



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Utvärdering av bärplanskoncept för Stigfjord 650 CAT

Kandidatarbete vid Mechanical Engineering

WILMER AHLGREN
CARL DAHL
AXEL WINCENTSON

FABIAN THIRINGER COSTER
ELIAS SÖRQVIST
HARALD ÖDMAN

INSTITUTIONEN MECHANICAL ENGINEERING
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2026
www.chalmers.se

Utvärdering av bärplanskoncept för Stigfjord 650 CAT

Kandidatarbete i Mechanical Engineering

WILMER AHLGREN
FABIAN THIRINGER COSTER
CARL DAHL
ELIAS SÖRQVIST
AXEL WINCENTSON
HARALD ÖDMAN



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

Utvärdering av bärplanskoncept för Stigfjord 650 CAT
Kandidatarbete i fartygskonstruktion

WILMER AHLGREN
FABIAN THIRINGER COSTER
CARL DAHL
ELIAS SÖRQVIST
AXEL WINCENTSON
HARALD ÖDMAN

© WILMER AHLGREN, FABIAN THIRINGER COSTER, CARL DAHL,
ELIAS SÖRQVIST, AXEL WINCENTSON, HARALD ÖDMAN, 2026.

Handledare: Per Mottram Hogström, Mechanical Engineering, Sten Örneblad, Dynalift Power boats
AB

Examinator: Arash Eslamdoost, Institutionen Mechanical Engineering

Kandidatarbete MMSX21-VT26-03A
Institutionen Mechanical Engineering

Institutionen Mechanical Engineering
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslagsbild: Skalmodell av Stigfjord 650 CAT under dragtest.

Tryckeri / Institutionen Mechanical Engineering
Göteborg, Sverige 2026

Abstract

There is a need to reduce fuel consumption within the maritime sector. By using hydrofoils, water resistance can be reduced, which has the potential to lower fuel consumption. This report evaluates the effect of hydrofoils on hydrodynamic resistance and seakeeping characteristics. Through analysis of scale-model tests, the possibility of implementing a hydrofoil concept for a Stigfjord 650 CAT is investigated, with the potential to reduce total resistance under different loading conditions. The boat has a tendency to become bow-heavy under heavier loads, which impairs its planing ability and increases water resistance.

Through analysis and screening of existing wing profiles, the Wortmann FX60-100 was selected as the main profile and dimensioned to provide lift corresponding to 45% of the heaviest loading condition. Together with two smaller aft hydrofoils acting as trimfoils, these form the hydrofoil concept. The concept was evaluated experimentally using a 1:5 scale model, in which three longitudinal hydrofoil positions were tested under different loading conditions and wave directions. The model was towed alongside a boat using a test rig that made it possible to measure towing force while speed was logged in order to analyze resistance within the relevant speed range.

The qualitative results show that the hydrofoil clearly affects the running characteristics of the model by lifting the bow, particularly under heavy load, which reduces spray and the risk of the model diving in waves. At the same time, a rougher ride was observed, which will likely compromise one of the full-scale boat's strengths. The quantitative results do not provide sufficient support to establish a reduction in resistance. For the heavier loading condition, the model without hydrofoils shows a lower resistance than the model with hydrofoils within the same speed range. The quantitative results are limited by the testing conditions and variations in the measurement data, meaning that they should primarily be used to identify overall trends rather than to draw conclusions about resistance reduction. Overall, the results show that the hydrofoil can lift the bow and thereby alter the boat's seakeeping characteristics, but its effect on water resistance cannot be determined with certainty. Thus, implementation of a hydrofoil concept on the full-scale boat is not considered advantageous.

To evaluate the effect of the hydrofoil more clearly, future work should conduct tests in a controlled environment and use digital tools to log more data points with higher precision.

Sammandrag

Det finns ett behov av att minska bränsleförbrukningen inom sjöfart. Genom att utnyttja bärplan kan vattenmotstånd minskas, vilket har potential att ge en sänkt bränsleförbrukning. I denna rapport utvärderas effekten av bärplan på hydrodynamiskt motstånd och sjöegenskaper. Genom analys av tester med skalmodell undersöks möjligheten att implementera ett bärplanskoncept för en Stigfjord 650 CAT med potential att minska det totala motståndet vid olika lastförhållanden. Båten har en tendens att bli framtung vid tyngre last, vilket försämrar planingsförmågan och ökar vattenmotståndet.

Genom analys och sållning av befintliga vingprofiler valdes Wortmann FX60-100 som huvudprofil och dimensionerades för att bidra med lyftkraft motsvarande 45% av det tyngsta lastfallet. Tillsammans med två mindre aktre bärplan som agerar trimplan utgör dessa bärplanskonceptet. Konceptet utvärderades experimentellt med en skalmodell i skala 1:5, där tre längsgående bärplanspositioner testades under olika lastfall och vågriktningar. Modellen bogserades bredvid en båt med en testtrigg som gjorde det möjligt att mäta dragkraft samtidigt som hastigheten loggades för att analysera motståndet inom det relevanta hastighetsintervallet.

De kvalitativa resultaten visar att bärplanet tydligt påverkar modellens gångläge genom att lyfta förskeppet, särskilt vid tung last, vilket minskar vattenstänk och risken för att modellen dyker ner i vågor. Samtidigt observerades en stötigare gång, vilket bedöms kunna försämrare en av den fullskaliga båtens styrkor. De kvantitativa resultaten ger inte tillräckligt stöd för att fastställa en minskning av motståndet. För det tyngre lastfallet visar modellen utan bärplan lägre motstånd än med bärplan inom samma hastighetsintervall. De kvantitativa resultaten begränsas av försöksförhållandena och variationer i mätdata, vilket gör att de främst bör användas för att identifiera övergripande tendenser snarare än för att dra slutsatser om motståndsminskning. Sammantaget visar resultaten att bärplanet kan lyfta fören och därmed förändra båtens sjöegenskaper, men dess påverkan på vattenmotståndet kan inte fastställas med säkerhet. Således bedöms implementering av ett bärplanskoncept på den fullskaliga båten inte vara fördelaktig.

För att tydligare utvärdera bärplanets effekt bör framtida arbeten utföra tester i en kontrollerad miljö samt använda digitala verktyg för att logga fler datapunkter med högre precision.

Förord

Denna rapport presenterar arbetet och resultatet bakom kandidatarbetet "Utvärdering av bärplanskoncept för Stigfjord 650 CAT". Arbetet har genomförts vid institutionen Mechanical engineering under vårterminen 2026 vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Vi skulle vilja tacka institutionen Mechanical engineering för hjälp med ekonomiskt stöd till material och utrustning samt genomförande av tester.

Vi skulle även vilja rikta ett stort tack till följande personer:

Sten Örneblad, VD på Dynalift power boats AB, som med sitt engagemang samt erfarenhet har hjälpt handleda oss. Även bistått med utrustning för att kunna genomföra tester i arbetet.

Handledare Per Mottram Hogström från avdelningen Marin teknik vid Mechanical Engineering. Med sitt stöd och goda råd från sin stora erfarenhet inom den marina sektorn har Per varit till stor hjälp under hela arbetet.

Arash Eslamdoost, också på avdelningen Marin teknik, som tog sig an rollen som examinator för vårt arbete och som gett goda råd som sakkunnig inom bärplansområdet.

Författarna, Göteborg, 13 maj 2026

Ordlista

- Akter - Bakre delen av båten.
- Anfallsvinkel - Vinkeln hos ett bärplan jämfört mot flödets riktning i mediet.
- Bärplan - En vingprofil som placeras under en båt.
- Fribord - Båtens utsida som är över vattenlinjen.
- För/Förskepp - Främre delen av båten.
- Katamaran - Båt med två parallella skrov.
- Knop - Enhet för hastighet som motsvarar 1,852 kilometer per timme.
- Längsskeppsposition - Position längs båtens längdaxel.
- Marschfart - En konstant hastighet som vanligtvis används under längre sträckor då det inte finns hinder eller stop.
- Planing - Vid en tillräckligt hög hastighet börjar en båt gå ovanpå vattnet istället för att plöja igenom det, detta kallas planing.
- Slag/Slaglinje - Den skarpa linje där båtens undersida möter båtens vertikala sidor.
- Skrov - En båts eller fartygs kropp.
- Spant - Böjda trälistor eller vinkeljärn på insidan av skrovet som ger skrovets form i tvärsled.
- Trimvinkel - Vinkeln skrovet har mot vattenytan.
- V-botten - En skrovutformning där bottenvinkeln bildar ett V för att klyva vattenytan och dämpa stötar i vågor.
- Våt yta - Ytan hos en båt som är i kontakt med vatten.

Innehållsförteckning

Abstract	i
Sammandrag	ii
Förord	iii
Ordlista	iv
Figurförteckning	vii
Tabellförteckning	ix
1 Inledning	1
1.1 Syfte	1
1.2 Avgränsningar	1
1.3 Användning av AI	2
2 Teori	3
2.1 Planing	3
2.1.1 Hydrodynamisk lyftkraft	3
2.1.2 Galoppering	3
2.2 Skalning	3
2.2.1 Kinematisk likformighet - Froudes tal	4
2.2.2 Dynamisk likformighet - Reynoldstal	4
2.2.3 Skalning av massa	5
2.3 Bärplan	5
2.3.1 Vingprofilers strömningsegenskaper	6
2.3.2 Tredimensionell vinge	7
3 Metod	8
3.1 Fullskalig båt	8
3.2 Tillverkning av modell	9
3.2.1 Skanning och digital 3D-modellering	10
3.2.2 Massberäkningar	10
3.2.3 Fysisk modell	10
3.3 Befintliga bärplanskoncept	13
3.4 Val av bärplanskoncept	13
3.4.1 Dimensionering av bärplan	13
3.4.2 Utformning av bärplanskoncept	14
3.4.3 Sällning och val av bärplansprofil	15
3.4.4 Aktre bärplan	17
3.4.5 Tillverkning av bärplan	18
3.5 Tester	21
3.5.1 Position av bärplan	21
3.5.2 Utrustning och mätmetoder	23
3.5.3 Fysiska tester med modell	24
3.6 Analys av mätdata	26
4 Resultat	27
4.1 Kvantitativt resultat	27
4.2 Kvalitativt resultat	28
5 Diskussion	32
5.1 Mätdata och försöksosäkerheter	32

5.2	Kvantitativt resultat	32
5.3	Kvalitativt resultat	33
5.4	Utvärdering av bärplanskoncept	34
5.5	Utvärdering av metod	34
5.5.1	Tillverkningsprocess av skalmodell	34
5.5.2	Testmetod	35
6	Slutsats	36
7	Framtida arbete	37
	Källförteckning	38
A	Hydrodynamisk modell enligt Savitsky	I
A.1	Kraft- och momentjämvikt	II
B	Sållning av bärplan	III
B.1	Graf av C_P för bärplansprofiler	III
B.2	Värdeskalor tillhörande Kesselringmatris	V
C	Figurer på mätdata	VI

Figurförteckning

2.1	Geometrisk förklaring för ett bärplan. Modifierad bild baserad på original från (Cleynen, 2011), CC0-licens.	5
3.1	Fullskaliga båten vid 20 knop.	8
3.2	Fullskaliga båten vid 23 knop.	9
3.3	Fullskaliga båten vid 29 knop.	9
3.4	Färdigställd modell i CAD.	10
3.5	Spant som sedan ska kläs in med plywood och bilda skrovformen.	11
3.6	Form med glipor under byggprocess.	11
3.7	Härdning av kompositen med hjälp av cellplast och värmefläkt.	12
3.8	Härdning av gelcoat innan slipning.	12
3.9	Test av båtens flytförmåga efter invägning.	12
3.10	Fastmonterade roder på modellen.	12
3.11	Jämförelse mellan vridande moment runt infästningarna för ett svept och ett rakt bärplan. Det raka bärplanet har ett mindre avstånd till infästningarna vilket innebär ett mindre vridande moment.	15
3.12	Illustration av profilen GOE 11K.	16
3.13	Illustration av profilen GOE 622.	16
3.14	Illustration av profilen NACA 2408.	16
3.15	Illustration av profilen NACA 2414.	16
3.16	Illustration av profilen Wortmann FX60-100.	16
3.17	Sällning med Kesselringmatris.	17
3.18	Böjmoment i bärplan vid fast inspänd balk.	19
3.19	Huvudbärplanet med infästning sett framifrån.	20
3.20	Huvudbärplanet med infästning sett ovanifrån.	20
3.21	Aktre bärplanet.	21
3.22	Modellen med alla bärplan monterade. Foto: Sten Örneblad.	21
3.23	Figuren visar motstånd som funktion av bärplansposition för de tre olika lastfallen. De vertikala prickade linjerna är masscentrum för de olika lastfallen.	22
3.24	Schematisk bild av testtriggen (Sten Örneblad, n.d.).	23
3.25	Testtriggens utformning för de fysiska modellförsöken. Figuren visar hur bommen, vågen och draglinan kopplades samman för att möjliggöra mätning av dragkraften under försöket.	24
3.26	Illustration av testområdet.	25
3.27	Vattentätning av modellen.	25
4.1	Medelvärde och standardavvikelse för motstånd i intervallet 10 till 12 knop för olika lastfall, riktning och olika bärplanspositioner. Antalet mätpunkter betecknas med n.	28
4.2	Modellen med bärplan i främre position i medsjö och lastfall 1.	28
4.3	Modellen utan bärplan i medsjö och lastfall 1.	29
4.4	Modellen med bärplan i främre position i medsjö och lastfall 2.	29
4.5	Modellen med bärplan i bakre position i medsjö och lastfall 2.	29
4.6	Modellen utan bärplan i motsjö och lastfall 1.	30
4.7	Modellen utan bärplan i motsjö och lastfall 2.	30
4.8	Modellen med bärplan i främre position i motsjö och lastfall 2.	30
B.1	Graf av C_P för profilen GOE 11k från Xfoil 6.99.	III
B.2	Graf av C_P för profilen GOE 622 från Xfoil 6.99.	III
B.3	Graf av C_P för profilen NACA 2408 från Xfoil 6.99.	IV
B.4	Graf av C_P för profilen NACA 2414 från Xfoil 6.99.	IV
B.5	Graf av C_P för profilen Wortmann FX60-100 från Xfoil 6.99.	V
B.6	Värdeskalor för utvärdering med Kesselringmatris.	V
C.1	Individuella mätresultat för främre bärplansposition, uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning. Varje deldiagram visar uppmätt motstånd mot hastighet. Samtliga deldiagram visas med samma axelintervall.	VI

C.2	Individuella mätresultat för mittre bärplansposition, uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning. Varje deldiagram visar uppmätt motstånd mot hastighet. Samtliga deldiagram visas med samma axelintervall.	VII
C.3	Individuella mätresultat för bakre bärplansposition, uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning. Varje deldiagram visar uppmätt motstånd mot hastighet. Samtliga deldiagram visas med samma axelintervall.	VIII
C.4	Individuella mätresultat utan bärplan, uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning. Varje deldiagram visar uppmätt motstånd mot hastighet. Samtliga deldiagram visas med samma axelintervall.	IX
C.5	Grupperade mätresultat för försöken, uppdelade efter bärplansposition och lastfall. Varje deldiagram visar sambandet mellan hastighet och motstånd för medsjö och motsjö. Samtliga deldiagram redovisas med samma axelintervall.	X

Tabellförteckning

3.1	Båtens specifikationer.	8
3.2	Totalvikter för olika lastfall.	9
3.3	Skalade massor för skalmodellen för de olika lastfallen.	10
3.4	Värden för de olika bärplansprofilerna	17
3.5	Lyftkraftskoefficient (C_L) som funktion av anfallsvinkel för NACA 0012 från Xfoil 6.99. Beräknat med $Re = 0,240 \cdot 10^6$	18
3.6	Faktisk lyftkraft i 3D för skalmodell vid $AR = 2$ och hastighet 11,7 knop.	19
3.7	Tabellen beskriver de tre lastfallen med massa och masscentrum på fullskalig båt och modell, som användes under framtagandet av den optimala bärplanspositionen.	22
3.8	Testmatris för modellförsök med olika lastfall och bärplanskonfigurationer. Varje serie genomfördes både med och mot vågornas riktning.	24
4.1	Testförhållanden från testdagar (SMHI, n.d.-b).	27

1 Inledning

Inom modern sjöfart finns ett växande behov av att minska bränsleförbrukningen, ur både ekonomisk synpunkt och miljöpåverkan (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, n.d.). Samtidigt ställs det höga krav på att prestandan inte försämras. Detta har lett till ett ökat intresse för tekniska lösningar som kan reducera vattenmotståndet hos fartyg.

Bärplan är en vingformad profil monterad under ett fartygs skrov. När hastigheten ökar genereras en lyftkraft av bärplanet som lyfter båten upp ur vattnet (Larsson et al., 2022). Eftersom bärplanet har en mindre yta än båtens skrov innebär det att friktionen mot vattnet minskar. Det minskade motståndet ger möjlighet till ökad hastighet och minskad bränsleförbrukning.

I arbetet undersöks möjligheten att minska bränsleförbrukningen genom installation av bärplan på en arbetsbåt av modellen Stigfjord 650 CAT (Stigfjordbåtar, n.d.). Hädanefter benämns båtmodellen i fråga som båten. Båten har ett katamaranskrov, vilket innebär att den är konstruerad med två parallella skrov. I dagsläget används den av företaget Trossö Naturvårdsuppdrag i huvudsakligt syfte att transportera material, mindre arbetsfordon och personal över långa sträckor längs västkusten. Båten framförs i en marschfart mellan 20 och 25 knop. Dess karaktär och design gör att båten ofta upplevs bli framtung vid tung last, vilket medför försämrade planingsförmåga eller att båten aldrig uppnår planing. Uppdragsgivaren önskar implementera bärplan mellan skroven för att lyfta fören ur vattnet och minska motståndet, både med och utan last.

Arbetet innefattar analys av både hydrodynamiska och mekaniska samband samt teori och analys av vingprofiler och bärplan, inklusive deras tillämpning på och påverkan på den specifika båten. Dessa valideras genom tester på en skalmodell av båten i skala 1:5.

1.1 Syfte

Kandidatarbetet ämnar utvärdera effekten av bärplan, placerade mellan katamaranskrov, på hydrodynamiskt motstånd samt sjöegenskaper vid marschfart under varierande lastförhållanden. Genom analys av tester med skalmodell ämnar arbetet undersöka möjligheten till att implementera ett bärplanskoncept för en Stigfjord 650 CAT med potential att minska totala motståndet vid olika lastförhållanden.

1.2 Avgränsningar

Arbetet omfattar inte bärplanens påverkan på båten i låg hastighet. Avgränsningen motiveras av att båten ofta kör långa sträckor och planar runt 90% av den totala körsträckan. När båten körs i planing bedöms vara den relevanta fasen att undersöka då bärplanen ger mer lyftkraft vid högre hastigheter.

Positionering och utformning av bärplanen ska inte försämra båtens vardagliga bruk, där båten kan behöva framföras i grunt vatten eller köras upp på stränder. Bärplanens positionering avgränsas till området mellan båtens två skrov och bärplanens profil avgränsas till standardiserade profiler.

Positionering och utformning av bärplanen avgränsas även baserat på vad som anses möjligt att realisera inom arbetets tidsram. Numeriska simuleringar för flödesberäkningar (CFD) bedöms inte vara realistiska inom tidsramen. Positionering av bärplanen baseras därför på mekaniska samband, grundläggande hydrodynamiska modeller och validering genom tester i modellskala.

Baserat på vad som är realistiskt inom tidsramen avgränsas arbetet till utvärdering av koncept med skalmodell och omfattar inte implementering av bärplanen på den fullskaliga båten. Då studien endast avser att utvärdera effekten av bärplan beaktas inte juridiska aspekter som lagstiftning och klassning av båten.

Valideringen av konceptet begränsas av de förutsättningar som är möjliga inom projektets tidsram och budget. Detta innebär att modelltesterna inte utförs i en kontrollerad miljö. Projektet avgränsas därför till att behandla och analysera mätdata utifrån de faktiska förhållanden som råder under testernas genomförande även om dessa inte är ideala.

Modellens vertikala tyngdpunkt har liten betydelse för bärplanens beteenden och anses därför inte vara av intresse vid genomförandet av tester. Istället undersöks bärplanens beteende vid olika horisontella placeringar.

1.3 Användning av AI

Under projektet har generativ AI använts i begränsad omfattning som stöd vid programmeringsrelaterade och språkliga moment. Användningen har främst omfattat felsökning, strukturering av kod samt stöd vid implementering av funktioner för datahantering, analys av mätdata och framtagning av figurer. AI har även använts som stöd för språklig bearbetning av egenproducerad text, exempelvis genom omformulering, justering av struktur och flyt. AI har inte använts för att generera rapportens tekniska innehåll, teori, metodval, resultat eller slutsatser. All kod och allt textmaterial som har bearbetats med stöd av AI har granskats, anpassats och verifierats av författarna. Författarna ansvarar därmed för rapportens innehåll och de resultat som presenteras.

2 Teori

I denna sektion presenteras grundläggande teori bakom områden som behandlas av projektet. Sektionen inleds med att beskriva teorin och fysiken bakom planing samt det fysikaliska fenomenet galoppering i sektion 2.1. Efter detta presenteras teori och formler för skalning i sektion 2.2. Avslutningsvis behandlas bärplan och olika vingprofilers strömningsegenskaper i sektion 2.3.

2.1 Planing

Arkimedes princip beskriver hur ett föremål nedsänkt i en vätska påverkas av en uppåtriktad kraft som är lika stor som tyngden av den undanträngda vätskan (Larsson et al., 2022). Denna uppåtriktade kraft utgör den hydrostatiska flytkraften. En stillastående flytande båt är i jämvikt då tyngden av det undanträngda vattnet motsvarar båtens totala tyngd. När en båt som är designad för att plana rör sig framåt uppstår en hydrodynamisk lyftkraft som delvis lyfter skrovet ur vattnet vid högre farter.

2.1.1 Hydrodynamisk lyftkraft

En planande yta får ett hydrodynamiskt tryck när den rör sig genom vatten med en viss hastighet och en positiv trimvinkel, alltså vinkeln mellan skrovet och vattenytan (McCauley, 2019). Då tvingas vattnet att ändra rörelseriktning längs botten och bort från ytan, vilket innebär att det byggs upp ett tryckfält mot den planande ytan. Trycket verkar vinkelrätt mot ytan och får en uppåtriktad komponent som utgör den hydrodynamiska lyftkraften.

Vid låga hastigheter bärs båtens vikt huvudsakligen av flytkraften och den hydrodynamiska kraften är liten (McCauley, 2019). När hastigheten ökar klättrar båten upp på sin bogvåg, vilket ger en positiv trimvinkel och därmed en lyftande tryckfördelning under skrovet. Positiv trimvinkel är inte tillräckligt för att få en stabil tryckfördelning utan det krävs även en gynnsam flödesseparation vid akterspegeln.

En skarp övergång mellan botten och akterspegel är därför viktig då det möjliggör ren separation av flödet (McCauley, 2019). Vid låga hastigheter, när akterspegeln fortfarande är våt och svallvågor förekommer längs den, är flödet inte tillräckligt för att bidra med en effektivt hydrodynamisk lyftkraft. Vid en viss hastighet släpper vattnet helt från akterspegeln och flödet fortsätter som om båtens botten vore längre. I detta skede ökar den hydrodynamiska lyftkraften tydligt och markerar även övergången då en båt börjar plana.

Lyftkraftens storlek beskrivs av

$$F = \frac{1}{2}\rho AU^2 C_L, \quad (2.1)$$

där ρ är densiteten, A är den yta som tryckfältet uppstår på, U är vattnets hastighet, och C_L är lyftkoefficienten (McCauley, 2019).

2.1.2 Galoppering

Galoppering syftar till den oscillerande vertikala rörelsen som uppstår när ett fartyg uppnår en viss hastighet och kan ses som en manifestation av dynamisk instabilitet (Zhang et al., 2025). Eftersom tyngdpunkten ligger för långt bak lyfts båtens för upp, vilket medför att lyftkraftens angreppspunkt flyttas bakåt (Larsson et al., 2022). Förskjutningen av lyftkraften skapar ett nedåtriktat moment på fören vilket medför att fören faller ner. När fören faller minskar trimvinkeln vilket återigen flyttar lyftkraftens angreppspunkt och skapar ett nytt uppåterverkande moment på fören.

2.2 Skalning

För att modellen ska ge korrekta samt jämförbara testresultat krävs skalenlighet mellan modell och fullskala (White & Xue, 2020). Skalenlighet innebär att geometrin är proportionellt nedskalad, att hastighetsfältet uppvisar samma relevanta fördelning samt att de dominerande krafterna verkar i motsvarande förhållanden. För att uppnå skalenlighet används följande faktorer.

- Geometrisk likformighet: Modell och fullskala har samma form. Alla dimensioner måste ha samma linjära skalningsfaktor.
- Kinematisk likformighet: Hastighetskomponenterna i det omgivande flödet skalas med samma faktor. Kräver geometrisk likformighet för att stämma och görs oftast genom skalning med Froudetal, se sektion 2.2.1.
- Dynamisk likformighet: Krafter skalas med samma faktor som geometrin. Det kräver att kraft- och tryckkoefficienter är identiska samt att geometrisk likformighet gäller. Dynamiska förhållanden skalas med Reynoldstal där samma Reynoldstal innebär att de dynamiska förhållandena är lika, se 2.2.2.

I ett ideellt fall kan kinematisk och dynamisk likformighet båda uppfyllas, detta är dock praktiskt svårt att genomföra (White & Xue, 2020). För att dynamisk likformighet ska gälla för höga skalningsfaktorer krävs fluider med egenskaper som inte existerar vilket gör flödestester omöjliga. Även i de fall med små skalfaktorer, där en fluid med korrekt dynamisk viskositet existerar, är det praktiskt svårt att genomföra tester på en skalmodell i någon annan fluid än vatten. Därför är det vanligt att man inte uppfyller dynamisk likformighet.

2.2.1 Kinematisk likformighet - Froudes tal

Froudes tal (F_r) beskriver förhållandet mellan tröghetskrafter och gravitationskrafter i flöden med fri vattenyta (White & Xue, 2020). Talet används för att bedöma i vilken grad ett rörligt objekt påverkar vattenytan genom vågbildning och ytvariationer. Froudes tal definieras enligt

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \quad (2.2)$$

där v är objektets hastighet, g är tyngdaccelerationen och L är vattenlinjelängden.

Genom omskrivning av Froudes tal, ekvation (2.2), härleds ett uttryck för skalning mellan modellens och den verkliga båtens hastighet.

$$F_r = \frac{v_{\text{modell}}}{\sqrt{gL_{\text{modell}}}} = \frac{v_{\text{verklig}}}{\sqrt{gL_{\text{verklig}}}} \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow v_{\text{modell}} = v_{\text{verklig}} \sqrt{\frac{L_{\text{modell}}}{L_{\text{verklig}}}} = v_{\text{verklig}} \sqrt{\frac{1}{5}}. \quad (2.4)$$

Här används det faktum att $L_{\text{verklig}} = 5 \cdot L_{\text{modell}}$ i och med skalan på 1:5.

2.2.2 Dynamisk likformighet - Reynoldstal

Reynoldstal är ett dimensionslöst tal som beskriver de viskösa effekterna av en fluid och är definierat som

$$Re = \frac{\rho v_{\infty} L}{\mu}, \quad (2.5)$$

där ρ är vätskans densitet, v_{∞} är fluidhastigheten utanför gränsskiktet, L är längden över ytan vilket för bärplanet motsvarar längden mellan fram- och bakkant och μ är den dynamiska viskositeten (White & Xue, 2020). Ett användningsområde för Reynoldstal är vid utformningen av ett bärplan, se 2.3, för att förutsäga om strömningen runt profilen kommer att vara laminär eller turbulent, vilket är avgörande för att kunna optimera formen för maximal lyftkraft och minimalt motstånd.

2.2.3 Skalning av massa

För att skala massa används formeln för densitet, definierad som

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.6)$$

där ρ är densiteten, m är massan och V är volymen.

Densiteten för ett material är densamma oavsett storlek leder det till sambandet

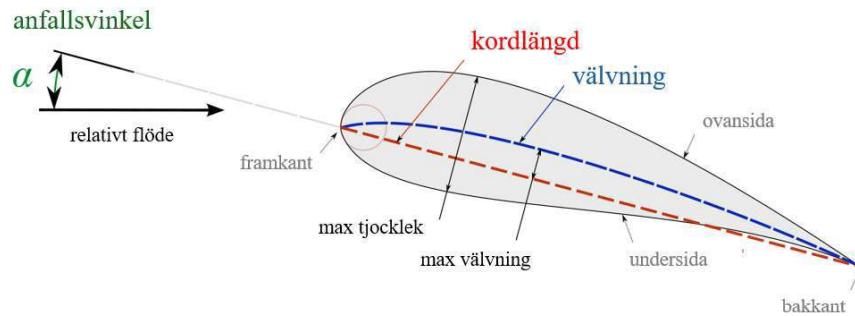
$$\rho = \frac{m_{\text{modellskala}}}{V_{\text{modellskala}}} = \frac{m_{\text{verklig}}}{V_{\text{verklig}}}. \quad (2.7)$$

Då längd, bredd och höjd skalas med 1:5 ansätts $V_{\text{verklig}} = 5^3$ och $V_{\text{modellskala}} = 1^3$. Genom insättning av värdena och omskrivning av ekvation (2.7) fås följande samband för skalning av massa genom

$$m_{\text{modellskala}} = m_{\text{verklig}} \frac{1}{5^3}. \quad (2.8)$$

2.3 Bärplan

Ett bärplan, se figur 2.1, fungerar på samma sätt som en flygplansvinge men är istället ämnad för användning i vatten. När bärplanet färdas genom vattnet ger vingprofilen upphov till att flödet på ovansidan är snabbare än flödet på undersidan (Rosado, 1998). Enligt Bernoullis princip ger ett flödes ökade hastighet upphov till ett minskat tryck, därav skapas ett lågtryck på bärplanets ovansida jämfört med undersidan (Hall, 2024). Tryckskillnaden skapar en lyftkraft som verkar uppåt på bärplanet. Eftersom vattnets densitet är ungefär 1000 gånger större än luft krävs det inte särskilt stora bärplan eller hastigheter för att generera stora lyftkrafter till skillnad från vingar på till exempel flygplan (Rosado, 1998). Lyftkraften för ett bärplan beräknas på samma sätt som hydrodynamisk lyftkraft, se ekvation (2.1).



Figur 2.1: Geometrisk förklaring för ett bärplan. Modifierad bild baserad på original från (Cleynen, 2011), CC0-licens.

Bärplan skapar motstånd i vatten genom friktion mot den våta ytan samt genom turbulens runt profilen. Dock har bärplan mycket bättre effektivitet mellan den lyftkraft som genereras och vattenmotståndet om man jämför mot en båt (Hoppe, 1989). Det kan användas för att implementera ett bärplan på en båt för att minska motståndet. Detta innebär att i låga farter kommer ett bärplan att addera motstånd innan bärplanet börjar generera tillräcklig lyftkraft. När bärplanet sedan lyckas generera tillräckligt med lyftkraft så att båtens motstånd minskar mer än bärplanets motstånd, uppnås en positiv nettoeffekt från bärplanet och det totala motståndet har på så vis minskat. Därmed kommer motståndet i låga farter vara större för ett skrov med bärplan, men vid högre farter kan ett minskat motstånd erhållas.

Två viktiga fenomen och potentiella problem hos bärplan är ventilering samt kavitation (Wall et al., 1989). Ventilering innebär att en del av bärplanet går upp från vattnet i luften och luft kommer åt ovansidan där det är ett lågtryck. Eftersom lufts densitet är mycket lägre än vattens så kommer bärplanet tappa mycket av sin lyftkraft och ger inte samma effekt. Kavitation bildas när vattentrycket blir så lågt att det går under dess ångtryck. Då börjar vattnet koka och när detta sker så tappar även bärplanet en stor del av sin lyftkraft (Faltinsen, 2006). Risker finns även att materialet skadas då gasbubblorna kan implodera, vilket skapar tryckimpulser på ytan (Larsson et al., 2022).

Vid val av bärplanen är det viktigt att ta hänsyn till hur närheten till vattenytan påverkar vingens lyftkraft (Larsson et al., 2022). När ett bärplan rör sig nära vattenytan uppstår en hydrodynamisk interaktion där tryckskillnaderna över och under profilen deformerar vattenytan. Detta resulterar i en vågtopp framför vingen och en vågdal bakom. Denna deformation minskar undertrycket på vingens ovansida och leder till förlust av lyftkraft. På sin topp kan detta vara upp till 50 procent av lyftkraften jämfört med om profilen är djupare i vattnet. Detta fenomen fungerar i praktiken som en passiv och stabiliserande höjdkontroll för farkosten vid högre hastigheter och om båten stiger för högt, sjunker lyftkraftskoefficienten (C_L) automatiskt.

2.3.1 Vingprofilers strömningsegenskaper

Runt en kropp som färdas i ett visköst medium bildas ett tunt lager, kallat gränsskikt (Abbott & Doenhoff, 1959). I detta lager förekommer huvudsakligen två typer av flöden, turbulent och laminärt samt en övergångsfas där emellan. Dessa flöden har olika egenskaper och stor påverkan på profilen, det laminära är jämnt och fritt från virvlar medan det turbulenta är dominerat av kraftiga virvlar. I gränsskiktet varierar hastigheten hos det viskösa mediet från noll nära kroppen till full hastighet i den yttre delen. Virvlarna bildar en överföring av rörelsemängd från den höga relativa hastigheten i det yttre gränsskiktet till den låga hastigheten nära kroppens yta. Effekten blir att rörelsemängden flyttas närmare ytan av kroppen vilket resulterar i en ökad medelhastighet i mediet som i sin tur ökar ytfriktionsmotståndet. Därför har ett turbulent flöde högre ytfriktionsmotstånd än laminärt flöde.

Övergången från laminärt till turbulent flöde sker vid ett kritiskt värde på Reynoldstal (Abbott & Doenhoff, 1959). Talet påverkas av V hastigheten av flödet, ρ vätskans densitet, L karakteristiska längden, samt μ viskositeten. Vid låga Reynoldstal dämpas alla störningar ut av viskositeten, men när talet ökar nås en punkt där störningar förstärks och slutligen orsakar en övergång. Denna process kan påskyndas av faktorer som ytans ojämnheter eller turbulens i den omgivande strömmen.

För en kropp som färdas genom ett medium förekommer två stagnationspunkter där flödet står helt stilla, för en cylinder är dessa punkter vid 0 och π radianer i förhållande till flödesriktningen (Abbott & Doenhoff, 1959). I flödet över en vingprofil förekommer en varierande hastighet och tryckfördelning. Detta påverkas av tjockleksfördelningen, alltså välvningen på profilen samt anfallsvinkeln som är vinkeln mellan vingprofilen och det relativa flödet. Lyftkraften i varje punkt längs vingprofilen bestäms av hastighetsskillnaden mellan ovan- och undersidan profilen. Till detta antas även hastighetsförändringen mellan ytorna vara proportionell mot varandra. Hastighetsförändringen över profilen beskrivs med förhållandet $\Delta v/V$. Där Δv är hastighetsförändringen orsakad av vingens välvning och V är den fria flödes hastigheten. Vid noll anfallsvinkel är den lokala hastigheten som störst där profilen är som tjockast. Där den lokala hastigheten är som störst är även trycket som lägst. Efter denna punkt sker en hastighetsminskning som resulterar i en tryckökning längs vingens bakre del. Om denna tryckökning är för stor, tvingas strömningen avvika från profilen vilket kallas separation. Då det turbulenta flödet har en större rörelsemängd nära profilen, är det mindre känsligt för separation än det laminära.

Vid mindre anfallsvinklar är flödet vanligtvis laminärt fram till den första punkten för minimitryck, därefter separerar flödet kortvarigt för att sedan återansluta till ytan som ett turbulent gränsskikt hela vägen till bakkanten (Abbott & Doenhoff, 1959). När anfallsvinkeln och lyftkraften ökas förändras punkten för separation då platsen för minimitrycket flyttas längre fram på ovansidan. Detta skapar ett kraftigt undertryck nära framkanten, vilket i sin tur minskar den del av vingen som har laminärt flöde. Den resulterande ökningen av turbulent flöde leder till ett ökat motstånd.

Valet av vingprofiler står i relation till både hydrodynamisk effektivitet och det aktuella Reynoldstalet

(Re) (Larsson et al., 2022). För bärplan som primärt ska generera lyftkraft i en riktning framhålls asymmetriska, alltså välvda profiler som effektivare än symmetriska profiler. Detta eftersom dessa genererar lyftkraft redan vid noll graders anfallsvinkel och generellt erbjuder ett högre förhållande mellan lyftkraft och motstånd (C_L/C_D).

2.3.2 Tredimensionell vinge

De teoretiska egenskaperna hos en tvådimensionell vingprofil förändras när den appliceras på en tredimensionell vinge med fria ändar (Larsson et al., 2022). När en vinge genererar lyftkraft uppstår en tryckskillnad mellan dess två sidor. Eftersom en verklig vinge har en ändlig utsträckning, kommer trycket att sträva efter att utjämna sig genom att strömma runt vingspetsarna. Detta fenomen skapar roterande virvlar som släpper från vingen och följer med strömningen bakåt. Dessa spetsvirvlar har två huvudsakliga konsekvenser för vingens prestanda, minskad lyftkraft och ett extra motstånd som kallas inducerat motstånd. För att beräkna den faktiska lyftkraftskoefficienten för en tredimensionell vinge med fria ändar används följande formel

$$C_L = \frac{C_{L,2D,1^\circ}}{1 + \frac{2}{AR}} \cdot \alpha. \quad (2.9)$$

C_L är den totala tredimensionella lyftkraftskoefficienten för vingen. $C_{L,2D,1^\circ}$ är den tvådimensionella lyftkraftskoefficienten per grad anfallsvinkel, vilket är det teoretiska värdet för själva profilen utan effekterna vid profilens vingspetsar. AR är vingens sidoförhållande och α är den aktuella anfallsvinkeln, angiven i grader.

3 Metod

För att studera bärplans inverkan på båten genomfördes först insamling av data för den fullskaliga båten för att därefter genomföra modelltester i skala 1:5. Inledningsvis utfördes en informationssökning om bärplan och tidigare genomföranden av tester parallellt med tillverkning av en testmodell av Stigfjord 650 CAT. Med informationssökningen som grund utfördes en teoretisk utvärdering av olika bärplansprofiler och möjliga positioneringar på modellen. Den lämpligaste bärplansprofilen tillverkades med tre olika positioner och avslutningsvis utfördes tester med modellen.

3.1 Fullskalig båt

För att skapa en representativ modell av den fullskaliga båten vägdes båten samt balanserades för att hitta tyngdpunkten. Vägningen gjordes i samband med att båten lyftes med kran, där en våg placerades och kalibrerades mellan kranens krok och båten. Båtens specifikationer redovisas i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Båtens specifikationer.

Egenskap	Värde
Massa (utan bränsle och olastad)	1550 kg
Längd	6,50 m
Bredd	2,60 m
Djupgående	0,35 m
Tyngdpunkt (Längd från aktern)	2,35 m

Båten testkördes även för att fastställa båtens trimvinkel vid hastigheterna 20, 23 och 29 knop. I alla fallen stabiliserades båten på en trimvinkel runt 4 grader. Vid testkörningen dokumenterades även hur båten låg i vattnet vid de testade hastigheterna. Från figur 3.1, 3.2 och 3.3 tillsammans med iakttagelser på plats kan slutsatsen dras att båten lyfts högre upp och får en minskad våt yta vid de två högre hastigheterna.

Båtens brukare är nöjda med de nuvarande sjöegenskaperna då båten går mjukt och tryggt även i större sjö. Den största begränsningen för användaren gällande bekvämlighet är att båten tar mycket vatten över sig vid körning i hårdare vind i kombination med sidesjö. Katamaranskrovet ger båten god stabilitet och sjöegenskaper bedöms annars som goda där en positiv egenskap är att den alltid går mjukt genom vågor.



Figur 3.1: Fullskaliga båten vid 20 knop.



Figur 3.2: Fullskaliga båten vid 23 knop.



Figur 3.3: Fullskaliga båten vid 29 knop.

Den fullskaliga båtens vikt uppmättes till 1550 kg. Båtens normala vikt uppskattades till 1750 kg. Detta baserat på en full bensintank om 120 liter, motsvarande 90 kg, en förarvikt på 80 kg och normala utrustning på 30 kg.

Båten framförs i vissa fall med en förare och maximalt sju passagerare. De extra sju passagerarna uppskattades väga 100 kg vardera inklusive tillhörande utrustning för dagsarbetet samt 50 kg extra material eller utrustning utöver detta. Detta ger en totalvikt på 2500 kg, vilket motsvarar det andra lastfallet.

Det finns även möjlighet att ta ombord mindre fordon och ett vanligt lastfall är därför en fyrhjuling på fördäck. En vanlig fyrhjuling uppskattades väga 400 kg och representeras av ett tredje lastfall som totalt väger 2150 kg. Detta ger tre vanliga lastfall vars totalvikter finns sammanställda i tabell 3.2.

Tabell 3.2: Totalvikter för olika lastfall.

Lastfall	Lastfall 1	Lastfall 2	Lastfall 3
Totalvikt [kg]	1750	2500	2150

3.2 Tillverkning av modell

Den fullskaliga båten tillverkas i små volymer och i flera utföranden. Därför krävdes en modell för att representera den specifika båten så verklighetstroget som möjligt. Det ansågs lämpligt att göra detta

med hjälp av Computer-Aided Design (CAD) för att underlätta processen vidare i arbetet. Följande sektion presenterar metodiken för tillverkningen av modellen.

3.2.1 Skanning och digital 3D-modellering

Tillverkningen inleddes med att skapa en bild av den fullskaliga båtens former och dimensioner. Då utförliga spantritningar och CAD-modell av båten saknades behövde det faktiska katamaranskrovet mätas för att skapa en verklighetstrogen modell. Eftersom den verkliga båten låg infrusen i vattnet vid mätningstillfället och möjligheten att lyfta upp den på land saknades utfördes i stället mätningar på formen som båtmodellen tillverkas med. Mätningarna bestod av att dokumentera kritiska dimensioner på båtformen, fotografering samt 3D-skanning av formen. För 3D-skanning användes appen Polycam (Polycam, n.d.) med en iphone 15 Pro utrustad med Light Detection and Ranging (LiDAR).

Dimensionerna från mätningen användes för att skapa en fullskalig CAD-modell med korrekt geometri och dimensioner i CAD-programmet Autodesk Fusion (AUTODESK, n.d.-a). Genom att jämföra skanningen med uppmätta dimensioner av formen säkerställdes det att CAD-modellen stämde överens med den verkliga båten. Den fullskaliga modellen skalades ned till 1:5 och anpassades för att möjliggöra tillverkningen av den fysiska modellen, se figur 3.4.



Figur 3.4: Färdigställd modell i CAD.

3.2.2 Massberäkningar

För att skalmodellen skulle uppfylla samma dynamiska samband som för den fullskaliga båten måste även massan vara skalenlig. Detta beräknades med ekvation (2.8). För lastfall 1 beräknades modellens massa enligt

$$m_{modellskala} = m_{verklig} \frac{1}{5^3} = 1750 \text{ [kg]} \cdot \frac{1}{5^3} = 14 \text{ [kg]} \quad (3.1)$$

I tabell 3.3 är massorna för skalmodellen listade för alla tre lastfallen. Massorna skalades på samma sätt som lastfall 1 i ekvation (3.1).

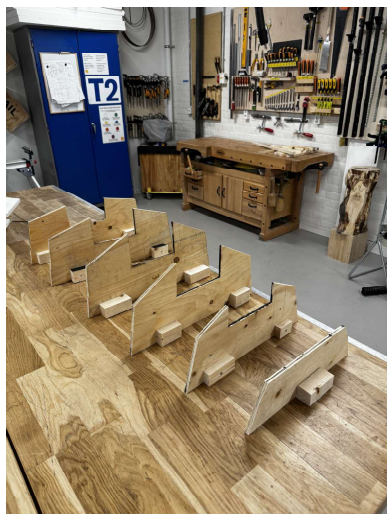
Tabell 3.3: Skalade massor för skalmodellen för de olika lastfallen.

Lastfall	Lastfall 1	Lastfall 2	Lastfall 3
Massa för modell [kg]	14	20	17,2

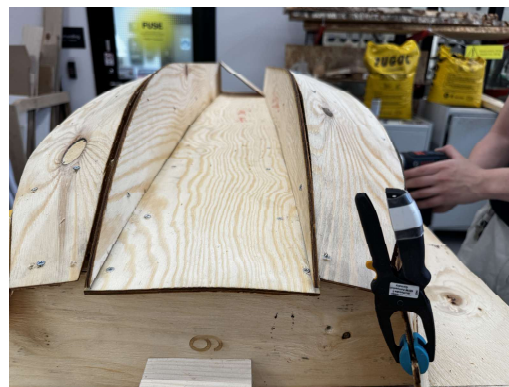
3.2.3 Fysisk modell

CAD-modellen användes som underlag för att skapa modellens spant samt skrovytor genom laserskärning av plywood, se figur 3.5. Spanten tillverkades i 10 mm tjock plywood och deras positioner i x-, y- och z-led mättes i CAD-modellen. Med de givna positionerna monterades spanten sedan noggrant på en basplatta. När precisionen i spantens montering hade säkerställts applicerades skrovytorna,

utskurna ur 4 mm tjock plywood. Denna plywoodtjocklek valdes då den lätt går att böja, trots detta behövde 2 mm djupa avlastningssnitt samt vattenbehandling göras för att kunna forma plywooden till skrovets form. Skrovytorna fästes med skruv i spanten. Resultatet blev en verklighetstrogen form, dock fanns enstaka glipor mellan skrovytorna, se figur 3.6.



Figur 3.5: Spant som sedan ska kläs in med plywood och bilda skrovformen.



Figur 3.6: Form med glipor under byggprocess.

Då det är viktigt att formen är verklighetstrogen spacklades gliporna igen med glasfiberspäckel som sedan slipades ner för att följa skrovets form. Ytterligare ett steg som togs för att förbereda formen för glasfiber var att skruvarna på skrovytan skruvades in mer eller slipades ner för att bidra till en slätare yta. Efter detta mättades plywooden med ett lager polyester, då trä absorberar fluider, såsom polyester. Detta gjordes för att förhindra att träet skulle suga åt sig all polyester som fanns tillsammans med glasfibermattan.

För att tillverka det yttre skrovet i glasfiber användes metoden "wet-layup" vilket innebär att en matris, i detta fall polyester, appliceras på en armering, glasfibermatta, med en viktfördelning på 50/50, alltså 300 gram glasfiber blandades med 300 gram polyester. Kompositens främsta egenskaper är en låg vikt med hög styvhet. Kompositen lades i två lager för att säkerställa vattentäthet samt strukturell styvhet. Kompositen härdade i runt 30°C i en vecka med hjälp av cellplast och värmefläkt, se figur 3.7.

Efter härdningen slipades kompositen för att ge en bra fästyta för ett lager gelcoat blandat med paraffinlösning i blandningsförhållande 1:0,02. Denna blandning gjordes då gelcoat vanligtvis härdar hårt på insidan men på grund av kontakt med luft förekommer syreinhibitering och gelcoaten får då ett gummiliknande ytskikt. Genom tillsättning av paraffinlösningen härdar gelcoaten till ett hårt ytskikt. Gelcoaten härdade i runt 30°C i ett dygn, se figur 3.8 och slipades sedan till en fin yta med P800-sandpapper. Vid slipningen lades fokus på att uppnå en speciellt fin yta för skrovet som går under vattenytan.



Figur 3.7: Härdning av kompositen med hjälp av cellplast och värmefläkt.



Figur 3.8: Härdning av gelcoat innan slipning.

Resultatet blev en skalenlig modell till båten i skala 1:5 med massan 8,6 kg. Efterarbete utfördes på spanten för att minska båtens massa. Genom att skära stora delar av spanten minskades båtens massa till 6,4 kg. För att sedan säkerställa korrekt tyngdpunkt i modellen placerades vikter på lämpliga positioner för att efterlikna båtens massfördelning och lastförhållanden i fullskala. Då båtens verkliga massa är 1750 kg och skalan är 1:5 placerades vikter i modellen tills modellen vägde 14 kg och hade korrekt tyngdpunkt.

Efter tillverkningen testades båtens flytförmåga i en bassäng, se figur 3.9, där det konstaterades att båtens skrov ej var tätt och vatten läckte in från några ställen. Ställen det främst läckte vid var skarpa hörn, såsom vid kölen samt längst bak. Båtens skrov täcktes med ett lager gelcoat på utsidan och ett lager polyester på insidan. För att säkerställa kursstabilitet hos modellen vid de fysiska testerna, 3D-printades två roder med symmetrisk NACA 4-serie profil och monterades på akterspegeln, se figur 3.10.



Figur 3.9: Test av båtens flytförmåga efter in-vägning.



Figur 3.10: Fastmonterade roder på modellen.

3.3 Befintliga bärplanskoncept

I denna sektion redovisas och sammanfattas den information som samlats in genom att studera tidigare kända bärplanskoncept. Detta har lagts till grund för designval gällande bärplan som redovisas i efterföljande sektion.

Faltinsen skriver att det finns tre vanliga konfigurationer av bärplanskonfigurationer (Faltinsen, 2006). Det första konceptet som beskrivs är det som kallas för "Konventionellt" och är då fordonet har ett större bärplan fram och ett mindre bak. Vidare beskrivs "Canard" konceptet som ett mindre bärplan fram och större bak samt "Tandem" konceptet med ett bärplan fram och en bak som är lika stora. Alla dessa tre har sina olika fördelar och används främst beroende på tyngdpunktens position i relation till båtens längd. Canard-konceptet beskrivs som det mest frekvent använda i industrin för båtar som använder sig av bärplan. En tydlig korrelation mellan dessa koncept är att de alla innehåller en uppsättning av två bärplan, ett i fören och ett i aktern, på var sin sida om tyngdpunkten.

K.G.W. Hoppe beskriver sitt eget koncept "Hysucat" som är ett vanligt koncept för katamaraner som färdas i högre farter (Hoppe, 1989). Konceptet bygger på att bärplan monteras i tunneln på katamaranen för att på så sätt delvis lyfta upp båten ur vattnet. Detta då ett bärplan har mycket högre lyftkraft i relation till sitt hydrodynamiska motstånd än ett båtskrov. Med hjälp av detta minskar båtens våta yta och det totala motståndet från vattnet. Konceptet innehåller ett större bärplan som lyfter en stor del av båtens vikt monteras strax föröver båtens tyngdpunkt. Även två små trimplan som sitter på tunnelns väggar positionerat nära aktern bidrar till att bibehålla en god trimvinkel för båten. Tillsammans ska bärplanen lyfta upp ca 45% av båtens totala vikt.

Hoppe beskriver vidare hur elektriska reglersystem i mindre båtar blir stora och komplexa (Hoppe, 1989). Därför bygger konceptet på en självinställande princip då båten närmar sig högre farter så kommer bärplanen närma sig vattenytan. När bärplanen närmar sig vattenytan störs flödet runt profilen, se sektion 2.3. På så sätt kommer bärplanen generera mindre lyftkraft vilket resulterar i att bärplanet sjunker neråt igen och lyftkrafterna stiger. Med denna principen så ställer båtens trimvinkel automatiskt in med hjälp av bärplanen utan extern reglering. Även de mindre bärplanen i aktern arbetar på detta vis och fungerar som trimplan. Dessa har enligt Hoppes studier fungerat väldigt bra för att säkerställa båtens trimvinkel men även förebygga galoppering.

På grund utav att bärplanen befinner sig i ytskiktet mot vattenytan så dimensioneras bärplanen utefter detta. Då bärplanen tappar mycket av sin lyftkraft i ytskiktet så bygger Hysucat-konceptet på att dimensionera upp bärplanens area jämfört med andra bärplan som vanligtvis går djupare i vattnet (Hoppe, 1989). Det främre och större bärplanet har även en svept form bakåt, utformat likt en pil sett underifrån. Orsaken till detta ska vara bättre gång i sjö då bärplanet kan penetrera vattenytan hos vågarna lättare.

3.4 Val av bärplanskoncept

Denna sektion dokumenterar stegen för att ta fram ett lämpligt bärplanskoncept för skalmodellen. Processen inkluderar dimensionering av area, utformning och sällning av olika bärplansprofiler.

3.4.1 Dimensionering av bärplan

För att dimensionera det främre bärplanet användes formeln för ett bärplans lyftkraft, se ekvation (2.1). Då krävdes det först att konstatera de kända konstanter som gäller under testerna.

Då båten framförs i Skagerrak på Sveriges norra västkust utgår dimensioneringen från densiteten i saltvattnet. Från grafen hos (SMHI, n.d.-a) uppskattades salthalten i grunt vatten på västkusten till ca 30-35 g/kg och därav den totala densiteten för vattnet till ca 1025 kg/m³. Det bestämdes att bärplanet skulle dimensioneras för lastfall 2 då massan är som störst och båten uppskattades gå som tyngst. Önskvärd lyftkoefficient uppgår till 0,45, se sektion 3.4.2. I modellskala motsvarade detta då 20 kg som bärplanet för modellen dimensionerades utifrån, se tabell 3.3.

Beräkningen av bärplanets area gav då följande, se ekvation (3.2).

$$A = \frac{2 F}{\rho U^2 C_L} = \frac{2 \cdot 0,45 \cdot mg}{\rho U^2 C_L} = \frac{2 \cdot 0,45 \cdot 20 \cdot 9,81}{1025 \cdot 5,75^2 \cdot 0,45} \approx 0,0116 \text{ [m}^2\text{]}. \quad (3.2)$$

Då bärplanet är avsett att sitta inne i skalmodellens tunnel, vid en position där bredden är konstant 15 cm kan den tänkta kordlängden enkelt lösas ut på följande vis, se ekvation (3.3)

$$l = \frac{A}{b} = \frac{0,0116}{0,15} \approx 0,0773 \text{ [m]}. \quad (3.3)$$

För att inte underdimensionera bärplanet avrundades kordlängden uppåt till 7,8 cm.

Baserat på den framtagna kordlängden kan Reynoldstalet som gäller för flödet runt bärplanet tas fram. Sedan tidigare är det känt att densiteten är ca 1025 kg/m³, hastigheten är 5,75 m/s och en kordlängd på 7,8 cm. Vattnets viskositet vid 10°C avläses till 1307 μPa s (Kestin et al., 1978).

Ekvation (2.5) gav då

$$Re = \frac{\rho \cdot v_\infty \cdot L}{\mu} = \frac{1025 \cdot 5,75 \cdot 0,078}{1307 \cdot 10^{-6}} \approx 3,5 \cdot 10^5. \quad (3.4)$$

Resultatet var att ett Reynoldstal på ca 3,5 · 10⁵ som kan observeras i ekvation (3.4). Detta värde användes senare i simuleringar för att kunna evaluera olika bärplansprofiler, se sektion 3.4.2. Viktigt att notera är att detta värde inte går att direkt överföra till den fullskaliga båten. Ett lämpligt bärplan i fullskala behövs därför dimensioneras efter den skalade vikten och utvärderas med ett justerat Reynoldstal, se sektion 2.2.

3.4.2 Utformning av bärplanskoncept

För att ta fram ett lämpligt bärplan fanns det många faktorer att ta hänsyn till. För att identifiera vad som var viktigt för att bestämma ett fungerande bärplan studerades tidigare bärplanskoncept där information inhämtades om andra försök att tillämpa bärplan mellan skroven på katamaraner. För detaljerad information om tidigare bärplanskoncept, se sektion 3.3. Informationen indikerade att följande punkter är viktiga att ta hänsyn till:

Uppsättning Det finns många olika sätt att placera bärplan på för att minska vattenmotståndet (Hoppe, 1989). Placering av ett enstaka bärplan på en bestämd punkt för om tyngdpunkten kunde ge en stor minskning av vattenmotståndet. Däremot är ett enstaka bärplan känsligt för fenomenet galoppering, se sektion 2.1.2. Ett sätt att motverka galoppering är att använda sig av bärplan i aktern, vilket ger upphov till en självinställande effekt. Uppsättningen med ett större bärplan för om tyngdpunkten samt två mindre trimplan i aktern är tillämpade i Hysucat-konceptet. De uppsättningar med bärplan som ansågs rimliga att utvärdera var:

- Ett bärplan för om tyngdpunkten
- Ett bärplan för om tyngdpunkten med små trimplan i aktern, det s.k Hysucat-konceptet (Hoppe, 1989).

Hysucat-konceptet presenterar många fördelar och framförallt en åtgärd för att motverka galoppering, således valdes denna uppsättning för vidare utvärdering.

Form på bärplanet Geometrin på bärplanet har stor påverkan på både strukturell styrka och lyftkraft. Vanliga utföranden är att ha ett rakt bärplan mellan skroven eller att ha ett bakåtsvept bärplan. Det raka bärplanet har en strukturell fördel då det böjande momentet blir avsevärt mycket mindre. Det finns emellertid fördelar med ett svept bärplan, exempelvis dess lyftprestanda i ytskiktet och dess fördel i vågor (Hoppe, 1989). Formen påverkar hållfastheten främst genom vridning runt

infästningarna, för en schematisk bild av detta samt en jämförelse mellan svepta och raka bärplan, se figur 3.11. Således valdes det raka bärplanet som en del av det valda bärplanskonceptet.



(a) Figuren visar ett svept bärplan och det resulterande vridande momentet runt infästningarna

(b) Figuren visar ett rakt bärplan och det resulterande vridande momentet runt infästningarna

Figur 3.11: Jämförelse mellan vridande moment runt infästningarna för ett svept och ett rakt bärplan. Det raka bärplanet har ett mindre avstånd till infästningarna vilket innebär ett mindre vridande moment.

Hållfasthet För att analysera hållfastheten modelleras bärplanet som en balk, utsatt för en utbredd last och fast inspänd i båda ändarna. De faktorer som påverkar hållfastheten är material, form och profil. Då formen och materialet är bestämda beror hållfastheten i sista steget på profilen där yttröghetsmomentet skiljer sig mellan de olika profilerna. Yttrögheterna räknas ut för varje profil i Autodesk Inventor (AUTODESK, n.d.-b) och används som kriterium i en sällningsmatris, se figur 3.17.

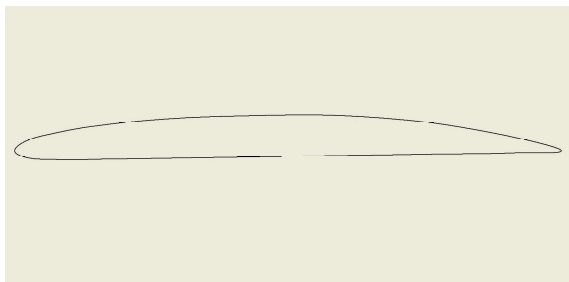
Lyftkraft Lyftkraften i bärplanet bestämdes genom att införa en önskad verksam lyftkoefficient, C_L , på 0,45 för skalmodellen. Detta då Hoppe visar i sitt koncept att med oändlig vattenhöjd över sitt isolerade bärplan med ändplattor konstateras en lyftkoefficient på 0,45 (Hoppe, 1989). Genom att sedan simulera bärplansprofiler i 2D med Xfoil 6.99 (Drela & Youngren, 2001) kunde lyftkoefficienter för de olika profilerna tas fram. För att få en uppskattning på den verkliga prestandan gjordes ett antagande att tunnelväggarna vid bärplanets sidor förhindrade ändvirvlar och att ingen kompensation för detta behövdes. Ett bärplan som verkar i en fri vattenvolym förlorar annars mycket lyftkraft till detta fenomen (Larsson et al., 2022).

Ventilering och ytskiktsprestanda Då bärplanet antas befinna sig i ytskiktet under testerna är det viktigt att bedöma hur väl bärplanet kommer prestera. Som beskrivet i 2.3 kan lyftkraften minska avsevärt i gränsskiktet. Vidare förekommer också risken för ventilering vilket även det sänker bärplanets lyftkraft. För att ta hänsyn till dessa två fenomen används en säkerhetsfaktor på 2 vid dimensioneringen, det innebär att verksamma C_L antas vara hälften av profilens C_L . För att jämföra profilernas ytskiktsprestanda antas ovansidan/sugsidan av bärplansprofilen inte bidra med lyftkraft. Antagandet gör att den verksamma C_L för varje profil som jämförs endast utgörs av integralen av C_L på undersidan av bärplanet, sett i graferna av C_P i appendix B.1. Integralerna beräknades med en Python kod och resulterade i ett väsentligt mindre värde än hela bärplanets lyftkoefficient (Python Software Foundation, 2026). Då C_L på en profils undersida beror på profilen används detta som ett urvalskriterium när bärplansprofil skall väljas. För framtagningen av grafer av C_P , se 3.4.3.

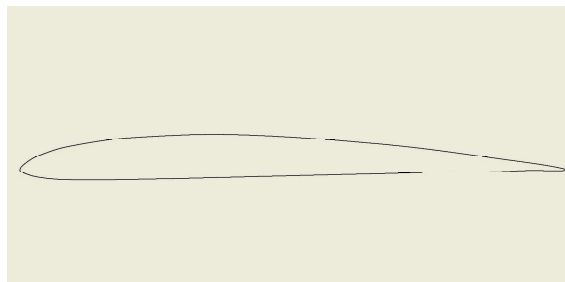
3.4.3 Sällning och val av bärplansprofil

Då många faktorer beror på profilen används en systematisk urvalsmetod för att jämföra och välja en bärplansprofil. Profilerna väljs baserat på dess prestanda i något eller flera av kriterierna. För att utvärdera profiler med hög lyftkoefficient vid låga anfallsvinklar valdes profilerna *GOE 11K*, se figur 3.12, och *GOE 622*, se figur 3.13. För profiler med högt yttröghetsmoment valdes *NACA 2408*, se figur

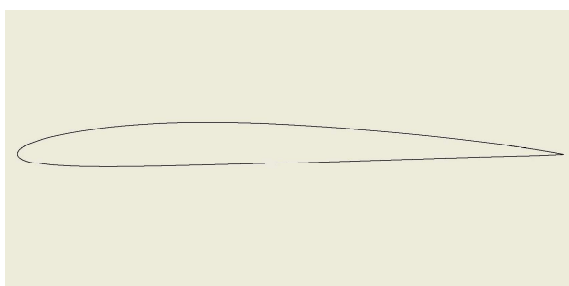
3.14, och *NACA 2414*, se figur 3.15, där *NACA 2408* är mer lik de två första profilerna och *NACA 2414* har avsevärt större yttröghetsmoment än alla andra profiler. Slutligen utvärderades också profilen *Wortmann FX60-100*, se figur 3.16, då den både har hög lyftkoefficient och högt yttröghetsmoment. Dessutom har profilen stort positivt tryck på undersidan vilket tyder på god prestanda i ytskiktet samt vid ventilering, se sektion 2.3 för bärplansteori. För att rangordna och jämföra de olika profilerna användes den systematiska metoden Kesselringmatris (Ulrich & Eppinger, 2014) med tillhörande värdeskalor. På detta sätt kunde profilerna jämföras objektivt med varandra för att finna den ideala lösningen.



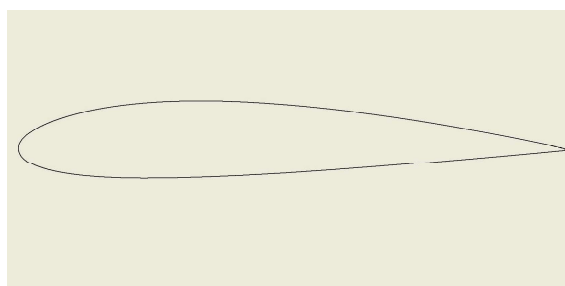
Figur 3.12: Illustration av profilen GOE 11K.



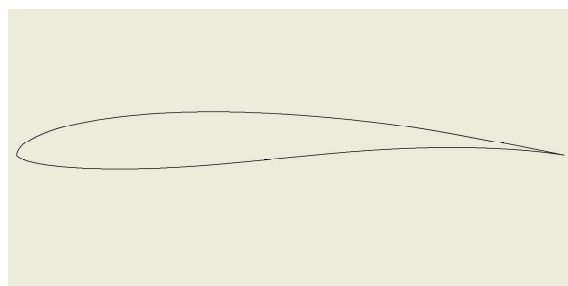
Figur 3.13: Illustration av profilen GOE 622.



Figur 3.14: Illustration av profilen NACA 2408.



Figur 3.15: Illustration av profilen NACA 2414.



Figur 3.16: Illustration av profilen Wortmann FX60-100.

I urvalet användes de fyra tidigare identifierade faktorerna som beror på profil, yttröghet, effektivitet/lyftkraft, prestation i ytskiktet samt risk för ventilering. Dessa gjordes sedan mätbara på olika sätt för att föras in i värdeskalor så att varje kriterium kan utvärderas. Yttrögheten gjordes mätbar genom att beräkna yttröghetsmomentet för varje profil vilket gav ett mätbart värde för varje profil. Beräkningarna gjordes för en profil med kordlängd på 78mm i Autodesk Inventor. För att jämföra profilernas lyftkraft beräknades kvoten C_L/C_D med programmet Xfoil 6.99 vilket ger ett mått på profilens lyftkraft i relation till dess motstånd, också benämnt som effektivitet. Dessa simuleringar gjordes med 250 iterationer, ett Reynoldsvärde på $Re = 350000$ samt en anfallsvinkel på $\alpha = 3^\circ$.

För att bedöma en profils risk för ventilering analyserades C_P över profilens längd, även dessa grafer gjorda i Xfoil 6.99. Se appendix B.1 för C_P -grafer på varje profil. Genom att observera det största negativa värdet för tryckkoefficienten C_P kunde profilerna jämföras med varandra där större negativa värden innebär en större risk för ventilering. Slutligen bedömdes prestationen i ytskiktet genom att beräkna integralen av undersidan/trycksidan på varje simulerad profil. Detta ger ett värde som representerar hur mycket lyftkraft varje profils undersida har vilket ger ett mätbart värde att utvärdera profilernas prestanda i ytskiktet. Med dessa mätbara kriterierna användes sedan en Kesselringmatrix för att rangordna profilerna på alla kriterier och den profil som presterade bäst valdes sedan. För att se uträknade värden för de olika profilerna, se tabell 3.4.

Tabell 3.4: Värden för de olika bärplansprofilerna

	GOE 11K	GOE 622	NACA 2414	NACA 2408	FX60- 100
Effektivitet	100,66	78,22	67,99	77,63	95,84
Yttröghetsmoment $[mm^4]$	831	823	4082	792	1283
Risk för ventilering	1,6	1,1	1,2	1,2	1,3
Prestation i ytskikt	0,197	0,140	0,075	0,129	0,225

Med de framtagna värdena ur tabell 3.4 kunde bärplansprofilerna utvärderas utifrån framtagna värdeskalor, se appendix B.2, och ges betyg utifrån dessa.

Chalmers		Kesselringmatris: Sällning av foilprofiler											
Utfärdare: MMXS21-VT26-03A				Skapad: 20260331				Modifierad: 20260421				Sid 1	
Kriterier		Alternativ											
		Ideal		GOE 11K		GOE 622		NACA 2414		NACA 2408		FX60-100	
Namn	w	v	t	v	t	v	t	v	t	v	t	v	t
Effektivitet (C_L/C_D)	0,3	5	1,5	5	1,5	3	0,9	2	0,6	3	0,9	5	1,5
Yttröghetsmoment	0,2	5	1	2	0,4	2	0,4	5	1	2	0,4	4	0,8
Risk för ventilering	0,2	5	1	1	0,2	5	1	4	0,8	4	0,8	3	0,6
Prestation i ytskikt	0,3	5	1,5	4	1,2	3	0,9	1	0,3	2	0,6	5	1,5
T (Totalt viktat värde)		20	5	12	3,3	13	3,2	12	2,7	11	2,7	17	4,4
T / T_{ideal}		1,00	1,00	0,60	0,66	0,65	0,64	0,60	0,54	0,55	0,54	0,85	0,88
Rangordning				2		3		4		4		1	
Beslut		Wortmann FX60-100											

Figur 3.17: Sällning med Kesselringmatrix.

För Kesselringmatrisen som användes, se figur 3.17. Profilerna evaluerades genom de viktade betygen som ett sammanvägt betyg för alla kriterier. Beslut blev att använda bärplansprofilen *Wortmann FX60-100*.

3.4.4 Aktre bärplan

Som beskrivs i sektion 3.3 placerar Hysucat-konceptet två mindre profiler i aktern av skrovet. Deras huvudsakliga funktion är att agera som trimplan för att säkerställa en förutbestämd trimvinkel för det planande skrovet. Detta motverkar även fenomenet galoppering, se sektion 2.1.2. För en båt som inte kräver en betydande lyftkraft i aktern, kan en symmetrisk profil vara att föredra för ett aktre bärplan (Larsson et al., 2022). Då testkörningar av den fullskaliga båten indikerat att den hydrodynamiska lyftkraften i första hand behövs förut, bedöms det lämpligt att ge de aktre profilerna en symmetrisk form. På detta sätt agerar de primärt som stabiliserande trimplan snarare än lyftande bärplan.

Den fullskaliga båtens trimvinkel i marschfart är 4° . För att anpassas till detta monteras trimplanen med en inbyggd negativ anfallsvinkel på -4° relativt skrovets baslinje. Detta medför att när båten intar sitt optimala gångläge, blir profilernas effektiva anfallsvinkel mot vattnet 0° , varvid ingen lyftkraft och motstånd minimeras. Strömningen runt profiler behandlas vidare i sektion 2.3.1. Om båtens gångläge störs och stäven reser sig, ökar trimplanens anfallsvinkel mot vattnet. Detta genererar ett lyft i aktern som tvingar ner stäven och motverkar vinkelförändringen, vilket stabiliserar skrovet. Trimplan optimerar ett skrovs trimvinkel för att minimera det totala motståndet (Savitsky & Brown, 1976). I ett räkneexempel genererar trimplanen en vertikal lyftkraft på 10 100 lbs för en båt med ett displacement på 186 000 lbs, vilket innebär att systemet i praktiken dimensioneras för att lyfta cirka 5,4 procent av båtens totala vikt.

För att vidare utvärdera denna teori genomfördes två jämviktssimuleringar när båten kör med 4° trimvinkel, en simulering där 5% av båtens lyftbehov placerades på det aktre bärplanet och en helt utan aktre lyftkraft. Resultaten visade att en konstant aktre lyftkraft krävde att det främre bärplanet optimala position flyttades fram för att bibehålla momentjämvikt. Följaktligen bedömdes den mest fördelaktiga konfigurationen vara att uteslutande använda de aktre profilerna som dynamiska trimplan. NACA 0012 ansågs vara godtycklig symmetrisk profil med tillräcklig tjocklek för att vara strukturellt lämplig för trimplanen. I tabell 3.5 presenteras värden för den valda profilen med olika anfallsvinklar beräknade i Xfoil 6.99.

Tabell 3.5: Lyftkraftskoefficient (C_L) som funktion av anfallsvinkel för NACA 0012 från Xfoil 6.99. Beräknat med $Re = 0,240 \cdot 10^6$.

Anfallsvinkel	C_L
-5°	-0,6223
-4°	-0,5368
-3°	-0,4387
-2°	-0,2744
-1°	-0,1193
0°	0,0000
1°	0,1193
2°	0,2744
3°	0,4387
4°	0,5368
5°	0,6222
6°	0,7020
7°	0,7786

För att säkerställa att skalmodellens stabilisatorer har tillräcklig förmåga att korrigera gångläget, dimensioneras de för att vid behov kunna generera en lyftkraft motsvarande 5% av modellens totalvikt med last på totalt 20 kg. Detta motsvarar ett maximalt lyftbehov på 1 kg. Lyftkraften beräknas enligt ekvation (2.1). Av hållfasthetsskäl designas modellens trimplan med ett lågt sidoförhållande, $AR = 2$. Denna korta och breda geometri gör dock att hänsyn måste tas till vingspetsvirvlar och 3D-effekter, vilket avsevärt reducerar den teoretiska lyftkraften. Denna korrigering beräknas med ekvation (2.9).

I tabell 3.6 redovisas den faktiska korrigerade lyftkraften vid en testfart på 11,7 knop när hänsyn tagits till de nämnda 3D-förlusterna. Beräkningen är baserad på en total area om $24,2 \text{ cm}^2$, vilket motsvarar $12,1 \text{ cm}^2$ per trimplan. C_L är baserat på värden från Xfoil 6.99 som presenteras i figur 3.5.

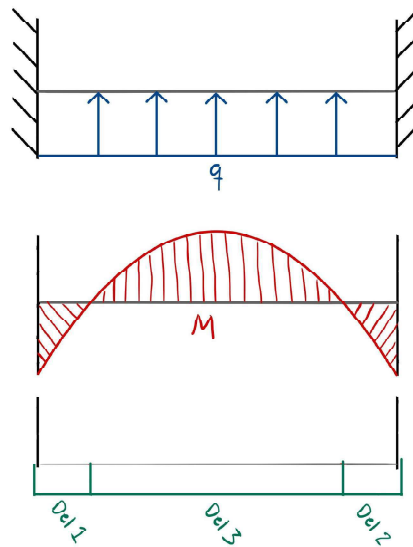
3.4.5 Tillverkning av bärplan

Bärplanen tillverkades med metoden 3D-printning och gjordes i kolfiberförstärkt PETG från RS Components. Bärplanet tillverkades i tre delar, två delar bestod av en vertikal sida samt 21% av bärplanetets bredd. Den tredje delen var 58% av bärplanetets bredd, alltså endast vingprofil. Bärplanet tillverkades medvetet så att skarvarna där bärplanet sammanfogades skulle uppleva nollmoment, se figur 3.18.

Tabell 3.6: Faktisk lyftkraft i 3D för skalmodell vid $AR = 2$ och hastighet 11,7 knop.

Anfallsvinkel	$C_{L,2D}$ (Teoretisk)	$C_{L,3D}$ (Verklig)	Lyftkraft (3D)
1°	0,1193	0,0597	ca 0,27 kg
2°	0,2744	0,1372	ca 0,61 kg
3°	0,4387	0,2194	ca 0,98 kg
4°	0,5368	0,2684	ca 1,20 kg
5°	0,6223	0,3112	ca 1,39 kg

Tillsammans med denna metod användes även två genomgående linor ståltråd genom alla tre delar för att minska risken för brott vid skjuvbelastning. Ståltråden samt de tre 3d-printade delarna sammanfogades med tvåkomponentlim. Bärplanen designades som utbytbara moduler med två väggar, se figur 3.19 och 3.20 för illustration. Genom att tillverka flera moduler med samma infästningspunkter och olika bärplanspositioner, kunde dessa på ett enkelt sätt bytas ut och testas. Läs vidare om positionerna i sektion 3.5.1. Denna lösning bidrog till att infästningshålerna hamnade ovanför vattenlinjen vilket minskar risken för vattenintrång. Denna design valdes även då det längst ner i skroven inte finns plats att skruva inifrån då modellens skrov är V-bottnade. Modulerna monterades parallellt med vattenlinjen, på detta sätt kunde rätt anfallsvinkel på bärplanet säkerställas. Modellens vattenlinje baserades på lastfall 1.



Figur 3.18: Böjmoment i bärplan vid fast inspänd balk.



Figur 3.19: Huvudbärplanet med infästning sett framifrån.



Figur 3.20: Huvudbärplanet med infästning sett ovanifrån.

De aktre bärplanen utformades för att skruvas in i skrovet längs bak. Dessa ritades även för att möjliggöra justering av anfallsvinkeln i efterhand, se figur 3.21. Anfallsvinkeln på bärplanen ställdes i förhållandet till vattenlinjen med ett digitalt vattenpass. Monteringen av bärplanen på modellen syns i bild 3.22.



Figur 3.21: Aktre bärplanet.



Figur 3.22: Modellen med alla bärplan monterade. Foto: Sten Örneblad.

3.5 Tester

Denna sektion redogör för hur tre bärplanspositioner bestämdes analytiskt utifrån de givna lastfallen, för att sedan testas på skalmodellen. Vidare beskrivs förberedelser, testutrustning, mätmetoder och själva utförandet.

3.5.1 Position av bärplan

Var bärplanen ska placeras beror på båtens tyngdpunkt som i sin tur beror på hur båten är lastad. För att få resultat som innefattar hela båtens användningsområde etableras tre lastfall, där lastfall 1 motsvarar en ensam förare på båten, lastfall 2 motsvarar åtta personer på båten och lastfall 3 motsvarar en förare och en fyrhjuling, se tabell 3.2. Lastfallen kompletterades med tillhörande masscentrum och definierades enligt tabell 3.7.

Placeringen av bärplanet bestämdes med en jämviktsmodell där kraftjämvikt i längd- och vertikalled samt momentjämvikt kring båtens tyngdpunkt löstes simultant för varje studerad bärplansposition och för varje lastfall. Skrovets hydrodynamiska egenskaper beskrevs med en modell baserad på Savitskys

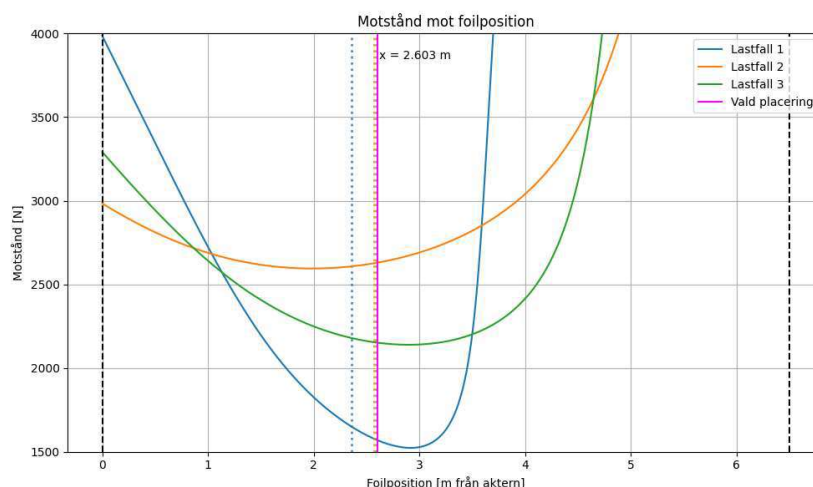
Tabell 3.7: Tabellen beskriver de tre lastfallen med massa och masscentrum på fullskalig båt och modell, som användes under framtagandet av den optimala bärplanspositionen.

Parameter	Lastfall 1	Lastfall 2	Lastfall 3
Motsvarande last	1 person	8 personer	Förare och fyrehjuling
Totala massan i verklig skala [kg]	1750	2500	2150
Skalenlig massa [kg]	14	20	17,2
Masscentrum verklig båt, från aktern [m]	2,362	2,569	2,597
Masscentrum skalmodell, från aktern [m]	0,4724	0,5138	0,5194

forskning (Daniel Savitsky, 1964) och löstes med python, se appendix A. I modellen antogs bärplanet ge en vertikal lyftkraft motsvarande 45% av båtens tyngd vid det tyngsta lastfallet.

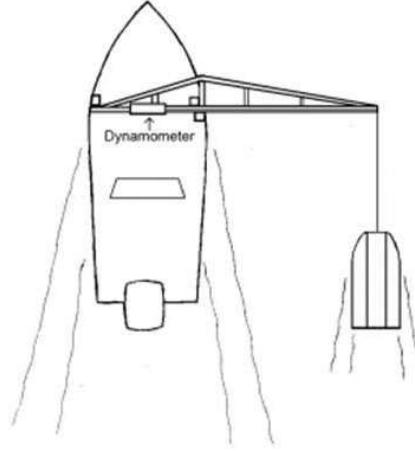
Bärplanets longitudinella placering varierades med olika lastfall. Jämviktsläget för varje studerad position löstes numeriskt, vilket gav båtens jämviktstrimvinkel τ , dimensionslösa våtlängdsparameter λ , erforderlig propellerkraft och det resulterande motståndet D .

Valet av bärplansplacering baserades därefter på hur motståndet varierade med bärplanets position för alla lastfall. Placeringen som valdes var den som genererade minst motstånd av lastfallen. Vid framtagning av den analytiska placeringen användes lastfallen i tabell 3.2. Den slutliga placeringen beräknades till 2,603 m från aktern, se figur 3.23. Placeringarna 2,853 m och 3,103 m från aktern valdes för att bedöma hur känslig båtens egenskaper är och hur motståndet varierar med placering. I modellen motsvarar det de slutgiltiga positionerna 0,52 m, 0,57 m, 0,62 m.



Figur 3.23: Figuren visar motstånd som funktion av bärplansposition för de tre olika lastfallen. De vertikala prickade linjerna är masscentrum för de olika lastfallen.

3.5.2 Utrustning och mätmetoder



Figur 3.24: Schematisk bild av testriggen (Sten Örneblad, n.d.).

Vid testerna drogs modellen bredvid en motorbåt med hjälp av en testrigg, se figur 3.24. Testriggen bestod av en våg, en bom placerad på båten och en bogserlina fäst mellan bommen och modellen. Bommen hade fasta infästningspunkter i bogserbåten och stack ut cirka fyra meter i sida från den. På detta sätt kunde modellen dras på en del av vattenytan som inte påverkas av bogserbåtens svall samt tillåta en lång längd för bogserlinan på fyra meter. Anledningen till den långa bogserlinan är att den vertikala kraftkomponenten från linan blir liten på skalmodellen vilket minskar effekten av att bogserlinan lyfter skalmodellen uppåt. Bogserlinan gick via en trissa längst ut på bommen mellan skalmodellen och vågen vilket gör att motståndskraften skalmodellen upplever kan utläsas som en vikt i enheten kg. Genom att bogsera skalmodellen i en bestämd hastighet kunde således vattenmotståndet mätas för den bestämda hastigheten. För en övergripande bild av testriggen, se figur 3.25. Hastigheten med korresponderande motstånd loggades genom att filma en telefon som hölls upp bredvid vågen och som visade GPS-hastigheten, med en decimals noggrannhet. För att hålla koll på vilket test som utfördes sades placering av bärplanet, lastfall och riktning i filmen. Efter testerna antecknades datan manuellt in i Microsoft Excel (Microsoft, n.d.). Även båten filmades under testerna för att dokumentera köregenskaperna för respektive fall.

Då skalmodellen skulle framföras i den verkliga båtens upplevda hastighet av 25 knop kalkylerades modellens hastighet enligt ekvation (2.4).

$$v_{\text{modell}} = v_{\text{verklig}} \sqrt{\frac{L_{\text{modell}}}{L_{\text{verklig}}}} = 25 \text{ [knop]} \cdot \sqrt{\frac{1}{5}} = 11,18 \text{ [knop]} = 5,75 \text{ [m/s]}$$



(a) Figuren visar bommen som användes till testtriggen med infäst våg och gul lina. Linan är fäst i vågen, som i sin tur är monterad till bommen med en skruv och tamp. Linan leds längs bommen till en trissa placerad vid bommens ände, där den ändrar riktning och används för att dra båten under försöket.



(b) Figuren visar bogserslinans infästning i vågen samt vågens koppling till bommen.

Figur 3.25: Testtriggens utformning för de fysiska modellförsöken. Figuren visar hur bommen, vågen och draglinan kopplades samman för att möjliggöra mätning av dragkraften under försöket.

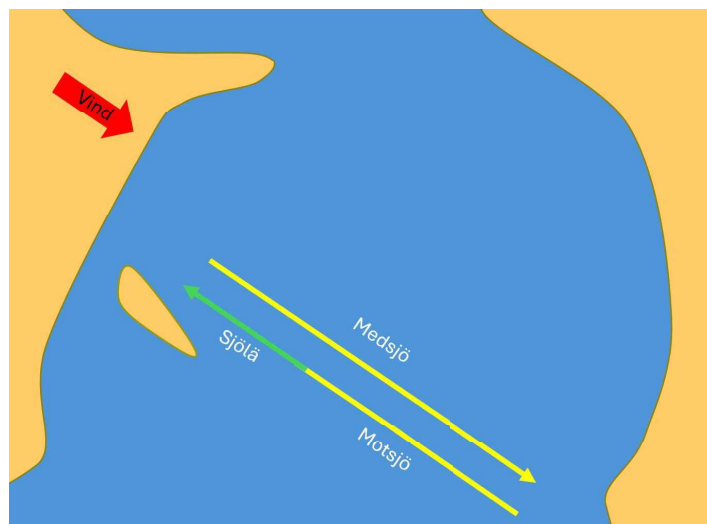
3.5.3 Fysiska tester med modell

Testerna utfördes i Trönningenäs under två dagar, den 23 och 24 april 2026, i syfte att undersöka hur modellbåtens beteende påverkades av olika lastfall och horisontella bärplanspositioner längs skrovet. Försöksserien, se tabell 3.8, bestod av att testa modellen för lastfall 1 och lastfall 2, och delades upp i två huvudkonfigurationer, med och utan bärplan. Då extremfallen ansågs representativa för båtens lastintervall exkluderades lastfall 3 från försöksserien. Varje testserie genomfördes både med och mot vågornas riktning.

Det noterades att vågor förekom på vattenytan där testerna genomfördes, således genomfördes tester där skalmodellen bogserades både mot och med vågornas riktning för att särskilja på olika sjöförhållanden. Testkörningen begränsades till sträckorna illustrerade i figur 3.26 på grund av vindriktning samt en minskad storlek på vågorna. Körsträckorna hade varierande vågförhållanden. Under den första testkörningen noterades det att de sista 15 sekunderna av testkörningarna i motsjö var i sjölä. Då sträckan i sjölä var kort och endast förekom i motsjötester beslutades det att inte särskilja på mätvärdena från denna delsträcka från övriga mätvärden i motsjö.

Tabell 3.8: Testmatris för modellförsök med olika lastfall och bärplanskonfigurationer. Varje serie genomfördes både med och mot vågornas riktning.

Serie	Konfiguration	Lastfall	Position
1	Utan bärplan	Lastfall 1	-
2	Utan bärplan	Lastfall 2	-
3	Med bärplan	Lastfall 1	Mittre
4	Med bärplan	Lastfall 1	Fram
5	Med bärplan	Lastfall 1	Bak
6	Med bärplan	Lastfall 2	Mittre
7	Med bärplan	Lastfall 2	Fram
8	Med bärplan	Lastfall 2	Bak



Figur 3.26: Illustration av testområdet.

Inför varje körning konfigurerades modellen enligt valt lastfall och bärplansposition. Lastfallen valdes för att representera belastningen och tyngdpunkten då båten framförs med en förare vid förarplatsen och då båten framförs med åtta personer ombord, en förare och sju passagerare med personlig utrustning. Positionerna av bärplanet som testades fanns på 0,52 m, 0,57 m och 0,62 m från aktern.

Under första dagen testades modellen med tre olika bärplanspositioner och två lastfall för respektive position, serie tre till åtta i tabell 3.8. Vid testkörningarna upptäcktes det att modellen tog in vatten under samtliga körningar. För att förhindra intaget av vatten inför resterande tester tätades modellen mellan skrovet och plastskivan med tejp vilket minskade intaget. Plastskivan tätades även med tejp vid öppningen för bogseröglan, se figur 3.27.



Figur 3.27: Vattentätning av modellen.

Baserat på resultaten från första dagens tester togs beslutet att sälla bort den bakre bärplanspositionen. Under andra dagen testades modellen för båda lastfallen med mitten och främre positionering av bärplanet samt utan bärplan, enligt serie ett, två, fyra, fem, sju och åtta i tabell 3.8. Testerna utan bärplan användes som referensvärden för hastighet och dragmotstånd vid analys för respektive lastfall och färdriktning.

3.6 Analys av mätdata

Mätdata analyserades genom en Python-kod. Mätfiler importerades och sorterades efter bärplansplacering, lastfall och färdriktning. Varje fil innehöll hastighet och motstånd för den aktuella körningen. Testerna i motsjö innehöll markerade mätvärden för de sista 15 sekunderna. Utöver att vara markerade behandlades inte dessa mätvärden på något annat sätt utan utvärderades tillsammans med samtliga andra mätvärden i motsjötesterna. I figur 3.26 visas sträckan för de 15 sista sekunderna av den gröna pilen där testkörningen gjordes i sjölä.

Analysen avgränsades till hastighetsintervallet 10 till 12 knop, vilket motsvarar 22,26 till 26,83 knop i upplevd hastighet hos skalmodellen. Giltiga motståndsvärden inom intervallen för varje kombination av bärplansplacering, lastfall och färdriktning samlades in. Därefter beräknades medelvärde, standardavvikelse och antal mätpunkter, n för respektive grupp. Värdena användes för att jämföra motståndet mellan olika bärplanspositionerna.

För att undersöka om skillnaderna i medelmotstånd var statistiskt signifikanta genomfördes ett tvåvägs ANOVA-test (bhuwanesh, 2025). Innan ANOVA-testet reducerades varje körning till ett medelmotstånd inom intervallet 10 till 12 knop. Det innebär att varje körning representerades av ett medelvärde i den statistiska analysen. ANOVA-testet genomfördes separat för lastfall 1 och lastfall 2, med bärplansplacering och färdriktning som faktorer. Signifikansnivån sattes till $\alpha = 0,1$. Efter ANOVA-testet genomfördes ett Tukey HSD-test för att undersöka vilka bärplanspositioner som skiljde sig från varandra parvis (SciPy, n.d.).

4 Resultat

Resultaten presenterade i sektionen erhöills under tester med modellen i Trönningenäs under två dagar. I tabell 4.1 presenteras rådande förhållanden under testdagarna (SMHI, n.d.-b). Data angående luft- och vattentemperatur är insamlad från mätstation Varberg (72050) respektive Varberg Sjö (35133). Data för vindstyrka och riktning är hämtat från mätstation Nidingen A (71190).

Tabell 4.1: Testförhållanden från testdagar (SMHI, n.d.-b).

Datum		2026-04-23	2026-04-24
Lufttemperatur	[°C]	12,5	12,46
Vattentemperatur	[°C]	8,32	8,14
Vindhastighet	[m/s]	6,6	5,9
Vindhastighet byar	[m/s]	7,5	6,7
Vindriktning	[Väderstreck]	NW	NW
Våghöjd	[m]	0,15	0,15

4.1 Kvantitativt resultat

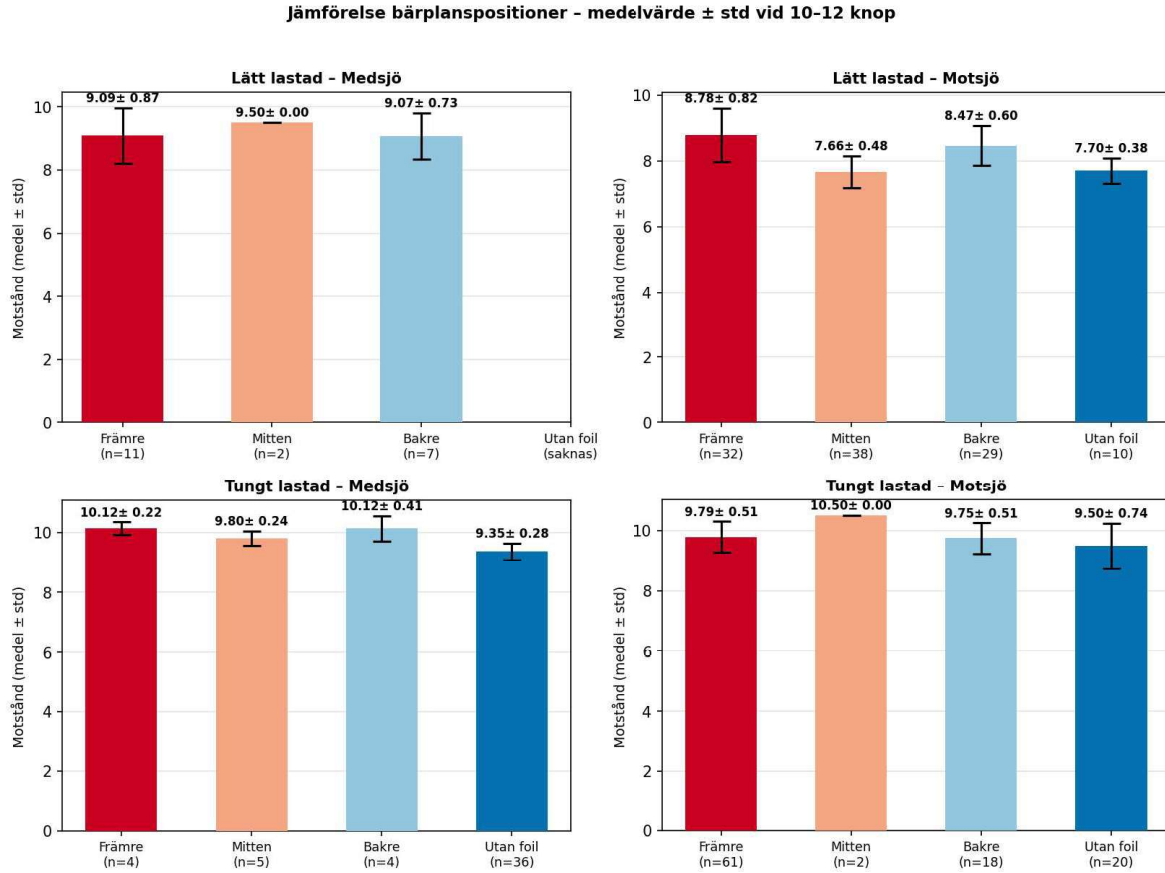
Resultaten från mätningarna uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning i figur C.1 visar mätdata från testerna med främre bärplansposition, figur C.2 visar mätdata från mittre bärplansposition, figur C.3 visar mätdata från bakre bärplansposition och figur C.4 visar mätdata från tester utan bärplan. Mätningar för varje bärplanskonfiguration grupperade hittas i figur C.5.

Medelvärde och standardavvikelsen inom intervallet 10 till 12 knop för de olika bärplanspositionerna redovisas i figur 4.1. Resultatet visar att modellen för lastfall 2, går lättare utan bärplan oberoende av färdriktning. Lastfall 1 i motsjö gav ett lägre medelvärde för mittre bärplanspositionen på $7,66 \pm 0,48$ kg, jämfört med lastfall 1 utan bärplan på $7,70 \pm 0,38$ kg. Det går ej att dra slutsatser för lastfall 1 i medsjö eftersom det saknas mätpunkter för fallet utan bärplan.

Tvåvägs ANOVA-test visade ingen signifikant skillnad mellan bärplanspositionerna för lastfall 1, $p = 0,6650$, medan färdriktningen var signifikant, $p = 0,0593$, vid en signifikansnivå $\alpha = 0,1$. Lastfall 2 visade en signifikant skillnad mellan bärplanspositionerna, $p = 0,0858$, medan skillnaden mellan färdriktningarna inte var signifikant, $p = 0,8492$.

Det efterföljande Tukey HSD-testet för bärplanspositionerna visade ingen signifikant parvis skillnad för lastfall 1. Lastfall 2 visade en signifikant skillnad mellan mittre bärplansposition och utan bärplan, där modellen hade 0,72 kg lägre last utan bärplan än med bärplan, $p = 0,0671$. Övriga parvisa skillnader var ej signifikanta.

Sammantaget visar de statistiska testerna begränsad signifikans. Resultaten indikerar vissa skillnader mellan konfigurationerna men det begränsade och obalanserade mätunderlaget gör att inga direkta slutsatser kan dras. Resultatens innebörd och osäkerhet diskuteras vidare i sektion 5.1 och sektion 5.2.



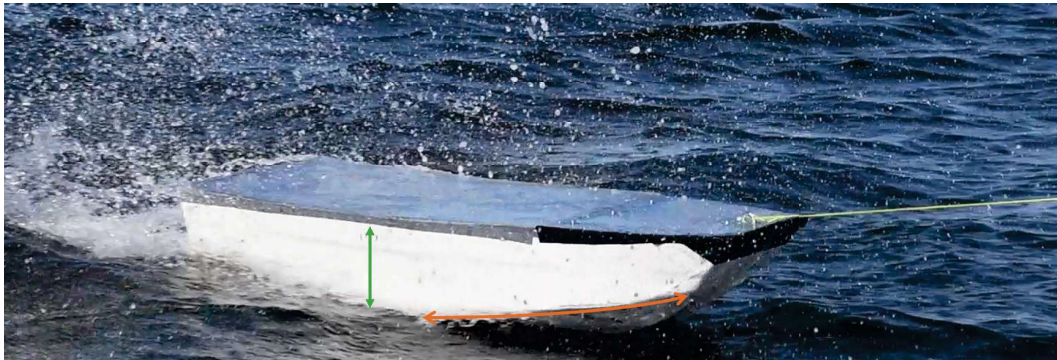
Figur 4.1: Medelvärde och standardavvikelse för motstånd i intervallet 10 till 12 knop för olika lastfall, riktning och olika bärplanspositioner. Antalet mätpunkter betecknas med n.

4.2 Kvalitativt resultat

Testkörningarna visade att modellen med bärplanet gick märkbart högre i vattnet än med utan bärplan. Detta syntes tydligast i att mer av friborden var synliga samt att mer av slaglinjen var synlig. Skillnaden kan observeras i figur 4.2 och figur 4.3, där höjden på fribordet är markerat i grönt samt längden på slaget är markerat i orange.



Figur 4.2: Modellen med bärplan i främre position i medsjö och lastfall 1.



Figur 4.3: Modellen utan bärplan i medsjö och lastfall 1.

För lastfall 1 observerades ingen markant skillnad i båtens beteende mellan de olika positioner av bärplanet. En tydligare skillnad mellan bärplanspositionerna observerades när lastfall 2 testades. Den främre bärplanspositionen gav en ökad lyftkraft på förskeppet, se figur 4.4. Med bärplanet i den bakre positionen gavs inte samma effekt och förskeppet gick djupt i vattnet, se figur 4.5.



Figur 4.4: Modellen med bärplan i främre position i medsjö och lastfall 2.



Figur 4.5: Modellen med bärplan i bakre position i medsjö och lastfall 2.

Vid körning i motsjö uppvisade modellen olika beteenden beroende på om den var utrustad med

bärplan och vilket lastfall som testades. Utan bärplan observerades en tydlig skillnad mellan lastfall 1 och 2. Figur 4.6 visar modellen under lastfall 1. I jämförelse med lastfall 2, vilket visas i figur 4.7, skvätter det mindre över modellen för lastfall 1 då den går högre i vattnet. Med bärplanet i någon av de två främre positionerna gick modellen högre och med mindre överskvätt även för lastfall 2. Denna effekt upplevdes störst med bärplanet i den främre positionen vilket syns i figur 4.8.



Figur 4.6: Modellen utan bärplan i motsjö och lastfall 1.



Figur 4.7: Modellen utan bärplan i motsjö och lastfall 2.



Figur 4.8: Modellen med bärplan i främre position i motsjö och lastfall 2.

Sett till samtliga testkörningar bidrog bärplanet till att lyfta båten högre ur vattnet, förutom i fallet

med bärplanet i den bakre positionen och lastfall 2. Vid körning i medsjö motverkade lyftkraften från bärplanet att modellen bromsades ner i den ikappkörda vågen i jämförelse med fallet utan bärplan. Vid körning i motsjö bidrog bärplanet även till att lyfta förskeppet mer över den mötande sjön. Från videoanalys framgår samtidigt att modellen med bärplan rör sig mer i vertikalt led. Detta syns tydligast i att båten rör sig mer på vågorna än modellen utan bärplan, där skrovet låg djupare i vattnet.

5 Diskussion

Syftet med arbetet var att studera hur bärplan placerat mellan ett katamaranskrov påverkar det hydrodynamiska motståndet vid marschfart. Genom tester i modellskala med olika placeringar av bärplan och lastfall ämnade arbetet att öka lyftkraften och minska motståndet vid olika lastförhållanden. I följande sektion behandlas resultaten erhållna från testerna, frågeställningar och potentiella felkällor.

5.1 Mätdata och försöksosäkerheter

Vid analys av de enskilda mätpunkterna i appendix C, framgår att motståndet generellt ökar med hastigheten. Samtidigt finns en tydlig spridning mellan mätpunkter vid liknande hastigheter. En möjlig förklaring till detta är att modellen inte alltid befann sig i samma rörelsetillstånd under mätningarna. Vid försöken observerades att det uppmätta motståndet blev högre när modellen accelererade, medan lägre motståndsvärden uppmättes när modellen saktade in. Det innebär att två mätpunkter vid samma hastighet inte nödvändigtvis är direkt jämförbara om den ena registrerades under acceleration och den andra under inbromsning. Detta kan ha påverkat medelvärdena inom intervallet 10 till 12 knop, eftersom mätpunkterna inom intervallet kan komma från olika delar av körningen. Spridningen i mätdata beror därför sannolikt inte enbart på bärplansposition, lastfall eller färdriktning, utan även på hur stabil hastigheten var vid mättillfället.

Antalet mätpunkter inom intervallet 10 till 12 knop varierade kraftigt mellan försöksgrupperna, från som lägst 2 till som högst 61 mätpunkter. Detta visar att vissa medelvärden bygger på betydligt svagare underlag än andra, vilket gör att jämförelser mellan grupperna bör tolkas med försiktighet.

Vid försöken konstaterades att mätningarna i medsjö var mer osäkra än mätningarna i motsjö. I medsjö gungade båten mycket upp och ner med vågorna, vilket gjorde att motståndet periodvis inte kunde avläsas korrekt på vågen. Detta ledde till att en stor del av mätdata gick förlorad eller inte kunde användas i analysen. Detta kan även observeras i figur 4.1, där antalet mätpunkter skiljer sig mellan försöksgrupperna. Mätningarna i motsjö var däremot mer stabila. Under de sista 15 sekunderna av flera tester i motsjö gick modellen dessutom in i lä, vilket gjorde att båten gick jämnare och påverkades mindre av vågorna. Detta visade sig påverka testerna med bärplan mer än testerna utan bärplan, eftersom båten gick torrare med bärplan. Dessa mätpunkter kan därför ses som mer stabila än övriga delar av försöken, men de representerar samtidigt inte exakt samma vågförhållanden som resterande motsjömätningar. De kan därmed bidra till mindre spridning i datan, men bör samtidigt tolkas med hänsyn till att försöksförhållandena förändrades under körningen.

Under testerna hade vågorna en kort våglängd och en våghöjd på 0,15 meter. Våghöjden motsvarar 0,75 meter i full skala vilket i kombination med den korta våglängden gör det svårt att uppnå marschfart och hålla en konstant hastighet. Som följd av fenomenen tog båten ursprungligen in stora mängder vatten under testen. Detta problem löstes genom att täcka alla glipor med tejp och testen där båten tog in stora vatten sållades bort.

5.2 Kvantitativt resultat

Resultaten från medelvärdesberäkningarna i figur 4.1 och de efterföljande variansanalyserna bör tolkas med försiktighet. Datamaterialet är begränsat både avseende antal observationer och balans mellan försöksgrupperna, se samtliga figurer i appendix C. Flera grupper innehåller endast ett fåtal mätpunkter inom det studerade hastighetsintervallet 10 till 12 knop, vilket medför att skattningar av både medelvärde och standardavvikelse blir känsliga för enskilda observationer. Detta är särskilt relevant för de bärplanspositioner och lastfall där antalet giltiga mätpunkter är lågt. För lastfall 1 i medsjö saknas dessutom mätpunkter för konfigurationen utan bärplan, vilket begränsar möjligheten till en fullständig jämförelse mellan samtliga bärplanspositioner.

För lastfall 1 visar medelvärdena i figur 4.1 en tendens till lägre motstånd för mittre bärplansposition i motsjö. I detta fall uppmättes medelmotståndet till $7,66 \pm 0,48$ kg för mittre bärplansposition, jämfört med $7,70 \pm 0,38$ kg utan bärplan. Skillnaden motsvarade endast 0,04 kg, eller cirka 0,5%. Detta är mycket litet i förhållande till standardavvikelserna, och intervallen överlappar varandra. För mittre

bärplansposition motsvarar intervallet 7,18 till 8,14 kg, medan intervallet utan bärplan motsvarar cirka 7,32 till 8,08 kg. Den relativa spridningen var dessutom större än skillnaden mellan medelvärdena, där standardavvikelsen motsvarade 6,3% av medelvärdet för mittre bärplansposition och 5,0% för utan bärplan. Detta gör att det lägre medelvärdet för mittre bärplansposition inte bör tolkas som en säker förbättring.

Tvåvägs ANOVA-testet visade inte någon signifikant skillnad mellan bärplanspositionerna för lastfall 1 vid signifikansnivån $\alpha = 0,1$, eftersom p-värdet var 0,6650. Däremot visade ANOVA-testet en signifikant skillnad mellan färdriktningarna, med p-värdet 0,0593. Resultatet kan därmed ses som en tendens i mätdata, men underlaget är inte tillräckligt starkt för att fastställa att bärplanspositionen haft en tydlig påverkan på motståndet för lastfall 1. ANOVA-resultatet tyder däremot på att färdriktningen haft betydelse för lastfall 1, även om detta resultat också bör tolkas försiktigt med tanke på det begränsade datamaterialet.

För lastfall 2 visar figur 4.1 att konfigurationen utan bärplan hade lägre medelmotstånd i både medsjö och motsjö. ANOVA-testet visade en signifikant skillnad mellan bärplanspositionerna vid signifikansnivån $\alpha = 0,1$, med p-värdet 0,0858. Däremot visade testet ingen signifikant skillnad mellan färdriktningarna, eftersom p-värdet var 0,8492. Det efterföljande Tukey HSD-testet visade en signifikant parvis skillnad mellan mittre bärplansposition och utan bärplan, med p-värdet 0,0671, där den mittre bärplanspositionen enligt testet gick 0,72 kg tyngre än utan bärplan. Övriga parvisa skillnader mellan bärplanspositionerna var inte signifikanta.

För lastfall 2 hade samtliga bärplanspositioner högre motstånd än utan bärplan i både medsjö och motsjö. I medsjö var motståndet 4,8% till 8,2% högre med bärplan än utan bärplan, medan motsvarande skillnad i motsjö var 2,6% till 10,5%. Detta tyder på att bärplanen inte gav någon tydlig minskning av motståndet i de genomförda försöken, även om resultaten bör tolkas med hänsyn till det ojämna antalet mätpunkter.

Den signifikanta skillnaden mellan mittre bärplansposition och utan bärplan för lastfall 2 tyder på att bärplanspositionen kan ha påverkat motståndet i detta fall. Samtidigt är flera grupper baserade på få mätpunkter, och vissa standardavvikelser överlappar varandra. Det gör att resultatet inte bör ses som ett säkert bevis på att en viss bärplansposition alltid ger lägre eller högre motstånd.

Resultaten visar även att statistisk signifikans inte nödvändigtvis innebär att skillnaden är praktiskt relevant. Även där skillnader mellan grupper kunde påvisas är mätunderlaget begränsat och skillnaderna relativt små i förhållande till variationen i datan. För att bärplanen ska vara motiverade behöver de ge en tydlig och upprepbar minskning av motståndet. Utifrån de genomförda försöken kan en sådan minskning inte fastställas.

Sammantaget antyder resultaten vissa skillnader mellan bärplanspositionerna, särskilt för lastfall 2 där bärplanen tenderade att ge högre motstånd jämfört med konfigurationen utan bärplan. Resultaten antyder även en skillnad mellan färdriktningarna för lastfall 1. Det begränsade och obalanserade mätunderlaget innebär dock att ingen säker slutsats kan dras om huruvida bärplanen minskar motståndet eller inte. Dessa resultat tyder på att bärplan därför inte ska implementeras som en åtgärd för att minska motståndet innan mer omfattande och tillförlitliga tester har genomförts.

5.3 Kvalitativt resultat

Resultatet presenterade märkbara skillnader hos modellens beteende i vågor. Bärplanet upplevdes i majoriteten av fallen göra att modellen gick högre i vattnet och red över vågorna mer än utan bärplanet. Detta bedöms komma med både negativa och positiva konsekvenser för användaren. Positiva egenskaper som påvisades var att när båten gick högre upp orsakade den mindre vattenstänk över däck. Att båten orsakar mycket vattenstänk är något som tidigare i sektion 3.1 tagits upp som ett problem för användaren, alltså är det högst relevant för att förbättra användarupplevelsen. Bärplanets resulterande lyftkraft på förskeppet gav även modellen en större förmåga att rida över vågorna i med- och motsjö vilket bidrog till mindre vattenstänk. Att modellen inte dyker ner i ikappkörda vågor minskar risken att ta in stora vattenmängder över förskeppet vilket är en risk när båten körs i kraftig

medsjö i kombination med tung last.

Bärplanet bidrog samtidigt till att modellen gick stötigare i framförallt motsjö vilket minskar bekvämligheten för passagerarna. I jämförelse med den fullskaliga båten, vars förmåga att gå mjukt i sjön lyfts fram som en av dess främsta positiva egenskaper i sektion 3.1, uppvisade modellen med bärplan en betydligt stötigare gång. Alltså kompromissar bärplanet just på denna egenskap. Sett till sjöegenskaperna kan det stötigare beteendet göra att modellen upplevs otryggare när den framförs i mycket sjö. Den stötigare gången beror sannolikt på den stora horisontala ytan som bärplanet bidrar med. I vågorna kunde bärplanet observeras lämna vattnet för att sedan landa mot vattenytan, vilket motverkar V-bottenskrovet naturligt mjuka gångegenskaper.

Kombinationen med lastfall 2 och bärplanet i den bakre positionen gav en kraftigt negativ effekt på modellen. För denna kombinationen upplevdes förskeppet tryckas ner mer i vattnet än för lastfall 2 utan bärplanet. Sannolikt är att bärplanet hamnade bakom tyngdpunkten och inte bidrog till att lyfta förskeppet. Detta påvisar risken med att montera bärplanet för långt bak och att modellen riskerar att tippa över på förskeppet.

5.4 Utvärdering av bärplanskoncept

Det kvantitativa resultatet tyder inte på någon förbättring med bärplanet. Samtidigt påvisades inte heller en kraftig försämring trots att flera strukturer som bidrar till motstånd monterades på skrovet. Sektion 2.3 redogör för bärplanets egenskaper, väggarna som håller bärplanet samt de aktre bärplanen. Vid installationen uppstod också glipor mellan tunneln och bärplanets vertikala väggar då tunnelns ytor inte var helt jämna. Således antas installationen av bärplanet bidra till en betydande ökning i motstånd. Det är därför tydligt att detta kompenseras genom att modellen lyfts högre ur vattnet och den våta ytan av skrovet minskade. I kombination med den kvalitativa analysen kan det konstateras att bärplanet genererade en betydande lyftkraft. Nettoförändringen i motstånd visade sig dock vara liten, då minskningen av skrovets våta yta balanserades ut av det tillkomna motståndet från bärplanskonstruktionen. Med hänsyn till osäkerheten i mätdata och installationen av bärplanen är det heller inte möjligt att utesluta att bärplanen skulle kunna ha en positiv effekt i ett annat utförande.

5.5 Utvärdering av metod

Metoden som användes lyckades skapa en skalenlig modell av båten och anses lämplig för att ge resultat som ger svar på problemformuleringen. Däremot saknade delar av processen precision vilket påverkar resultaten. I detta stycke utvärderas olika delar av metoden för att se hur den kan förbättras.

5.5.1 Tillverkningsprocess av skalmodell

Att använda en CAD-modell för att tillverka skalmodellen är fördelaktigt då det går att efterlikna den verkliga båten med god precision och ger många möjligheter för tillverkning. Ideellt ger detta en perfekt kopia som kan skalas fritt, men när CAD-modellen togs fram blev det stora brister i precisionen. Detta då det saknades omfattande ritningar eller CAD-modell från tillverkaren. CAD-modellen behövde då baseras på mått av den verkliga skrovformen samt en 3D-skanning med låg upplösning. Således kan modellskrovets precision till verkliga båten ej garanteras. För att undvika detta hade en 3D-scanner med högre upplösning och fler samt mer precisa mått kunnat användas för att ge en mer verklighetstrogen modell av båten.

Att använda CAD-modellen för att laserskära skott för att tillverka modellen fungerade bra och gjorde att skalmodellen initialt efterliknade CAD-modellen med god precision. Även laserskärningen av skrovsidorna bidrog till god precision i modellen, men när skott och skrovsidor skulle monteras samt vid handbearbetning av skotten tappades en del av precisionen vilket ledde till mindre förskjutningar och utrymmen mellan skrovsidorna. Detta gör att skalmodellen inte perfekt efterliknar den fullskaliga båten.

För att förstärka och vattentäta skalmodellens skrov som konstruerats av plywood användes polyester och glasfiber. Detta fungerade bra och modellen klarade alla testkörningar. Konstruktionen blev

stark men fortfarande relativt lätt vilket möjliggjorde att lastfallen kunde återskapas korrekt genom att lägga till externa vikter. Dock var det även i detta steget svårt att säkerställa precisionen då metoden "wet-layup" görs för hand och dessutom är alla former som skall följas handgjorda. När kompositen härdade uppstod också små bubblor på vissa delar av skrovet, främst på toppen av skrovet där kompositen hängde fritt. De ytor som hade kontakt med vatten slipades för att bli släta vilket till stor del antas åtgärda problemet med ytfinhet. Resterande bubblor och ojämnheter hamnade på delar av modellen som befinner sig ovanför vattenytan, vilket innebär att de inte antas påverka resultatet i större utsträckning.

Även om tillverkningen av skalmodellen inte kunde garantera likformighet mellan den fullskaliga båten och skalmodellen anses skillnaderna vara små och inte ha någon märkbar effekt på resultatet. Detta då totala vikten och masscentrum kunde justeras för att vara skalenliga, och för att de få brister som uppkom i likformigheten inte var stora nog att påverka det hydrodynamiska motståndet.

5.5.2 Testmetod

Testmetoden fungerade för att få ett mätvärde på vattenmotståndet. Det gick att bogsera modellen långt utanför dragbåten vilket gjorde att modellen inte påverkades av dragbåtens svallvågor, detta innebär att, rent idealiskt sätt, skulle det gå att bogsera modellen i en konstant hastighet och mäta motståndet. Dock var inte vattenytan platt utan det gick vågor när testerna utfördes, detta fick därför effekten att det uppmätta motståndet varierade även om hastigheten hölls konstant. Vidare hade vågorna också en riktning, detta påverkade mätningarna eftersom testerna utfördes i både riktning med vågorna och emot. Som nämnt i 3.5.3 gjordes mätningar både med och mot vågornas riktning. Detta gav ett kvalitativt resultat där skalmodellens sjöegenskaper för de olika riktningar kunde observeras väl. Däremot gav det inte mycket för det kvantitativa resultatet då det uppmätta motståndet kraftigt varierade beroende på vågorna. Detta var särskilt tydligt för mätningarna i medsjö där skalmodellen stundtals "surfade" på vågor vilket gav lågt motstånd och stundtals "klättrade" upp på vågor vilket gav ett högt uppmätt motstånd. Alla variationer i det uppmätta motståndet gjorde det svårt att finna trender i mätdata vilket innebär att ingen kvantifierbar slutsats kunde göras. Vågorna anses således vara en stor anledning till osäkerheten i mätdata.

En annan faktor som kan bidragit till missvisande resultat är den korta körsträckan där vattnet inte var vågigt och konsekventa testresultat kunde utläsas. Under denna körsträcka var det svårt att hålla konstant hastighet med bogserbåten. Vilket ledde till stora variationer i motståndet.

Motståndet och korrelerande hastighet avlästes med en analog fiskevåg och en telefon som visade GPS-hastigheten. Manuella mätningar är alltid svårt och vissa osäkerheter finns i GPS-mätningen samt hos fiskevågen.

6 Slutsats

Arbetet utvärderar huruvida det är möjligt att med hjälp av bärplan minska hydrodynamiskt motstånd för en Stigfjord 650 CAT samt hur detta påverkar köregenskaperna. Detta har genomförts genom att ta fram ett bärplanskoncept, som sedan validerats med fysiska tester med en skalmodell. Tre olika längskeppspositioner för bärplanet testades med ett lätt och ett tungt lastfall.

Utifrån de genomförda modellförsöken kan det konstateras att bärplan hade en tydlig kvalitativ påverkan på modellens gångläge. I flera testfall gick modellen högre i vattnet med bärplan än utan bärplan, särskilt vid tung last där det främre bärplanet bidrog till att lyfta fören. Detta påvisar att ett bärplan placerat mellan katamaranskroven kan generera lyftkraft och påverka båtens köregenskaper. En fördel av att modellen gick högre i vatten var att vattenstänket över däckets blev mindre, den högre gången minskade också risken att modellen tog in vatten när den dök i vågdalar vilket också anses vara en fördel. Däremot bidrog också bärplanet generellt till att modellen gick stötigare vilket anses vara en nackdel, eftersom det försämrar en god egenskap den fullskaliga båten har.

De kvantitativa resultaten gav inte tillräckligt stöd för att fastställa att bärplanet minskade motståndet. För den lätt lastade modellen kunde ingen signifikant förbättring kopplas till bärplanspositionen. För den tungt lastade modellen visade resultaten snarare att konfigurationen utan bärplan hade lägre motstånd än med bärplan inom det analyserade hastighetsintervallet. Resultatet bör dock tolkas varsamt eftersom mätunderlaget var begränsat och obalanserat mellan försöken.

Den sammanvägda slutsatsen av de kvantitativa och kvalitativa resultaten är att ett bärplan kan användas för att lyfta fören vilket medför en förändring i sjöegenskaper. Bärplanets effekt på vattenmotståndet kan ej med säkerhet fastställas. Sammanvägt anses det därför inte fördelaktigt att implementera ett bärplanskoncept på den fullskaliga båten.

7 Framtida arbete

I detta arbete har det konstaterats att bärplanet har en påverkan på modellens beteende. Samtidigt gör osäkerheten i mätdata att inga tydliga slutsatser kan dras gällande förändringen i motstånd. Detta beror på de felkällor som tas upp i diskussionen under sektion 5.5. För vidare arbete är det därför av intresse att genomföra liknande tester igen i en kontrollerad miljö. Genom att säkerställa högre noggrannhet i mätdata kan tydligare slutsatser av kvantitativ data dras. Vid eventuell användning av nuvarande testmetod skulle lugnare vindförhållanden vara av stor vikt för att undvika osäkerheten som vågor samt lättare insamling av data inom det intressanta intervallet.

Önskvärt är även att samla in en större mängd rådata, vilket hade kunnat genomföras genom att köra fler tester. Den nuvarande testrigheten under de rådande testförhållandena resulterade i extremt få användbara datapunkter i det intressanta intervallet. Förslagsvis bör data även samlas in genom digital loggning för att möjliggöra fler datapunkter och enklare filtrering. På detta sätt kan till exempel rätt hastigheter enklare väljas ut och accelerationer filtreras bort.

Intressant kan även vara att mäta accelerationerna i höjddet för att kvantitativt kunna utvärdera hur båtens köregenskaper förändras med bärplanet när den framförs i vågor. Arbetet har visat att bärplanet påverkar sjöegenskaperna. Om ett vidare arbete potentiellt skulle påvisa en nettovinst i motstånd tack vare bärplanet, är det fortfarande av stor betydelse att analysera bekvämligheten för passagerarna.

Referenser

- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. (n.d.). Climate action [Online; accessed 2026-05-11]. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/decarbonization%20of%20shipping.aspx>
- Larsson, L., Eliasson, R. E., & Orych, M. (2022). *Principles of yacht design* (5th ed.). Adlard Coles.
- Stigfjördbåtar. (n.d.). Stigfjord 650 Cat - FAKTA [Online; accessed 2026-05-11].
- McCauley, J. L. (2019, February). *Hydrodynamic Lift on Boats* (tech. rep.).
- Zhang, Y., Ma, S., Shao, W., Huang, X., Zhang, Y., & Duan, W. (2025). Study on the porpoising performance of high-speed vessels: Experimental, 3D numerical, and 2.5D numerical approach. *Ocean Engineering*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122665>
- White, F. M., & Xue, H. (2020, November). *This International Student Edition is for use outside of the U.S. FLUID Mechanics* (tech. rep.).
- Rosado, T. (1998). *HYDROFOILS AUTHOR: Detail of Hydrofoil Geometry EXPLANATION OF HOW IT WORKS/ IS USED* (tech. rep.).
- Hall, N. (2024, November). *Bernoulli's Principle* (tech. rep.) (Online; accessed 2026-02-19). NASA. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoulli-and-newton/#arguments-of-theories>
- Cleynen, O. (2011, April). Wing profile nomenclature [Online; accessed 2026-05-08]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wing_profile_nomenclature.svg
- Hoppe, K. G. W. (1989). *The Hysucat Development The Hysucat Development Project The Hysucat Development* (tech. rep.). University of Stellenbosch. Stellenbosch.
- Wall, M., Drela, M., & Finberg, S. (1989). Hydrofoil Basics.
- Faltinsen, O. (2006). *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press.
- Abbott, I. H., & Doenhoff, A. E. V. (1959). *Theory of Wing Sections*. Dover Pubns.
- Polycam. (n.d.). Polycam manual [Online; accessed 2026-05-13]. <https://learn.poly.cam/hc/en-us>
- AUTODESK. (n.d.-a). Welcome to Fusion Product Documentation [Online; accessed 2026-05-12]. <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/>
- SMHI. (n.d.-a). Salt i haven runt Sverige [Online; accessed 2026-04-15]. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/haven-runt-sverige/salt-i-haven-runt-sverige>
- Kestin, J., Sokolov, M., & Wakeham, W. A. (1978). Viscosity of liquid water in the range -8°C to 150°C. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 7(3), 941–948. <https://doi.org/10.1063/1.555581>
- AUTODESK. (n.d.-b). Welcome to Inventor Help [Online; accessed 2026-05-12]. <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2025/ENU/>
- Drela, M., & Youngren, H. (2001, November). XFOIL 6.9 User Primer [Online; accessed 2026-05-13]. https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/xfoil_doc.txt
- Python Software Foundation. (2026, May). The Python Tutorial [Online; accessed 2026-05-13]. <https://docs.python.org/3/tutorial/index.html>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. P. (2014, January). *Produktutveckling : konstruktion och design*.
- Savitsky, D., & Brown, P. W. (1976). *Procedures for Hydrodynamic Smooth and Rough Water Evaluation of Planing Hulls in* (tech. rep. No. 4). <http://onepetro.org/MTSN/article-pdf/13/04/381/2203285/sname-mtsn-1976-13-4-381.pdf/1>
- Daniel Savitsky. (1964). Hydrodynamic Design of Planing Hulls - Savitsky 1964.
- Sten Örneblad. (n.d.). Testrigg Sten Örneblad [Online; accessed 2026-04-16]. <https://www.dynaliftpowerboats.se/teknik.htm>
- Microsoft. (n.d.). Excel help & learning [Online; accessed 2026-05-11]. <https://support.microsoft.com/en-us/excel>
- bhuwanesh. (2025, July). How to Perform a Two-Way ANOVA in Python [Online; accessed 2026-04-29]. <https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/how-to-perform-a-two-way-anova-in-python/>
- SciPy. (n.d.). tukey_hsd [Online; accessed 2026-05-09].
- SMHI. (n.d.-b). Ladda ner väderobservationer [Online; accessed 2026-04-26]. <https://www.smhi.se/data/hitta-data-for-en-plats/ladda-ner-vaderobservationer/wind/71190>

Carlton, J. S. (2019). Chapter 12 - Resistance and Propulsion. In *Marine propellers and propulsion (fourth edition)* (Fourth Edition, pp. 313–365). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100366-4.00012-2>

A Hydrodynamisk modell enligt Savitsky

För att beskriva båtens planande jämviktsläge användes en semi-empirisk hydrodynamisk modell baserad på Savitskys metod. Modellen används för att beräkna skrovets lyftkraft, motstånd samt tryckcentrumets placering som funktion av trimvinkel, fart och våt geometri (Daniel Savitsky, 1964).

I modellen beskrivs det planande skrovet med den effektiva bredden B , den våta längden $L_{\text{våt}}$, spraylängden $L_{\text{stänk}}$ samt skrovets deadrise-vinkel β (Daniel Savitsky, 1964). En dimensionslös våtlängdsparemeter definieras som

$$\lambda = \frac{L_{\text{våt}} + L_{\text{stänk}}}{2B}, \quad (\text{A.1})$$

och fartkoefficienten definieras som

$$C_v = \frac{V}{\sqrt{gB}}, \quad (\text{A.2})$$

där V är båtens fart och g är tyngdaccelerationen.

Enligt Savitsky är lyftkoefficienten för ett plant planande skrov

$$C_{L0} = \tau^{1.1} \left[0.012\sqrt{\lambda} + 0.0055 \frac{\lambda^{2.5}}{C_v^2} \right], \quad (\text{A.3})$$

där τ är trimvinkeln i grader (Daniel Savitsky, 1964). Därefter korrigeras lyftkoefficienten för skrovets deadrise-vinkel enligt

$$C_{L\beta} = C_{L0} - 0.0065 \beta C_{L0}^{0.6}, \quad (\text{A.4})$$

där β anges i grader.

Den hydrodynamiska lyftkraften från skrovet beräknas sedan som

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 C_{L\beta}, \quad (\text{A.5})$$

där ρ är vattnets densitet (Daniel Savitsky, 1964). Tryckcentrumets position relativt aktern bestäms med

$$l_p = \lambda B \left[0.75 - \frac{1}{5.21(C_v^2/\lambda^2) + 2.39} \right]. \quad (\text{A.6})$$

Motståndet modelleras som summan av en tryckterm och en friktionsterm,

$$D = D_p + D_f. \quad (\text{A.7})$$

Tryckmotståndet skrivs som

$$D_p = \Delta \tan \tau, \quad (\text{A.8})$$

där $\Delta = mg$ är båtens tyngd. Friktionsmotståndet skrivs som

$$D_f = \frac{1}{2} \rho V^2 \lambda B^2 \frac{C_f}{\cos \beta}, \quad (\text{A.9})$$

där C_f är friktionskoefficienten. Reynolds tal definieras som

$$Re = \frac{V \lambda B}{\nu}, \quad (\text{A.10})$$

där ν är vattnets kinematiska viskositet. Friktionskoefficienten bestäms implicit genom

$$C_f = \frac{0.0586}{[\log_{10}(Re C_f)]^2}, \quad (\text{A.11})$$

vilken löses numeriskt för varje aktuellt värde på Re (Carlton, 2019).

A.1 Kraft- och momentjämvikt

För varje lastfall och vald foilplacering bestäms båtens jämviktsläge genom att lösa ett icke-linjärt ekvationssystem med tre obekanta:

$$\tau, \quad \lambda, \quad T, \quad (\text{A.12})$$

där τ är trimvinkel, λ är dimensionslös våtlängd och T är krävd propellerkraft.

De krafter som inkluderas i modellen är:

- skrovets lyftkraft F_L ,
- skrovets motstånd D ,
- tyngdkraften $W = mg$,
- foilens lyftkraft F_{foil} ,
- motorkraften T .

Jämvikt i vertikal led skrivs som

$$F_L \cos \tau + F_{\text{foil}} - D \sin \tau - W = 0. \quad (\text{A.13})$$

Jämvikt i horisontell led skrivs som

$$D \cos \tau + F_L \sin \tau - T = 0. \quad (\text{A.14})$$

Utöver kraftjämvikten krävs även momentjämvikt kring båtens tyngdpunkt. Det totala momentet skrivs som

$$M_{\text{tot}} = M_{\text{skrov}} + M_{\text{foil}} + M_{\text{motor}} = 0. \quad (\text{A.15})$$

Skrovmomentet beror på lyftkraftens angreppspunkt l_p samt motståndskraftens antagna angreppspunkt. Foilmomentet bestäms av avståndet mellan foilens placering och tyngdpunkten, medan motormomentet bestäms av motorernas placering relativt tyngdpunkten.

Systemet med tre icke-linjära ekvationer,

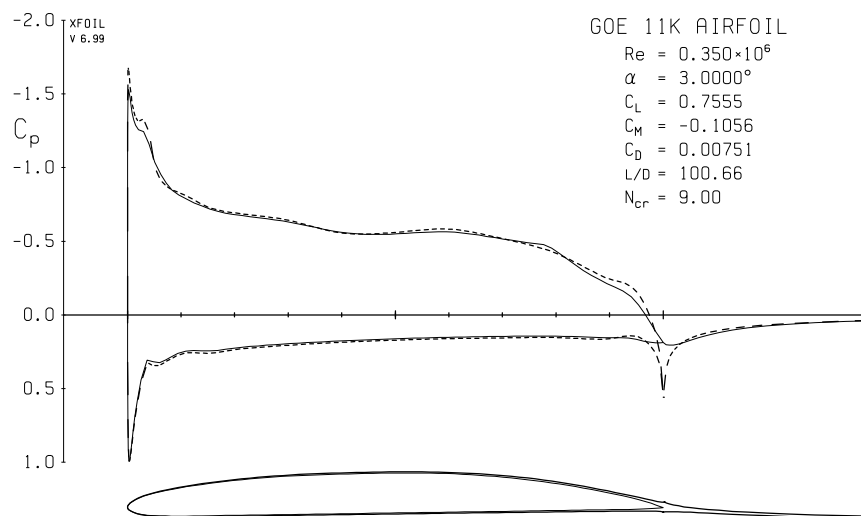
$$R_x(\tau, \lambda, T) = 0, \quad R_y(\tau, \lambda, T) = 0, \quad R_M(\tau, \lambda, T) = 0, \quad (\text{A.16})$$

löses numeriskt med en iterativ rotlösare. För varje vald foilplacering erhålls därmed ett jämviktsläge som ger trimvinkel, våtlängdparameter och erforderlig propellerkraft.

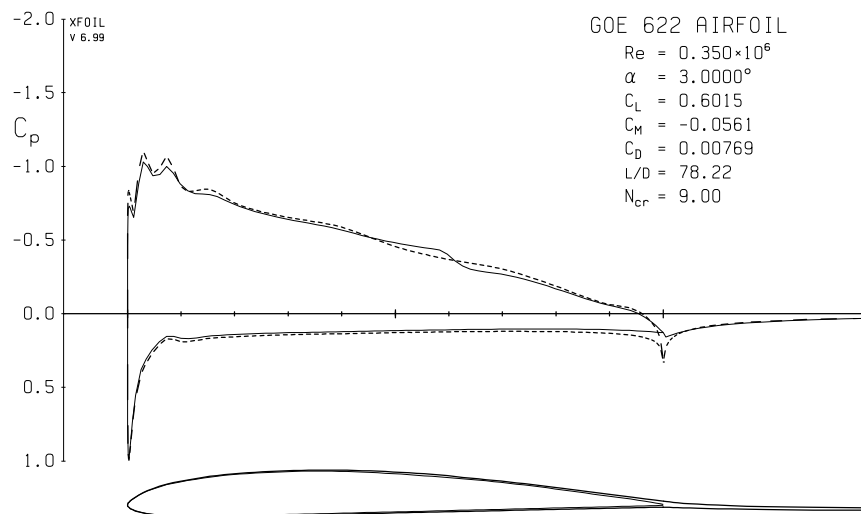
Denna modell används för att analysera hur olika lastfall och olika placeringar av foilen påverkar båtens jämviktsläge. För varje foilposition löses jämviktssystemet numeriskt, varefter motstånd, trimvinkel och momentbalans kan jämföras mellan olika konfigurationer. På så sätt identifierades den foilplaceringen som gav lägst motstånd över alla tre lastfall.

B Sällning av bärplan

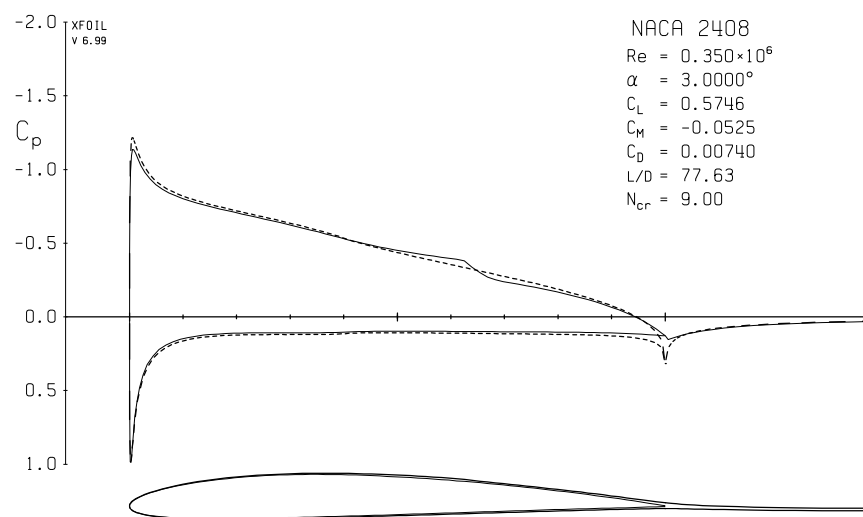
B.1 Graf av C_P för bärplansprofiler



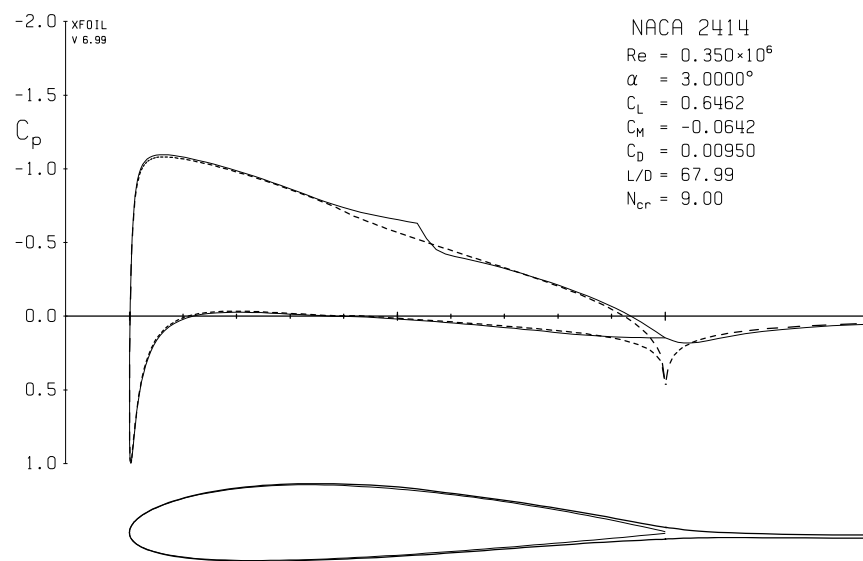
Figur B.1: Graf av C_P för profilen GOE 11k från Xfoil 6.99.



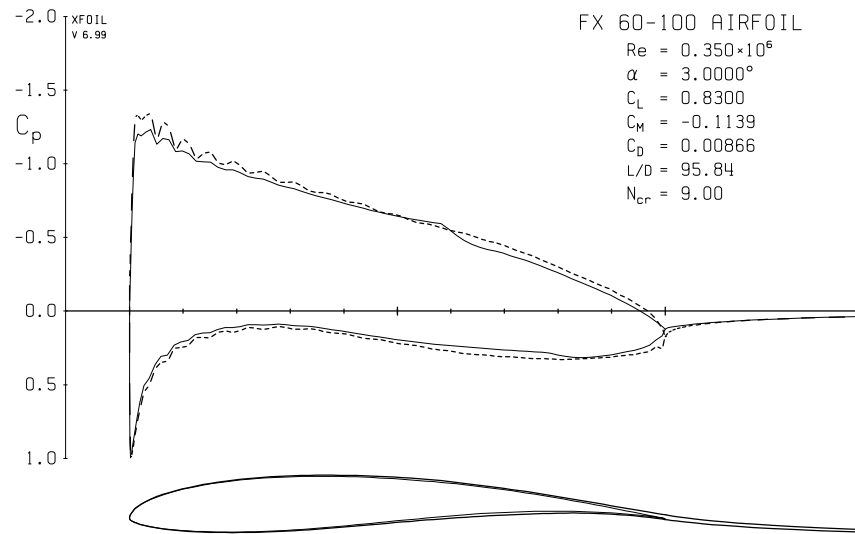
Figur B.2: Graf av C_P för profilen GOE 622 från Xfoil 6.99.



Figur B.3: Graf av C_P för profilen NACA 2408 från Xfoil 6.99.



Figur B.4: Graf av C_P för profilen NACA 2414 från Xfoil 6.99.



Figur B.5: Graf av C_P för profilen Wortmann FX60-100 från Xfoil 6.99.

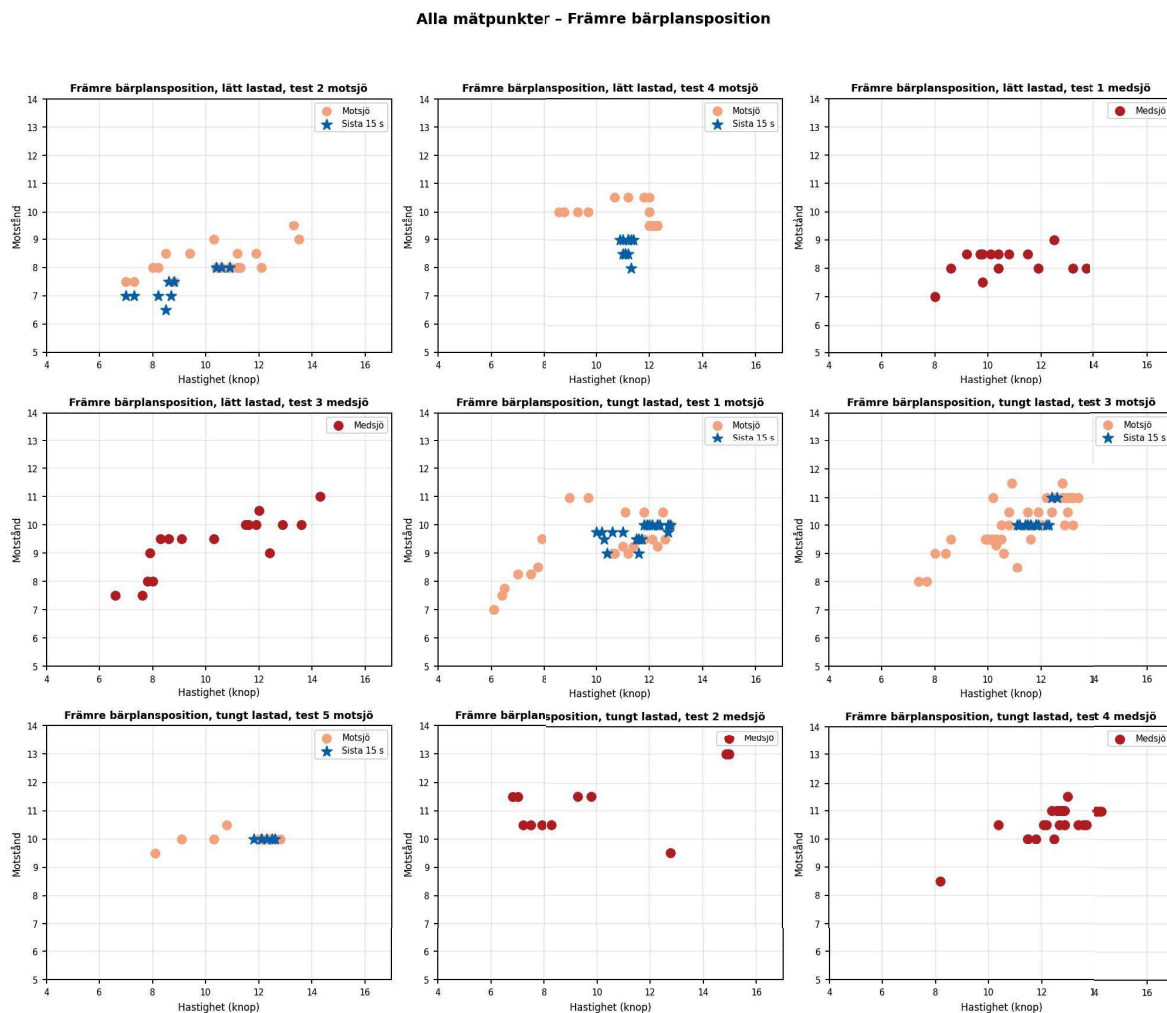
B.2 Värdeskalor tillhörande Kesselringmatris

Effektivitet (C_L/C_D)		Yttröghetsmoment [mm^4]	
1	<60	1	<600
2	60-70	2	600-900
3	70-80	3	900-1200
4	80-90	4	1200-1500
5	>90	5	>1500
Risk för ventilerings (Störst negativa C_P)		Prestation i ytskikt (Integral av trycksida)	
1	>1,45	1	<0,1
2	1,45-1,35	2	0,1-0,133
3	1,35-1,25	3	0,133-0,167
4	1,25-1,15	4	0,167-0,2
5	<1,15	5	>0,2

Figur B.6: Värdeskalor för utvärdering med Kesselringmatris.

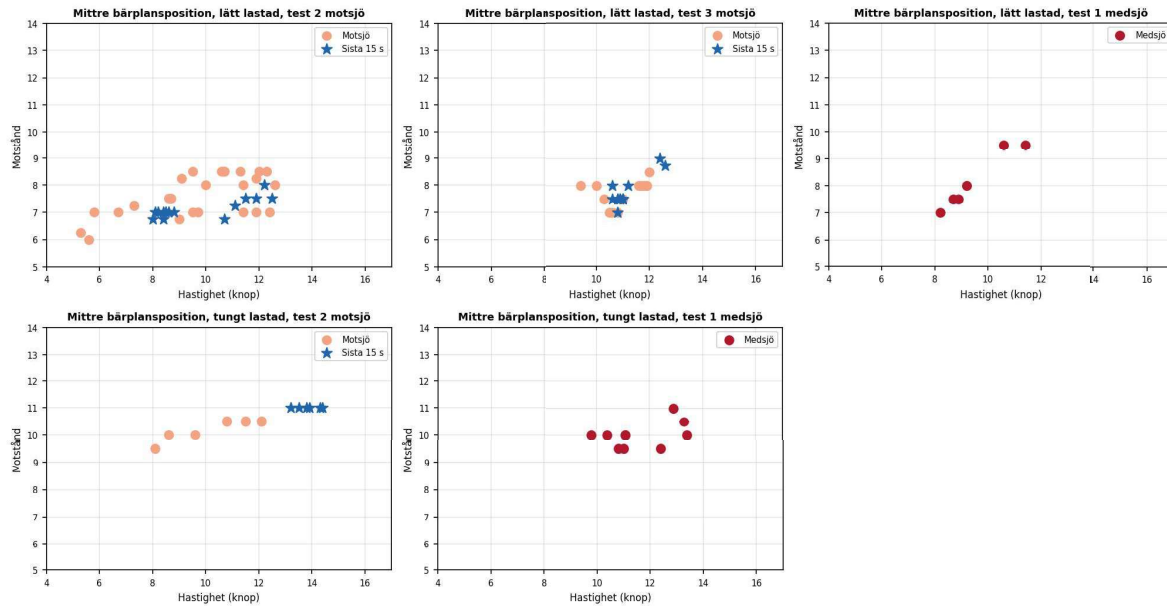
C Figurer på mätdata

Här visas mätdata som togs under testerna. Först visas figurer som innehåller alla tester för en bärplansposition, sorterad efter lastfall, test och riktning (med eller motsjö). I figurerna är representerar lätt lastad, lastfall 1, och tungt lastad, lastfall 2. Sista figuren visar grupperade mätresultat sorterade efter bärplansposition och lastfall.



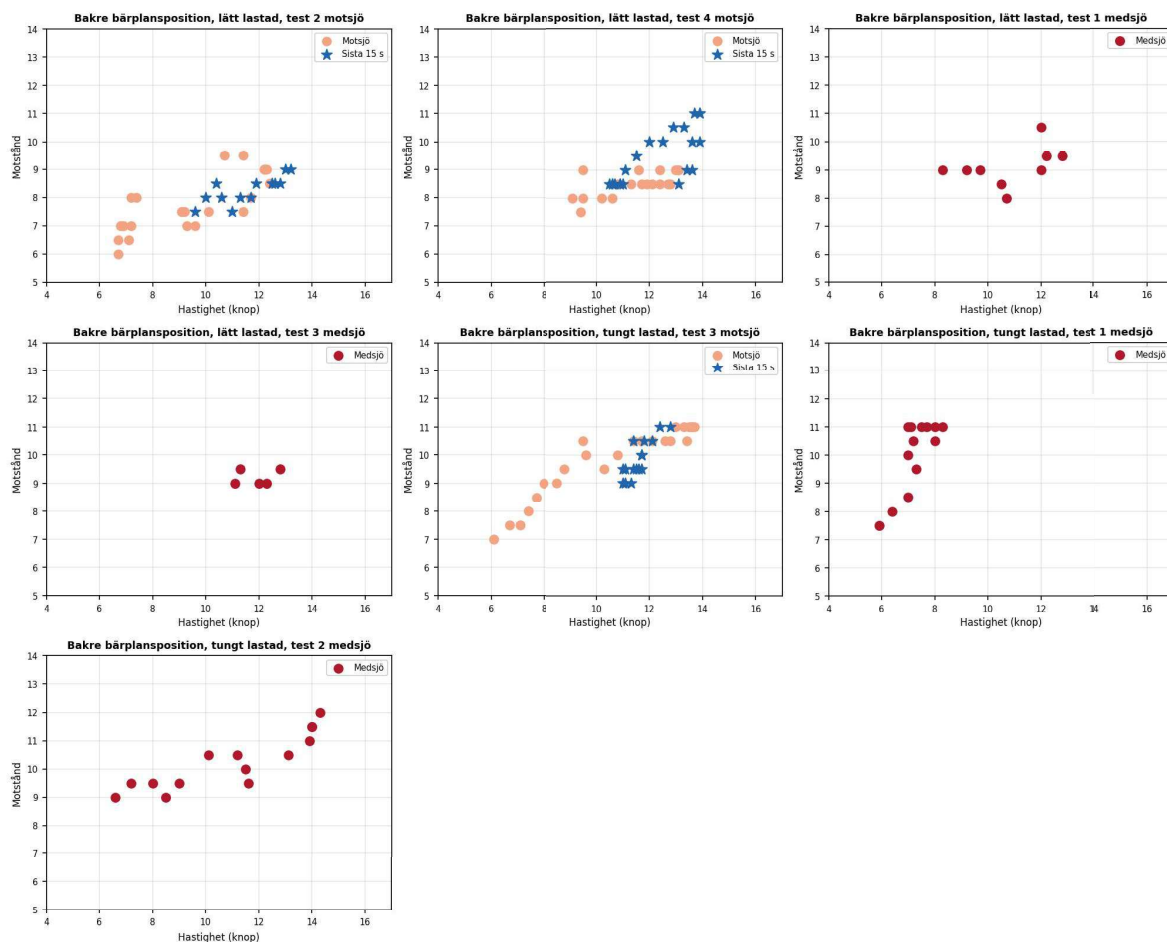
Figur C.1: Individuella mätresultat för främre bärplansposition, uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning. Varje deldiagram visar uppmätt motstånd mot hastighet. Samtliga deldiagram visas med samma axelintervall.

Alla mätpunkter - Mitre bärplansposition



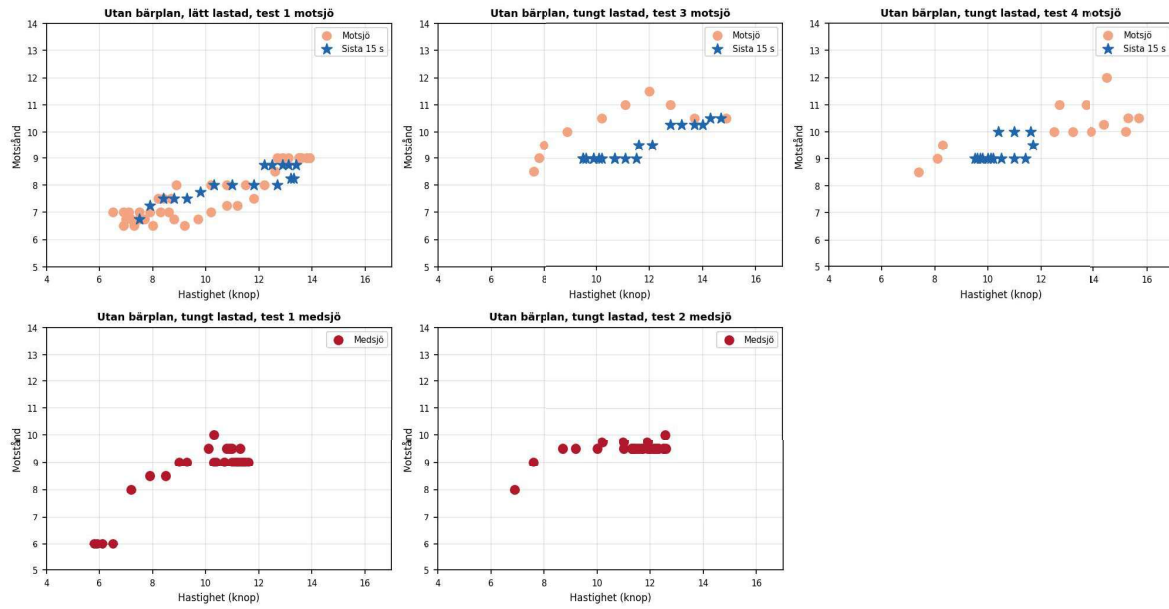
Figur C.2: Individuella mätresultat för mitre bärplansposition, uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning. Varje deldiagram visar uppmätt motstånd mot hastighet. Samtliga deldiagram visas med samma axelintervall.

Alla mätpunkter - Bakre bärplansposition



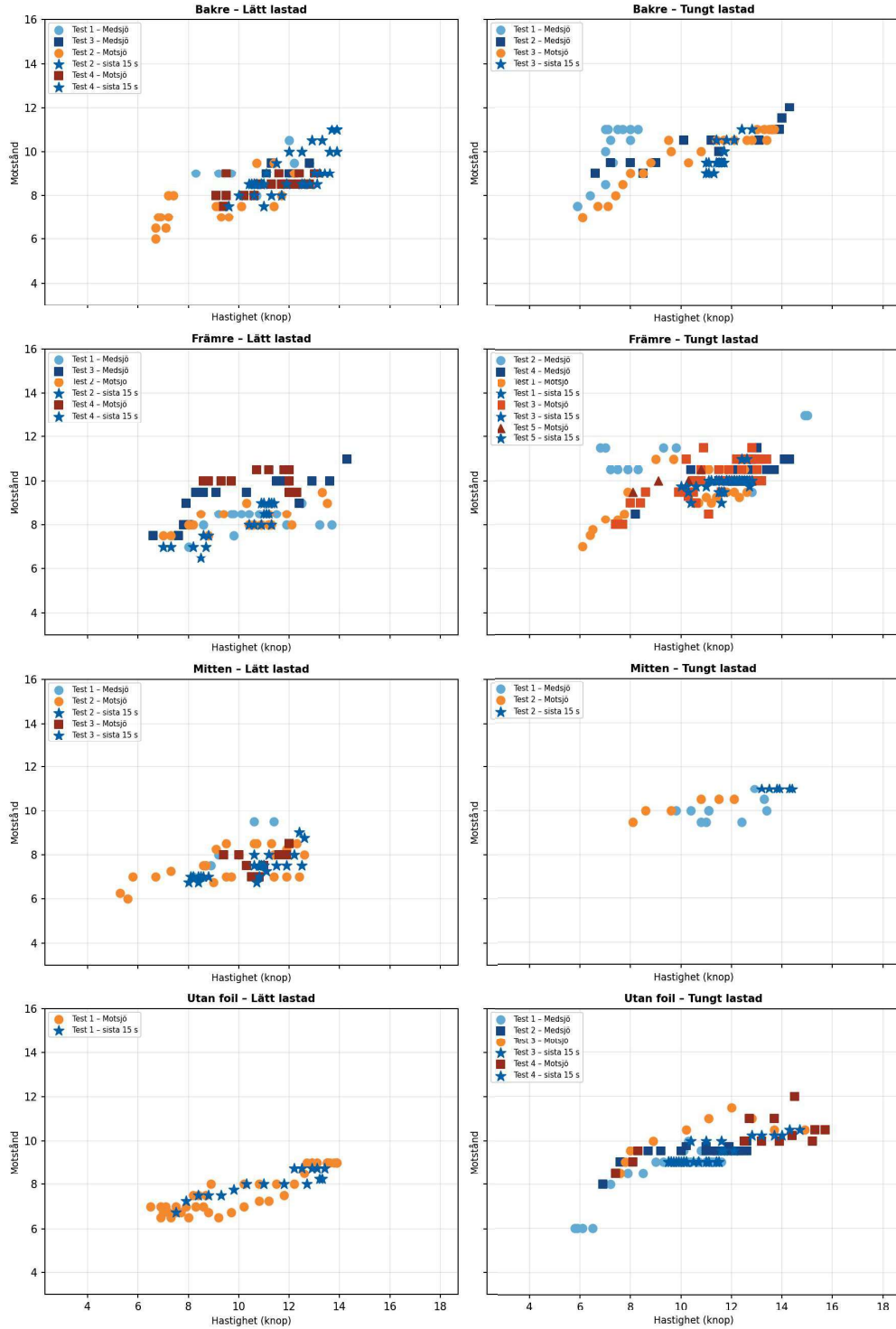
Figur C.3: Individuella mätresultat för bakre bärplansposition, uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning. Varje deldiagram visar uppmätt motstånd mot hastighet. Samtliga deldiagram visas med samma axelintervall.

Alla mätpunkter - Utan bärplan



Figur C.4: Individuella mätresultat utan bärplan, uppdelade efter lastfall, testnummer och vågriktning. Varje deldiagram visar uppmätt motstånd mot hastighet. Samtliga deldiagram visas med samma axelintervall.

Grupperade resultat: Medsjö vs Motsjö | ★ = sista 15 s



Figur C.5: Grupperade mätresultat för försöken, uppdelade efter bärplansposition och lastfall. Varje deldiagram visar sambandet mellan hastighet och motstånd för medsjö och motsjö. Samtliga deldiagram redovisas med samma axelintervall.