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

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 LaTeX
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, framdrivningse□ekt 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 kontrollytor 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 rodret 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, reglersystem, 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 achives 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 årigt 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 framdrivningse ekt. 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 båtföretaget 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 Kon guration . . . 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 Vingkla ar . . . 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 ventilering . . . 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 Bärplanspro l och dimensionering . . . 36

3.1.7.2 Främre bärplan . . . 41
3.1.7.3 Bakre bärplan . . . 44
3.1.8 Kontrollytor . . . 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 Materialslitage 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. ., 2024) . . . 2
1.3 Vidareutveckling av koncept från kandidatarbete (Björk m. ., 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 ödet 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 gur 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 Vingkon gurationer 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 Vingkla 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 ygindustri 22
2.20 Ventilering & kavitation runt propeller 24
2.21 Ventilering runt ett bärplan (Duncan m. ., 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 aluminiumpro l (20 20 mm) 30
3.3 CAD-modell av bottenplatta, adapter mellan surfbrädan och aluminiumpro len 30
3.4 Genomskärning av nedre del av främre mast 31
3.5 Bakre mastens tekniska kon gurationer 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 för analyserade pro ler från XFLR5 37
3.12 FX84W097 pro l 37

3.13 Graf C_D mot för analyserade pro ler från XFLR5 38
3.14 NACA 0010 pro l 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 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 pro ler 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 realtidstelemetri 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 e ekt (W) 57
5.4 Deformation 2-bladig kol berförstärkt 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 ygande 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 försökt 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. Elektri ering har identi erats 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 elektri ering krävs därför inte bara bättre lagring av energi utan framförallt en drastisk reducering 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 speci ka hastighetsintervall är planande skrov mer e ektiva 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 energie ektivitet förbättras avsevärt. Den radikala minskningen av det hydrodynamiska motståndet medför att energi-förbrukningen kan reduceras upp till 80% i jämförelse med konventionella skrov (Candela, u. å-a). Denna e ektivisering 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 erårig forskning vid Chalmers Tekniska Högskola. Forskningen be-står 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 gur 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. ., 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 gur 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. ., 2024)

Den senaste utvecklingen i projektserien genomfördes som ännu ett kandidatarbete vid Chalmers Tekniska Högskola (Björk m. ., 2025). Syftet med detta arbete var att konstruera en radiostyrd, självreglerande bärplansbåt som tog upp de stabilitetsproblem och mekaniska svagheter som identi erats under tidigare år. I detta projekt övergavs konceptet med att vinkla hela masten för att reglera anfallsvinkeln så att konstruktionen blev mer robust, se gur 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 ygning över vattenytan under era minuter. Projektet visade dock att tillförlitligheten hos höjdsensorer i marina miljöer är en teknisk utmaning, då vibrationer påverkade ultraljudssensorns precision och där även dess indata till systemet.

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

1.2 Syfte

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

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 ygande 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 logg ler. 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 veri ering 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.

Skalningse ekter och överförbarhet till större eller mindre båtar analyseras inte. Skrovet utgörs av en be ntlig 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 mastkon gurationer, då den be ntliga bärplanskon gurationen, 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 e ektivt 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 gur 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 framåtdrivande 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 ygplansvinge, men i vatten istället för luft. På samma sätt skapar bärplanet en kraft som lyfter upp båten från vattenytan. När vatten strömmar runt bärplanets pro l delas ödet upp i en övre och en undre del. På ovansidan rör sig vattnet snabbare, vilket resulterar i ett lägre tryck, medan undersidan har långsammare öde 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 gur 2.2. En viktig del i designen är att optimera förhållandet mellan det hydrodynamiska motståndet relativt lyftkraften (Tina Rosado, 1998).

$$p + \frac{1}{2} v^2 + gh = K \tag{2.1}$$

Tabell 2.1: De nition av variabler i Bernoullis ekvation (Ekvation 2.1)

Symbol	Beskrivning	Enhet
p	Statiskt tryck	Pa
	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 ödet

Kordlängd är ett centralt begrepp inom hydrodynamik och de nieras som avståndet mellan framkanten och bakkanten på ett bärplan eller bärplanspro l (Raymer, 1992). Se gur 2.3 som förtydligar detta.

Figur 2.3: Kordlängden, c

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

Figur 2.4: Vingspetsfenor

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 (gur 2.6). När anfallsvinkeln ökar, stiger även lyftkraften eftersom tryckskillnaden blir större mellan bärplanets sidor. Detta leder till större hydrodynamiskt motstånd, vilket påverkar energie ektiviteten. Vid för höga anfallsvinklar kan bärplanet stalla, vilket innebär att lyftkraften minskar kraftigt då ödet separerar från ytan (FAA, u. å).

Figur 2.6: Anfallsvinkel

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

Figur 2.7: Skillnad mellan monteringsvinkel och anfallsvinkel

För att yga 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 gur 2.8. På samma sätt kan moment från rull och gir påverka stabiliteten.

Figur 2.8: En förenklad gur 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 stigningskoe cienten och är anfallsvinkeln.

$$\frac{@C_m}{@} \tag{2.2}$$

Lutningen på momentkurvan kan vara stabil både om den är negativ och positiv, vilket beror på utformningen av pro len. Detta innebär att en pro l med positiv välvning endast uppnår stabilitet när momentkurvans lutning är negativ, medan en negativ välvning kräver en positiv lutning för att bibehålla jämvikt, se gur 2.9. Det går även att få en önskad lutning på kurvan genom att placera tyngdpunkten på en speci k 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 Kon guration

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 ygande i önskad färdriktning. En illustration av de tre rotationsaxlarna visas i gur 2.10.

Figur 2.10: Rotationsaxlar (Google Gemini med egen illustration)

Kon gurationen av bärplan på en båt kan delas in i två övergripande kategorier, ytgenomträngande och nedsänkta bärplan (Johnston, 1985). De olika kon gurationerna illustreras i gur 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 påträ ar 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 ygning, eftersom båtens bärplan kan förlora kontakten med vattnet vid högre hastigheter när vattennivån varierar snabbt. Detta resulterar potentiellt i ett instabilt system.

Nedsänkta bärplan be nner 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 ygning 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 ygning (van Walree, 1999).

Figur 2.11: Illustration av ytgenomträngande & nedsänkta bärplan

2.3.1 Positionering av master

Vingkon guration delas vanligtvis upp i tre kategorier: konventionell, canard och tandem (Johnston, 1985). Konventionell kon guration 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 kon guration har lika stora bärplan framtill som baktill och då bär de båda bärplanen lika stor del av lasten. Alla tre kon gurationer kan ha både delade och sammansatta vingar bak och fram för att uppnå olika e ekter såsom ökad manövrerbarhet, stabilitet och styrka. De olika vingkon gurationerna illustreras i gur 2.12.

Figur 2.12: Vingkon gurationer

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 bärplanspro ler krävs en serie av fundamentala beräkningar. Centralt för denna process är beräkningen av Reynoldstal enligt ekvation 2.3, vilket beskriver strömningens karaktär kring pro len. 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).

$$Re = \frac{V\,c}{\nu} \tag{2.3}$$

Tabell 2.2: De nition 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 denieras av bärplanets planformsyta, se gur 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

$$A_p = bc \tag{2.4}$$

$$L = \frac{1}{2} C_L \, A_p V^2 \tag{2.5}$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \, A_p V^2 \tag{2.6}$$

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

Beteckning	Storhet	Enhet
V	Strömningshastighet	m/s
	Fluidens densitet	kg/m ^{3}
c	Kordlängd	m
b	Spännvidd	m
	Kinematisk viskositet	m ^{2}/s
C_L	Lyftkoe cient	
C_D	Motståndskoe cient	

2.4.2 Programmet XFLR5

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

I programvaran importeras en 2D-pro l av bärplanspro len som sedan analyseras i olika Reynoldstal som pro len 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 ertalet 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 ertalet andra konstanter tas fram vilket gör det möjligt att estimera 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 ödet genom hastigheten som en tangent till ytan. Panelmetoden modellerar däremot hela geometrin och löser potential ödet 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 speci ka hastigheter eller vinklar som båten är stabil i. Exempelvis går det att undersöka för olika rullvinklar, se gur 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 uider och gasers beteenden (Ansys, u. å-a). Med denna simuleringsmetod kan till exempel luft öden kring ygplan, vattnets öde genom ett rör eller kring ett bärplan visualiseras. Den datorbaserade beräkningsmetoden fungerar enligt följande; det nns en domän där man vill analysera ödet. 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 era (Volupe, u. å).

Eftersom en uids öde är komplicerat i sig, blir det även svårt att modellera dess öde i datorn. Detta till följd av att ertalet olika fysikaliska fenomen blandas, vilket innebär att en solid och en uid 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 uiden till den fasta kroppen, men kroppens respons har försumbar inverkan på ödet. Detta innebär att till exempel en vinge kan generera kraft utan att deformeras. Till skillnad från envägskoppling har tvåvägskopplingen en ömsesidig interaktion. Alltså, uidens krafter orsakar deformationer som i sin tur förändrar ödet, vilket leder till ett samspel där båda systemen påverkar varandra kontinuerligt.

2.5 Vingkla ar

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

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

Vingkla ar används inte enbart för ygstabilitet 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 vingkla arna ökar lyftkraftskoe cienten, vilket resulterar i att tillräckligt med lyftkraft uppnås för att lyfta skrovet från vattenytan vid lägre hastigheter. De mest förekommande vingkla styperna är plain ap, split ap, slotted ap och fowler ap (Roberts, 2025). Dessa vingkla ar visas i gur 2.15.

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

Dimensionerna på bärplanens främre kontrollytor ska vara mellan 15% 25% medan bakre bärplanet ska ha kontrollytor 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 gur 2.16a. Eller genom att en låg tid på pulsen motsvarar minimiläge och att en dubbelt så lång puls motsvarar maximiläge, se gur 2.16b.

(a) Illustrering av PWM-signalens arbetscykel (Thewrightstu , 2018)

(b) Illustrering av PWM-signalens påverkan (Tauner, 2013)

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 nns olika batterityper men de mest relevanta och lättillgängliga är Litium Polymer (LiPo), Lithium-ion (Li-ion) och Lithium Iron Phosphate ($LiFePO_4$).

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. ., 2025). $LiFePO_4$ 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 e ekt
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 ertalet 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 e ektkrav. För att uppnå rätt systemspänning kopplas era 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:

$$U_{sys;min} \quad N_s \quad U_{cell} \quad U_{sys;max} \tag{2.7}$$

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

$$P_{bat} = U_{bat} \quad I_{bat} \tag{2.8}$$

Den maximala kontinuerliga e ekten som batteriet kan leverera, $P_{bat;max}$, måste överskrida systemet maximala kontinuerliga e ekt, $P_{sys;max}$, 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 e ekt 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:

$$I_{bat;max} = I_{cell;max} \quad N_p \tag{2.9}$$

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

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

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

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

Kombinationen av serie- och parallellkoppling möjliggör att batteriet modelleras utifrån systemets tillåtna spänningsintervall, maximala e ekt 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 gur 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 ödar genom spolar inuti statorn. Genom varje spole där en ström ödar skapas ett elektromagnetiskt fält, B, enligt ekvation 2.12 med variabelde nitioner enligt tabell 2.5.

$$B = {}_0 {}_r \frac{N}{L} I \tag{2.12}$$

Tabell 2.5: De nition av variabler för magnetisk ödestäthet (Ekvation 2.12)

Symbol	Beskrivning	Enhet
B	Magnetisk ödestäthet	T
$_0$	Permeabilitetskonstanten i vakuum	H/m
$_r$	Relativ permeabilitet	
N	Antal lindningsvarv	
L	Spolens längd	m
I	Elektrisk ström	A

De elektromagnetiska fält som genereras av ström ödet 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, $M_{förlust}$.

$$M_{res} = M_{motor} \quad M_{förlust} \tag{2.13}$$

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.

$$M_{propeller1} + M_{propeller2} = 0 \tag{2.14}$$

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 mass ödet 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 vatten öde (Bal & Görener, 2014). Denna tryckskillnad blir olika stor beroende på propellerns designparametrar, se gur 2.18.

$$F = m \quad a = \underline{m}(v_{ut} \quad v_{in}) \tag{2.15}$$

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 er blad på propellern (Kerwin, 1986). Kerwin beskriver även att propellrar inom marina användningsområde är bredare i förhållande till diametern jämfört med propellrar i ygindustrin, detta för att motverka kavitation och öka mass ödet av vatten, vilket möjliggör ökad kraftutveckling. Jämförelse av propellrar från marin- och ygsektorn visas i gur 2.19.

(a) Fyrbladig marinpropeller (Britannica, 2026b)

(b) Tvåbladig ygplanspropeller (Britannica, 2026a)

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

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

$$J = \frac{V_a}{nD} \tag{2.16}$$

Tabell 2.6: De nition 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 koe - cienter. Det vridmoment (M) som motorn måste leverera för att driva propellern de nieras

enligt ekvation 2.17.

$$M = K_Q \quad n^2 \quad D^5 \tag{2.17}$$

där K_Q representerar vridmomentskoe cienten och vätskans densitet. Propellerns vridmomentskoe cient 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 vatten ödet kring propellern störs, vilket medför att propellern tappar greppet och inte längre kan generar e ektiv dragkraft. Detta gör att motståndet minskar signi kant 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 be nner 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 gur 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 ytande till gas. När dessa bubblor rör sig till områden med högre tryck på bladet, imploderar de med enorm kraft. Detta ger e ekten 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 e ektivitet samt funktion försämras. Dessutom kan kavitation leda till ödesseparation över propellerns blad vilket resulterar i en signi kant 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 gur 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 inträ ar då luft in ltrerar den övre sidan av bärplanet med lägre tryck då det be nner sig nära vattenytan. Detta resulterar i ett ökat hydrodynamiskt motstånd samt minskad lyftkraft, vilket i sin tur försämrar båtens prestanda och stabilitet (Young m. ., 2023). För att motverka ventilation runt bärplanet är utformningen av bärplanspro len avgörande för att upprätthålla ett jämnt öde. En korrekt strömlinjeformad pro l minskar turbulenta öden kring bärplanet vilket annars kan ge upphov till ventilering (Barden & Binns, 2012). I gur 2.21 illustreras händelseförloppet av ventilering kring ett bärplan.

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

Kavitation kring bärplan bildas vid inkorrekt utformad pro l 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 gur 2.22.

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

2.9 Kapslingsklassning

Kapslingsklassning är en standardiserad klassi cering som anger hur motståndskraftigt en elektronisk komponent är mot inträngande partiklar och vatten. Klassi ceringen Ingress Protection gradering (IP) anges enligt formatet IPXX, till exempel IP67. Den första si ran anger graden av partikeltäthet och den andra si ran anger graden av vattentäthet. En högre si ra innebär en tätare elektrisk komponent.

2.10 Reglersystem

En bärplansbåt i ygande 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).

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

Konstanterna K_p, K_i och K_d är proportionella, integrerande och deriverande förstärkningskonstanterna. Felet e(t) de nieras 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.

$$s = \frac{v \cdot t}{2} \tag{2.19}$$

Tabell 2.7: De nition 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 era internationella positioneringssystem som Global Positioning System och Galileo med era.

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 ygsystem 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 ygningen beroende på utformning och körförhållanden nns 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 ygläge som används. Denna data loggas på en integrerad hårddisk i styrenheten, vilket möjliggör datautvärdering samt felsökning i efterhand.

I ArduPilot nns det olika yglägen som kan användas för att köra fordonet: höjdreglerat läge, Fly by Wire A (FBWA) och manuellt. I manuellt läge styr föraren alla kontrollytor och motorerna helt manuellt. FBWA är ett ygläge 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 höjdreglerat läget, implementerat av tidigare projektgrupper, erhåller föraren samma stöd som i FBWA, samtidigt som ArduPilot reglerar mot en förinställd yghöjd.

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 modulärt 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 gur 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 be ntlig plattform valts i form av en surfbräda avsedd för ygning. Brädans integrerade mastinfästning i botten utnyttjas som en mekanisk fästpunkt för att xera båtens överbyggnad.

Surfbrädan har en volym på 90 liter, en egenvikt på 4,5 kg och dimensionerna 152,4 60,0 cm. Brädans ytförmåga 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 (1000 kg/m ^{3}) ger lyftkraften (F_l) enligt ekvation 3.1.

$$F_l = (V \quad) \; m_{\text{bräda}} = (0;090 \quad 1000) \quad 4;5 = 85;5 \text{ kg} \tag{3.1}$$

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 be ntliga surfbrädan används en överbyggnad bestående av aluminiumpro ler. Strukturen baseras på pro ler med dimensionerna 20 20 mm, enligt gur 3.2. Valet av denna pro l 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 ytta 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 aluminiumpro l (20 20 mm)

I delar av konstruktionen som be nner sig i vattnet används en egentillverkad bottenplatta för att sammankoppla surfbrädan med överbyggnaden. Bottenplattan utnyttjar surfbrädans originalinfästningar och fungerar som en adapter mot aluminiumpro len, som visas i gur 3.3. För att minimera strömningsmotstånd som uppstår vid aluminiumpro lens infästning i bottenplattan, har hydrodynamiska kåpor konstruerats. Dessa kåpor dirigerar ödet längs pro len och minskar därmed risken för turbulens.

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

I designprocessen gjordes en avvägning där vikt jämfördes mot hållfasthet. Aluminiumpro - lerna som använts nns i era olika dimensioner så ett val av en större pro l hade kunnat öka konstruktionens styvhet och robusthet. Den första versionen av överbyggnaden modellerades

med pro ler 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 pro len. Då ett av projektets delmål är att hantera en extern last på 30 kg, konstaterades det att viktbesparingen med 20 20 mm-pro len, 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 xerar 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 pro l är 85 cm lång med en kordlängd på 17 cm och är tillverkad i aluminium. Dessa master har modi erats 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 gur 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 undvikit på grund av dess komplexitet. För att möjliggöra detta användes samma vingpro l som för de främre masterna, men med en anpassad konstruktion tillverkad i 3D-utskriven PETG. För att kunna styra höjdrodret placerades en genomföring för ett tryckstag strax framför rodret som i gur 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-

l. Denna lösning bidrar till en betydande stabilitetsökning då aluminiumpro lerna 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 gur 3.5a. Även rodret har förstärkts med kol berstavar i storleken 5mm och 2mm för att motverka skjuvning. I toppen av den bakre masten är servomotorer monterade för att kunna styra bakre kontrollytor. Dessa är implementerade genom att modi era en del av övre masten så att servomotorerna sitter stadigt. Servomotorernas positionering visas i gur 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 kon gurationer

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

(a) Stängt (b) Öppet

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 skevrodret. Tryckstagen som sträcker sig mellan servomotorns 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 skevrodret. Det smala hålet begränsar tryckstagens rörelse i tangentens riktning relativt dess verkningslinje i syfte att minimera glapp under belastning. Tryckstagen hakar i skevrodret och servomotorernas arm med en 90° sektion i slutet på vardera sida av tryckstagen och låses i position vid montering som i gur 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 ödet i propellern. Fästena går att justera i höjdled på de främre masterna vilket kräver en noggrann avvägning mellan mekaniska moment och hydrodynamisk e ektivitet. 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 ödet och drastiskt minska bärplanets lyftkraft. Motorfästena är utskrivna i PETG med en ökad väggtjocklek för att förbättra hållfastheten eftersom fästena utsätts för högt vridmoment.

Motorn monteras i fästanordningen enligt gur 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 ler för propellrar med olika propellerparametrar. Dessa CAD- ler modi erades för att passa motorns bultmönster samt ha en mer hydrodynamisk form för ett minimerat motstånd. Se primärt utvalda propellrar i gur 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 propellerpro ler 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 yt nhet, vilket ledde till att kol berförstärkt 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 Bärplanspro l och dimensionering

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

I XFLR5 analyseras pro lerna 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 visualiseras i gur 3.11, alltså hur lyft- och drag-koe cienten påverkas av anfallsvinkeln. Detta för att se vilken pro l som ck högst kvot och samtidigt inte minskar drastiskt. Ett kraftigt avtagande av datapunkter innebär högre risk för stallfenomen, vilket vill undvikas.

Efter att ha analyserat ertalet pro ler valdes FX84W097 till det främre bärplanet, som visas i gur 3.12. Trots att den inte presterade bäst enligt grafen i gur 3.11, hanterar den alla begränsningar som satts på pro lens geometriska egenskaper. De pro ler 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 pro ler vara för tunna för att rymma en förstärkningspro l invändigt. Bärplanspro lens optimala anfallsvinkel är då kvoten mellan lyft- samt drag-koe cienterna 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 för analyserade pro ler från XFLR5

Figur 3.12: FX84W097 pro l

Det bakre bärplanets pro l 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 pro ler valdes därför ut och gav resultat enligt gur 3.13. NACA 0010 redovisas enligt gur 3.14 och var den pro l som gav minst motstånd inom intervallet 2 till 3 grader. Till följd av detta valdes denna pro l.

Figur 3.13: Graf C_D mot för analyserade pro ler från XFLR5

Figur 3.14: NACA 0010 pro l

Med pro lerna fastställda, dimensionerades den våta strukturen i tre dimensioner i XFLR5 enligt gur 3.15. Det vill säga det som kommer att vara under vattenytan och påverkas av dess öde. 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 interaktionse ekter 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 gur 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 spetsvirvlarnas inverkan på bärplanets prestanda. Arean ska samtidigt vara tillräckligt stor så att lyftkraften genererad från bakre bärplan bidrar till att uppnå momentjämvikt kring tyngdpunkten:

$$M_{\text{främrebärplan}} \quad M_{\text{bakrebärplan}} = 0 \tag{3.2}$$

Dessa krafter hämtas från XFLR5 och det bakre bärplanet överdimensioneras för att kunna kompensera för extremfall. Dimensionerna blir således en area $_{p}A$= 0,044 m^2, ett vingspann på 0,4 m samt en kordlängd som avtar från 0,14 m till 0,08 m, vilket visas i gur 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 identi eras med hjälp av stabilitetsgrafen C_m mot och iterativt för ytta 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 gur 3.18.

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

3.1.7.2 Främre bärplan

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

(a) Främre vingpro l 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 aluminiumpro l, se gur 3.20. Bärplanet skrevs ut vertikalt för att uppnå hög yt nhet 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 pro ler

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 ödet negativt. Justeringen av anfallsvinkeln sker genom att placera brickor, enligt gur 3.21b, mellan masten och kontaktytan till bärplanet. De tillverkade brickorna kan skapa anfallsvinklar på 1°, 1,5°, 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 gur 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 gur 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 xeras, se gur 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 kol berstavar i strukturen. I bärplanet användes två 5 mm tjocka kol berstavar och i skevrodren en 5 mm och en 3 mm tjock kol berstav, se gur 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 (gur 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 aluminiumpro len.

(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 vingpro len, NACA 0010, som XFLR5 simuleringarna utfördes med. Istället för att använda vingspetsfenor i syfte att minimera turbulens vid vingspetsarna, 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 vingpro- len, bidrar till ökad komplexitet vid förstärkning och design av kontrollytor.

Figur 3.25: Bild på hela bakre bärplanet

Genom att integrera en 3 50 mm aluminiumpro l i vingen, för att ha en sammanhängande aluminiumstruktur, förstärks bärplanet. Vingkla en var för tunn för att möjliggöra integration av ett aluminiumstycke trots att den är 50% av bärplansarean, därav användes 5 mm och 2 mm kol berstavar som förstärkning. Aluminiumstycket och kol berstavarna 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 gur 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 vingkla en med servomotorn, som är fast monterad på överbyggnaden, användes ett tryckstag likt främre masterna. Tryckstaget fästes i vingkla en genom att skjutas in och därefter roteras 90 medurs för att låsas fast, se gur 3.27.

(a) Tvärsnitt sett uppifrån (b) Tvärsnitt sett från sidan

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 gur 3.21b. Detta möjliggör optimering för att anpassa båten utifrån olika förhållanden och krav som exempelvis olika last eller hastighet.

3.1.8 Kontrollytor

Kontrollytorna är baserade på den bärplansgeometri som framtogs vid simulering, därefter har bakre delen av den valda vingpro len modellerats om i CAD för att e ektivt användas som kontrollytor 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 och 20 , vilket ger en god avvägning mellan hållfasthet och maximalt vinkelutslag.

Då god manövrerbarhet är viktigt för denna bärplansbåt, valdes kontrollytorna vid främre bärplanet till 30% och det bakre bärplanets kontrollytor 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 e ekt på P = U I = 50 200 = 10 kW. Den höga e ektgränsen gör att de två 4,4 kW motorerna kan drivas utan att begränsas av regulatorerna.

Denna modell har inbyggda kondensatorer, se gur 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 ström ödet från batteriet till regulatorerna, vilket kortvarigt tillåter hög ström till motorerna vid acceleration.

Motorregulatorerna styrs med PWM-signaler via signalkablarna, se gur 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 kon gureras 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 ertalet andra motorparametrar, exempelvis lindningsresistans, utifrån kalibrering samt motorernas datablad.

Motorerna som ESC-enheterna ska driva är sensorlösa vilket innebär att de saknar positionsgivare, 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

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

(a) Inställningar för FOC (b) Sensorlös inställning

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 era tusen Revolutioner Per Minut (RPM) under aktiv användning.

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

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 di erentiell 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 er komponenter från samma batteri, vilket eliminerar behovet av ytterligare batterier och förenklar systemets uppbyggnad. Se gur 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 er elektroniska komponenter.

Figur 3.31: Kopplingsschema över BEC

3.2.4 Styrenhet

Systemets centrala styrenhet, se gur 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 era 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-signaler till ESC-enheterna och servomotorerna.

För att styra och övervaka styrenheten nns 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 kon gureras för att justera och felsöka systemets elektroniska komponenter.

Figur 3.32: Styrenheten

3.2.5 Servomotor

Fyra stycken servomotorer, se gur 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, gur 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 gur 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 yghöjd, 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 realtidstelemetri

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 veri erades 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 servomotorns fysiska respons. Dessa veri eringar 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 gur 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-kon guration 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 kon gurationer för att identi era skillnader i prestanda och materialstyvhet, enligt gur 4.2.

(a) Tre blad i kol berförstärkt PETG

(b) Två blad i kol berförstärkt PETG

(c) Två blad i standard PETG

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 di erensen observerades och beräknades.

Ett liknande test utfördes där styrenhetens IMU istället användes. Då uppmättes di erensen 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 följebåt 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 yttar stillastående vatten, blir den hydrodynamiska belastningen signi kant högre än vid normal drift. Detta fenomen beror på att propellerns framdrivningstal är noll, vilket tvingar bladen att arbeta med maximalt vridmoment för att ytta det stillastående vattnet. Under verkliga arbetsförhållanden, när båten rör sig framåt, minskar den relativa belastningen på motorn då vatten ödet 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:

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

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 kolförstärkta 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 tvingades 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 e ekt observerades inga märkbara skillnader mellan de olika propellerkon gurationerna, detta presenteras i gur 5.3. Samtliga propellrar följer samma trend vilket indikerar att varken materialval eller bladantal gav upphov till någon signi kant 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 speci ka modellen avbröts.

Figur 5.3: ESC-data, Duty Cycle (-) som funktion av e ekt (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 kol berförstärkta PETG-varianten. Den uppvisade inga antydningar på deformation eller sprickbildning förutom några små isor längst ut i kanten, enligt gur 5.4.

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

Figur 5.4: Deformation 2-bladig kol berförstärkt 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]	Di [s]	Insignal (Styrenhet) [s]	Ut [s]	Di [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 yga 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 gur 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.

(a) Lyft påbörjas (b) Inget lyft i aktern (c) Främre bärplan 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° och det bakre bärplanet en mellanbricka på 1,0°. 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 e ekt. 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 e ekt 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 iakttogs 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 gur 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 innebar att båtens styrande förmåga var helt beroende av di erential 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 aluminiumpro len för att låsa fast masten. Som synes i gur 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 gur 5.7b.

(a) Med blå infästningsplatta

(b) Utan blå infästningsplatta

Figur 5.7: Justering av infästning av bakre mast

Utöver modi eringen 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 motore ekten 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 höjdreglerat läget på styrenheten, vilket under tidigare test inte fungerat. Trots att båten i detta skede lyfte från vattenytan och går att köra i ygande läge, utan några större problem, identi erades era aspekter som behövde justeras ytterligare inför nästkommande fälttest. När båten befann sig i ygande läge, uppstod en vibrerande rörelse där hela konstruktionen, främst masterna, rör sig enligt gur 5.8. För att åtgärda detta måste överbyggnaden förstärkas och PID-regulatorns värden utvärderas.

Figur 5.8: Båten i ygande 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 er 10 kg vikter. Inledningsvis rådde nästintill vindstilla förhållanden, vilka senare övergick i vindbyar upp till 14 m/s och vågor på 15 20 cm som i gur 5.9.

Figur 5.9: Väderförhållande under andra fälttestet

Fackverksstrukturen som syns i gur 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 gur 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 e ekt 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 ygande läge vilket redovisas från ygloggen i gur 5.13 . Vid hastigheten kördes motorerna på full e ekt. Efter detta testades det att lasta båten med 30 kg extra vikt. Placeringen av vikter som visas i gur 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 gur 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 gur 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 gur 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 identi eras och kostsamma misstag i tillverkningsfasen minimerats.

I gur 5.14b illustreras den verkliga sammanställningen där samtliga komponenter har monteras. 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 identi eras 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 skevrodren 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 interaktionse ekt med modelleringen i CFD. Dessutom är CFD-beräkningen ödesbaserad och gjord enligt en envägskoppling, vilket kan påverka det verkliga resultatet av uid-solid-interaktionen.

Analysen av korrelationen mellan resultaten försvåras av att endast en datapunkt är gemensam för de två beräkningsmetoden. 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 speci kt 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, speci kt vid den lägre hastigheten. Inget tydligt samband kunde identi eras 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 interaktionse ekter påverkar ödet. Exempelvis hur respektive beräkningsmetod hanterar viskösa e ekter eller interaktionse ekter mellan bärplanen och masterna. Jämförelsen kan avläsas i 6.1 där är monteringsvinkel och är vinkel för skev- samt höjdroder.

Tabell 6.1: Jämförelse mellan XFLR5 och CFD för olika V_1 (bilaga D samt E)

	V_1 = 4 m/s		V_1 = 6 m/s	
	XFLR5	CFD	XFLR5	CFD
Främre [ ]	4	4	4	4
Bakre [ ]	0	0	0	0
Främre [ ]	2	0	0	0
Bakre [ ]	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 ygande 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 yga stabilt även med en extra last på 10 kg. Däremot plogade skrovet mycket vatten på grund av ytkraftens placering, vilket tros ha påverkat båtens förmåga att lyfta. Detta korrigerades inför andra fälttestet, via framskjutning av skrovet, vilket gav god e ekt då båten blev mer baktung vid ytande läge och resulterade i en lättare övergång till ygande läge.

Inför fälttest två förstärktes överbyggnaden, vilket direkt reducerade vibrationer. I hög sjö och stark vind uppvisade båten relativt god stabilitet i ygande 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 skevrodret 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 viktfördelningen 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 e ekt 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 e ekt reduceras automatiskt av ArduPilot vid icke-manuellt ygande läge, vilket tyder på någon form av intern begränsning eller skyddsfunktion som påverkar prestandan.

6.1.3 PID-reglering och kontrollrespons

Kraftiga uktuationer i det bakre bärplanets höjdroder observerades under test, vilket framgår av gur 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 ygande 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 identi erades även. Något som sannolikt bidrog till de observerade uktuationerna 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 karakteristiskt böljande rörelse. Fördröjningen påverkar dock regleringens precision och kan vara en bidragande faktor till problematiken med regleringen. Under fälttest 2 slutade det höjdreglerade läget att fungera. Dock gick det inte att identi era 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 Materialslitage 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-veri eringar

klarar 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

Design loso n bakom den slutgiltiga konstruktionen resulterade i ett välfungerande samspel mellan mekanik och elektronik, vilket lade grunden för båtens förmåga att uppnå stabil yg-ning. En av de mest framträdande styrkorna i årets iteration är den genomgående modu-lariteten 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 e ektivt ett byte av vingpro l kan genomföras: genom att endast lossa fyra respektive två skruvar för det främre och bakre bärplan kan hela pro len snabbt bytas vid test av olika modeller.

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

Trots dessa styrkor visar utvärderingen på era kritiska områden där konstruktionsvalen på-verkade prestandan negativt. Den mest framträdande bristen var valet att använda en be ntlig 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 mel-lan 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 ygning. 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 er 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 kon gurationen 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 xera 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 modi eringarna troligen försämrade lådans ursprungliga inkapslingsklass. För vidareutveckling av projekt rekommenderas därför att välja IP-klassade komponentlådor med fabriksfärdiga infästningspunkter. Genom att undvika egna modi eringar 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-utskriven PETG och en aluminiumpro l, 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 e ektivt bearbeta data från IMU enheten, vilket gav en snabb responstid, detta är viktigt eftersom att båten i ygande läge är ett instabilt system. Styrenheten har också era lättillgängliga kontakter vilket möjliggjorde enkel inkoppling av externa moduler och sensorer.

GNSS-modulen fungerade väl och kunde hitta era 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 ertal 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 ine ektiv 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 e ektiva. 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 propellerkon gurationer utredas för att uppnå en högre toppfart. Det nns också risk att det är batteriets e ekt 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 aluminiumpro ler 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 pro l 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 ygningen blev mer stabil. Många tidigare års koncept, såsom förstärkning via kol berstavar, 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 ultraljudssensor har även gett resultat då körning med höjdreglerat 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 yga 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 yga 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 ög 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 yga 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 ck svårt att hålla sig upprätt vid gir i långsammare hastigheter. Båten klarade dock att yga 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 ög båten utan några större svårigheter, med reservation från enstaka tillfällen då starka vindbyar trä ade 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 era 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 ler. 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 yga självreglerande i respektabel hastighet, är lättstyrd och manövrerbar. Den har lätt att uppnå ygande 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 ygande läge efter justeringar av bärplanens anfallsvinklar och PID-parametrar. De identi erade 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- uid-dynamics

Ansys. (u. å-b). What is Fluid-Structure Interaction? https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is- uid-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). Identi cation 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 E ect 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/ les/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_(aps).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.thrust ight.com/airplane- aps/

S.A.Kinnas. (1996). Photographs of di erent 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

Thewrightstu . (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://volupe.com/support/basic-cfd-concepts- uid-dynamics/

XFLR5. (2026 mars). x r5. https://www. ow5.tech/x r5/x r5.html

Young, Y. L., Valles, Z., Napoli, I. D., Montero, F. M., Minerva, L. F., & Harwood, C. (2023). Wave e ects on the hydroelastic response of a surface-piercing hydrofoil. Part 1. Fully wetted and ventilated ows.

A. Basic tuning - Inställning i ArduPilot

B. Full Parameter List - Inställning i Ardu-Pilot

C. Servo Output - Inställning i ArduPilot

D. Beräkningsresultat XFLR5

E. Beräkningsresultat CFD

2 = 2

2.1 Main Results & Comparison

Table 2: Hydrofoil comparison at = 2 : with mast (W) vs. without mast (W/O). = 1000 kg=m ^{3}, S = 0:17 m^2.

V [m/s]	L [N]		D [N]		C_L [-]		C_D [-]		C_L =C_D [-]	
	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

(a) L vs V

(b) D vs V

(c) C_L vs V

(d) C_D vs V

(e) C_L =C_D vs V

Figure 2: Hydrofoil performance at = 2 as a function of velocity.

3 = 4

3.1 Main Results & Comparison

Table 3: Hydrofoil comparison at = 4 : with mast (W) vs. without mast (W/O). = 1000 kg=m ^{3}, S = 0:17 m^2.

V [m/s]	L [N]		D [N]		C_L [-]		C_D [-]		C_L =C_D [-]	
	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