppkopplade till styrenheten kunde även

hastighet, rull, stigning och höjd avläsas vilket underlättade beslutstagande under testerna.

Servomotorerna funkade bra i aspekten att 70 kg/cm var tillräckligt med vridmoment för att vinkla skev- och höjdroderet för att uppnå lyft. Förbättringsområdet hos servomotorerna är deras vattentäthet. Tillverkaren påstår IP67, vilket ska klara en nedsänkning på 1 meter upp till 30 minuter, men det konstaterades under fälttest att de stänk servomotorerna utsattes för var tillräckligt för att orsaka funktionsfel. Detta är något som bör lösas då det gör att båten får en lägre pålitlighet och att byte av servomotorerna blir en tidskrävande process.

Motorerna har hög kraft vilket innebar att båten behövde köras varsamt, samtidigt som det möjligen hade en låg högsta vinkelfrekvens, vilket ledde till en mindre än optimal topphastighet. För att åtgärda detta bör därför andra propellerkonfigurationer utredas för att uppnå en högre toppfart. Det finns också risk att det är batteriets effekt som begränsar motorerna, detta hade behövts undersökas ytterligare.

6.3 Jämförelser med tidigare projekt

För årets projekt har det skett en stor designförändring jämfört med tidigare år, både utseendemässigt och komponentvis. I år har idén att tillverka skrovet själv utelämnats och istället har konstruktionen kretsat kring en uppblåsbar surfbräda. Detta resulterade i att båten inte alls ser ut som tidigare års katamaranbåtar. Detta i kombination med högre krav på hastighet och lyftkraft har gjort att båten är betydligt större än tidigare år. Fokuset på modularitet har resulterat i att allt på båten är enkelt att byta ut och reparationer går snabbt, även test av nya koncept i fält var relativt enkelt. Det var fördelaktigt att designa bärplanen med utgångsläge 0° i anfallsvinkel, för att sedan använda mellanbrickor för att reglera anfallsvinkeln och testa nya koncept. Detta till skillnad från tidigare år som justerade anfallsvinkeln på hela masten. Det som även underlättade årets design var användningen av aluminiumprofiler i de 3D-utskrivna komponenterna, vilket gjorde att de gick att fästa delsystemen ordentligt.

Årets projekt har även utvecklat bärplansdesignen jämfört med tidigare år. Djupare analyser i XFLR5 samt CFD gjorde det möjligt att utvärdera och iterera ytterligare. I år har det för första gången under projektets gång använts en asymmetrisk profil för det främre bärplanet. Detta resulterade i en betydligt högre teoretisk lyftkraft än tidigare år. Konceptet med ett höjdroder på det bakre bärplanet var även nytt för projektet. Detta gjorde, till skillnad från tidigare års koncept, att båten inte hackade fram lika mycket och flygningen blev mer stabil. Många tidigare års koncept, såsom förstärkning via kolfiberstavar, tryckstänger och inbyggda gångjärn till roder har använts.

Elektroniken och regleringssystemet har även förbättrats markant tack vare kvalitén på årets inköpta komponenter. Här har det använts både bättre och starkare motorer och batterier, vilket har resulterat i en betydligt längre drifttid än tidigare. Förbättringen med ultraljudsensor har även gett resultat då körning med höjdregerat läge fungerade helt felfritt. Under projektet har även tanke på kabeldragning med modularitet gjorts, vilket resulterat i att modellen är lättare att byta delar på i fält.

Som ett resultat av alla dessa förbättringar har årets projekt nått goda resultat. Det har skett en stor förändring i båtens drift, förmåga och prestanda. Båten har visat förmåga att flyga stabilt med högre hastighet än tidigare i kombination med en extern last.

6.4 Måluppfyllnad

Projektets huvudsakliga mål var att konstruera en självreglerande bärplansbåt som i stabilt läge skulle kunna flyga på egen hand utan yttre påverkan. Redan vid första fälttest uppnåddes detta då båten körde fritt genom att själv reglera höjden utifrån höjdsensorns insignaler. Det bekräftade att såväl den mekaniska som den elektroniska designen var väl utformad och fungerande, trots mindre brister i stabiliteten. Målet att konstruera en fungerande bärplansbåt anses därför uppfyllt.

Gällande hastighetsmålet var målet ett värde på 6 m/s med ett önskat värde på 10 m/s. Under det andra fälttestet uppmättes en hastighet på 7,54 m/s där båten även flög stabilt vid lägre hastigheter. Kravet anses därför som uppfyllt. Önskemålet på 10 m/s uppnåddes aldrig vilket delvis var på grund av den vibrerande rörelsen vid gaspådrag. Vid fortsatt förbättring av båten anses detta önskemål som fullt möjligt att åstadkomma.

Båten hade som mål att flyga stabilt med 30 kg extern last. Då 30 kg lastades välte båten och målet uppfylldes därför aldrig. Detta beror till stor del på positioneringen av vikten då tyngdpunkten blev för hög och båten därför fick svårt att hålla sig upprätt vid gir i långsammare hastigheter. Båten klarade dock att flyga med 20 kg extern last utan större problem under fälttest två. Gruppen anser därför att båten, vid bättre viktplacering, inte kommer ha några problem att lyfta minst 30 kg extern last. Detta då det inte fanns några tecken på instabilitet eller avsaknad av lyftkraft vid 20 kg last.

Ett önskemål för båten var även att den skulle kunna köra i varierande förhållanden såsom vind och vågor. Vid andra fälttestet blåste det som tidigare nämnt upp till 14 m/s i byarna och vågorna uppskattades uppnå cirka 15 – 20 cm. Trots detta flög båten utan några större svårigheter, med reservation från enstaka tillfällen då starka vindbyar träffade båten rakt från sidan och slog den något ur kurs. Överlag hanterade båten förhållandena väl. Avsikten var även att testa båtens funktion i saltvatten. Detta genomfördes dock ej, då konstruktionen inte bedömdes vara tillräckligt resistent mot den korrosiva belastningen som saltvatten medför. Målet att klara av varierande förhållanden anses därför delvis avklarat.

Ytterligare ett mål med arbetet var att hålla konstruktionen modulär för att enkelt kunna byta ut komponenter och system med syfte att smidigt kunna prova olika koncept samt idéer. Modularitet kom att genomsyra hela projektet då detta togs i beaktning tidigt i designstadiet och resulterade i att alla komponenter är inskjutna och fastskruvade för att enkelt kunna bytas ut. Detta blev fördelaktigt då många olika iterationer av system på båten har gjorts och beprövats under projektets gång. Målet anses därför uppnått.

Gällande båtens förmåga att vara vattentät vidtogs flera förebyggande åtgärder. Detta inkluderade inkapsling av all elektronik i vattentäta lådor samt tätning av kabelgenomföringar.

Trots detta trängde en mindre mängd vatten in i elektroniklådorna, då båten under det andra fälttestet kapsejsade och låg upp och ner under en kort stund. Under vanlig drift observerades inte detta problem lika tydligt och målet om att båten skulle vara vattentät anses därför vara delvis uppfyllt.

Slutligen hade gruppen som mål att dokumentera projektets utvecklingsprocess systematiskt för att kommande projekt ska kunna ta del av och vidareutveckla projektet. Detta har gjorts i form av videomaterial, insamlad mätdata, dataloggar och filer. I rapporten beskrivs även tanken bakom alla konstruktioner, utvärdering av testresultat, programvaruinställningar samt gjorda justeringar. Detta kommer att ligga till god grund för kommande projekt och målet anses därför vara uppfyllt.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att projektet i helhet har god måluppfyllnad. Båten kan flyga självreglerande i respektabel hastighet, är lättstyrd och manövrerbar. Den har lätt att uppnå flygande läge och tolererar last i varierande förhållanden. Vissa förbättringsområden kvarstår men resultaten tyder på att konstruktionen är väl fungerande och ligger till god grund för vidareutveckling.

6.5 Slutsats

De genomförda testerna visar att projektets mål till stora delar har uppnåtts. Båten uppvisade god bärighet, manövrerbarhet och stabilitet i flygande läge efter justeringar av bärplanens anfallsvinklar och PID-parametrar. De identifierade bristerna i vibrationer och PID-reglering pekar på behovet av fortsatt utveckling. Sammanfattningsvis har projektet resulterat i en tekniskt välfungerande båt med utvecklingspotential i framtida iterationer.

Referenser

- Alfredsson, H., Börjesson, L., Hansson, F., & Kongstad, A. (2024). *Bärplansbåt: Från Koncept till Konstruktion Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima vetenskaper* (tekn. rapport). <https://www.chalmers.se>
- Ansys. (u. å-a). What is Computational Fluid Dynamics (CFD)? <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics>
- Ansys. (u. å-b). What is Fluid-Structure Interaction? <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-fluid-structure-interaction>
- Bal, H., & Görener, N. (2014 oktober). *Comparison on Hydrodynamic Behavior of Shape-Adaptive and Rigid Marine Propellers* (tekn. rapport). University of Strathclyde.
- Barden, T. A., & Binns, J. R. (2012). *On the Road to Establishing Ventilation Probability for Moth Sailing D inghies* (tekn. rapport).
- Bhawna, Phogat, P., Shreya, Jha, R., & Singh, S. (2025). Advancements and challenges in lithium-ion and lithium-polymer batteries: towards sustainable energy storage solutions. *Ionics*, 31, 5263–5289. <https://doi.org/10.1007/s11581-025-06309-x>
- Björk, C., Classon, G., El-Haddad, O., Netz, S., Nordström, A., & Strid, N. (2025). *Bärplansbåt- Från koncept till självreglerande prototyp Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima Vetenskaper* (tekn. rapport). <https://www.chalmers.se>
- Britannica, E. (2026a). Propeller aeroplane engine [Photograph]. https://quest-eb-com.eu1.proxy.openathens.net/images/132_1475851
- Britannica, E. (2026b). Ship propeller of the express steamer Europa, Hügelpark, Essen, North Rhine-Westphalia, Germany [Photography]. https://quest-eb-com.eu1.proxy.openathens.net/images/search/ship%20propeller/detail/310_5157509
- Califano, A., & Steen, S. (2011). Identification of ventilation regimes of a marine propeller by means of dynamic-loads analysis. *Ocean Engineering*, 38, 1600–1610. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.009>
- Candela. (u. å-a). Candela. <https://candela.com/about-us/>
- Candela. (u. å-b). Candela. <https://media.candela.com/Leisure/Leisure-Images/Candela-C-8-Center-Console/i-NCNbQBv/A>
- Crosby, M. J. (2019). *A CFD Study on the Performance of High Speed Planing Hulls* (tekn. rapport).
- drela, M. D., & Youngren, H. (2026 januari). XFOIL Subsonic Airfoil Development System. <https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>
- Duncan, I., Goodman, T., Cocard, M., Day, S., & Dai, S. (2023). *An Investigation into the Effect of Ventilation, Bulbs and Flow Turbulence on Lifting T Foil Performance* (tekn. rapport).
- Etkin, B., & Reid, L. D. (1996). *Dynamics of Flight Stability and Control* (3. utg.). John Wiley & Sons, Inc.
- FAA. (u. å). *Angle of Attack Awareness* (tekn. rapport). <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-01/Angle%20of%20Attack%20Awareness.pdf>

- Gray, F. M., & Smith, M. J. (2009). Secondary Batteries - Lithium Rechargeable Systems | Lithium Polymer Batteries. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 169–176. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00040-X>
- Hall, N. (2025 juli). Winglets. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/winglets/#winglets>
- Johnston, C. R. J. (1985). NAVAL ENGINEERS JOURNAL.
- Kerwin, J. E. (1986). *MARINE PROPELLERS* (tekn. rapport). <https://www.annualreviews.org/aronline>
- Lennartson, B. (2002). *Reglerteknikens grunder*. Studentlitteratur.
- Lundqvist, N., & Favrum, E. L. (2022). *Hydrodynamic design, system design and control system for a model-scale foiling boat* (tekn. rapport).
- Molland, A. F. (2008). *The maritime engineering reference book : a guide to ship design, construction and operation*. Butterworth-Heinemann.
- NiD.29. (2011 oktober). Flap (aeronautics). [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airfoil_lift_improvement_devices_\(flaps\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airfoil_lift_improvement_devices_(flaps).png)
- Raymer, D. P. (1992). *Aircraft Design-A Conceptual Approach* (2. utg.). American Institute of Aeronautics Astronautics.
- Roberts, J. (2025 juli). Airplane Flaps – What are They, and How Do They Work? - Thrust Flight. <https://www.thrustflight.com/airplane-flaps/>
- S.A.Kinnas. (1996). Photographs of different types of cavitation.
- Selig, M. (1994). UIUC Airfoil Data Site. https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html
- Tauner, S. (2013 december). Servo Diagram. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Servo_Diagram.svg
- Thewrightstuff. (2018 september). Duty Cycle Examples. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Duty_Cycle_Examples.png
- Tina Rosado, M. L. C. (1998). How a Hydrofoil Works. <https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>
- Tupper, E. C. (2013). *Introduction to naval architecture* (5. utg.). Elsevier, Butterworth Heinemann.
- van Walree, F. (1999). COMPUTATIONAL METHODS FOR HYDROFOIL CRAFT IN STEADY AND UNSTEADY FLOW.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7. utg.). McGraw-Hill Education.
- Volupe. (u. å). Basic CFD Concepts — Introduction to Computational Fluid Dynamics. <https://volute.com/support/basic-cfd-concepts-fluid-dynamics/>
- XFLR5. (2026 mars). xflr5. <https://www.flow5.tech/xflr5/xflr5.html>
- Young, Y. L., Valles, Z., Napoli, I. D., Montero, F. M., Minerva, L. F., & Harwood, C. (2023). Wave effects on the hydroelastic response of a surface-piercing hydrofoil. Part 1. Fully wetted and ventilated flows.

A. Basic tuning - Inställning i ArduPilot

The screenshot displays the 'Basic Tuning' section of the ArduPilot configuration interface. The left sidebar contains navigation links: DATA, PLAN, SETUP, CONFIG (selected), SIMULATION, and HELP. The main area is divided into several panels for parameter adjustment.

Basic Tuning

- Servo Roll Pid**
 - P: 4
 - I: 0,6
 - D: 0,010
 - INT_MAX: 0,06
- Servo Pitch Pid**
 - P: 3,5
 - I: 0,010
 - D: 0,07
 - INT_MAX: 0
- Servo Yaw**
 - Yaw 2 roll: 0,8
 - Integral: 0
 - Dampening: 0
 - Intergrator Max: 15
- L1 Control - Turn Control**
 - Period: 17
 - Damping: 0,75
- TECS**
 - Climb Max (m/s): 5
 - Sink Min (m/s): 2
 - Sink Max (m/s): 5
 - Pitch Dampening: 0,3
 - Time Const: 5
- Other Mix's**
 - P to T: 0
 - Rudder Mi: 0
- Throttle 0-100%**
 - Cruise: 45
 - Min: 0
 - Max: 100
 - SlewRate: 100
- Navigation Angles**
 - Bank Max: 45
 - Pitch Max: 20
 - Pitch Min: -25
- Airspeed m/s**
 - Cruise: 12
 - Min: 9
 - Max: 22
 - Ratio: 2,000

At the bottom, there are two buttons: **Write Params** and **Refresh Screen**.

B. Full Parameter List - Inställning i Ardu-Pilot

ARDUPILOT COM7 9600 Stats... COM7-1-FIXED WING DISCONNECT

Basic Tuning
QP Extended Tuning
Onboard OSD
MAVFtp
User Params
Full Parameter List
Planner
CubeLan 8 port Switch

Name	Value	Units	Options	Desc	Fav
EK3_ENABLE	1		0:Disabled 1:Enabled	This enables EKF3. Enabling EKF3 only makes the maths run, it does not mean it will be used for flight control. To use it for flight control set AHPF_EKF_TYPE=2. A checkered grid will appear in the bottom left corner of the screen.	☒
GNDEFCT_ALT_MAX	110				☒
GNDEFCT_ALT_MIN	300				☒
GNDEFCT_FLP_I	-2				☒
GNDEFCT_FLP_IMAX	-20				☒
GNDEFCT_FLP_P	-10				☒
PTCH_RATE_D	0.07		0.001 0.03	Pitch axis rate controller D gain. Compensates for short-term change in desired pitch rate vs actual pitch rate	☒
PTCH_RATE_I	0.01		0.01 0.6	Pitch axis rate controller I gain. Corrects long-term difference in desired pitch rate vs actual pitch rate	☒
PTCH_RATE_IMAX	0		0 1	Pitch axis rate controller I gain maximum. Constrains the maximum that the I term will output	☒
PTCH_RATE_P	3.5		0.08 0.35	Pitch axis rate controller P gain. Corrects in proportion to the difference between the desired pitch rate vs actual pitch rate	☒
RLL_RATE_D	0.01		0.001 0.03	Roll axis rate controller D gain. Compensates for short-term change in desired roll rate vs actual roll rate	☒
RLL_RATE_I	0.6		0.01 0.6	Roll axis rate controller I gain. Corrects long-term difference in desired roll rate vs actual roll rate	☒
RLL_RATE_IMAX	6		0 1	Roll axis rate controller I gain maximum. Constrains the maximum that the I term will output	☒
RLL_RATE_P	4		0.08 0.35	Roll axis rate controller P gain. Corrects in proportion to the difference between the desired roll rate vs actual roll rate	☒
RNGFND1_ORIENT	25		0:Forward 1:Forward-Right 2:Right	Orientation of rangefinder	☒
RNGFND1_PIN	55		-1:127 -1:Not Used 11:Reserved	Analog or PWM input pin that rangefinder is connected to. Analog RSSI or Airspeed ports can be used for Analog inputs (some rangefinders require others). Non-IO MCU Setup (MotorOutput)	☒
RNGFND1_TYPE	5		0:None 42:Ainsein_LR_D1 1:Analog	Type of connected rangefinder	☒
RUDD_DT_GAIN	100	%	0 100	gain control from rudder to differential thrust	☒
EKF3			0:Disabled	Enable attitude locking when sticks are released. If set to 2 then	☒

Load from file
Save to file
Write Params
Refresh Params
Compare Params
All Units are in raw format with no scaling
3DR_Iris+param
Load Presaved
Reset to Default
Search
Modified

C. Servo Output - Inställning i ArduPilot

DATA

PLAN

SETUP

CONFIG

SIMULATION

HELP

Install Firmware

>> Mandatory Hardware

Accel Calibration

Compass

Radio Calibration

Servo Output

Serial Ports

ESC Calibration

Flight Modes

FailSafe

HW ID

ADSB

>> Optional Hardware

RTK/GPS Inject

CubeID Update

Sik Radio

#	Position	Reverse	Function	Min	Trim	Max
1	1380	☒	FlaperonLeft	1280	1380	1680
2	1515	☒	FlaperonRight	1300	1515	1700
3	1100	☐	ThrottleLeft	1100	1100	1900
4	1100	☐	ThrottleRight	1100	1100	1900
5	0	☐	Disabled	1100	1500	1900
6	0	☐	GPIO	1100	1500	1900
7	1410	☐	Rudder	1135	1410	1680
8	1540	☒	Elevator	1420	1540	1780
9	0	☐	Disabled	1100	1500	1900
10	0	☐	Disabled	1100	1500	1900
11	0	☐	Disabled	1100	1500	1900
12	0	☐	Disabled	1100	1500	1900
13	0	☐	Disabled	1100	1500	1900
14	0	☐	Disabled	1100	1500	1900
15	0	☐	Disabled	1100	1500	1900
16	0	☐	Disabled	1100	1500	1900

D. Beräkningsresultat XFLR5

V ∞ [m/s]	MONTERINGSVINKEL		Skev-/höjdroder VINKEL		CL	CD	[N]	[KG]	[N]	[KG]
	Främre α °	Bakre α °	Främre θ °	Bakre θ °			FL	mL	FD	mD
4	3	0	2	0	0,472	0,031	640,63616	65,23789817	42,07568	4,284692464
4	3,5	0	2	0	0,507	0,033	688,14096	70,07545418	44,79024	4,561124236
4	4	0	2	0	0,541	0,079	734,28848	74,7747943	107,22512	10,91905499
4	3	0	7	0	0,687	0,051	932,45136	94,95431365	69,22128	7,049010183
4	3,5	0	7	0	0,72	0,055	977,2416	99,51543788	74,6504	7,601873727
4	4	0	7	0	0,753	0,059	1022,03184	104,0765621	80,07952	8,154737271
4	3	0	10	0	0,815	0,069	1106,1832	112,645947	93,65232	9,53689613
4	3,5	0	10	0	0,847	0,074	1149,61616	117,0688554	100,43872	10,22797556
4	4	0	10	0	0,879	0,079	1193,04912	121,4917637	107,22512	10,91905499
6	3	0	0	0	0,393	0,0227	1200,17484	122,2173971	69,323076	7,059376375
6	3,5	0	0	0	0,43	0,0243	1313,1684	133,7238697	74,209284	7,556953564
6	4	0	0	0	0,466	0,0261	1423,10808	144,9193564	79,706268	8,116727902
10	3	0	-2	0	0,275	0,018	2332,825	237,558554	152,694	15,54928717
10	3,5	0	-2	0	0,31	0,019	2629,73	267,793279	161,177	16,41313646
10	4	0	-2	0	0,345	0,021	2926,635	298,0280041	178,143	18,14083503
10	3	0	-7	0	0,022	0,016	186,626	19,00468432	135,728	13,82158859
10	3,5	0	-7	0	0,057	0,0163	483,531	49,23940937	138,2729	14,08074338
10	4	0	-7	0	0,092	0,016	780,436	79,47413442	135,728	13,82158859
10	3	0	-10	0	-0,121	0,018	-1026,443	-104,5257637	152,694	15,54928717
10	3,5	0	-10	0	-0,086	0,017	-729,538	-74,2910387	144,211	14,68543788
10	4	0	-10	0	-0,052	0,0169	-441,116	-44,92016293	143,3627	14,59905295

E. Beräkningsresultat CFD

Report CFD comparison : Prototype A

Nils Lundqvist

May 11, 2026

The results presented below were obtained from simulations, including the free surface, for a wing submergence of 400m.

1 Static Angle : $\alpha = 0^\circ$

1.1 Main Results & Comparison

Table 1: Hydrofoil comparison at $\alpha = 0^\circ$: with mast (W) vs. without mast (W/O). $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $S = 0.17 \text{ m}^2$.

$V \text{ [m/s]}$	$L \text{ [N]}$		$D \text{ [N]}$		$C_L \text{ [-]}$		$C_D \text{ [-]}$		$C_L/C_D \text{ [-]}$	
	W	W/O	W	W/O	W	W/O	W	W/O	W	W/O
4	223.098	232.054	30.483	10.784	0.190	0.171	0.022	0.008	7.318	21.519
6	486.356	510.842	64.865	22.118	0.181	0.167	0.021	0.007	7.497	23.096
10	1444.176	1459.241	184.816	59.183	0.176	0.172	0.022	0.007	7.814	24.657

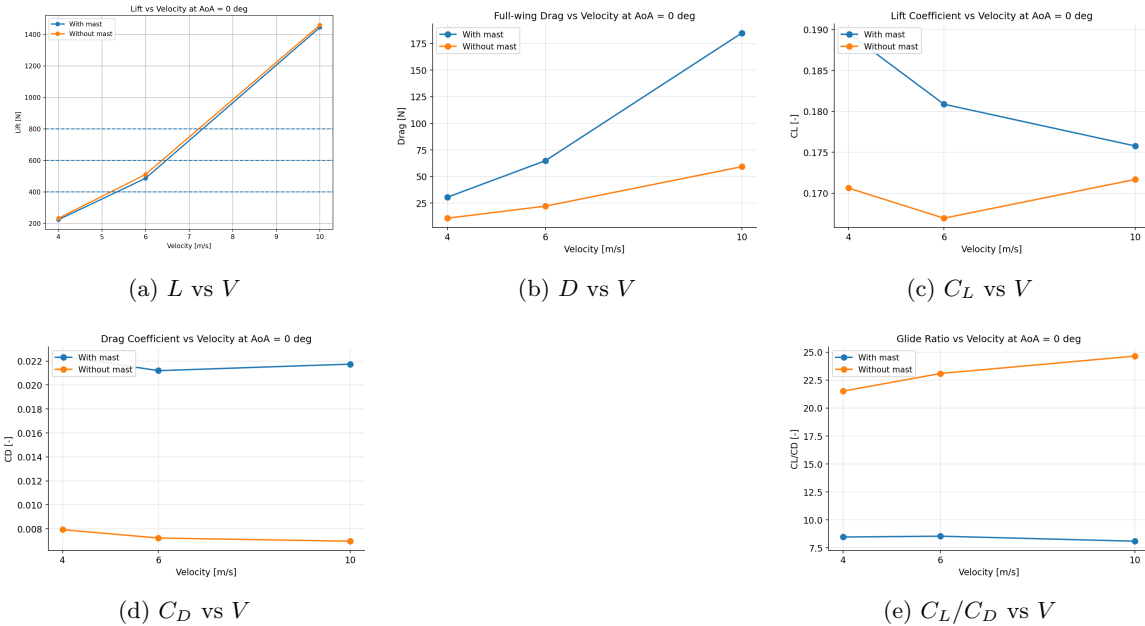


Figure 1: Hydrofoil performance at $\alpha = 0^\circ$ as a function of velocity. Comparison between configurations with and without mast.

2 $\alpha = 2^\circ$

2.1 Main Results & Comparison

Table 2: Hydrofoil comparison at $\alpha = 2^\circ$: with mast (W) vs. without mast (W/O). $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $S = 0.17 \text{ m}^2$.

$V \text{ [m/s]}$	$L \text{ [N]}$		$D \text{ [N]}$		$C_L \text{ [-]}$		$C_D \text{ [-]}$		$C_L/C_D \text{ [-]}$	
	W	W/O	W	W/O	W	W/O	W	W/O	W	W/O
4	421.655	433.588	33.846	17.303	0.310	0.319	0.025	0.013	12.458	25.059
6	943.799	964.732	73.075	35.900	0.308	0.315	0.024	0.012	12.915	26.873
10	2679.273	2683.888	210.872	95.181	0.315	0.316	0.025	0.011	12.706	28.198

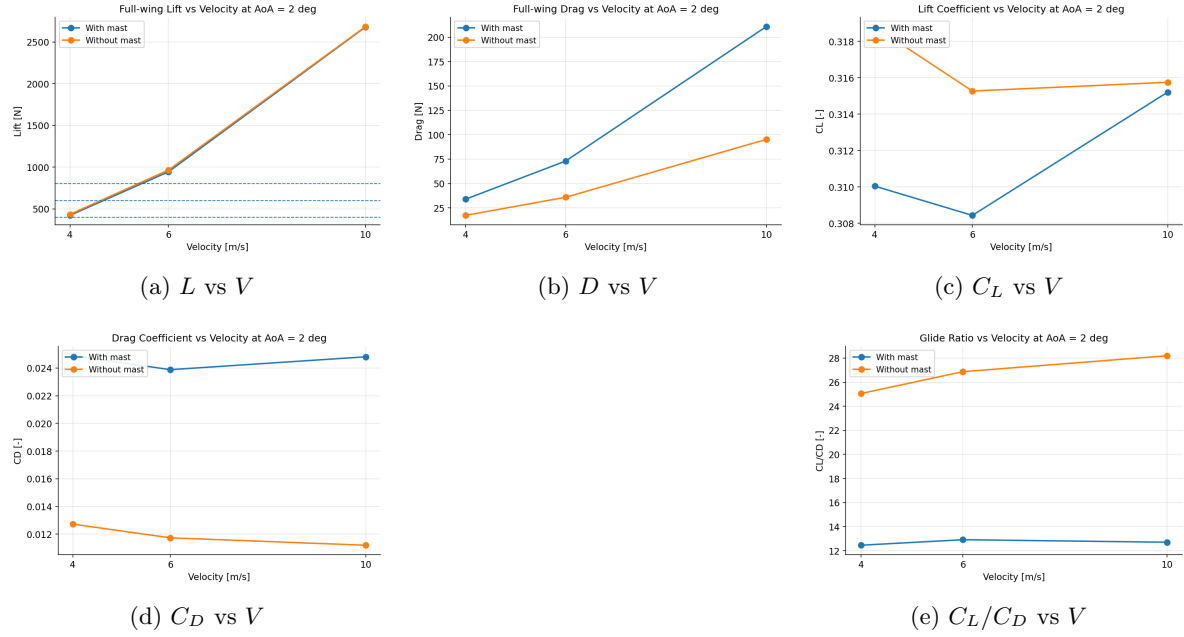


Figure 2: Hydrofoil performance at $\alpha = 2^\circ$ as a function of velocity.

3 $\alpha = 4^\circ$

3.1 Main Results & Comparison

Table 3: Hydrofoil comparison at $\alpha = 4^\circ$: with mast (W) vs. without mast (W/O). $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $S = 0.17 \text{ m}^2$.

$V \text{ [m/s]}$	$L \text{ [N]}$		$D \text{ [N]}$		$C_L \text{ [-]}$		$C_D \text{ [-]}$		$C_L/C_D \text{ [-]}$	
	W	W/O	W	W/O	W	W/O	W	W/O	W	W/O
4	624.305	628.588	48.948	27.306	0.459	0.462	0.036	0.020	12.754	23.020
6	1395.003	1411.200	106.671	57.868	0.456	0.461	0.035	0.019	13.078	24.387
10	3865.748	3905.250	292.004	153.581	0.455	0.459	0.034	0.018	13.239	25.428

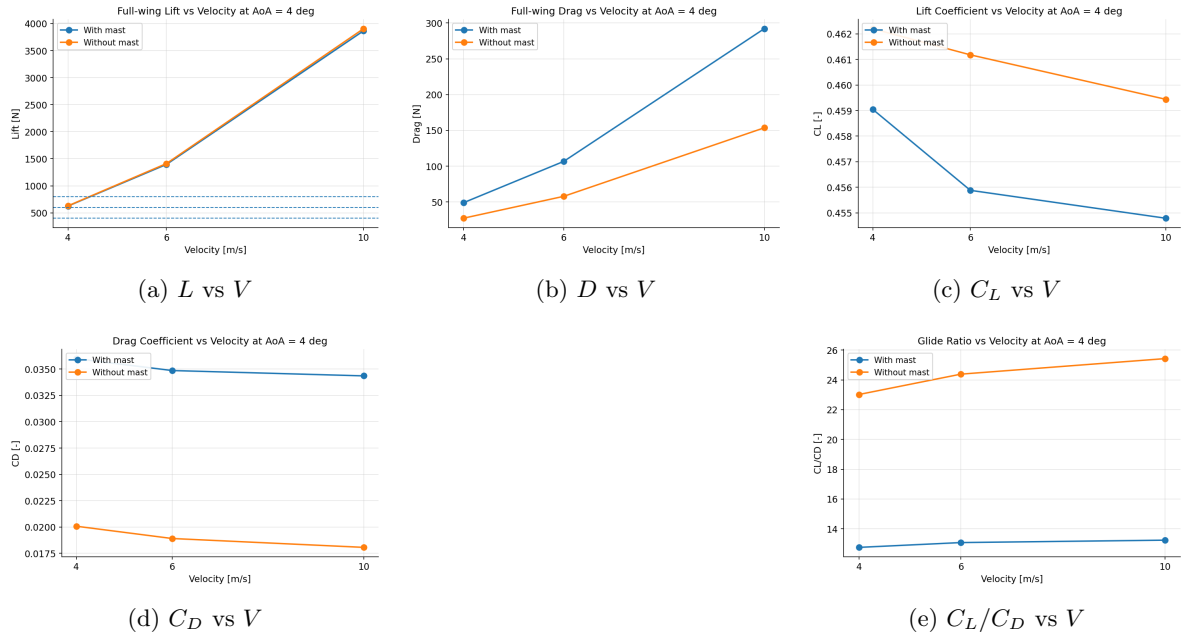
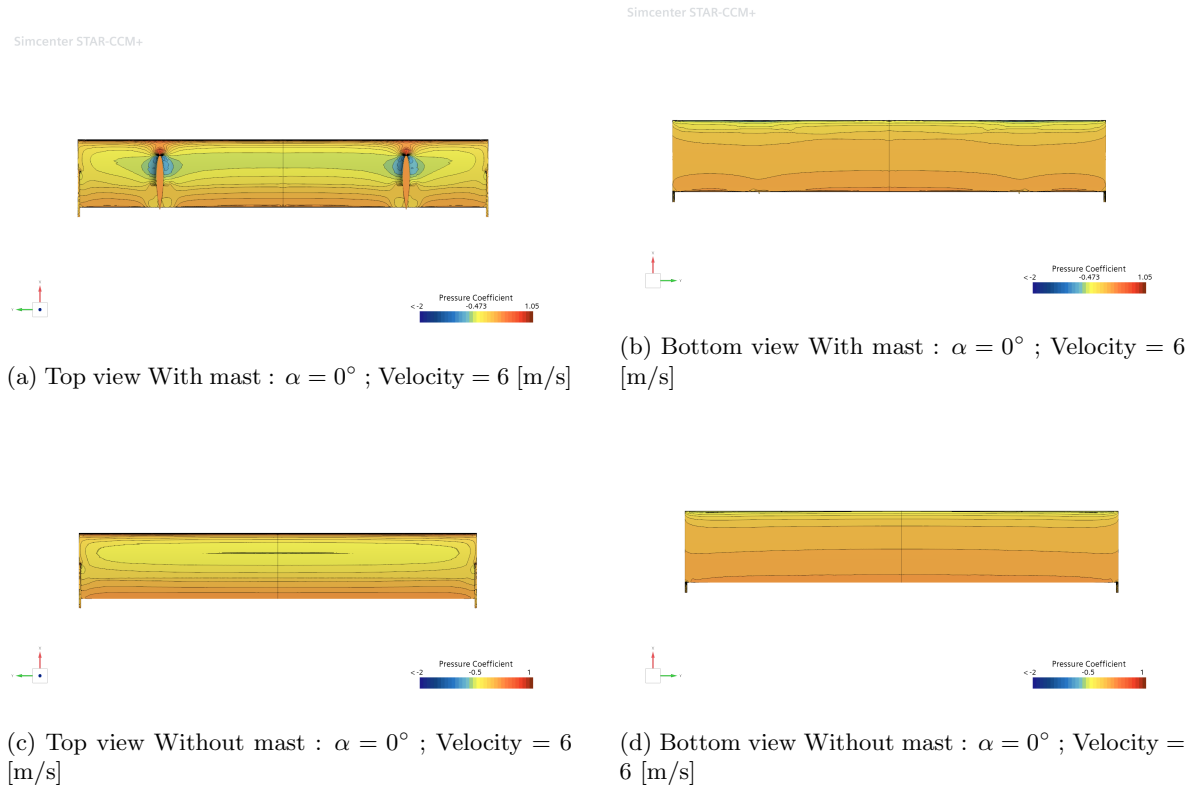


Figure 3: Hydrofoil performance at $\alpha = 4^\circ$ as a function of velocity.

4 Influence of the mast on the pressure field : Visualization of C_p

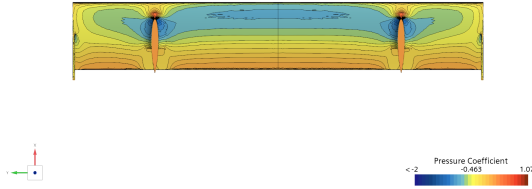
4.1 Pressure coefficient : Velocity = 6 [m/s]

4.1.1 Static Angle of Attack : $\alpha = 0^\circ$



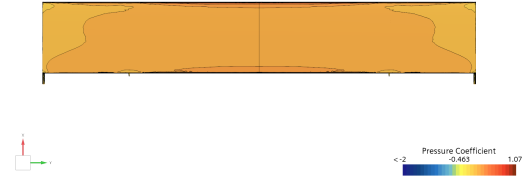
4.1.2 Static Angle of Attack : $\alpha = 4^\circ$

Simcenter STAR-CCM+

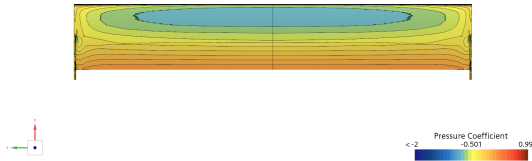


(a) Top view With mast : $\alpha = 4^\circ$; Velocity = 6 [m/s]

Simcenter STAR-CCM+



(b) Bottom view With mast : $\alpha = 4^\circ$; Velocity = 6 [m/s]



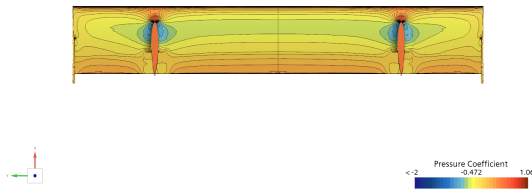
(c) Top view Without mast : $\alpha = 4^\circ$; Velocity = 6 [m/s]



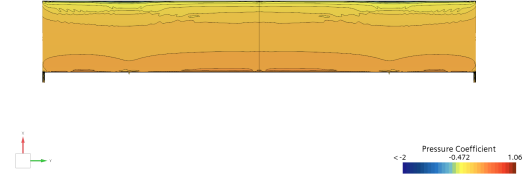
(d) Bottom view Without mast : $\alpha = 4^\circ$; Velocity = 6 [m/s]

4.2 Pressure coefficient : Velocity = 4 [m/s]

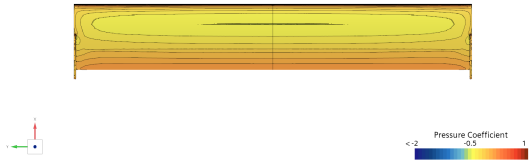
4.2.1 Static Angle of Attack : $\alpha = 0^\circ$



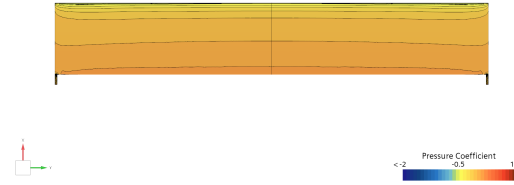
(a) Top view With mast : $\alpha = 0^\circ$; Velocity = 4 [m/s]



(b) Bottom view With mast : $\alpha = 0^\circ$; Velocity = 4 [m/s]



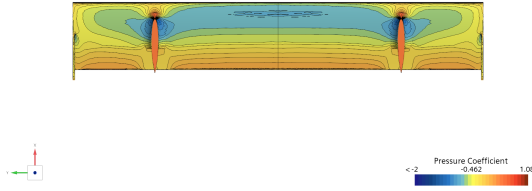
(c) Top view Without mast : $\alpha = 0^\circ$; Velocity = 4 [m/s]



(d) Bottom view Without mast : $\alpha = 0^\circ$; Velocity = 4 [m/s]

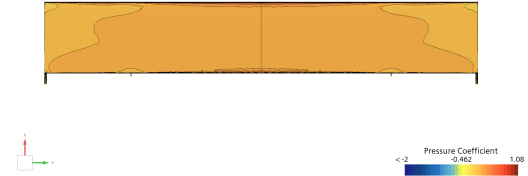
4.2.2 Static Angle of Attack : $\alpha = 4^\circ$

Simcenter STAR-CCM+

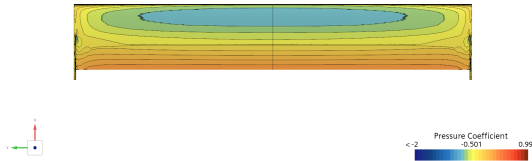


(a) Top view With mast : $\alpha = 4^\circ$; Velocity = 4 [m/s]

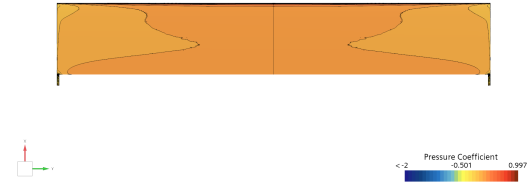
Simcenter STAR-CCM+



(b) Bottom view With mast : $\alpha = 4^\circ$; Velocity = 4 [m/s]



(c) Top view Without mast : $\alpha = 4^\circ$; Velocity = 4 [m/s]



(d) Bottom view Without mast : $\alpha = 4^\circ$; Velocity = 4 [m/s]

F. Pythonkod

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 t = np.linspace(0, 2 * np.pi, 2000)
5
6 phase_a_sin = np.sin(t)
7 phase_b_sin = np.sin(t - 2 * np.pi / 3)
8 phase_c_sin = np.sin(t - 4 * np.pi / 3)
9
10 phase_a_sq = np.sign(np.sin(t)) + 0.007
11 phase_b_sq = np.sign(np.sin(t - 2 * np.pi / 3))
12 phase_c_sq = np.sign(np.sin(t - 4 * np.pi / 3)) - 0.007
13
14 fig, axs = plt.subplots(2, 1, figsize=(10, 8), sharex=True)
15
16 axs[0].plot(t, phase_a_sin, label='Fas A', linewidth=2)
17 axs[0].plot(t, phase_b_sin, label='Fas B', linewidth=2)
18 axs[0].plot(t, phase_c_sin, label='Fas C', linewidth=2)
19 axs[0].set_title('FOC-styrning: Trefasiga sinusvapor')
20 axs[0].set_ylabel('Amplitud')
21 axs[0].grid(True, alpha=0.3)
22 axs[0].legend()
23
24 axs[1].step(t, phase_a_sq, where='mid', label='Fas A', linewidth=2)
25 axs[1].step(t, phase_b_sq, where='mid', label='Fas B', linewidth=2)
26 axs[1].step(t, phase_c_sq, where='mid', label='Fas C', linewidth=2)
27 axs[1].set_title('BLDC-styrning: Trefasiga fyrkantsvapor')
28 axs[1].set_xlabel('Elektrisk vinkel [rad]')
29 axs[1].set_ylabel('Amplitud')
30 axs[1].grid(True, alpha=0.3)
31 axs[1].legend()
32
33 axs[1].set_xticks([0, np.pi/2, np.pi, 3*np.pi/2, 2*np.pi])
34 axs[1].set_xticklabels(['0', r'$\pi/2$', r'$\pi$',
35                          r'$3\pi/2$', r'$2\pi$'])
36
37 plt.tight_layout()
38 plt.show()
```

Listing F.1: Pythonkod för FOC och BLDC plot



CHALMERS