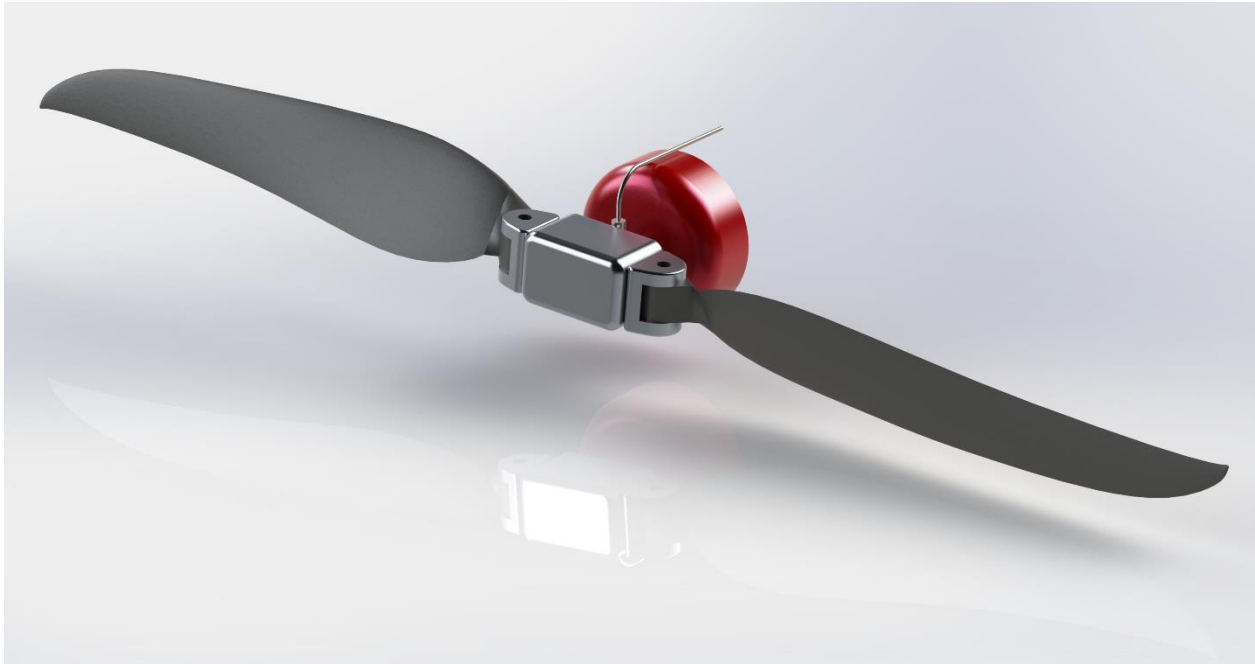




CHALMERS



Utvärdering av varierande stigning för implementation inom flygplansdrönare

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

Fabian Somi

Mattias Walldén

IMSX20
INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

Examensarbete 2021 : IMSX20

Utvärdering av varierande stigning för implementation inom flygplansdrönare

Fabian Somi

Mattias Walldén

Institutionen för Industri- och Materialvetenskap

IMSX20

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

Utvärdering av varierande stigning för implementation inom flygplansdrönare

© Fabian Somi, 2021

© Mattias Walldén, 2021

Examinator : Peter Hammersberg

Handledare : Peter Hammersberg

Institutionen för Industri- och Materialvetenskap
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2021

SE-412 96 Göteborg

Sweden

Telefon + 46 (0)31-772 1000

En bild av ett modellerat nav som tillåter varierande stigning, se kapitel 5.3 för mer detaljer.

Chalmers Reproservice,

Gothenburg, Sweden 2021

Förord

Denna rapport beskriver det examensarbetet som utfördes i utbildningen till högskoleingenjör inom Maskinteknik hos Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet utfördes på efterfrågan samt med samarbete från Sjöräddningssällskapet vilket även blev stött av Chalmers via Institutionen för industri- och materialvetenskap. Sjöräddningssällskapet möjliggjorde projektet med en testrigg samt stöd för diverse behov som arbetet behövde. Chalmers gav stöd med 3D Printing som möjliggjorde den design som utvecklades för att uppmäta data samt gav tid för tester i vindtunnel.

Vi vill tacka Sjöräddningssällskapet samt Fredrik Falkman för möjligheten och stödet för arbetet, Peter Hammersberg för handledning samt agerandet som examinator med mycket givande direction och stöd under arbetets gång. Vi vill även tacka Roger Saghdal för stödet med 3D-printing genom de flertal rundor de tog för att få en slutgiltig design samt Edward Hadziavdic för assistansen i vindtunneln.

Sammanfattning

Den här rapporten täcker det uppdrag som utfördes för Sjöräddningssällskapet under den första halvan av 2021. Uppdraget av arbetet var att undersöka implementationen av varierande stigning inom deras Sjöräddnings drönare. Eftersom vikten av drönaren är väsentligt för operation ansågs det att vikt kunde sparas in i bland annat batteri genom att utnyttja ett varierande stigning system som skulle höja verkningsgraden av propellern.

Med uppdraget etablerat undersöktes teorin bakom varierande stigning samt hur den bäst kunde implementeras. Efter detta utfördes tester av ett varierande stigning nav samt motoranordning kallat MEVP2216 gjort av företaget Hobby Wings. Dessa tester utfördes först statiskt samt sedan i vindtunnel vid Chalmers Tekniska Högskola. Efter att ha stött på svårigheter under testernas gång med vibrationer samt prestandan av MEVP2216 systemet användes simuleringar för att komplettera resultaten som framtogs av testerna i vindtunneln.

Testerna samt simuleringarna bekräftade att varierande stigning resulterar i en ökning i propellerns verkningsgrad. Genom att skapa ett artificiellt test med hjälp utav simuleringarna uppskattades det att en ökning på upp till 38.4% propellerverkningsgrad kunde fås fram under de antagna flygtillstånden.

Evaluation of variable pitch systems for implementation within fixed wing drones

Fabian Somi
Mattias Walldén

Institutionen för Industri- och Materialvetenskap
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

This report covers the thesis written for the Swedish Sea Rescue Society abbreviated as the SSRS during the first half of 2021. The objective of the thesis was to investigate the application of variable pitch within a Search and Rescue Drone that is being developed by SSRS. As the importance of low weight is vital for this drone it was believed that using a variable pitch system for the propeller could save on battery space and therefore weight of the drone.

With the objective established the theory behind variable pitch was investigated, including how it would be best implemented within their current design. Thereafter tests were performed using a variable pitch motor & system called MEVP2216 made by the company Hobby Wings. These tests were first performed in a stationary configuration and thereafter in a wind tunnel at Chalmers University of Technology. After encountering issues with vibrations and the lacking performance of the MEVP2216 system simulations were used to compliment the results acquired from the wind tunnel testing.

The testing and simulations confirmed that using a variable pitch system results in an increase in the efficiency of the propeller. By creating an artificial test using simulations it was estimated that an increase in propeller efficiency of up to 38.4% could be expected for the proposed flight conditions.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Precisering av frågeställningen	1
2. Teori	3
2.1 Propellerns funktion	3
2.2 Varierande stigning	4
2.3 Tordering.....	6
2.4 Mätdata.....	7
2.4.1 Propeller Verkningsgrad	7
2.4.2 Stigning.....	9
2.5 Marknadssökning.....	10
2.6 Servo	11
2.7 Passiv stigning	12
3. Metod.....	13
3.1 Motor & Nav	13
3.2 Testrigger.....	14
3.2.1 Elektriskt fartreglage.....	15
3.2.2 Kraftkälla	16
3.3 Mjukvara	16
3.4 Stigningslås.....	16
3.5 Felkällor.....	18
3.6 Propellertest	19
3.7 Statiskt test	19
3.8 Vindtunnel test	20
3.9 Ny design samt implementering av servo.....	21
3.10 Statiskt test av servo	22
3.11.1 Ytsprickor samt sprickutbredning	23
3.11.2 Begränsningar av system	23
3.12 Modellering av propeller	24

3.13 Simulering	26
3.14 Testmetodik för simulering.....	28
4. Resultat	30
4.1 Statiska Tester.....	30
4.2 Vindtunnel testdata analys	31
4.3 Vibrationer samt egenfrekvens.....	33
4.4 Vindtunnel resultat	35
4.5 Simulering resultat	36
5. Diskussion	40
5.1 Arbetsgång	40
5.2 Mätprecision i vindtunnel	40
5.3 Prototyp	44
5.4 Passivt varierande stigning	44
6. Slutsats	45
6.1 Svar på frågeställning.....	45
6.2 Förslag till vidare arbete	46

Referenslista

Bilagor

1. Inledning

I detta kapitel diskuteras arbetets bakgrund, syfte, avgränsningar samt detaljer kring frågeställningen.

1.1 Bakgrund

Arbetet gavs ut från organisationen Sjöräddningssällskapet som under de senaste åren arbetat på att utveckla en drönare som ska hjälpa till att hitta samt spåra olycksplatser ute till havs men även ge information kring hur olyckan ser ut. Detta så att besättningen kan få en överblick över olyckan så de bättre kan avgöra vad för utrustning som bör tas med.

Under utvecklingen av drönaren testades ett flertal propellrar för att avgöra hur stor propeller som krävs för att driva drönaren vid de begärda hastigheterna. Storlek är däremot inte det hela svaret då en större propeller betyder mer vikt samt ett starkare nav som allt lägger till mer vikt. Därför är andra alternativ för att vinna ut mer prestanda intressant till Sjöräddningssällskapet.

1.2 Syfte

Med anseende på behovet av en ökning i prestanda för Sjöräddningssällskapets drönare föreslogs det att undersöka samt testa hur varierande stigning kan påverka drönarens verkningsgrad. Detta tillsammans med en insikt på implementationen av varierande stigning i denna skala.

1.3 Avgränsningar

Fokuset på arbetet ligger i att undersöka vinster av varierande stigning samt undersöka hur det bäst skulle implementeras. På grund av den kortare tidsperioden arbetet utförs under kommer arbetet utföras i prototypfas, målet är därmed inte en komplett produkt utan idéer samt förslag till en mer slutgiltig produkt.

1.4 Precisering av frågeställningen

Nulägesanalys

- Vilka för samt nackdelar tillför ett varierande stigning system emot ett statiskt system? Vad finns idag på marknaden inom variabel stigning, i båda mindre samt större skala?
- Medför varierande stigning en ökning i vikt för drönaren samt hur kan vikten distribueras över drönaren?

Implementation

- Kan vinkeln varieras passivt beroende på motstånd/varvtal eller krävs ett aktivt servo?
- Hur kan varierande stigning implementeras i Sjöräddningssällskapets nuvarande design.

Utvärdering samt rekommendation

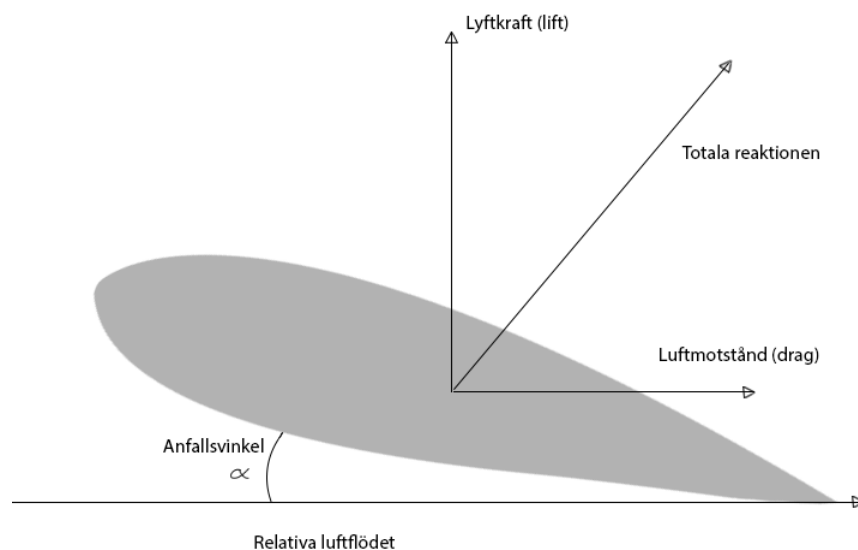
- Hur stor förbättring i verkningsgrad kan vinnas ut vid olika tillstånd med hjälp utav varierande stigning jämfört med fast stigning, speciellt vid en lågfart på 15m/s.

2. Teori

I detta delkapitel beskrivs teorin bakom arbetet för att ge läsaren en fördjupning för propellerns funktion, varierande stigning samt andra aspekter som relaterar till detta.

2.1 Propellerns funktion

Innan man kan diskutera varierande stigning måste det först klargöras hur en propeller fungerar samt den effekt varierande stigning har för propellern. För att påbörja en analys av en propeller är det först insiktsfullt att diskutera en vingprofil som syns i Figur 1. I figuren visas det relativa luftflödet, även de reaktionskrafter som fås ut är synliga som betecknas Lyftkraft samt luftmotstånd, kallat lift respektive drag på engelska. Dessa krafter kan enligt Hitchens (2015) ändras genom att öka respektive minska vingens vinkel relativt till luftflödet vilket kallat anfallsvinkel, betecknat α . I ett horisontellt läge hade vingen haft ett minimalt luftmotstånd men den hade skapat en liten lyftkraft enbart beroende av vingprofilen vilket hade stoppat planet från att lyfta. Därför måste vingen vinklas emot luftströmmen, detta påverkar då riktningen av den totala reaktionen vilket ger ut en större lyftkraft som tillåter planet att resa i luften. Anfallsvinkeln kan däremot inte höjas oändligt, för det ökande luftmotståndet övergår till slut mängden lyftkraft som produceras av vingen vilket resulterar i överstegring känt som stalling på engelska.



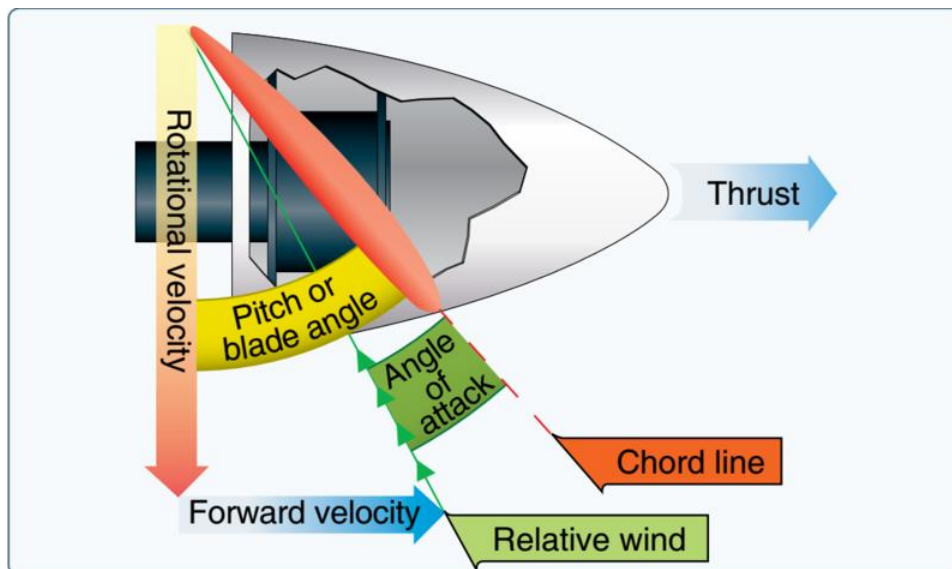
Figur 1. Illustration av en vingprofil

Ett propellerblad är egentligen endast en vingprofil som har placerats runt en axel i ett vertikalt läge jämfört med de horisontella vingarna. Precis som vingar producerar både lyftkraft samt luftmotstånd som sammanlagt producerar en total reaktion, producerar en propeller en total reaktion av dragkraft samt vridmoment. Genom Newtons tredje lag kommer den luften som trycks bakom propellern att producera den dragkraft som bär planet framåt. En mängd olika

saker påverkar propellerns effektivitet. Bland annat den innan nämnda anfallsvinkeln men även diameter, vingprofilens form samt många fler effekter, även den mest intressanta för detta arbete, stigningen har ett inflytande.

2.2 Varierande stigning

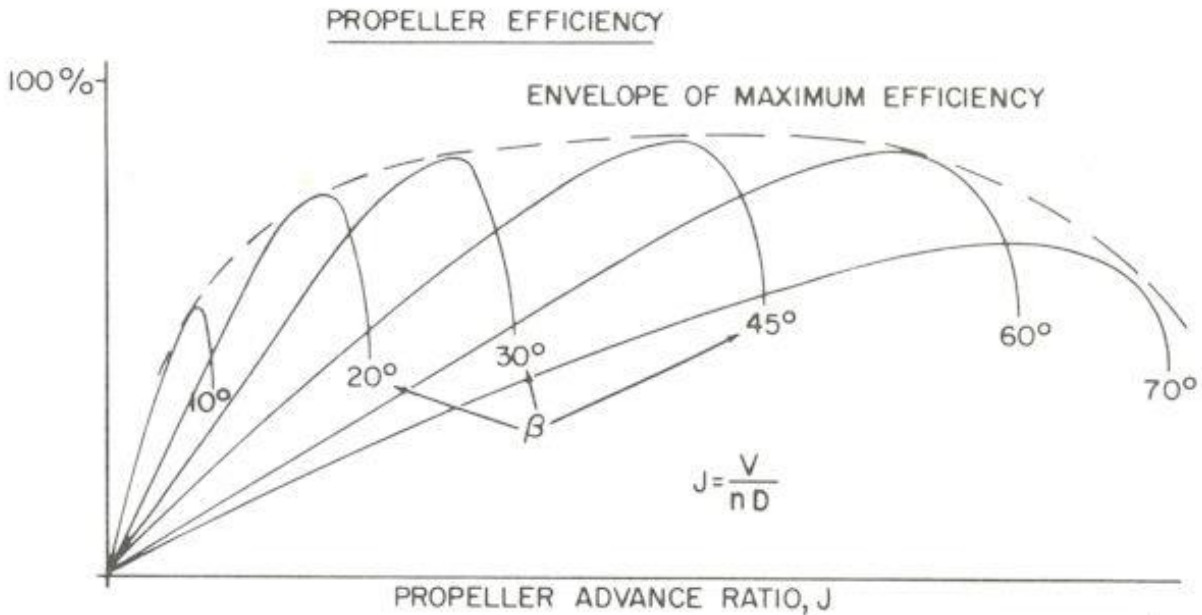
Stigning, känt som pitch på engelska är vinkeln mellan propellern samt rotationsplanet för propellern vilket visas i Figur 2. Detta används för att ändra det hastighetsområde där propellern är som mest effektiv. Fin stigning har en liten vinkel mellan planet och propellern vilket ger utmärkta tillstånd för låg hastighet, specifikt vid lyftning samt klättring, men på grund av den lilla vinkeln är den maximala hastigheten låg. Motsatsen till detta är en grov stigning som har en större vinkel vilket ger utmärkta tillstånd för hög hastighet men har dåliga egenskaper vid lyft samt klättring. En för grov vinkel betyder att planet inte kan lyfta alls. Hitchens (2015)



Figur 2. Federal Aviation Administration (2016). Termer för en propeller från [1]

Propellrar har sällan en konstant vinkel mot luftströmmen, istället varierar den över bladets längd, den nominella stigningen mäts ofta 75% från bladets rot (β i Fig. 3) som nämns av Vorkoetter (2002). Detta med anledning av att rotationshastigheten är högre vid kanterna av bladet jämfört med nära navet.

För att bättre illustrera sambandet mellan en propellers stigning samt dess verkningsgrad kan en graf för propellerverkningsgrad för olika nominella stigningsvinklar användas, som finnes i Figur 3. Den horisontella axeln representerar avanceringtalet känt som advance ratio på engelska som är förhållandet mellan flyghastighet, propellerhastighet samt propellerdiametern. Det syns att varje stigningsvinkel har ett spann av hög verkningsgrad men presterar sämre utanför det specifika spannet.

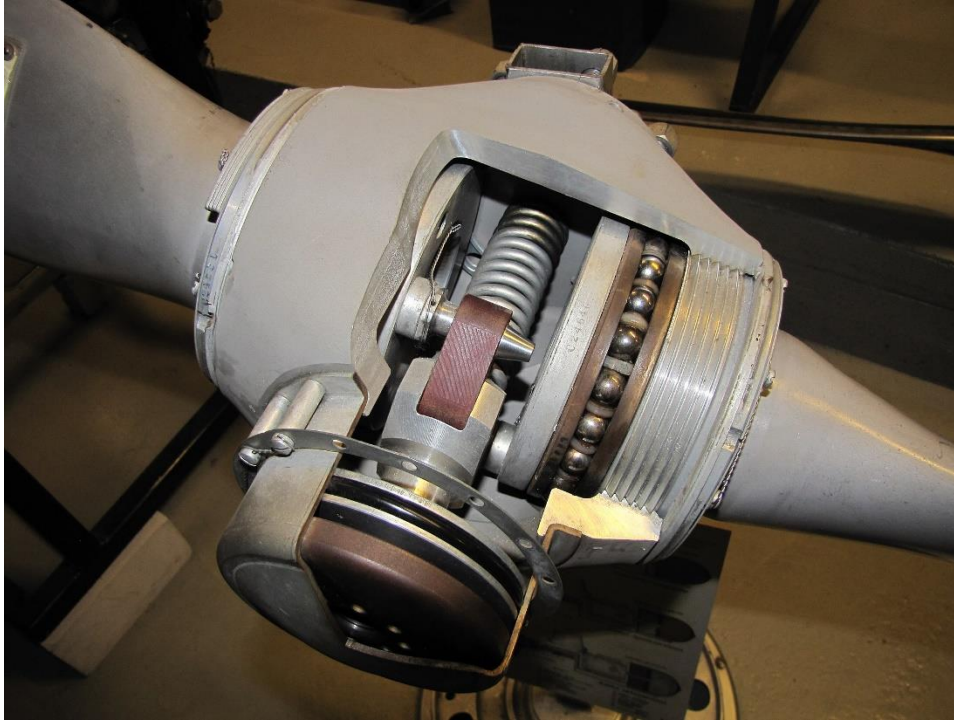


Figur 3. Jämförelse av propellerverkningsgrad, Från *Aerodynamics for Naval Aviators* (s. 149) av H.H.Hurt 1965. [2]

För att åtgärda förlusterna som uppkommer på grund av propellerns stigning har flera system utvecklats som kan ändra propellerns stigningsvinkel, kollektivt kända som variabel stigning. De första sådana propellrarna var enkla tvåstegspropellrar som kunde ställas in för exempelvis klättring samt marchfart samt propellrar för vilka stigningsvinkeln enbart kunde ändras på marken innan lyft, så som beskrivs av Hitchens (2015).

Idag är så kallade "constant speed unit", vanligen känt som CSU, vilket normalt används på högpresterande propellerplan. Som namnet antyder roterar dessa propellrar med en konstant rotationshastighet. Alla CSUs har samma fundamentala operationsprinciper, när en ökning i motorns varvtal upptäcks ställs propellern till en grövre stigningsvinkel, vilket i sin tur medför en ökning av moment på motorn samt sänkta varvtal. Denna process sker omvänt vid en sänkning av motorvarvtal, på så sätt hålls propellerns varvtal konstant under operation.

De CSUs som finns på kommersiella flygplan varierar i sin konstruktion, men ändring av stigningsvinkel erhålls genom hydraulik, oljetryck eller tryckluft, ett exempel på ett sådant system finns i Figur 4, system som dessa anses olämpliga till projektets skala.

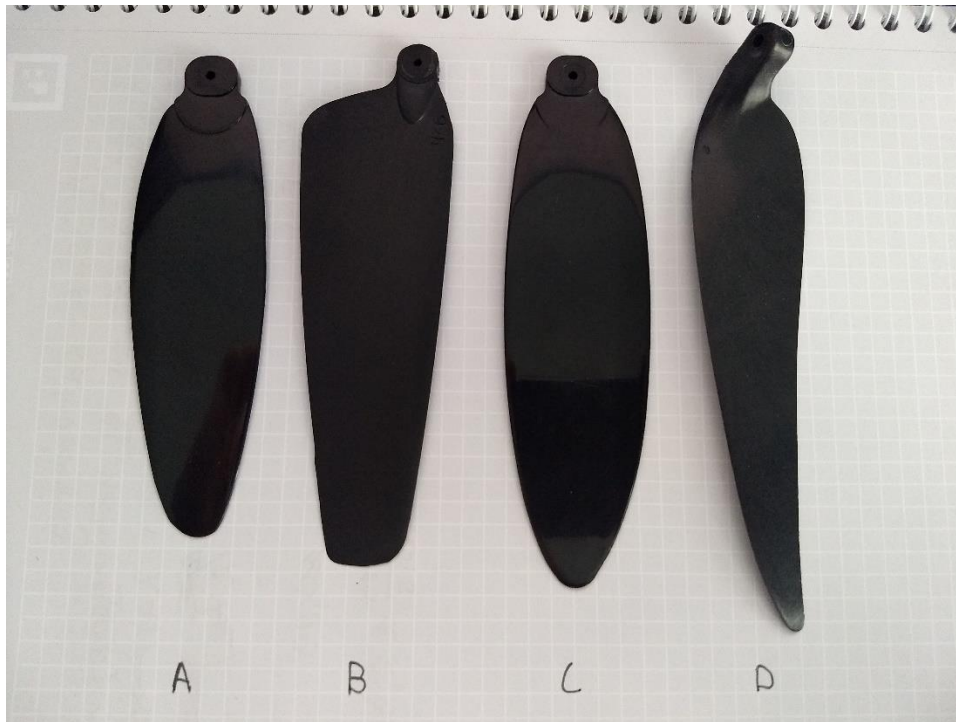


Figur 4. En genomskuren bild av ett propellernav med varierande stigning. Taget via [3] av MKFI

En diskussion av variabel stigning bör benämna luftfarkoster med roterande vingar, det vill säga helikoptrar, där kontroll av rotorbladens stigningsvinkel spelar en kritisk roll för styrning. En konventionell helikopter genererar lyftkraften som krävs för flygning med sin huvudrotor, men huvudrotorn står även för mycket av manövreringen. Vertikal förflyttning erhålls genom en ändring av rotorns anfallsvinkel, som motsvarar stigningsvinkel för en propeller. Även horisontell förflyttning av helikoptern styrs av anfallsvinkeln, genom att cykliskt ändra anfallsvinkel vid samma position i rotationen erhålls en ojämn lyftkraft som utnyttjas för lateral förflyttning.

2.3 Tordering

Tordering är den böjning som utförs på själva propellerbladet vilket kan ses i Figur 5 propeller D. Vilket ger propellerbladet i sig en varierande stigning längst propellerbladet relativt till luftflödet. Detta på grund av att hastigheten på kanten av propellern som tidigare nämndes är betydligt högre än det är nära navet. Genom att böja propellerbladet kan därmed en ideal anfallsvinkel uppnås längst hela bladet vid en specifik vindhastighet.



Figur 5. Sammanställning av tillgängliga propellrar

Propellrarna som användes i tester syns i figur 5, de är:

- A: Maxx Products VPP101-10 10"
- B: Dancing Wings 9xh
- C: Maxx Products VPP101-11 11"
- D: Aeronaut CAM Carbon 12 X 6,5

2.4 Mätdata

Av intresse är även vad för data som bör uppmätas vilket är viktigt att ha i åtanke innan arbetet påbörjas. För fallet vid variabel stigning finns det en del intressanta värden. Dels drivkraften samt vridmomentet för att få ut den kraft som propellern i sig producerar men även effekten tillförs för att kunna jämföra verkningsgraden.

Det finns en mängd olika metoder för att mäta verkningsgrad, en av de ursprungliga var att jämföra effekten in med den dragkraft som tas ut, detta påverkas däremot av motorn vilket bör bortses från i en diskussion om varierande stigning.

2.4.1 Propeller Verkningsgrad

Med det påvisat att effekten av själva motorn bör bortses ifrån vid undersökning av stigning beslutades det att istället använda propellerverkningsgrad. Detta beskrivs av Spakovszky (2007) som en faktor av Dragkraften, vridmomentet samt avanceringstalet. [7]

Advancingtalet är ett sätt att beskriva hur mycket luft en propeller kan förflytta. Denna dimensionslösa kvot används för att beskriva karaktären av en propeller samt utnyttjas i beräkning av propellerns verkningsgrad, Advancingtalet ges enligt

$$J = \frac{V}{nD}$$

Där

V = hastigheten av luftströmmen i m/s

n = rotation hastigheten i revolutioner/s

D = Propellerns diameter i m

Dragkraftskoefficienten skrivs som följande

$$k_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

Där

T = Dragkraften i N

ρ = Densitet i kg/m³

Slutligen vridkraftskoefficienten skrivs som följande

$$k_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

Där

Vridmomentet, Q = Nm

Detta kan sedan samlas i en kvot för att lösa ut propellerverkningsgraden

Det är känt att en verkningsgrad beskrivs av den kraft som sätts in samt den kraft som tas ut, detta kan i sin tur beskrivas av den användbara kraften, alltså den dragkraften motorn skapar dividerat med det vridmoment som skapas som en funktion av advancingtalet J.

$$\eta_{prop} = \frac{P_{ut}}{P_{in}} = J \frac{k_T}{2\pi k_Q}$$

Genom att nu ersätta koefficienterna med det tidigare givna formlerna fås den förenklade formeln som

$$\eta_{prop} = \frac{TV}{2\pi nQ}$$

Detta innebär att de tal som behövs för att räkna ut verkningsgraden av en propeller är dragkraften, vindhastigheten, rotationshastigheten samt vridmomentet. Detta kan sedan jämföras med stigningen efter tester är utförda för att ge ett intryck av stigningens inverkan på propellerns verkningsgrad utan att motorns verkningsgrad påverkar resultatet.

2.4.2 Stigning

Det andra värdet som behöver uppmätas efter propellerns verkningsgrad är stigningen själv. Stigningen mäts som vinkeln mellan centerlinjen av propellerbladet den så kallade chord line på engelska samt rotationsplanet vilket kan ses tydligt i Figur 2. Detta kan sedan exempelvis drivas via ett servo där en vridning av servoarmen resulterar i en viss gradändring. Alternativt kan ett manuellt system skapas som håller fast en speciell stigning som är tidigare uppmätt vilket kan noteras ner innan testet påbörjas.

Många propellrar anger måtten på sin stigning på följande form: Diameter x Stigning. Denna form av mått på stigning beräknas enligt Vorkoetter (2002) [12] som:

$$S=0.75\pi*D*h/b$$

Där D=Diameter

h=höjd

b=bredd

S= Stigning, angett i meter.

Där alla värden uppmäts 0.75D från navets centrum.

2.5 Marknadssökning

Inom skalan som arbetet befinner sig i kan likartade produkter finnas inom RC det vill säga radiostyrda flygplan där modellplan med varierande stigning har existerat länge. Mer inflytande kan hittas i större skala från de drönare som används militärt samt de drönare som används civilt. Många av de som används civilt använder ett så kallat quadcopter upplägg som är mer passande till andra applikationer än det arbetet fokuserar på. Dessa quadcopters har som namnet antyder fyra stycken propellrar som används på ett liknande sätt till en helikopter.

I större skala används varierande stigning i större utsträckning där även ett av det vanligaste civila flygplanet Cessna 172 har en variant med varierande stigning. Militärt sett har de flesta propellerflygplan ersatts idag av jetmotorer, men används fortfarande på transportflygplan som exempelvis C-130J Super Hercules som utnyttjar varierande stigning vilket syns i Figur 6.



Figur 6 Ett propellernav från ett C-130J Super Hercules med varierande stigning, Taget via [4] av Pingstone.A

Inom marknaden idag har däremot många av de kvarstående billigare propellerflygplanen inte varierande stigning på grund av den tillagda komplexiteten samt kostnaden som den medför. Detta kan förklara varför det inte används i stor utsträckning idag inom drönare där ofta vikt samt storlek kan göra det svårt att rättfärdiga användningen av varierande stigning.

Vid närmare undersökning av de nav som finns på marknaden idag i den eftertraktade skalan framkom det att utbudet av nav för flygplan är ytterst begränsat. Utbudet av RC-helikoptrar är dock betydligt större, det är därför inte förvånande att de nav som finns tillgängliga är mycket lika de mekanismerna som används för RC helikoptrar.

Den vanligaste mekanismen i den skalan som var intressant framgick ur marknadssökningen som ett system vilket fäster två armar runt en axel som i sin tur sitter fäst till propellerbladen. När axeln trycks framåt eller bakåt trycks propellerfästerna som i sin tur roterar vilket leder till en ändring i stigningen på propellern. Detta kan ses i Figur 7.



Figur 7. Exempel på en varierande stigning design i plast

Detta skapade ett problem för att använda de motorer samt navfästen som Sjöräddningssällskapet hade tillgängligt då dessa inte var ihåliga vilket innebär att de inte kan passas med en axel med ett sådant system för varierande stigning. Därför söktes det efter ett system som inkluderade både en motor med ett nav som tillåter varierande stigning som idealt sätt även kunde anpassas till de torderade propellrar som Sjöräddningssällskapet redan hade till hands.

2.6 Servo

Ett servo är en liten elektrisk enhet som konverterar en insignal given av användaren till rotation av ett kugghjul som oftast driver en servoarm. Denna kan i sin tur kopplas till en mängd olika system. För varierande stigning är det vanligt att utnyttja ett servo för att ändra stigningen. Dessa mindre servon används för många applikationer utöver detta som exempelvis inom RC flygplan för att styra skevroder med mera. Ett exempel på ett av gruppens servon syns i figur 8.



Figur 8. Ett införskaffat servo av Futaba

2.7 Passiv stigning

Den tidigare diskuterade hydrauliken för större applikationer samt den elektriska metoden med ett servo täcker den största utsträckningen av implementationer av varierande stigning idag. Det finns däremot en eftersträvd passiv lösning, som utan något kommando från människa eller dator kan variera stigningen av sig själv för att behålla den eftersträvide anfallsvinkeln genom hela flyget.

Inom detta område finns det en hel del prototyper samt arbeten skrivna exempelvis [7] Heinzen et al. (2015) som skapade ett helt passivt system, beroende av en unik vingprofil till propellerbladet. Genom att sedan sammankoppla bladen med ett mekaniskt system placerat i propellernavet kan bladen roteras tillsammans då avanceringstalet ändras.

Ett annat exempel kan hittas av [8] Burger, C (2007) som skapade ett system som varierar stigningen genom att uppmäta vridmomentet som överförs till propellern samt koppla en så kallad "constant torque spring" mellan propellern och motorn. Med hjälp utav detta kan sedan propeller stigningen ändras när vridmoment överstiger den mellankopplade constant torque spring. Vilket genom att verka på ett mekaniskt system placerat i propellernavet roterar bladen, när anfallsvinkeln ökas minskas vridmomentet vilket gör att det mekaniska systemet håller fast bladen.

Ännu en rapport som är av betydligt intresse är den skriven av [9] Rhyne (2018) denna rapport undersöker båda de innan nämnda systemen. De analyserar deras genomförbarhet i verkligheten samt utför en egen design. Denna designen varierar stigningen passivt genom att då ett visst varvtal överstigs tillåta ett mekaniskt system att rotera propellerbladen som i sin tur sänker rotationshastigheten likt de tidigare diskuterade CSUn i mindre skala.

Alla dessa system uppmätte en ökning i verkningsgraden jämfört med ett system med låst stigning. Detta påvisar att det finns möjligheter att variera det passivt idag men det bär en viss mängd risker som exempelvis beskrivs av Heinzen et al. (2015) där de vibrationer som uppstod vid 5000 RPM i ett vindtunneltest vid ungefär 15m/s skakade loss delar av det mekaniska systemet som höll de två olika propellerbladens stigning lika. Exempel som detta visar att de mekaniska systemen kan vara känsliga till externa faktorer som uppkommer vid flygning. Med detta i åtanke beslutades det att vibrationer bör uppmätas samt betraktas i testerna som utförs senare i arbetet.

På grund av de risker kring vibrationer samt den ökade komplexiteten dessa passiva system innehar beslutades det att fokusera på tester med ett servo alternativt ett manuellt system för att variera stigningen. Detta på grund av de tidsbegränsningar som fanns för arbetet som ansågs vara för kort för att även testa de passiva systemen som har diskuterats i kapitlet.

3. Metod

I detta delkapitel beskrivs metoden bakom arbetet, det beskriver vägen till de resultat som senare beskrivs, allt från testtriggen som uppmäter data, testmetodiken själv samt hur testerna utfördes.

3.1 Motor & Nav

För att mäta varierande stigning införskaffades en speciell motor samt navanordning, sålda tillsammans som Hobby Wings MEVP2216. I denna anordning vilket är mycket likt det tidigare diskuterade RC helikopter varianter sitter en ihålig motor fäst runt en axel som sitter kopplad till propellerbladen. Utöver detta sitter det framför propellern fäst till axeln en cylinder som är inskruvad till propellerfästen. När axeln pressas framåt vrids dessa propellerfästen via den cylindern som i sin tur roterar propellerbladen till en ny stigning. Detta visas i Figur 9 samt 10 nedanför.

Med hjälp utav denna anordning kan stigningen varieras drastiskt mellan olika lägen, det krävs däremot något för att låsa fast axeln annars kommer propellern när den går upp i varv återvända till ett neutralt stigningsläge på grund av det återförande momentet som skapas av propellern. Detta kan skapa risker för motorn då det kan leda till en plötslig kraftig ökning i varvtalet då luftmotståndet för propellern minskar då stigningen blir finare.



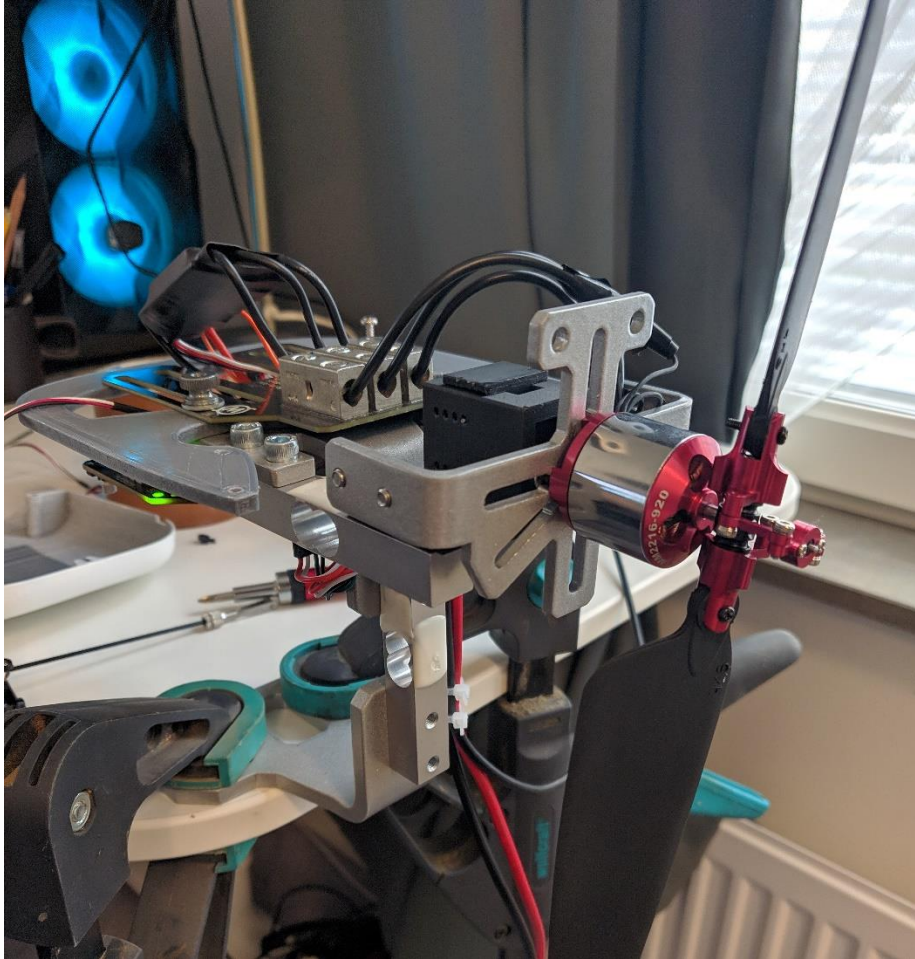
Figur 9. Neutralt stigningsläge



Figur 10. Extremt stigningsläge

3.2 Testriggen

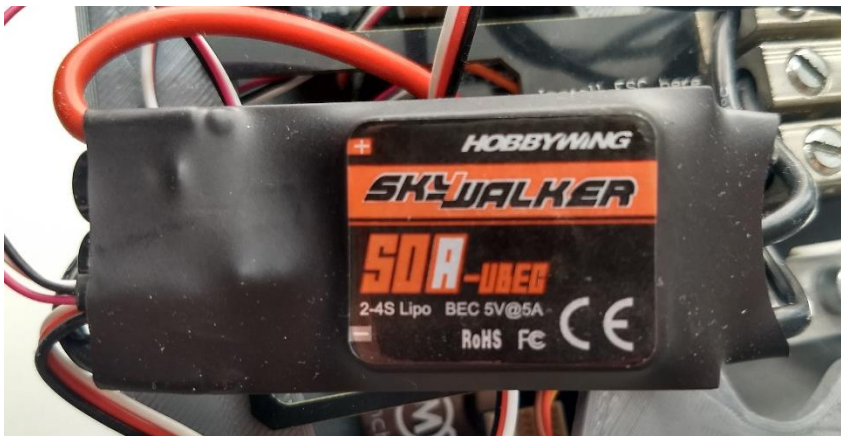
För att analysera påverkan av stigning utnyttjades en testrigg, RC-benchmark Serier 1580. Vilket gjordes tillgänglig av Sjöräddningssällskapet som tillåter anslutning av en motor samt nav, som kopplas till ett elektriskt fartreglage en, ESC. Den fästs sedan i tur till ett nätaggregat eller ett batteri för drivning. Värden uppmäts med mätdon från testriggen som kan uppmäta intressanta värden som dragkraft, vridmoment, vibration med mera. Värdena betraktas sedan med hjälp utav programmet RC-benchmark som exempelvis drivkraft, verkningsgrad samt effekten som tillförs. En bild på testrigg med propeller samt nav syns i figur 11.



Figur 11. Testtriggen med ansluten motor samt propeller

3.2.1 Elektriskt fartreglage

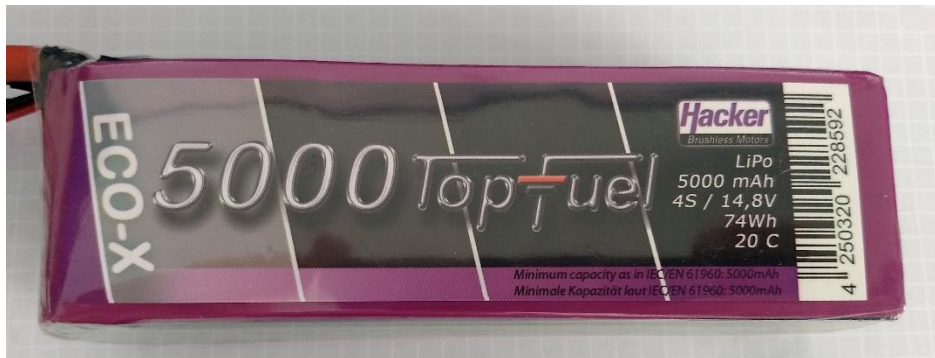
För att koppla motorn till testtriggen används ett elektriskt fartreglage även kallat ESC för att sammankoppla de två delarna. ESC:n funktion är att se till att motorn får den effekt den behöver samt kontrollerar som namnet benämner farten som motorn skall utge, se figur 12 för exempel.



Figur 12. ESC:n som användes av gruppen

3.2.2 Kraftkälla

Med motorn nu kopplad till testtriggen behövs en kraftkälla för att driva den. Här används antingen batterier av modell 5000 Top Fuel, synlig i figur 13 eller ett nätaggregat som Sjöräddningssällskapet har försett. Nätaggregatet har fördelen att den ger ut en konstant spänning jämfört med batterierna som under användning tappar spänning, men under kortare tester kommer detta ha ett försumbart inflytande på testerna.



Figur 13. Batteriet som användes med testtriggen

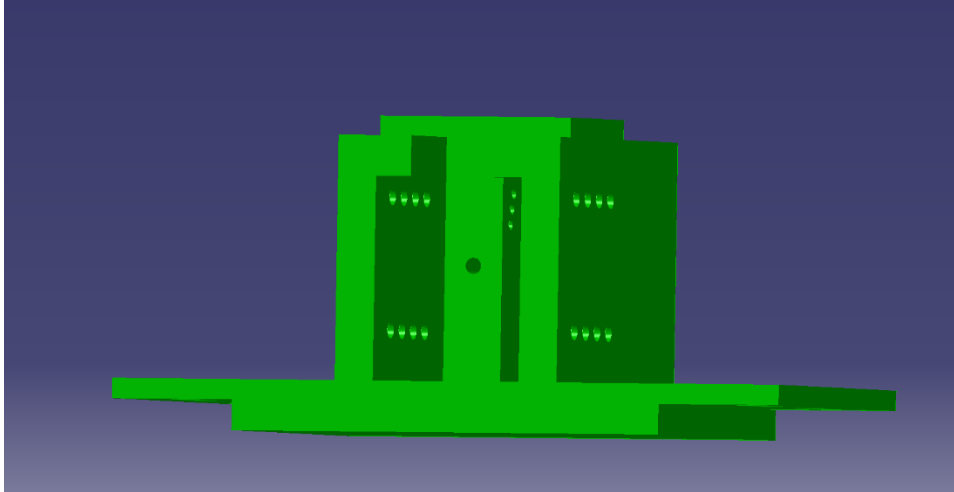
3.3 Mjukvara

Den data som uppmäts av testtriggen kommer som nämnt tidigare in i programmet RCbenchmark. Programmet ger därefter ut data i grafer inom programmet samt producerar filer som kan föras vidare till Excel där det kan analyseras djupare. Programmet tillåter även en mängd inställningar för säkerhet som automatiskt slår av strömförsörjningen till motorn om olika värden överstigs som skyddar både operatör samt hårdvaran. Vidare har programmet även stöd för justering av ett servo som är det ideala sättet att justera stigning.

3.4 Stigningslås

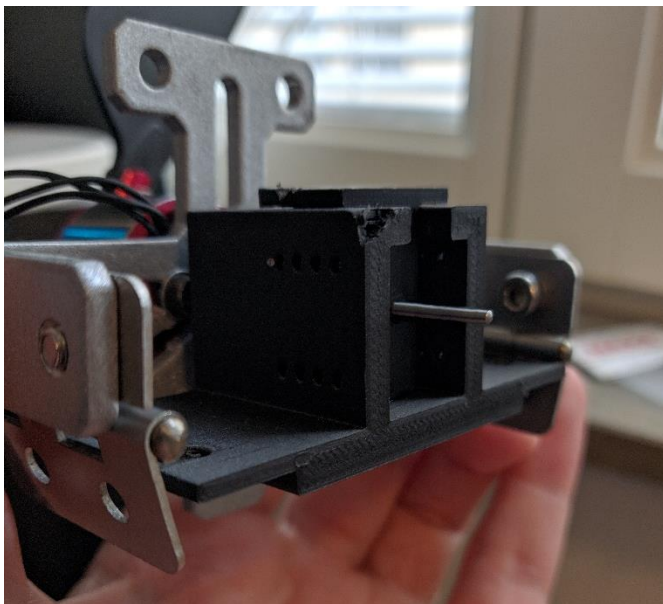
För att kunna ändra samt hålla stigning behövdes separata delar skapas för att låsa fast stigningen samt sedan ändra den. Först planerades det att använda ett servo som införskaffades men att anpassa detta till testtriggen var svårt på grund av det begränsade området bakom axeln.

Med detta i åtanke användes CAD för att skapa en anordning som kan låsas fast runt axeln samt justeras manuellt till nya stigningar men även passa in i det begränsade område som var tillgängligt, vilket syns i Figur 14. Detta 3D printades sedan ut samt anpassades in i testtriggen.



Figur 14. CAD modellen för stigningslåset

Stigningslåset bygger på att en axelhållare placeras i en ombyggnad som sitter fäst till testtriggen. Genom dessa sitter ett flertal hål där en mindre cylinder kan föras igenom som låser ihop axelhållaren med ombyggnaden, detta låser i sin tur axeln till testtriggen som stoppar propellern från att återgå till ett neutralt läge då propellerns hastighet ökar. Detta tillåter snabba manuella justeringar med det begränsade utrymme som är tillgängligt i testtriggen, vilket visas i Figur 15.



Figur 15. 3D printad manuellt stigningslås

Den införskaffade motorn kan nu fästas med hjälp utav stigningslåset kan den inställda stigningen hållas i plats medans data uppmäts. I Figur 16 visas propellern i ett mellanläge där axeln har tryckts framåt sedan fästs med stigningslåset.



Figur 16. Propeller med justerad stigning

3.5 Felkällor

För att säkerställa att mätdatan som tas ut från testriggen är jämförbar samt tillförlitlig är det viktigt att under hela processen se över möjliga felkällor. Inom testriggen kan ett flertal felkällor tas fram som variationer i programmet i sig själv som oscillerar runt det egentliga värdet. Jämfört med andra felkällor ses detta som försumbart då det är väldigt små variationer. Större problem kan framstå från vibrationer i testriggen vilket åtgärdas med regelbunden koll på skruvar samt mätning i programmet själv, detta tas extra hänsyn till med tanke på den tidigare diskussionen i teorin. Även skador till propellerbladen måste regelbundet överses då små sprickor i kanterna kan ha stor betydelse för testresultaten samt utsätter både riggen samt operatören för risker vid eventuellt propellerhaveri.

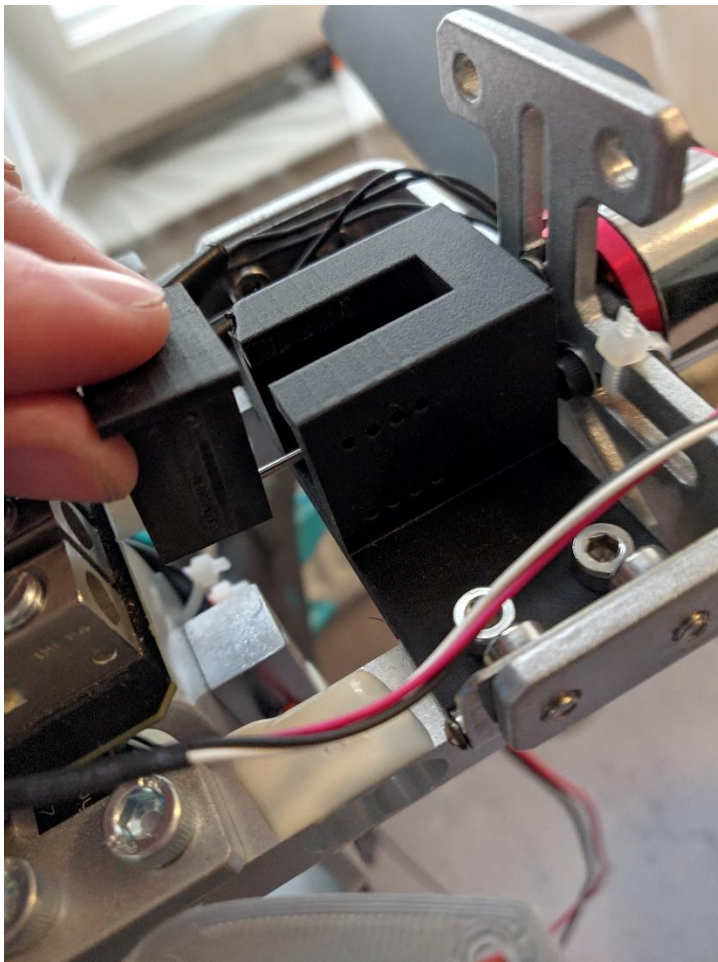
Det är även viktigt att miljön kring testriggen hålls konstant under tester då ändringar i luftströmmen runt om propellern kan orsaka variationer i verkningsgrad som kan ha betydelse för resultaten, genom att hålla miljön konstant kan effekten av miljön bortses från då den påverkar alla tester till samma grad. Tack vare arbetet av en grupp som utförde ett separat arbete med Sjöräddningsällskapet införskaffades ett aerodynamiskt hölje för testriggen. Detta för att minimera dess påverkan på vinden innan den träffar propellern.

3.6 Propellertest

Först jämfördes propellrar A, B samt C som visades i kapitel 2.3, Figur 5 för att säkerställa vilken som ska användas för tester. Propeller B uppskattades vara mycket obalanserad vilket gav upphov till större vibrationer. A samt C ansågs likvärdiga gällande vibrationer, A valdes då den mindre diametern förväntades minimera risken för haveri i framtida tester.

3.7 Statiskt test

För att utföra statiska tester monterades testtriggen med hjälp utav tving till ett stabilt bord. Vilket tillät monteringen av nav samt motoranordningen till testtriggen vilket ankopplades till riggen via en ESC. För att låsa stigningen placerades stigningslåset runt axeln tillsammans med att cylindern fördes igenom stigningslåset vilket säkerställde att stigningen var fastlås. Monteringen visas i Figur 17.



Figur 17. Montering av stigningslås runt axeln

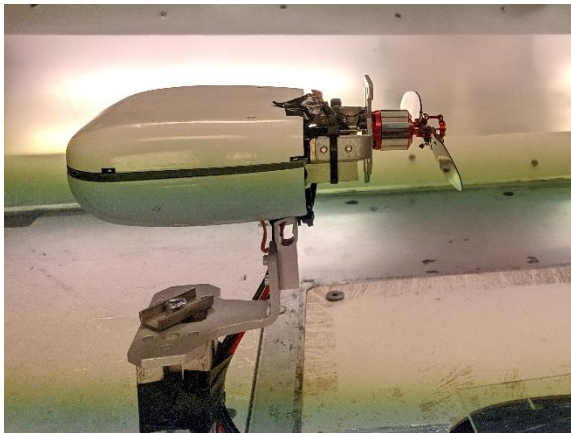
Innan testet kunde påbörjas diskuterades säkerhet, den primära risken ansågs vara att ett propellerblad kunde spricka vilket hade resulterat i att den kunde flyga iväg mot gruppen under

operation. Därför beslutades det att placera sig ett par meter ifrån riggen samt göra regelbundna inspektioner av propellerbladen. Utöver detta användes skyddsglasögon i kombination med en genomskinlig plastbricka för att skydda ansiktet. För att undvika olyckor när ändringar till stigningen skulle utföras kopplades batteriet ut innan gruppen utförde ändringar på testriggen.

Därefter påbörjades testet i ett neutralt stigningsläge, varvtalet ökades upp med målet på 4000 rpm, därefter stängdes motorn av och stigning ökades i tur genom spannet. Riggen höll bra under testets gång men en del vibrationer uppmättes som antogs vara i stor del på grund av de tving som användes för att fästa riggen. Riggen avklarade hela spannet av stigningsvinklar utan några problem riggen ansågs därför redo för test i vindtunnel.

3.8 Vindtunnel test

Med riggen redo bokades tid för test vid Chalmers Ströminingslaboratorium. Med de statiska testerna utförda kvarstod det att se hur designen skulle klara sig i en verklig miljö. Först översågs ett par tester gjorda av en separat grupp för att få en förståelse för hur testandet bör utföras i vindtunneln. För att minimera störningar i vindtunneln samt för att skydda kablarna tejpades det ner som kan ses i Figur 18 nedanför. Här ser man även monteringen av bottenarmen av testriggen in i en metallstav samt det aerodynamiska höljet.



Figur 18. Montering av testrigg i vindtunnel

Med riggen fastmonterad samt nyladdade batterier inkopplade påbörjades det med statiska tester för att säkerhetsställa att allt betedde sig korrekt. Efter ett flertal ändringar i stigningen samt uppgång i höga varvtal ansågs riggen redo för påbörjan av test med vindhastighet.

För att utföra testet så säkert som möjligt ändrades vindhastigheten i steg av 5m/s. Därmed sattes vindtunneln till 5m/s sedan inväntades det att tunneln går upp i korrekt hastighet. Förutom en liten ökning i vibrationer klarade riggen av att gå upp till de begärda värden vid 5m/s men med en märkvärdig ökningen av varvtal med vindhastigheten. Detta tillsammans med en egenfrekvens gav gruppen ett spann där riggen gick upp i kraftiga vibrationer vilket påfrestade stigningslåset speciellt.

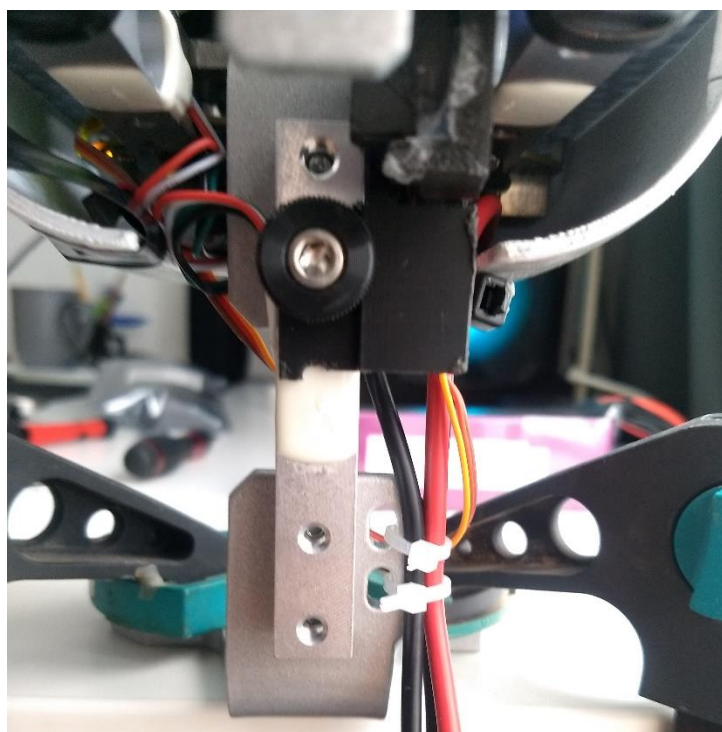
Detta visade sig vara betydligt värre vid 10m/s där vibrationerna skakade loss stigningslåset vilket drog tillbaka stigningen till ett neutralt läge vilket gav en kraftig uppskjutning av varvtal. Med snabba händer på av knappen i RCbenchmark klarade sig motorn samt propellerbladen från skador men det blev tydligt att stigningslåset i sig inte kunde utföra sin funktion som hade

funkat så väl statistiskt. Detta på grund av de toleranser 3D-printingen var utförd med, samt en design som inte är väl anpassad för att absorbera de vibrationer som uppstår i testtriggen speciellt vid högre vindhastigheter.

3.9 Ny design samt implementering av servo

Med det första testet ett misslyckande behövdes ett totalt omtänkande på hur testet skulle utföras . Med assistans från personal från Chalmers Strömingslaboratorium lånades ett Servo i mindre storlek som inte hade varit tillgängligt under marknadsundersökningen.

Med tidsbegränsningar i vindtunneln samt endast få möjligheter för att kunna utföra ett nästa test var det extremt viktigt att detta anpassades till testtriggen under väldigt kort tid. Därför användes snabbare lösningar vilket resulterade i att servon blev fäst till testtriggen via att skruva fast servon till plastbrickor som i tur skruvades fast till testtriggen vilket visas i Figur 19. Även anpassningen mellan servon samt axeln var problematisk då axel storleken jämfört med den mindre servon gjorde det svårt att fästa de till varann. Med hjälp utav en tång deformerades servoaxelkopplingen runt axeln som låstes fast till servon. Eftersom detta skapade risker för vidare lossning av stigningen vid de kraftiga vibrationer som tidigare hade uppmätt bestämdes det att låsa servon väldigt hårt samt reducera spännet servon kunde röra sig i. Detta minskade mängden stigning som var tillgänglig men med de korta tidsmöjligheterna samt riskerna för ännu ett misslyckat test av vibrationer ansågs det vara acceptabelt.

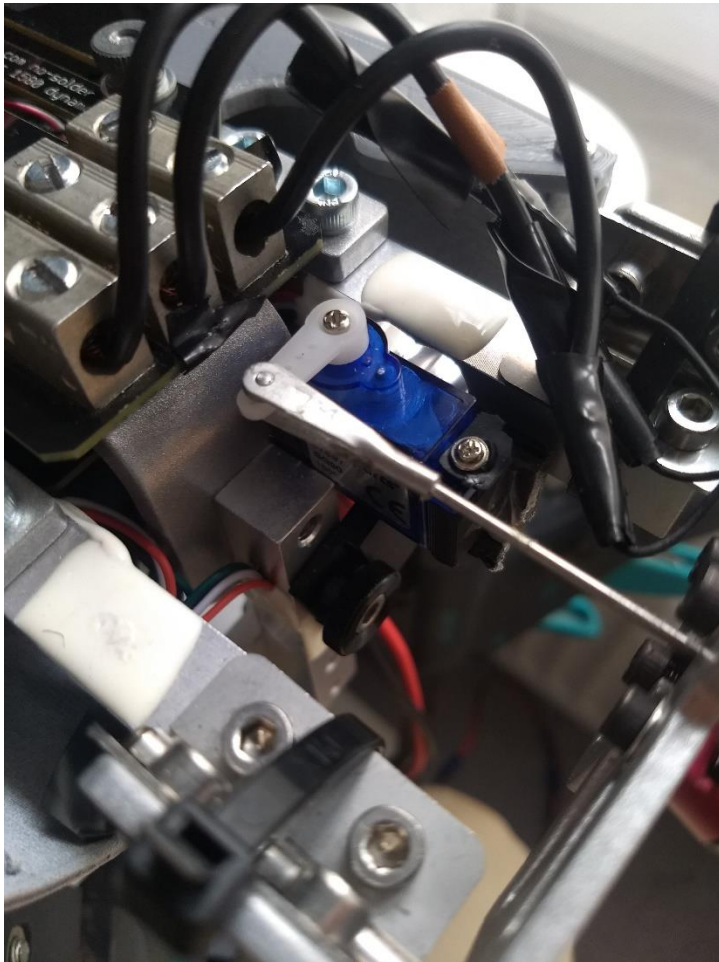


Figur 19. Servo monterad till testtrigg med skruv

3.10 Statiskt test av servo

För att höja säkerheten på att det nya systemet skulle hålla upp i vindtunnel beslutades det att utföra ett till statistiskt test. Även om det tidigare testet hade visat att det som uppmäts statistiskt inte går att direkt jämföra till det som uppmäts i vindtunnel. Testet kunde däremot användas för att verifiera att stigningen kan ändras under testets gång samt säkerhetsställa att ändring av stigning inte skulle orsaka en lossning av servon eller liknande problem. Riggen monterades därför upp som innan med hjälp utav tving.

För att få en närmare inblick på hur servon agerade under ändring placerades en kamera ovanför testriggen som sedan kunde betraktas under testets gång. Där sågs en del oroväckande böjningar i armen vid de maximala stigningsvärden. Med de högre vibrationerna från vindtunneln i åtanke sänktes därför spannet av stigningsvinklar för att säkerställa att data kunde utmätas, monteringen av Servon kan ses i Figur 20.



Figur 20. Servon monterad samt placerad kring axeln

3.11 Andra Vindtunnel test

Med en nytänkt plan kunde det andra testet i vindtunnel påbörjas vilket utfördes på samma sätt som innan på ett mycket varsamt sätt. Servon visar ännu en fördel jämfört med stigningslåset då den tillåter ändringar av stigningen under testets gång utan att detta måste utföras manuellt. Oro över att servon skulle misslyckas med att hålla fast stigningen kunde snabbt överses då den tidigare starka fästningen av axeln till servon höll genom de höga vibrationer som uppstod vid högre vindhastigheter.

Testerna utfördes utan de problem som uppstod första gången, med både mer erfarenhet av vindtunneln samt en bättre lösning skapades ett bra tillstånd för att lugnt kunna samla in data. Det enda märkvärda problemet för riggen i sig var att säkerhetsgränsen för vibrationer behövdes höjas för att övergå egenfrekvensen vid högre vindhastigheter då krafterna övergick säkerhetsgränsen som RCbenchmark själv har som förinställd.

Testerna pågick bra fram till 15 m/s där riggen utsattes för större krafter samt vibrationer. Speciellt propellerbladen var oroväckande då propellern utsätts för stora krafter av de höga varvtalen, vibrationer samt vindhastigheten. Efter insamling av data stängdes vindtunneln av för att analysera hur propellerbladen hade avklarat den högre vindhastigheten.

3.11.1 Ytsprickor samt sprickutbredning

Vid närmare analys av propellerbladen visade det sig att ytsprickor hade börjat uppstå under testet vid 15m/s. Sprickorna i sig var fortfarande relativt ytliga men sprickutbredningen hade tagit sprickorna tvärs över propellerbladet med ett flertal sprickor närmande varann. På grund av detta ansågs det för riskfullt att uppgå i hastigheter högre än eller lika med 20m/s detta för att inte riskera ett haveri som hade kunnat skada både motorn samt resultera i bitar av propellrar genom hela vindtunneln, med dessa faktorer i åtanke avslutades testet.

3.11.2 Begränsningar av system

Med avseende på den korta tiden som fanns mellan det första samt andra testet kom en hel del begränsningar in i systemet. Med en väldigt precis passning av servon inom testriggen kunde inte hela spannet av stigning för navet utnyttjas. Även fästningen mellan servon samt axeln minskade spannet som var tillgängligt för att reducera risken att vibrationer skakade loss axeln från servon. Det begränsade spannet reducerade den data som kunde uppmätas för att ge den ideala stigningen för en viss vindhastighet. Det ansågs däremot kunna ge resultat nog att påvisa potentiella vinningar av varierande stigning jämfört med en låst stigning propeller samt var det den data som kunde samlas med den tillgängliga utrustningen.

Med avseende på de begränsningar som uppstod under arbetets gång samt problem som alltid kommer fram i verkliga tester bestämdes det att för att komplettera resultatet med hjälp utav simuleringar.

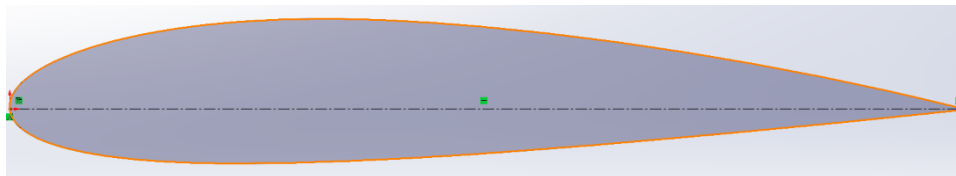
3.12 Modellering av propeller

För att besvara Sjöräddningssällskapets frågeställning om de vinningar i verkningsgrad som kan förväntas med variabel stigning utfördes simuleringar på en propeller i Computer Fluid Dynamics, med hjälp utav programvaran Simscale. Simscale valdes då det har ett användarvänligt gränssnitt samt att de erbjuder en stor mängd processor-timmar, vilket är ett måttvärde för tiden en dator arbetar på ett projekt för simulering genom molnet för studenter. Detta underlättar gruppens arbete betydligt då många simuleringar kan utföras samtidigt.

Innan simuleringar kan utföras behövdes en CAD-modell av en propeller, som referens väljs Aeronaut CAM Carbon 12 X 6,5 då denna propeller bestämdes att ha bäst systemverkningsgrad av Hellekant. (2020). Den data som var tillgänglig från tillverkaren för den valda propellern är: 30.5x16.5, vilket är ett mått på propellerdiametern respektive stigningen.

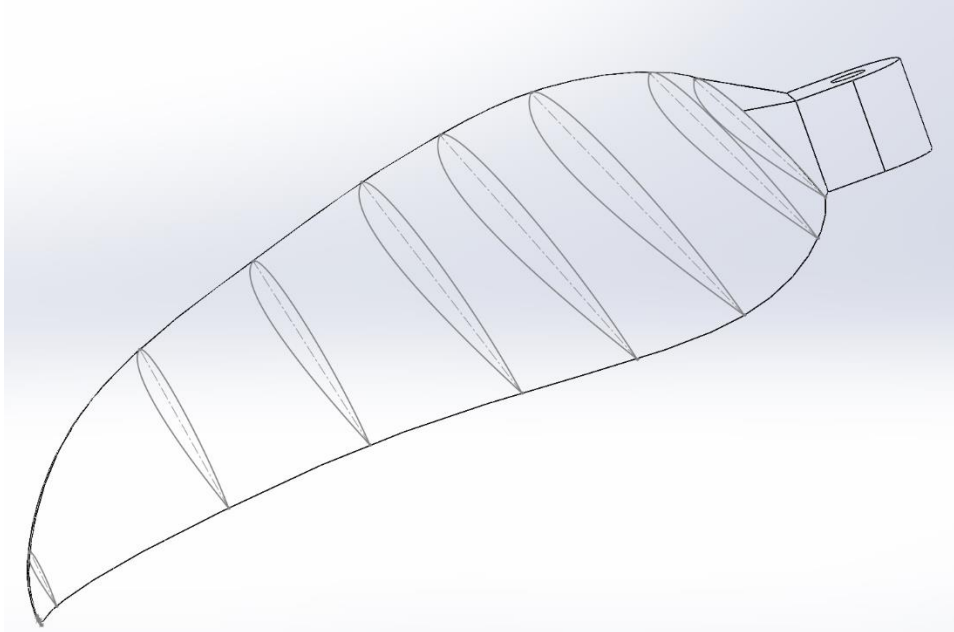
Inspektion av propellern visar att propellerns vingprofil är torderad vilket diskuterades i mer detalj i kapitel 2.3, detta till skillnad från de propellrar som testades i vindtunneln. Först utfördes mätningar av propellerns geometri för att skapa en bas för modellen, exempelvis centrumlinjens längd vid olika propellerradier samt propellerfästets geometri.

Amerikanska National Advisory Committee for Aeronautics tillhandhåller geometriska data för många olika vingprofiler [6]. Gruppen använde sig av de enklaste fyrsiffriga NACA profilerna, där siffrorna innehåller information om vingprofilens geometri. Vingprofilen importerades till CAD-miljön samt skalades upp för att matcha den uppmätta geometrin ett exempel på detta visas i Figur 21.



Figur 21. NACA 2415 vingprofil i CAD-miljö.

Denna vingprofil roterades längst bladets längd vilket ger propellern en tordering, för en tydligare bild se Figur 22 som visar propellern med vingprofiler samt deras tordering synliga. Även propellerns fäste kan ses modellerad.



Figur 22. CAD-modell av propeller med vingprofiler synliga.

Även ett nav för att variera stigningen behövdes vilket skapades i CAD där två propellerblad kan placeras samt tillåter en snabb ändring av stigningen. Med propellrar samt nav skapade kan den geometriska stigningen för propellern verifieras. Med den geometriska datan synlig i Figur 23 kan propellerns stigning beräknas till: 30.2x16.5cm, mycket nära det för originalet, som svarar mot en stigningsvinkel på 13°. Propellern har en konstant tordering på 113° per meter.

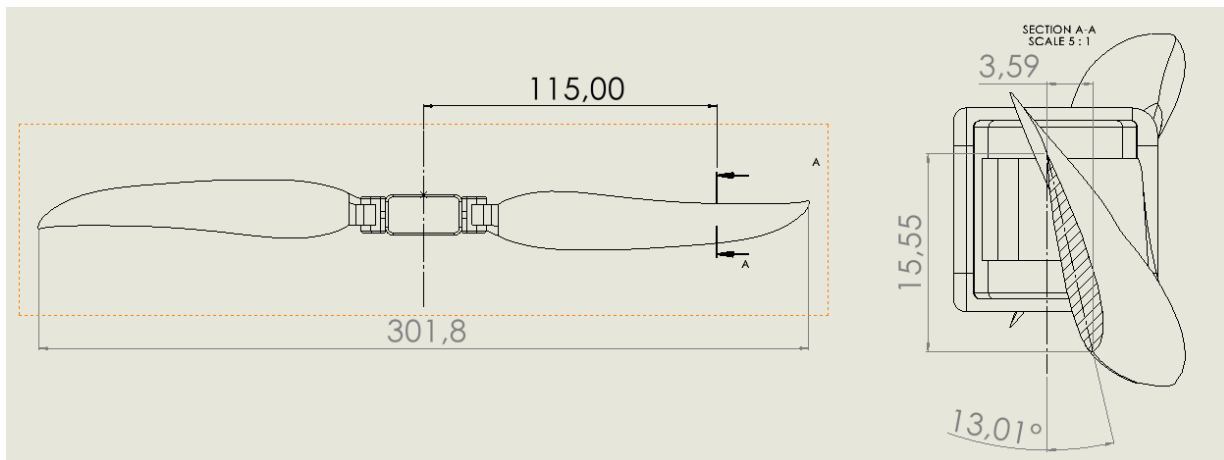
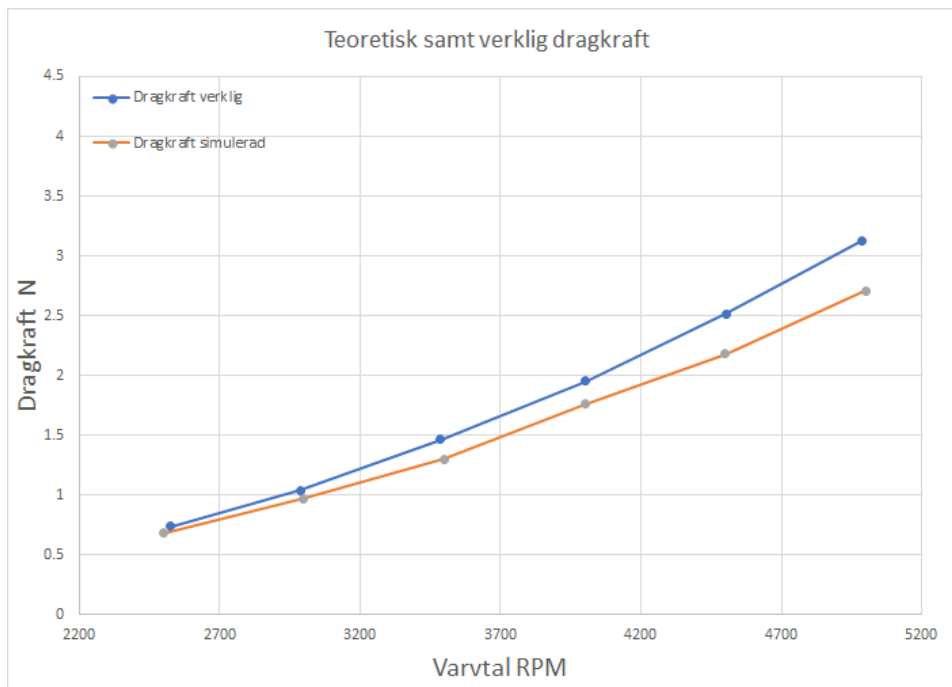


Fig 23. Dimensioner för det slutgiltiga navet samt propellrar.

För att verifiera att gruppens propellermodell stämmer överens med den verkliga propellern utfördes statiska tester med Aeronaut CAM Carbon 12 X 6,5 där dragkraften uppmättes. Olika vingprofiler prövades sedan tills den nyskapade propellermodellen liknade resultaten som de statiska testerna gav.

Detta test syns i Figur 24, där den valda vingprofilen för simulering är NACA2415. NACA2415 matchar den fysiska propellern väl vid låga varvtal men presterar något sämre vid höga varvtal.

Detta anses vara godtagbart då det skapar en säkerhetsmarginal som innebär att värden som uppmäts för den simulerade propellern inte överskrider den fysiska.



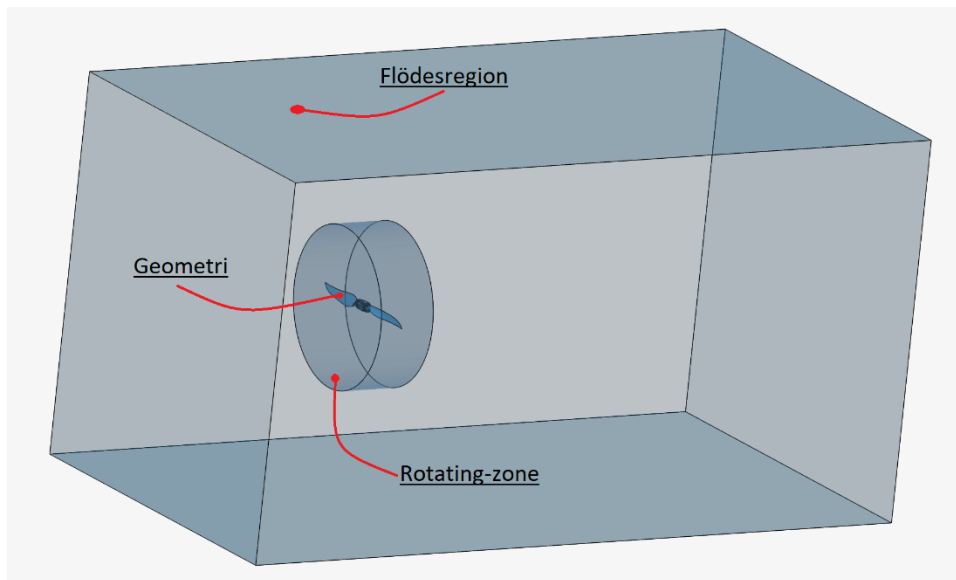
Figur 24. Graf av uppmätt dragkraft samt simulerad dragkraft för propeller.

3.13 Simulering

Med en propeller skapad kunde simuleringar utföras, detta gjordes i programvaran Simscale, där en simulerad vindtunnel skapas vilket tillåter propellerns beteende att uppmätas vid olika vindhastigheter. För att skapa simuleringen implementerades den 3D modellerade propellern, därefter infördes en flödes-region för materialet som strömmar kring propellern, vilket i detta fall är luft vid normalt atmosfärstryck. För att simulera propellerns rotation krävs en så kallad "rotating-zone" kring propellern, där luftströmmen kring propellern sätts i rotation istället för själva propellern, detta kan ses tydligare i Figur 25.

Propellern samt dess rotationsområde placerades närmare luftens inlopp för att ge mer utrymme för de effekterna som uppstår i regionen bakom propellern, utan att skapa en för stor flödesregion som är hårdvaruintensiv att simulera. Dessa effekter som medförs av propellerns dragkraft samt moment uppmäts av virtuella sensorer placerade på propellerns geometri.

Det behöver även påpekas att det uppmätta momentet är det momentet propellern utsätts för av luftströmmen men i detta sammanhang är det ekvivalent med det momentet som en motor måste övervinna för att framföra propellern genom luftströmmen.



Figur 25. Simulationens primära delar med tillhörande namn

För att utföra simuleringar måste så kallade meshar skapas, vilket är den processen då modellens kontinuerliga geometri finfördelas i element för simulering. Detta är ett processorintensivt förlopp därav är det viktigt att minimera storleken på flödesregionen för att inte slösa processortid samt elektricitet.

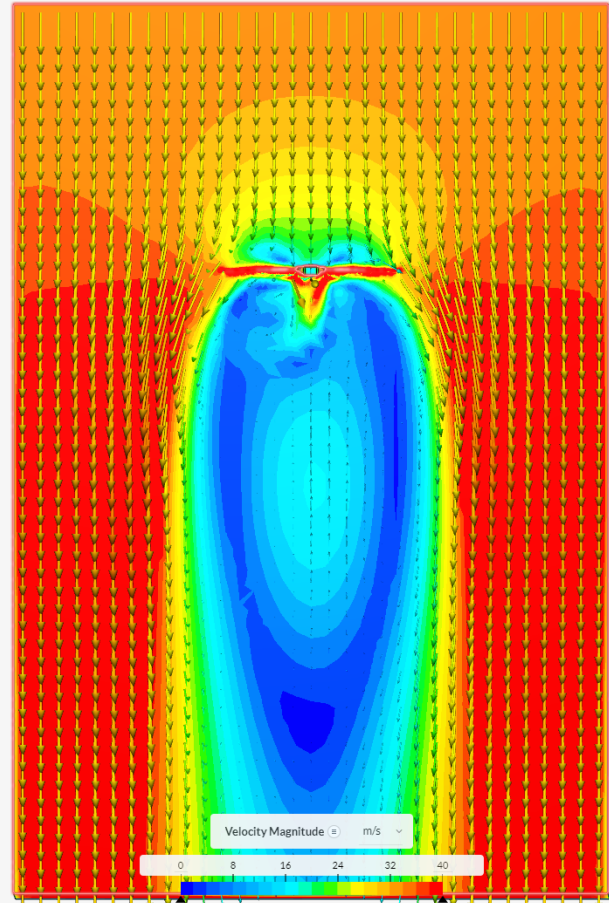
Då Sjöräddningssällskapets drönare förväntas framföras med två primära hastigheter, lågfart vid 15m/s samt marschfart vid 35m/s, utförs simuleringarna vid dessa vindhastigheter.

Simulering i sig sker på den ändring i hastighet på luftströmmen som propellern ger upphov till. Vid normala omständigheter ger propellerns rotation upphov till en ökning av lufthastigheten kring propellern, som är större än det luftmotstånd som propellern position i luftströmmen ger upphov till. Detta syns exempelvis i Figur 26, där de röda områdena visar en högre lufthastighet samt hastighetsvektorerna tydliggör riktningen av luftströmmen.

Däremot vid lägre varvtal, speciellt då vindhastigheten är hög kan inte propellern övervinna det luftmotståndet den själv skapar vilket resulterar i en region av lägre vindhastighet bakom propellern vilket synliggörs av den blåfärgade regionen i Figur 27. Dessa fall orsakar icke konvergerande simuleringar, för att undvika detta valde gruppen att använda avanceringstal som faktor för simuleringar, då detta är en dimensionslös kvot av just varvtal samt vindhastighet. Konsekvens av detta är att vid höga vindhastigheter erfordras högre varvtal.



Figur 26. Analys av korrekt fungerande propeller



Figur 27. Analys av propeller som ger nyttig dragkraft

För att minska antalet processortimmar som krävs för simuleringen skapades en design för ett experiment i JMP-pro. Designen för de båda experimenten finns tillgängliga i bilaga A. Den responsen som söks i simuleringen är propellerverkningsgrad, som är en funktion av två faktorer, dels propellerns stigningsvinkel, från 13° till 55° , dels avanceringsstal vilket diskuterades innan.

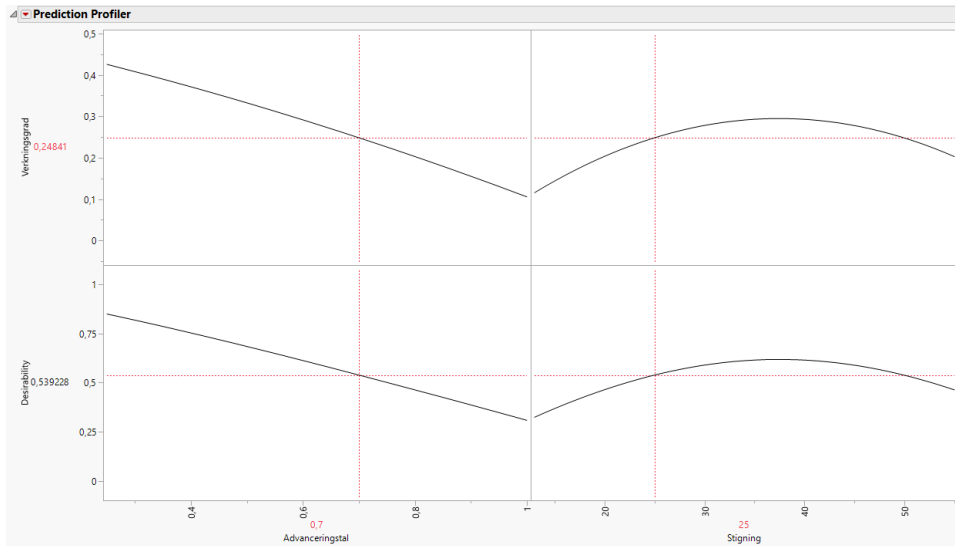
Simscale utför simuleringar iterativt, alla gruppens simuleringar har gjorts vid 1000 iterationer då detta ger pålitliga resultat för korrekt konfigurerade simuleringar. För att verifiera att simuleringen har lyckats, skapar Simscale grafer över hur de simulerade värdena konvergerar. Ett exempel på en konvergerande simulation syns i Bilaga B samt en felkonfigurerad simulering som resulterar i att den aldrig konvergerar där simuleringen avslutades efter 3500 iterationer.

3.14 Testmetodik för simulering

JMP Pro vilket benämndes i det tidigare kapitlet är ett kraftfullt statistikprogram med en mängd olika funktioner som utnyttjades under projektets gång. Speciellt intressant var Design of Experiments verktyget som tillåter skapning samt anpassning av en testplan, för exempel se Bilaga A. Programmet ges en rad faktorer som påverkar resultatet, skapar en testplan för att utreda faktorernas effekt samt samverkans-effekten mellan dem. Gruppen valde att skapa en I-

optimal design med en responsyta. I-optimal design valdes då det ger den lägsta variation på de prognostiserade värdena. En design för responsyta lägger till andragsinteraktionstermer för att skapa responsytan.

Med värden för testplanen uppmätta kan interaktioner mellan faktorer undersökas i Prediktion profiler verktyget. Detta verktyg kan förutsäga det förväntade resultatet av en kombination av faktorer samt optimera faktorerna baserat på den eftersträvade responsen. Ett exempel på detta kan ses i Figur 28 där den förväntade verkningsgraden för de två ingående faktorerna syns. Dessa faktorer har alltså inte uppmätts vid dessa värden, deras effekt är istället förutspådd av JMP Pro.



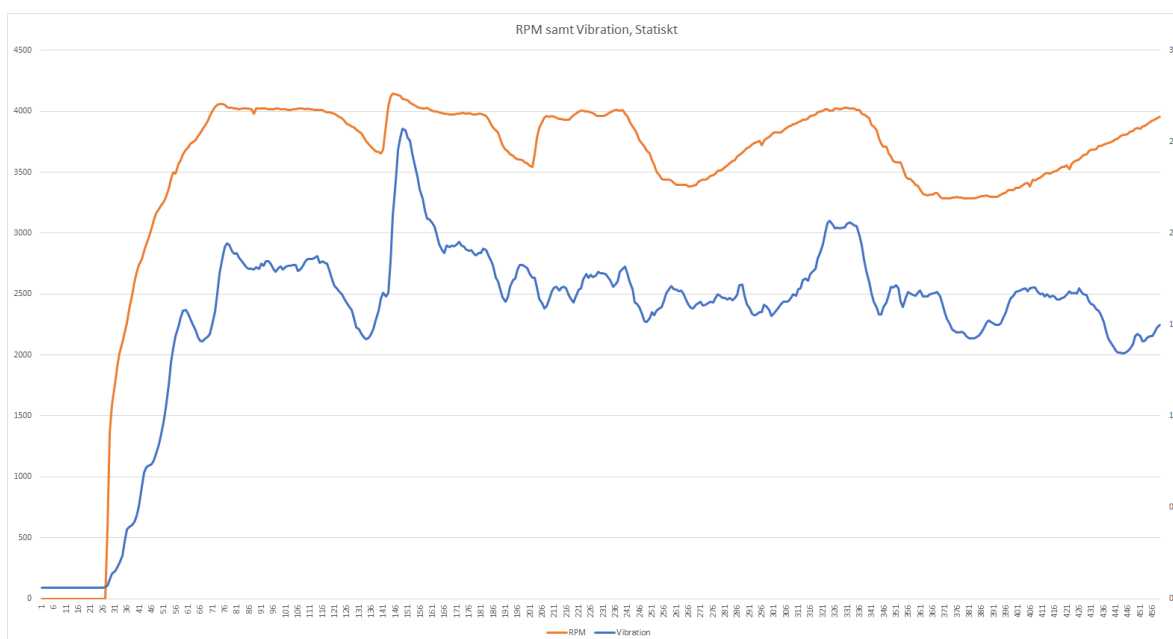
Figur 28 JMP Pro Prediction Profiler

4. Resultat

I detta kapitel diskuteras resultaten som togs fram från de testerna som gjordes. Hur datan sammanställdes, grafer över intressanta områden samt kompilering av simuleringsresultat.

4.1 Statiska Tester

Det statistiska testet som utfördes ger en del data som bör ses över. Det är viktigt att påminna sig om att propellerverkningsgrad vid stillastående tillstånd inte kan uppmätas. Detta då det beror till del av det relativa luftflödet vilket inte existerar vid ett stillastående tillstånd. Jämförelser mellan varvtal samt de uppmätta vibrationerna kan däremot undersökas då det förväntas att dessa ökas något under testet i vindtunnel vilket kan ses i Figur 29.



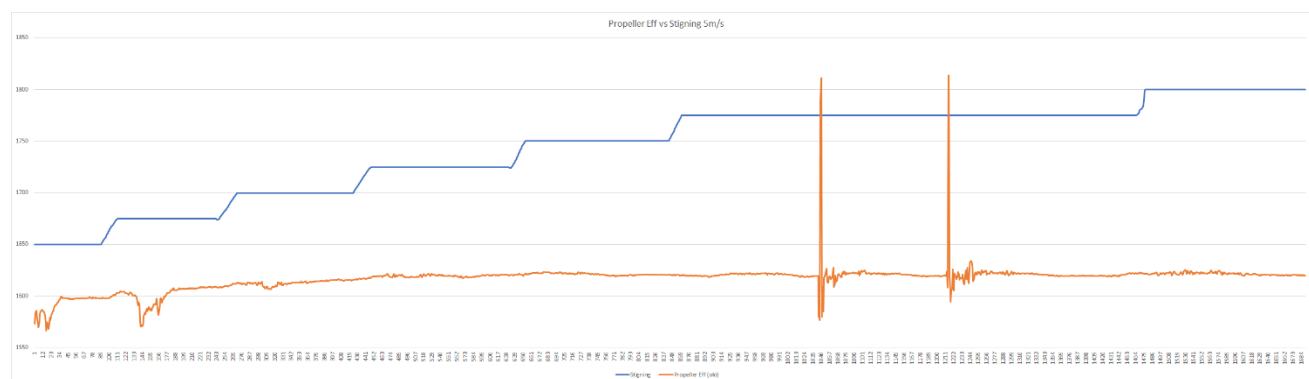
Figur 29. Del av statistiskt test, vibrationer samt varvtal jämfört, varvtal skala på vänster sida och vibrationer till höger

Vibrationerna statistiskt kan ses som relativt låga, en del av dessa kan förekomma från de tving som används för att fästa testriggen till bordet, detta elimineras i vindtunneln där en bättre fästningen med en skruv in i botten av vindtunneln kan utföras.

Eftersom propellerverkningsgraden inte kan direkt uppmätas statistiskt jämfördes istället dragkraften med stigningen som utan någon överraskning ökar med ökad stigning. Detta då bladet förflyttar mer luft med varje rotation med större stigningsvinkel samt eftersom varvtalen går upp till ungefär samma vid alla de olika stigningar. Detta kan ses tydligt i Figur 29 jämfört med Dragkraft mot stigning uppmätt i servoutslag som visas i Figur 30.

Många värden är ointressanta för de mätningar som skulle utföras men andra värden som stigningen inställd på servon, vridmoment, dragkraft samt varvtal är eftersökt som diskuterades i teorin. Ett problem i kalibrering av testriggen gav ut teckenfel på vridmomentet, noterat som Torque i programmet men detta kan enkelt åtgärdas i Excel. Dragkraften kan också ses som negativ i början vilket kommer ifrån att riggen mäter upp den vindkraft som går emot propellern som uppmäts i en negativ dragkraft, detta luftmotstånd måste först övergå innan man kan börja uppmäta positiv dragkraft ur testriggen. Detta analyseras mer djupgående i diskussionen senare.

Ett vidare problem från testriggens uppmätningar är att alla värden mäts inte lika ofta. Värden som exempelvis dragkraft uppmäts fyra till fem gånger mindre än övriga värden som varvtal. Därför bestämdes det för att summera grupper av 10 celler för att få ut korrekta snittvärden för alla värden som på så sätt gör datan mer läsbar.



Figur 32. Ursprungliga data för propellerverkningsgrad jämfört med stigning i servoutslag vid 5m/s, stigning skala till vänster samt verkningsgrad till höger

Med datan sammanställd samt teckenfel åtgärdat var det dags att analysera datan. I Figur 32 ovanför syns testet utfört vid 5m/s. Här kan man se stigningen när den ökar samt propellerns verkningsgrad uppmät på den andra Y-axeln. Verkningsgraden är relativt låg samt vid vissa delar även negativ, som nämdes tidigare.

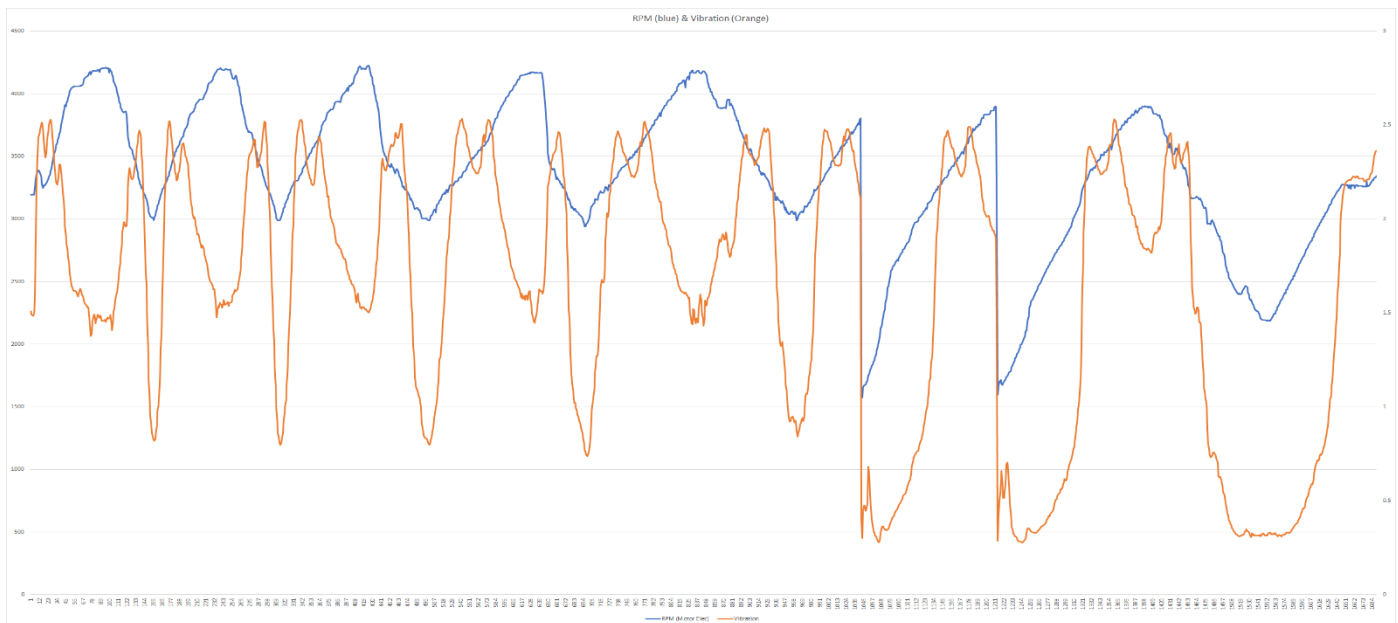
Man kan även se i Figur 32 att det finns en del stora utslag på grafen där de största uppstår då riggen slås av. Detta under diverse problem under testandes gång då för riggens säkerhet riggen plötsligt slås av vilket ger en plötslig höjning i propellerns verkningsgrad då kraft inte längre matas till systemet medans varvtalet faller. Vilket får datan att hoppa mellan plötsliga höga samt negativa värden. Dessa turbulenta områden måste rensas ur datan så att resultaten inte påverkas. Detta utförs även när stigning höjs då det i sin tur kan komma att orsaka turbulenta områden på grund av den reducering i varvtal som en ökning i stigning orsakar. Speciellt då detta kan komma att ingå i ett område med betydligt högre vibrationer vilket kan påverka resultaten.

De mindre utslag som är tydliga i början av grafen orsakas av för låga varvtal där motorn inte kan driva propellern effektivt vilket leder till mer turbulenta områden. Dessa värden rensas

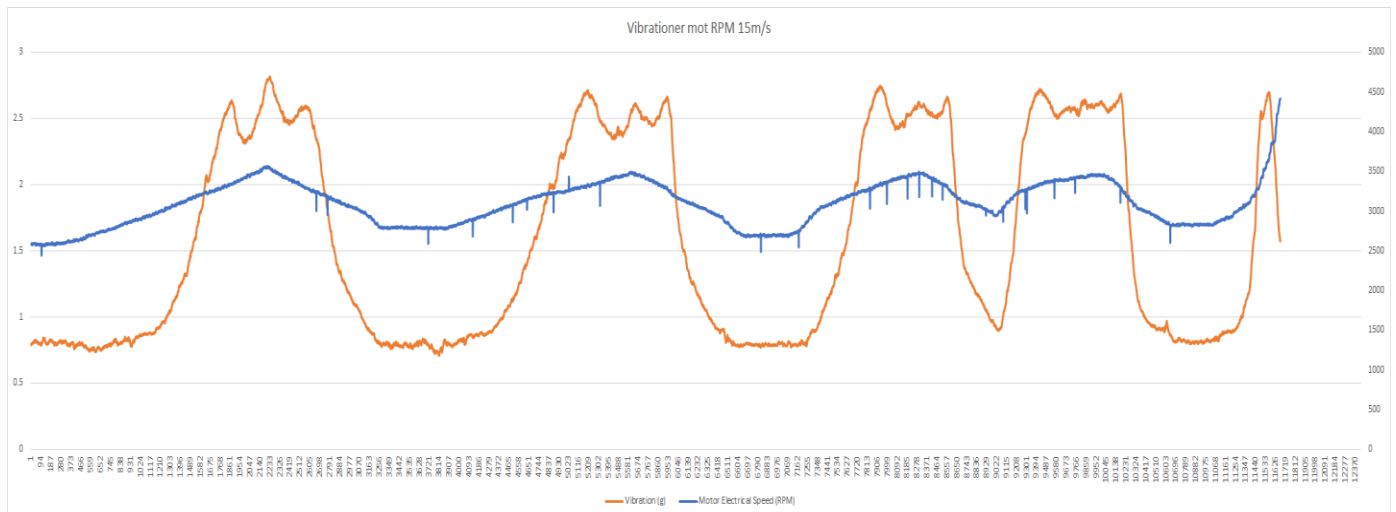
också ur det slutgiltiga resultatet för att säkerställa sig att datan är korrekt samt inte påverkas av stora variationer i varvtal. Tack vare att programmet RCbenchmark har hög uppmättningsfrekvens kan ett test som endast varar några minuter ge ut tio tusentals med resultat som ger stort rum för rengöring av datan.

4.3 Vibrationer samt egenfrekvens

Varvtal har även ytterligare effekter som kan ses på en graf som jämför vibrationer samt varvtal som kan ses i Figur 33. I figuren kan det mest turbulenta området som uppstår kring 3200–3800 RPM betraktas närmare där det förmodas att riggens egenfrekvens uppnås vilket ger systemet en kraftig ökning i vibrationer. Detta faller sedan när motorn går upp emot 4000 rpm. Dessa vibrationer kan stå till svars för några av de ännu mindre utslagen i de föregående graferna. Det finns ännu en påverkan då stigning ökas, med ökad stigning behöver motorn som tidigare nämnt slå igenom mer luft då propellerbladen skär med en större yta genom luften. Detta i tur reducerar varvtalet som kan föra systemet tillbaka till sin egenfrekvens vilket är ännu en anledning till att datan i områden då stigningen ökas bortses ifrån.



Figur 33. Varvtal jämfört med vibrationer vid 5m/s varvtal skala till vänster samt vibration skala till höger



Figur 34. Varvtal jämfört med vibrationer vid 15m/s varvtal skala till höger samt vibration skala till vänster

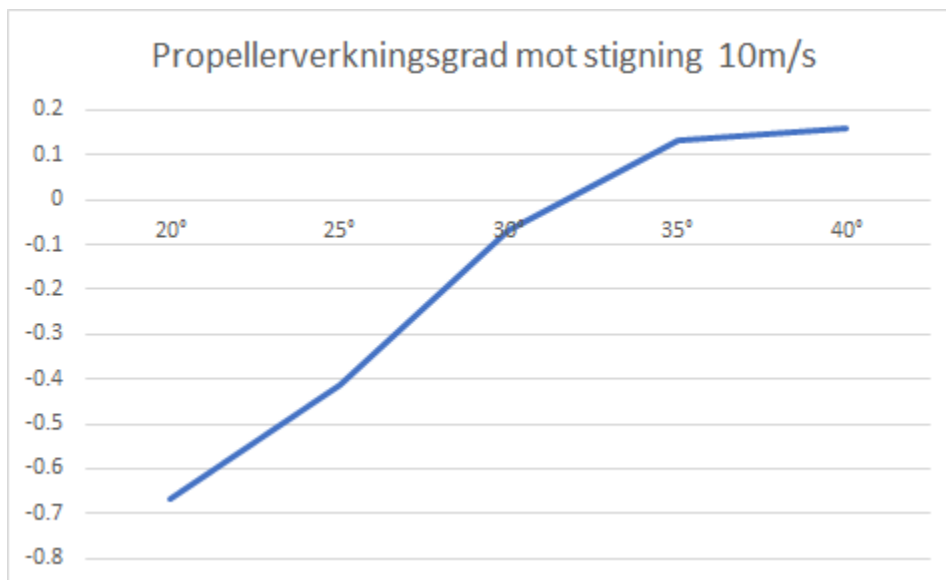
Vibrationer blev även en begränsande faktor vid 15m/s som kan ses i Figur 34, där de högre vibrationer av vindhastigheten orsakade problem vid försök att öka varvtalet då vibrationerna snabbt ökade upp emot den nysatta säkerhetsgränsen. Detta stoppade tester upp i högre eftersökta varvtal som sänkte spannet av data varje stigning kunde testas med, vilket i tur förklarar varför riggen inte kunde producera en positiv dragkraft som var möjligt i 5 samt 10m/s. Speciellt då den negativa dragkraften från vinden så klart även ökar vid 15m/s.

4.4 Vindtunnel resultat

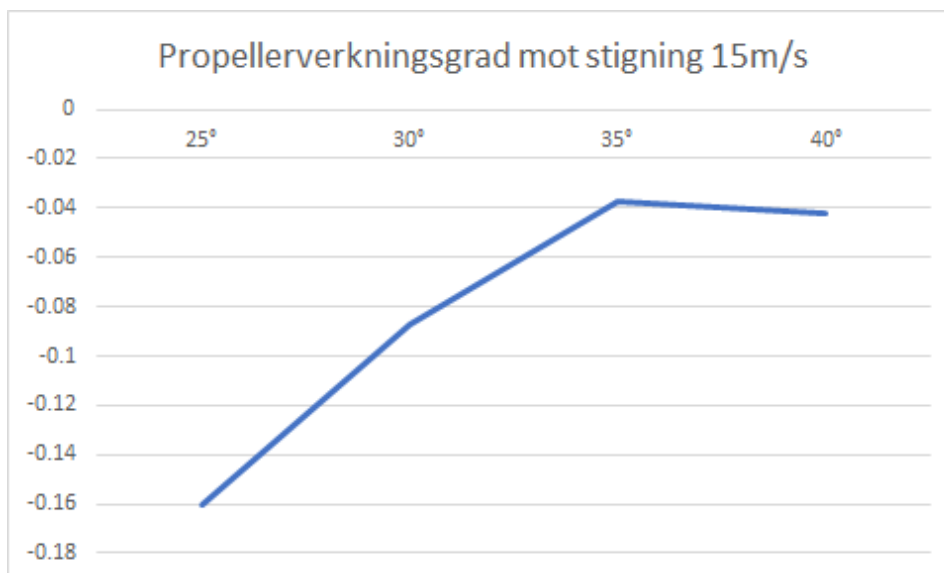
Med datan från vindtunneln rensad på ogiltiga värden samt en diskussion av vibrationer med dess effekter analyserade kan en uppfattning skapas av effekten varierande stigning har för de värden som kunde uppmätas. Genom en summering samt snittning av alla datapunkter vid olika stigningar kan ett mittenvärde för en stigning tas fram vid varierande varvtal.



Figur 35. Propellerknivningsgrad jämfört med stigning vid 5m/s



Figur 36. Propellerknivningsgrad jämfört med stigning vid 10m/s



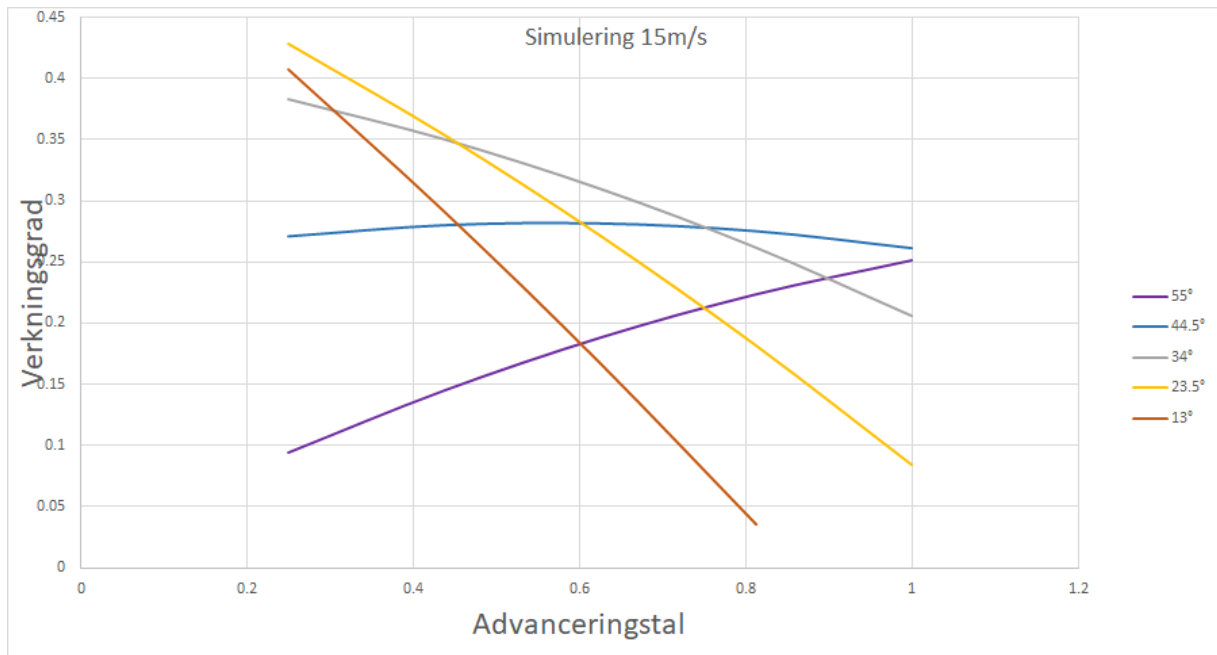
Figur 37. Propellerverkningsgrad jämfört med stigning vid 15m/s

Som kan ses i Figur 35 till 37 har stigning en märkbar skillnad. Generellt sätt ökar propellerverkningsgrad med stigningen, med små skillnader mellan de sista gående stigningarna. På grund av de tidigare diskuterade begränsningar av navet kunde inte större stigningar testas.

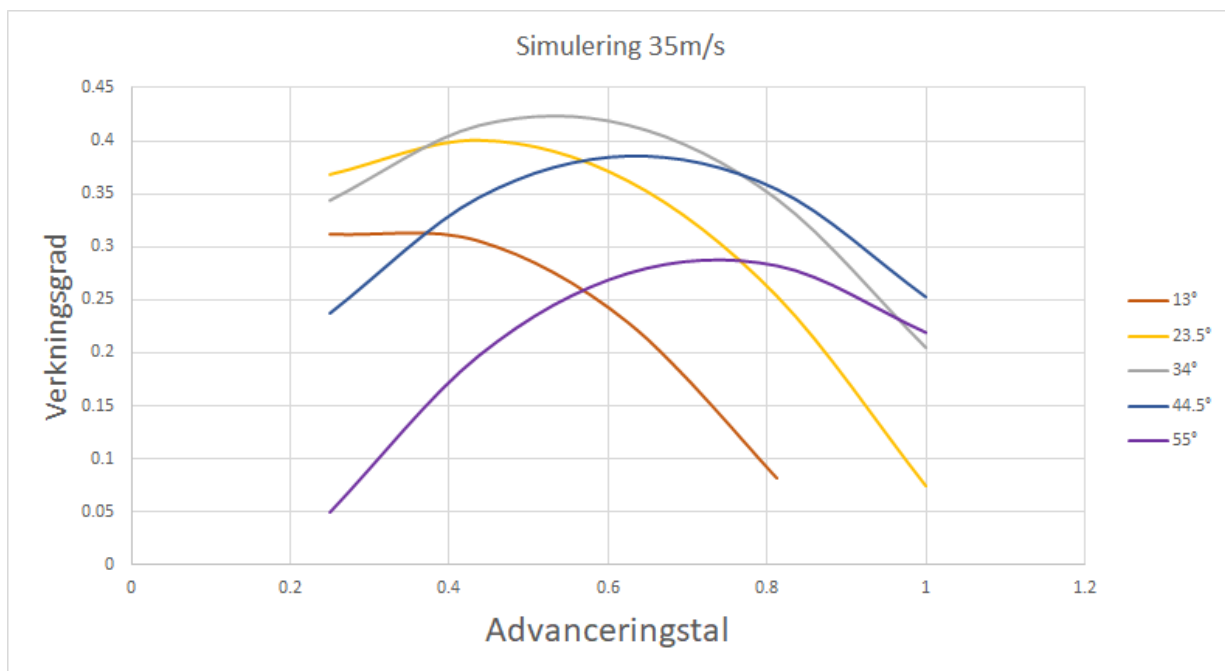
I de sista värdena av 35 respektive 40 grader hålls verkningsgraden relativt stadigt med en mindre ökning följt av minskning. Det är även märkvärdigt att resultatet vid 15m/s rör sig om ett litet spann samt hålls negativt genom hela testet. Detta då propellern inte klarar av att gå över den dragkraft vinden producerar, så kallad windmilling på engelska som nämns av Hitchens (2015) där vinden roterar propellerbladen istället för motorn. Detta tillsammans med att endast ett lägre än eftersträvat varvtal kunde uppnås på grund av de tidigare diskuterade vibrationerna resulterade i att vindhastighetens påverkan på motorn inte kunde överkommas vilket diskuteras samt visas djupare i diskussionen.

4.5 Simulering resultat

Med alla simuleringar slutförda kunde grafer skapas över propellerverkningsgraden mot avanceringstalet för fem olika stigningsvinklar med hjälp av JMPs prediction profiler. Dessa redovisas i Figur 38 samt Figur 39 för respektive vindhastighet.



Figur 38: Data från JMP för 15m/s



Figur 39: Data från JMP för 35m/s

Från Figur 38 kan det ses att propellern beter sig som förväntat vid olika stigningsvinklar, jämfört med det teoretiska beteendet i Figur 3 som kan hittas i kapitel 2.2. Låga stigningsvinklar resulterar i högre verkningsgrad vid låga avanceringstal men ger sämre resultat när de ökar. För större stigningsvinklar ses ett omvänt beteende, där verkningsgraden ökar i samband med

högre stigningsvinklar. För den största stigningsvinkeln som undersöktes, 55°, antyder grafen att vinkeln inte nått sitt optimala avanceringsstal på spannet som undersöktes i simuleringarna.

Figur 39 som visar verkningsgrad respektive avanceringsstal för 35m/s uppvisar liknande beteende som Figur 38, men större stigningsvinklar presterar något bättre vid låga avanceringsstal. Det framgår även att alla stigningsvinklar presterar sämre vid högre avanceringsstal. Detta anses bero på att större avanceringsstal innebär ett lägre varvtal som vid den större vindhastigheten kan orsaka mindre pålitliga värden, som diskuterades i metodkapitlet.

Med hjälp utav JMPs prediction profiler verktyg kan optimala stigningsvinklar för olika avanceringsstal förutsägas samt den optimala kombinationen av faktorer. Det vill säga den kombination av avanceringsstal samt stigningsvinkel som ger maximal verkningsgrad för propellern etableras. För att verifiera graden av precision för den förutsägelse som JMP ger togs det även fram den stigningsvinkeln som ger optimal verkningsgrad vid ett antal avanceringsstal. Dessa värden användes sedan för att skapa simuleringar vars resultat jämförs med värden som gavs ut av JMP.

Datan som erhålls redovisas i Tabell 1, där den optimala kombinationen av faktorer har markerats med blå färg, som för 15m/s sammanföll med avanceringsstalet 0.25. Det framgår att modellen för 15m/s har förhållande bra precision med en medelavvikelse på $\eta=0.0417$. För 35m/s är modellen mindre tillförlitlig med en medelavvikelse på $\eta=0.1348$. Dessa resultat anses godtagbara vilket används för att hitta optimala stigningsvinklar för de vindhastigheter som undersöks.

Tabell 1: Redovisning av tester som utfördes för verifiering av modellen i JMP

V	Avanceringsstal	Stigning	$\eta_{pr.}$ JMP	$\eta_{pr.}$ Sim.	Δ
15m/s	0.25	22°	0.429	0.413	0.016
15m/s	0.625	35°	0.31	0.245	0.065
15m/s	1	48°	0.265	0.221	0.044
35m/s	0.25	26°	0.37	0.1416	0.2284
35m/s	0.5246	33°	0.424	0.3183	0.1057
35m/s	0.625	36°	0.416	0.2511	0.1649
35m/s	1	45°	0.253	0.2932	-0.0402

För att ta fram ett resultat över hur möjlighet att variera stigning påverkar systemverkningsgraden hos en drönare simulerades slutligen de två fall som tagits fram som bäst, resultatet av denna simulering finns i tabell 2. Från denna tabell kan det ses att konfiguration 1, markerad med blå färg har en god verkningsgrad vid lågfart, men kraftigt försämrad vid marschfart. Konfiguration 2, här gulmarkerad har en sämre verkningsgrad vid låg fart, men bättre verkningsgrad vid marschfart.

Tabell 2: Resultat från simulering av bäst presterande faktorer

V	Advanceringsstal	Stigning	η pr. Sim.
15m/s	0.25	22°	0.4129
35m/s	0.25	22°	0.1662
15m/s	0.5246	33°	0.2304
35m/s	0.5246	33°	0.3183

Då exakta siffror för energiåtgång vid de olika fallen inte finns att tillgå utgår gruppen från de teoretiska värden som redovisas av [10] Hellekant (2020) som kan finnas i tabell 2.2 på sida 12 i hennes rapport för ett nominellt flygfall. För beräkning antas drivsystemets övriga delar ha en verkningsgrad $\eta=1$ då enbart propellerverkningsgrad undersöks. Beräkningarna redovisas i Tabell 3 för tre fall: Fall 1 samt 2 är för konstant stigningsvinkel vid 22° respektive 33°. Tabell 3 visar även att dessa fall har likartade totalverkningsgrader. För Fall 3 antas det att stigningsvinkeln hålls vid 33° vid Marschfart samt sedan slås om till 22° vid lågfart. Detta resulterar i en förbättrad propellerverkningsgrad med 0.101 eller 38.4%

Tabell 3. Slutgiltigt uppskattning av totalverkningsgrad för olika teoretiska propellrar.

	Energiåtgång Wh	Fall 1 Wh	Fall 2 Wh	Fall 3 Wh
Lågfart 40 min vid 15m/s	11.4	27.6	49.5	27.6
Marschfart 10 min vid 35m/s	9.5	57.2	29.8	29.8
Totalt per nominellt uppdrag	20.9	84.8	79.3	57.5
Total verkningsgrad	1	0.247	0.263	0.364

5. Diskussion

I detta delkapitel diskuteras resultaten som togs fram tidigare, felkällor i arbetet, hur metoden gick till väga samt diskussion runt passivt varierande system.

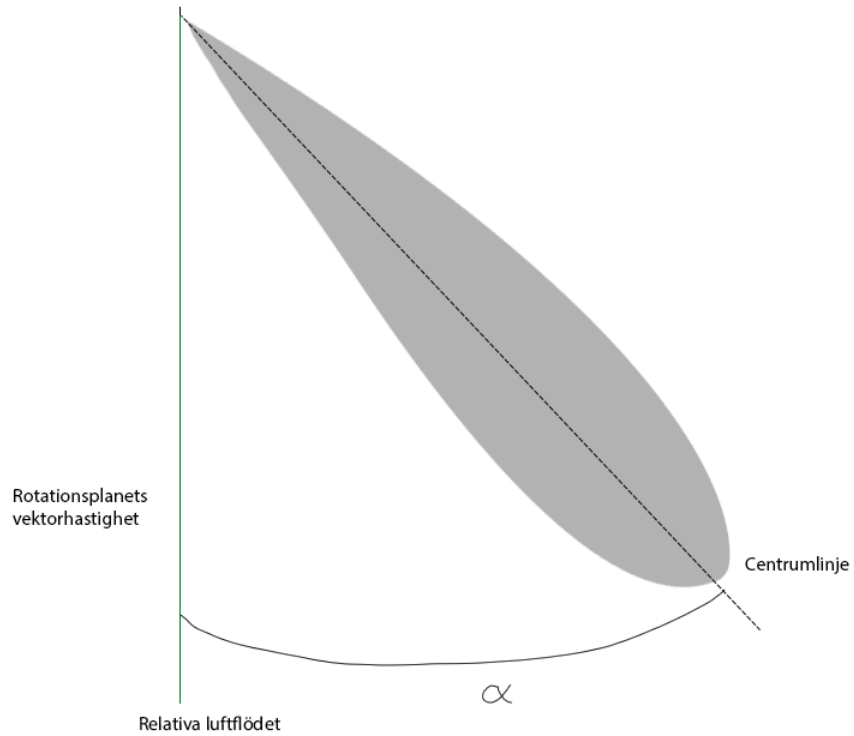
5.1 Arbetsgång

Under arbetets gång samt framförallt under tester i vindtunnel framkom det stora skillnader mellan vad som kan förväntas ur ett statistiskt test jämfört med i vindtunnel. Effekten vinden har på vibrationer som upptas av testriggen samt vilken påverkan effekter som windmilling kan ha på resultaten får inte underskattas då detta kan leda till problem i en förplanerad testplan. Detta kan tydligt ses med stigningslås designen som ansågs vara utmärkt för sin enkla design men effekten av vibrationer underskattades från det som uppmättes statistiskt. För framtida arbeten rekommenderades det därför att ta hänsyn till en kraftig ökning i vibrationer med ökande vindhastighet. Även propellerblads styrka bör betraktas för att inte riskera sprickor samt haveri i vindtunnel tester, delvis på grund av den effekt detta kan ha på testplanen men det är även viktigt att ta hänsyn till vindtunneln. Haveriet i sig kan ha minimala konsekvenser för arbetet då om motorn inte påverkas kan bladet enkelt ersättas. Avsevärt värre är delar av haveriet kan sluta upp i vindtunnelns fläkt vilket kan ha katastrofala effekter.

5.2 Mätprecision i vindtunnel

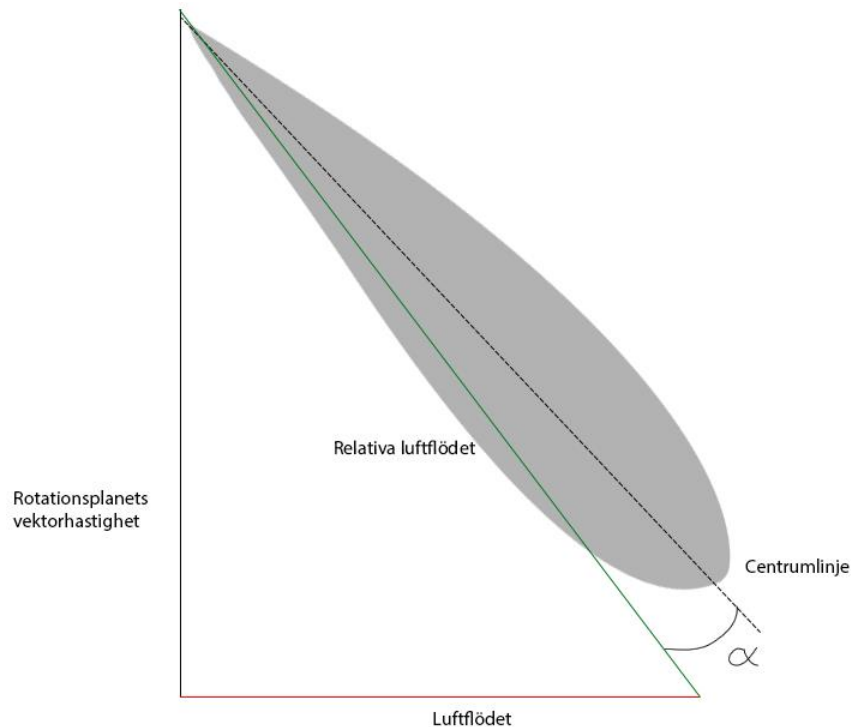
Av märkvärdighet är att de värden som uppmättes i vindtunnel var betydligt lägre än det som kan förväntas utifrån de resultat som gavs ut från de statistiska testerna, speciellt dragkraften som är många gånger lägre än tidigare uppmätt. Detta kan delvis förklaras med en djupare insikt på den tidigare förklarade teorin för varför resultaten bör falla med ökad vindhastighet.

Vid ett stillastående läge är anfallsvinkeln mellan det relativa luftflödet stor då som Figur 40 visar är det relativa luftflödet lodrätt tillsammans med rotationsplanets vektorhastighet. Denna stora anfallsvinkel resulterar i en hög dragkraft vid statistiska förhållanden som uppmättes under testerna.



Figur 40. Anfallsvinkel vid statiskt läge

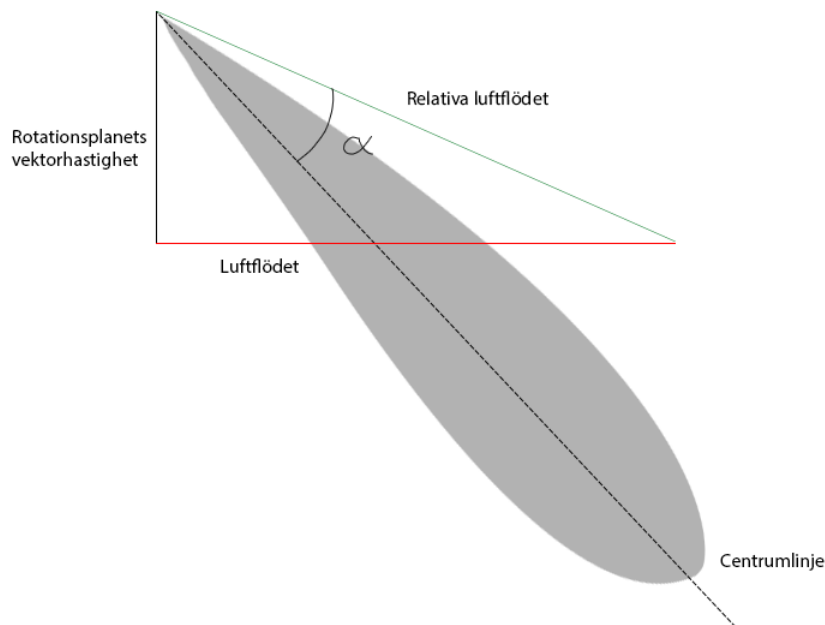
När testet påbörjades i vindtunnel förflyttas det relativa luftflödet vilket blir en resultant av rotationsplanets vektorhastighet som drivs av varvtalet som motorn ger in till propellern samt den uppmätta vindhastigheten. Detta visas tydligt i Figur 41.



Figur 41. Anfallsvinkel med luftflöde

Detta förklarar sänkning i varvtal som uppmättes i vindtunneln men en rad tidigare diskuterade faktorer kan ha haft inverkan i de riktiga testerna. Exempelvis turbulensen införd på vinden då den passerar över testtriggen på väg mot propellern, de märkvärdiga vibrationerna samt de negativa effekterna det raka propellerbladet har jämfört med ett torderad blad som har en mer konstant anfallsvinkel längs propellerbladet. Även de låga varvtalen som kunde uppnås innan vibrationer samt propellerns hållfastighet överstegs var begränsande faktorer då ett högre varvtal hade producerat en högre anfallsvinkel.

Men en fråga kvarstår, varför tas negativa resultat fram? Till del kan detta vara beroende av hur testtriggen mäter upp den insatta dragkraften men det kan även vara ett resultat av så kallad "windmilling" där vinden driver propellern som i tur driver motorn istället för tvärtom vilket benämns av Hitchens (2015). Detta förtydligas i Figur 42.



Figur 42. Ett exempel på windmilling, med en negativ anfallsvinkel

Som kan ses i Figur 42 kommer en drastisk sänkning i rotationshastigheten medans luftflödet hålls konstant resultera i att det relativa luftflödet förflyttas. Anfallsvinkeln förflyttas därför till andra sidan av centrumlinjen, vilket resulterar i vad som kallas en negativ anfallsvinkel. På grund av den negativa anfallsvinkeln kommer en negativ dragkraft skapas vilket kvarstår som negativ tills ett högt nog varvtal uppnås. Detta förflyttar det relativa luftflödet nog för att skapa en positiv anfallsvinkel, alternativt kan en minskning i vindhastighet ha samma effekt.

Detta förklarar tydligare varför resultaten för 5 samt 10m/s avslutades med en positiv propellerverkningsgrad medan vid 15m/s, där luftflödet är större samt endast ett lägre varvtal kunde uppnås resulterade i ett helt negativt resultat. Detta för att ändringen i stigning endast minskade hur negativ anfallsvinkeln var men inte nog för att göra anfallsvinkeln positiv. Därför är datan i sig fortfarande användbar då man kan se en ökning i propellerverkningsgraden, även om den kvarstår som negativ vid testets slut.

5.3 Prototyp

För att besvara Sjöräddningssällskapet frågeställning om hur variabel stigning kan implementeras i deras nuvarande design har en modell för ett sådant system skapats. En översiktsbild på detta system finns i Bilaga C, där alla ingående delar är markerade. Bilaga D synliggör prototypens operation, där propellerbladens stignings förändras på grund av servoarmens linjära förflyttning. Propellerfästets inre ändar består av kuggar, och axelkopplingen har i sin tur två kuggstänger, dessa har modellerats i en förenklad form och är i ingrepp mot varandra. Propellerfästet samt axelkopplingen skapar ihop en kuggstångsväxel vilket ger upphov till propellerbladens rotation.

Modellen bygger på att en servoarm kopplas till ett servo, på denna servoarm sitter en ledad rulle som är i kontakt med navets hölje. När servoarmen förflyttas ifrån motorn trycker den på höljet. När höljet sätts i rörelse följer de två propellerfästen med, på grund av kuggstångsväxeln roterar propellerfästen vilket i tur roterar propellerbladen, på så sätt ökar propellerns stigningsvinkel. För att minska propellers stigningsvinkel dras servoarmen mot motorn, höljet trycks sedan i samma riktning av det återförande momentet som propellerbladen utsätts för av luftströmmen.

5.4 Passivt varierande stigning

Som diskuterades i teorikapitlet 2.8 finns det en hel del olika idéer för hur varierande stigning kan utföras passivt, de flesta av dessa drivs av att försöka hålla ett värde fast som exempelvis rotationshastigheten eller vridmomentet. Ett problem som nämndes i teorin är hur vibrationer kan påverka de mekaniska systemen som sammankopplar propellerbladen med dessa olika system. Detta blir väldigt tydligt ett problem för de passiva lösningar då testerna som utfördes i vindtunnel uppmätte en hel del vibrationer samt plötsliga ökningar samt sänkningar av dessa vibrationer.

Med detta i åtanke bör de passiva systemen undersökas mer exakt för att få en idé om vilka vibrationer systemen kan avklara samt vilken som fungerar bäst för den applikation Sjöräddningssällskapet skall använda. Innan dessa är utförda är det svårt att rekommendera dessa system med tanke på de problem som vibrationer orsakar för de icke passiva systemen.

6. Slutsats

Det utförda uppdraget var gjort med målet att svara på en rad frågor inom varierande stigning. Med analys av marknaden idag, de olika systemen, dess implementation inom en mindre skala med mera. Alla de frågor som ställdes besvarades helt eller delvis, arbetet trycker projektet som utförs av Sjöräddningssällskapet framåt. De frågor som kan svaras på mer utförligt har haft rekommendationer för fortsatt arbete placerat i detta kapitel som diskuterar de slutsatser som kan dras från arbetet.

6.1 Svar på frågeställning

Arbetets mål var att svara på en lista av frågor som gavs ut av Sjöräddningssällskapet vilket har besvarats i större utsträckning under rapportens gång. För att underlätta för läsaren finns här en summerad bild över de frågor som var ställda.

Nulägesanalys

- Vilka för samt nackdelar tillför ett varierande stigning system emot ett statiskt system? Vad finns idag på marknaden inom variabel stigning, i båda mindre samt större skala?

Som kom att förstås under arbetets gång är utbudet av varierande stigning i mindre skala väldigt begränsad. Det rör sig primärt om designs för RC helikoptrar. Dessa är inte passande till det uppdraget som Sjöräddningssällskapets drönare är designad för att utföra. Därför bör en egen design skapas för att lösa de behov som drönaren har.

Fördelar av ett system med varierande stigning jämfört med ett fast stignings system har diskuterats vid längd i teorikapitlet. Det kan summeras med att det tillåter en ökning i anfallsvinkeln för propellern vilket ger ut ett högre span av verkningsgrader. Vilket påvisades i vindtunneltesterna samt visades mer precist i de simuleringar som utfördes.

- Medför varierande stigning en ökning i vikt för drönaren samt hur kan vikten distribueras över drönaren?

Ett system för variabel stigning kan designas på en rad olika sätt som kan öka samt minska mängden vikt den tillför, beroende på storlek av propellern samt vilka krafter systemet utsätts för kan materialet variera vikten till stor del. Vikten placeras primärt bakom motorn men kan förflyttas med en längre axel för att placera vikten utmed centrumlinjen av planet. Men system framför en oundviklig ökning i vikt till kostnad för den ökade propellerverkningsgraden.

Implementation

- Kan vinkeln varieras passivt beroende på motstånd/varvtal eller krävs ett aktivt servo?

Ett system som passivt varierar stigningen existerar idag men ej i stor utsträckning. Av speciellt intresse i området är rapporten skriven av Heinzen et al. (2015) som diskuterar samt utförde

testning på ett passivt system helt beroende av aerodynamik som diskuteras mer utförligt i kapitel 2.7 samt 5.4. Detta system samt de andra nämnda systemen i kapitel 2.8 bör vidare undersökas vilket skulle kunna ge ett passande system för Sjöräddningssällskapet.

- Hur kan varierande stigning implementeras i Sjöräddningssällskapets nuvarande design.

Som tidigare nämnt finns det en rad olika sätt att implementera varierande stigning för Sjöräddningssällskapet. Ett servo kan anpassas för att variera stigningen som den givna prototypen i kapitel 5.3 diskuterar alternativt kan ett system likt det beskrivet av Heinzen et al. (2015) användas vilket hade krävt en vidare fördjupning samt testning av designen.

Utvärdering samt rekommendation

- Hur stor förbättring i verkningsgrad kan vinnas ut vid olika tillstånd med hjälp utav varierande stigning jämfört med fast stigning, speciellt vid en lågfart på 15m/s.

Testdatan från vindtunneln tillsammans med de simuleringar som utfördes kan användas för att ge en uppfattning för hur stor skillnad varierande stigning kan ha vid de förväntade flygtillstånden. Speciellt det från simuleringarna med tanke på den effekt propellerbladet i sig har. Där en torderad propeller har en betydligt bättre prestanda jämfört med den icke torderade som kunde testat i vindtunneln. I slutändan gav simuleringarna en prestandaskillnad av upp till 38.4% för en djupare insikt på datan samt diskussion kring resultaten se kapitel 4.6.

6.2 Förslag till vidare arbete

Arbetet som utfördes gav en översikt över varierande stigning samt en början till ett arbete som kommer kräva djupare analys inom ett par områden. Med detta i åtanke finns det en del fortsatt arbete som rekommenderas för att ge djupare svar inom dessa områden.

För att säkerställa att varierande stigning kommer ha den betydande inflytande som den teoretiskt samt simuleringsmässigt hade, bör en prototyp skapas som kan stå upp till de vibrationer som uppstår. Denna prototyp kan även justeras till att använda mer hållfasta propellerblad likt de torderade som Sjöräddningssällskapet testat i nuläget. För att assistera framtida arbete i detta område har en förslagsmodell skapats som anses kunna lösa detta uppdrag med anpassningar som diskuteras i kapitel 5.3 som kan behöva en del djupare analys.

Utöver detta kan en undersökning även göras in i de passivt varierande systemen som diskuterades i kapitel 5.4. Vilket hade krävt en analys av systemen själva, urval av ett system samt utförliga tester för hur dessa står upp till de verkliga tillstånden. Exempelvis de vibrationer som kan uppmätas i exempelvis en vindtunnel. Där vibrationer samt liknande faktorer kan skapa problem, detta för att säkerhetsställa att systemet är robust nog för att användas i verkligheten.

Referenslista

- [1] - Federal Aviation Administration (2016). *Regulation Handbook*. Faa.gov - https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/07_phak_ch5.pdf
- [2] H. Hurt (1965), *Aerodynamics for Naval Aviators*, [University of Southern California]. Faa.gov - https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/00-80T-80.pdf
- [3] – MKFI (2010), *Cutaway constant speed propeller hub in Finnish Aviation Museum*. Commons.wikimedia - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cutaway_constant_speed_propeller_hub.JPG
- [4] – Pingstone. A (2005), *Hercules Propeller*. Commons.wikimedia - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hercules.propeller.details.jpg>
- [5] - Zoltán S. Spakovszky (2007). *Thermodynamics and propulsion, Performance of propellers*. Mit.edu -<https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node86.html>
- [6] – NACA airfoil. (n.d). *Airfoil Design NACA 2415*. Airfoiltools - <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n2415-il>
- [7] - Heinzen, S. Hall, C. Gopalarathnam, A. (2015). *Development and Testing of a Passive Variable-Pitch Propeller* [North Carolina State University]. Researchgate - https://www.researchgate.net/publication/276163095_Development_and_Testing_of_a_Passive_Variable-Pitch_Propeller
- [8] - Burger, C. Hartfield, R. (2007) - *Design, Testing and Optimization of a Constant Torque Propeller* [Auburn University]. Citeseerx - <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.571.39&rep=rep1&type=pdf>
- [9] - Rhyne, C. (2018) - *EXPLORING THE FEASIBILITY OF A PASSIVELY ACTUATED BINARY-PITCH PROPELLER FOR GROUP 2 UAVS* [Oklahoma State University]. Sharkeok.- <https://shareok.org/handle/11244/317696>
- [10] - Hellekant, J (2020) - *Test och utvärdering av framdrivningssystem för drönare avsedd för sjöräddning* [Chalmers University of Technology]. Chalmers.se - <https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/301764>
- [11] - Propeller Aerodynamics : The History, Aerodynamics & Operation of Aircraft Propellers – Frank Hitchens (2015) : (ISBN 9781785381249)
- [12] - Vorkoetter S. (2002) *Propeller Basics RCstuff*. Stefanv.com <http://www.stefanv.com/rcstuff/qf200203.html>

Bilagor

A:

Testplan för simulering

15m/s

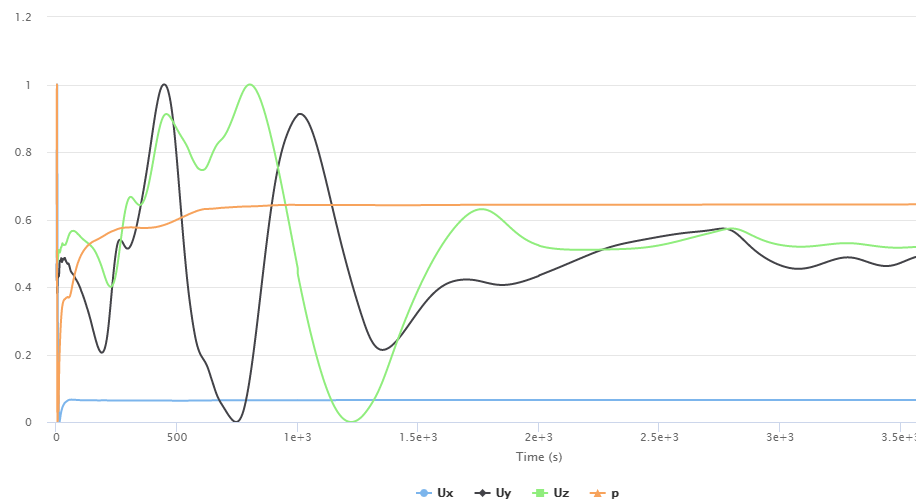
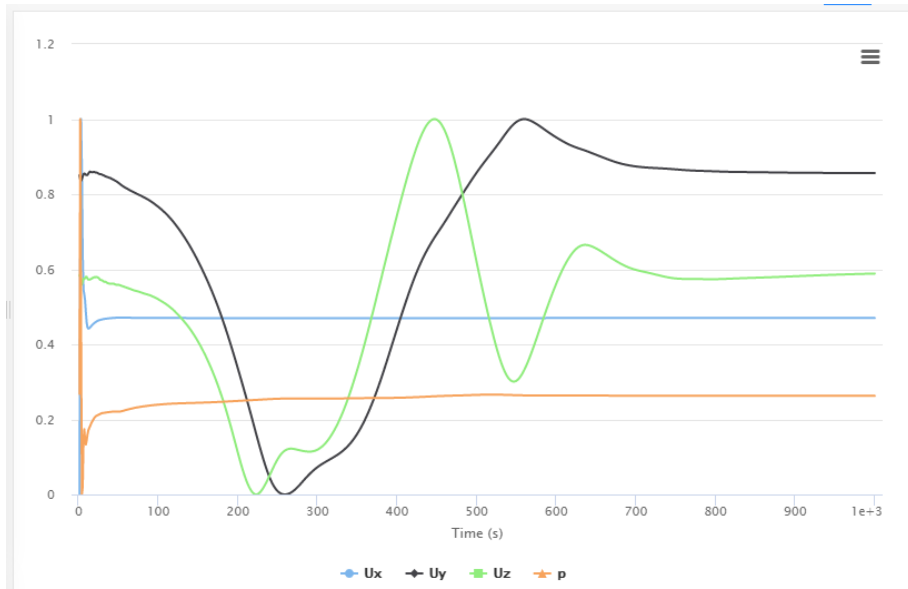
Design		
Run	Advancingstal	Stigning
1	0,625	34
2	0,25	55
3	0,625	55
4	1	55
5	1	13
6	0,625	34
7	0,25	34
8	0,625	13
9	0,25	13
10	0,625	34
11	1	34
12	0,625	34

35m/s

Design		
Run	Stigning	Advancingstal
1	55	0,625
2	34	0,625
3	34	0,625
4	13	0,25
5	34	1
6	13	0,625
7	13	1
8	55	0,25
9	55	1
10	34	0,625
11	34	0,625
12	34	0,25

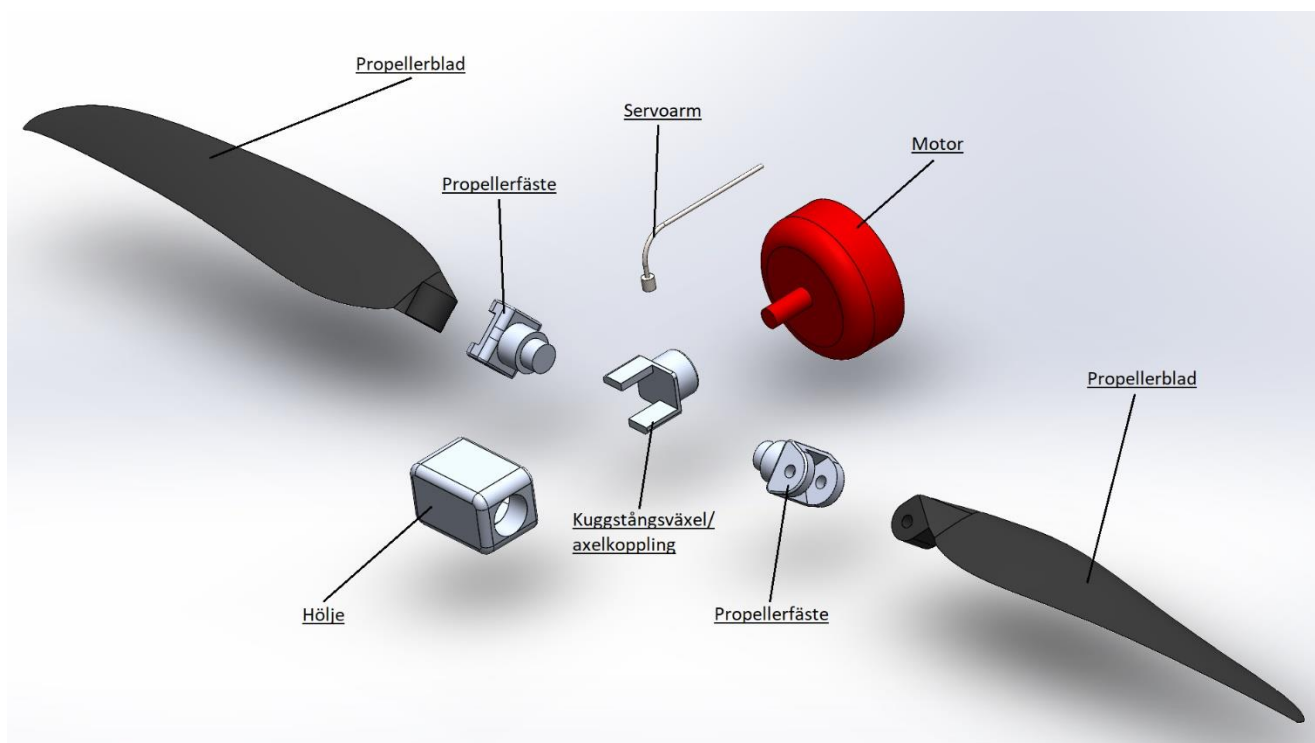
B.

Exempel på konvergerande respektive ickekonvergerande simulation.



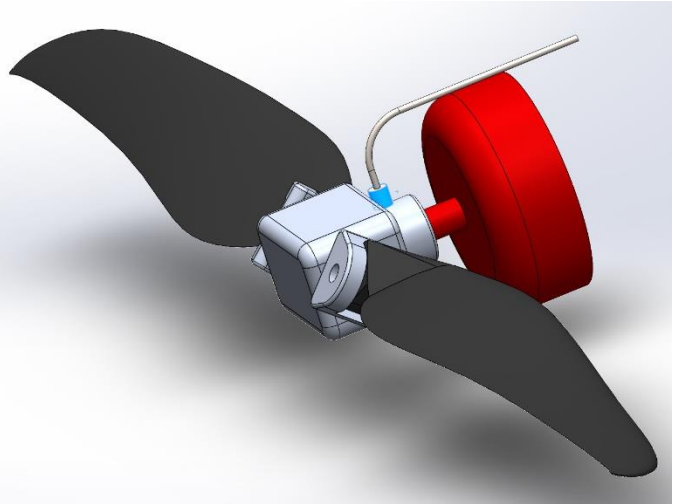
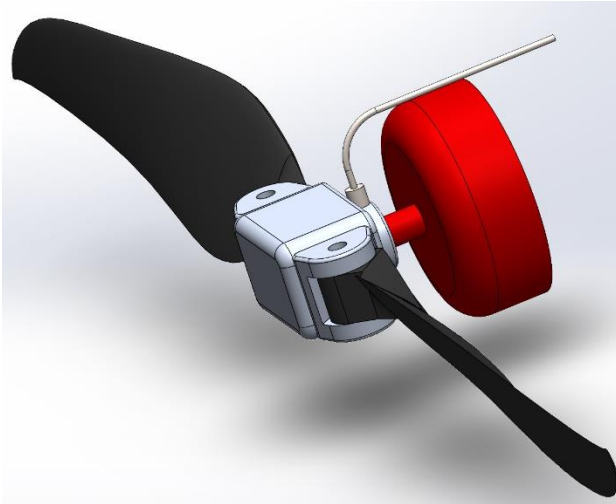
C

Ingående delar i nav för variabel stigning med tillhörande beteckningar.



D

Exempel på navets operation.



INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI- OCH
MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021



CHALMERS