



CHALMERS



Designa och bygga en flygande sond för atmosfärsmätningar

Från konceptuell design till funktionell produkt

Kandidatarbete inom Mekanik och Maritima Vetenskaper
(MMSX21-VT26-28A)

Natanael Andersson, Filip Cederqvist, William Fischerström
Isaac Kennedy, William Lavin, Anton Svensson

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

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

KANDIDATARBETE I MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

Designa och bygga en flygande sond för atmosfärsmätningar

Från konceptuell design till funktionell produkt

Natanael Andersson
Filip Cederqvist
William Fischerström
Isaac Kennedy
William Lavin
Anton Svensson



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för strömningslära
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Designa och bygg en flygande sond för atmosfärsmätningar
Från konceptuell design till funktionell produkt

Natanael Andersson
Filip Cederqvist
William Fischerström
Isaac Kennedy
William Lavin
Anton Svensson

© Natanael Andersson, Filip Cederqvist, William Fischerström
Isaac Kennedy, William Lavin, Anton Svensson 2026.

Examinator: Valery Chernoray
Handledare: Patxi Rodriguez Acero

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

Omslagsbild: Bild på en oktocopter, utomhus. Fotat 2026-05-13 av William Lavin.

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2026

Designa och bygga en flygande sond för atmosfärsmätningar
Från konceptuell design till funktionell produkt
Natanael Andersson, Filip Cederqvist, William Fischerström
Isaac Kennedy, William Lavin, Anton Svensson
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Strömningslära
Chalmers Tekniska Högskola

Sammandrag

Väderfenomen och atmosfäriska partiklar har stor påverkan på jordens klimatsystem och spelar en viktig roll i bland annat molnbildning, strålningsbalans och nederbördsprocesser. Samtidigt är direkta mätningar av dessa processer på hög höjd ofta komplexa, kostsamma och tekniskt utmanande. Syftet med detta kandidatarbete var därför att undersöka och utveckla ett koncept för ett luftburet mätsystem avsett för atmosfäriska tester och partikelmätningar. Partikelanalys i atmosfären är ett eftertraktat men ofta underutvecklat fält, med brist på verklig mätdata.

Arbetet genomförs i två delar. Den första behandlar en omfattande koncept- och bakgrundsstudie inom fältet för att utforska och fastställa det bästa farkostalternativet utefter projektets uppdragsprofil. Avsnittet behandlar även de tekniska och operationella krav som specificeras. Bland de undersökta alternativen behandlas raketer, flygplan, väderballonger och drönare i form av rotorplattformer och fixed wing. Dessa alternativ jämfördes med hjälp av en förundersökning och Kesselringanalys för att identifiera den mest lämpliga och optimala lösningen utefter uppdraget.

Den andra delen fokuserade på utvecklingen av en komplett drönarplattform i form av en oktocopterlösning. Konstruktionen utvecklades med fokus på modularitet, höga lastkapaciteter och integration av ett antal utvalda sensorsystem. Stor hänsyn togs till den strukturella komponenten av drönaren, så som styvhet, genomsvepande ankarpunkter, vibrationshantering, luftflöden och ventilation för komponenter, naturlig luftström runt atmosfära mätinstrument, fri sikt för andra sensorer, tillgänglighet för elektronik och batterihantering. Drönaren bygger på en skal- och skelettstruktur huvudsakligen i kolfiber, för att minimera vikt och maximera hållfasthet.

Arbetet omfattar konceptutveckling, skisser, CAD modellering med konstruktionsanalys, materialval, simulering samt konstruktion och av samtliga komponenter i en flygduglig slutprodukt. Resultatet blev en stor oktocopterplattform för en mängd olika applikationer inom atmosfära mätningar och vidare forskning inom drönarbaserade mätinstrument.

Nyckelord: Drönare, oktocopter, atmosfärsmätning, luftströmmar, design, konstruktion, validering.

Design and Construction of a Flying Probe for Atmospheric Measurements
From Conceptual Design to Functional Product
Natanael Andersson, Filip Cederqvist, William Fischerström
Isaac Kennedy, William Lavin, Anton Svensson
Department of Mechanics and Maritime Sciences
Division of Fluid Dynamics
Chalmers University of Technology

Abstract

Weather phenomena and atmospheric particles have a major impact on the Earth's climate system and play an important role in, among other things, cloud formation, radiative balance, and precipitation processes. At the same time, direct measurements of these processes at high altitude are often complex, costly, and technically challenging. The purpose of this bachelor's thesis was therefore to investigate and develop a concept for an airborne measurement system intended for atmospheric testing and particle measurements. Atmospheric particle analysis is a highly sought-after but often underdeveloped field, with a lack of real-world measurement data.

The work is carried out in two parts. The first part consists of an extensive concept and background study within the field, with the aim of exploring and determining the most suitable vehicle option based on the project's mission profile. This section also addresses the specified technical and operational requirements. The alternatives investigated include rockets, aircraft, weather balloons, and drones in the form of rotorcraft platforms and fixed-wing aircraft. These alternatives were compared using a preliminary study and a Kesselring analysis in order to identify the most suitable and optimal solution for the mission.

The second part focused on the development of a complete drone platform in the form of an oktocopter solution. The design was developed with an emphasis on modularity, high payload capacity, and the integration of a number of selected sensor systems. Significant consideration was given to the structural aspects of the drone, such as stiffness, through-mounted anchor points, vibration management, airflow and ventilation for components, natural airflow around atmospheric measurement instruments, unobstructed fields of view for other sensors, accessibility for electronics, and battery management. The drone is based on a shell-and-frame structure, primarily made of carbon fiber, in order to minimize weight and maximize strength.

The work includes concept development, sketches, CAD modelling with structural analysis, material selection, simulation, as well as the design and construction of all components into a flight-capable final product. The result was a large oktocopter platform suitable for a wide range of applications in atmospheric measurements and further research into drone-based measurement instruments.

Keywords: Drone, oktocopter, atmospheric measurement, airflow, design, construction, validation.

Förord

Rapporten är skriven under vårterminen 2026 som en del av kandidatarbetet MMSX21-VT26-28A. Projektet genomfördes av studenter inom Maskinteknik samt Automation och mekatronik vid Chalmers Tekniska Högskola.

Författarnas tack

Vi vill tacka Valery Chernoray med sitt engagemang och stöd under projektet. Det har gett oss de bästa möjligheterna för att få ett så givande kandidatarbete som möjligt. Vi vill även tacka vår handledare Patxi Rodriguez Acero för sitt intresse och bidragande feedback. Slutligen ett stort tack till Daniel Poveda Pi och Simon Björklund för deras hjälp.

Göteborg, maj 2026

Natanael Andersson, Filip Cederqvist, William Fischerström
Isaac Kennedy, William Lavin, Anton Svensson

Akronymer

Nedan är listan över akronymer som har använts genom hela denna avhandling listade i alfabetisk ordning:

CAD	Computer Aided Design
ESC	Electronic Speed Controller
FMU	Flight Management Unit
GPS	Global Positioning system
IP-klass	International Protection - klass
PBL	Planetary boundary layer,
PC	Personal Computer
PDB	Power Distribution Board
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
PID	Proportional-integral-derivative
PLA	Polylactic Acid
RPM	Revolutions Per Minute
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

Symboler

Variabler

m	massa	kilogram
g	tyngdacceleration	meter per sekundkvadrat
n_{motorer}	antal motorer	dimensionslös
d_{prop}	propellerdiameter	meter
$F_{\text{max,motor}}$	maximal dragkraft per motor	newton
$P_{\text{max,motor}}$	maximal effekt per motor	watt
U	batterispänning	volt
Q	batterikapacitet	amperetimme
k	användbar batteriandel	dimensionslös
η_{motor}	motorverkningsgrad	dimensionslös
η_{ESC}	ESC-verkningsgrad	dimensionslös
η_{koaxiel}	koaxiell verkningsgrad	dimensionslös
η_{prop}	propellerverkningsgrad	dimensionslös
ρ_0	luftdensitet vid havsnivå	kilogram per kubikmeter
C_d	luftmotståndskoefficient	dimensionslös
A	tvärsnittsarea	kvadratmeter
Δt	tidssteg	sekund
t_{sim}	simuleringstid	sekund
τ_{min}	minsta throttle	dimensionslös
τ_{max}	största tillåtna throttle	dimensionslös
$h_{\text{mål}}$	målhöjd	meter
v_{upp}	vertikal hastighet uppåt	meter per sekund
v_{ner}	vertikal hastighet nedåt	meter per sekund
t_{hovring}	hovringstid på toppen	sekund
T	temperatur	kelvin

Innehållsförteckning

Akronymer	viii
Nomenklatur	x
Figurer	xvii
Tabeller	xix
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Problemformulering	3
1.4 Avgränsningar	3
2 Förarbete för konceptval	5
2.1 Raket	5
2.2 Väderballong	6
2.3 Drönare	6
2.4 Flygplan	7
2.5 Operativa Förutsättningar	8
2.5.1 Lagar och regler kring raket och flygplan	8
2.5.2 Lagar och regler kring väderballonger	9
2.5.3 Lagar och regler kring drönare	9
2.6 Framdrivningssystemets arkitektur	10
2.6.1 Drönarens reglersystem	10
2.6.2 ESC	11
2.6.3 Propeller	11
2.7 Ingenjörsmetodik för konceptgenerering	12
2.7.1 Morfologisk matris	12
2.7.2 Elimineringsmatris	12
2.7.3 Pugh matris	13
2.7.4 Kesselringmatris	13
2.8 Materialegenskaper	14
2.8.1 Kolfiber	14

2.8.2	Plast	15
3	Metod	17
3.1	Val av farkosttyp	17
3.2	Design och konceptgenerering av en oktocopter	18
3.2.1	Schematisk modellering av en oktocopter	19
3.2.2	Morfologisk matris	19
3.2.3	Elimineringsmatris	19
3.2.4	Pugh matris	20
3.2.5	Kesselringmatris	20
3.3	CAD-modellering av en oktocopter	20
3.4	Konstruktion av oktocopter	21
3.5	Flygberäkningar	22
3.5.1	Grundläggande beräkningar	22
3.5.2	Grundläggande beräkningar om batteriet	23
3.5.3	Luftdensitetens och luftmotståndets inverkan på olika höjder	23
3.5.4	Oktocopterns effektkrav	24
4	Resultat	25
4.1	Konceptval luftsond	25
4.2	Konceptval oktocopter	25
4.2.1	Schematisk modellering	25
4.2.2	Morfologisk matris	26
4.2.3	Elimineringsmatris	27
4.2.4	Pugh matris	28
4.2.5	Kesselringmatris	28
4.3	Slutgiltig design	28
4.3.1	CAD-modell	29
4.3.2	Kretsschema för drönaren	32
4.4	Design och konstruktion av mätutrustning	32
4.5	Materialval	33
4.6	Slutgiltig konstruktion	34
4.7	Teoretiska analyser av oktocoptern	35
4.7.1	Vindtunneltest	38
5	Diskussion	39
5.1	Konceptgenerering	39
5.1.1	Luftsond	39
5.1.2	Oktocopter	40
5.2	Oktocopterns slutgiltiga design och konstruktion	41
5.2.1	Diskussion och motiveringar kring oktocopterns konstruktion	42
5.2.2	Oktocopterns konstruktion utifrån kravspecifikationen	42
5.2.3	Materialval	43
5.3	Mätinstrumentet	44
5.4	Beräkningar	44
5.4.1	Konstant hastighet vid upp- och nedstigning	45
5.4.2	Konstant C_d -koefficient	45

5.4.3	Verkningsgrader	45
5.4.4	Miljö och väder	45
5.4.5	Dragkraften verkar proportionerligt med luftdensiteten	45
5.4.6	Sammanfattning av beräkningarna	45
5.5	Vindtunneltest	46
6	Slutsats	47
6.1	Återkoppling till frågeställningen	47
6.2	Vidareutveckling	48
6.3	Framtida studier	48
7	Användning av AI och arbetsfördelning	51
	Litteraturförteckning	53
A	Kesselringmatris för val av luftsond	II
B	Konceptkatalog	III
C	Elimineringsmatris för konceptval	VIII
D	Pugh-matris	XI
E	Kesselringmatris	XIII
F	Förklaringar till dellösningar i den morfologiska matrisen	XIV

Figurer

2.1	Exempel på Morfologisk matris (Bilderna är skapade med [46])	12
2.2	Exempel på Elimineringsmatris	13
2.3	Exempel på Pugh-matris	13
2.4	Exempel på Kesselringmatris	14
4.1	Tre skisser över tänkbara koncept	26
4.2	Morfologisk matris med dellösningar	26
4.3	Morfologisk matris efter pragmatisk sällning	27
4.4	Rendering av oktocopter	29
4.5	Sprängvy Komponenter	29
4.6	Sprängvy av den slutgiltiga CAD-modellen	31
4.7	Simplifierat drönarsystem [64]	32
4.8	Mätutrustning	33
4.9	Mätutrustning, insidan	33
4.10	Mätutrustning tillverkad	33
4.11	Mätutrustning monterad	33
4.12	Färdigkonstruerad drönare	34
4.13	Färdigkonstruerad drönare under testning i vindtunnel	34
4.14	Simulering av oktocopter med externt luftflöde via AirShaper [67], återgiven med tillåtelse.	35
4.15	Batterinivå som funktion av tid	37
4.16	Höjd som funktion av tid	37
4.17	Effektförbrukning som funktion av tid	38
A.1	Kesselringmatrisen ovan användes för att ranka farkosttyperna för att utföra ett metodiskt och objektiva farkostval	II
B.1	Resultatet från morfologiska matrisen är koncept redo för sällning. Samtliga koncept presenteras i konceptkatalogen	VII
C.1	Elimineringsmatris för konceptval	IX
D.1	Pugh-matris för konceptgenieringen för copterdrönaren	XI
E.1	Kesselringmatrisen för konceptvalet	XIII

Tabeller

4.1	Resultat från Kesselringmatrisen	28
4.2	Bill of Materials	30
4.3	Parametrar som används i simuleringen	36
4.4	Resultat från simuleringen	36
4.5	Genererad lyftkraft vid olika Thrust-nivåer	38

Inledning

Forskning inom miljö och klimatförändringar har blivit mer aktuell. Det kräver både fysikaliska mätningar samt modellering för att kunna studeras. Området involverar nästan alla aspekter av vår omvärld; såsom väder, natur, städer och samhälle. Det har varit ett omdiskuterat ämne och medför stora konsekvenser då det har varit en drivande fråga både inom politik och i vardagen. Datainsamlingen är desto mer omfattande och utgör en global insats för att verifiera och bygga modeller, eftersom förmågan att förstå konsekvenserna av global uppvärmning är lika viktig som att analysera dess effekter [1].

Detta kandidatarbete behandlar utvecklingen av en farkost för mätning och observation av atmosfären. Huvudfokuset i projektet är att designa och bygga farkosten snarare än att tillhandahålla numeriska modeller. Eventuella mätningarna kommer att innefatta bland annat atmosfäriska partiklar och kristallbildning av is inom ett spann på en till fem kilometers höjd. Dessa mätningar kan ge ökad förståelse för molnbildning samt molnens livslängd, vilket spelar en central roll i klimatmodeller och förståelsen av specifika aspekter av global uppvärmning. Det tekniska systemet avser även att mäta andra parametrar som tryck, temperatur och vindhastighet eftersom det bidrar med förståelsen för luftkvalitet.

1.1 Bakgrund

I jordens atmosfär på en höjd mellan en till fem kilometer förekommer ett lager som kallas för *Planetary boundary layer*, PBL, eller på svenska, det planetära gränsskiktet. Denna lägre del av atmosfären påverkas direkt av de utsläpp och partiklar som cirkulerar vid ytan av jorden genom turbulenta luftströmmar som förflyttar sig till högre altitud [2]. Vid de turbulenta strömningarna sker bland annat överföring av värme, föroreningar och avdunstningar från ytan. I sin tur betyder det att utsläppen från jordens yta speglas i det planetära gränsskiktet, vilket gör att partiklar samlas i detta lager och därmed är det relevant att utföra atmosfäriska mätningar på denna höjd.

På den höjden som experimentet förväntas äga rum kommer turbulensen att orsa-

ka mätfel i form av temperaturförändringar och vibrationer [2] samt att densiteten kommer påverkas av en altitud skillnad [3]. Enligt standardatmosfären sjunker densiteten från 1 kg/m^3 , vilket är den relativa densiteten vid havsnivån, till 0.6292 kg/m^3 vid en höjd på fem kilometer. Temperaturen är runt -14.7°C . Låga temperaturer har en kritisk påverkan på litiumbaserade batteriers prestanda där kyla är direkt kopplat till processer som försämrar cellerna [4].

Utöver temperaturproblematiken medför lägre luftdensitet en minskad lyftkraft, det vill säga den aerodynamiska kraft som verkar vinkelrätt mot strömningsriktningen. Lyftkraftsekvationen [5] är proportionell mot densiteten. Om farkosten är utrustad med en eller flera propellrar kan samma hastighet inte nödvändigtvis upprätthållas [6], vilket i sin tur påverkar energiförbrukningen. Ytterligare om farkosten är utrustad med roterande rotorblad kan det orsaka turbulens vilken sorterar, förflyttar eller på annat sätt kan påverka partikelkoncentrationen negativt. Turbulensen och sorteringen utav partiklarna orsakas av fenomenet som kallas *Downwash*. Downwash innebär ett ökat luftflöde nedåt orsakat av roterande rotorblad [7].

Drönare har länge varit associerat med militären eftersom de kan utföra olika typer av militäroperationer [8]. Fixed-wing UAV har ofta varit associerad med användning vid atmosfäriska mätningar, men på senare tid har antalet rotorbaserade drönare ökat drastiskt [9], [10]. En av anledningarna till skiftet är att rotorbaserade drönare inte kräver en landningsbana för att flyga iväg eller landa. De är även kapabla att flyga med lägre hastighet och kunna sväva i luften [10]. På senare tid har drönaren även utvecklats för att användas mer civilt inom till exempel geofysik där främst multirotorvarianter är överrepresenterad med 72,73 % av alla publicerade försök mellan 2005 och 2025 [9]. Däremot finns det övervägande fördelar med fixed-wing exempelvis att dem har bättre uthållighet och lastkapacitet. Likaväl har multirotordrönare en bättre förmåga att sväva i luften och uppstigningen är smidigare än för en fixed-wing [11]. Barbieri et al. i artikeln [11] har gjort en studie där fixed-wing jämfördes med multirotordrönare på atmosfäriska observationer, vilket mynnade ut i att drönare är mer lämpade för punktmätningar i atmosfären än vad fixed-wing är. Detta baserades främst på multirotordrönares förmåga att sväva i luften vilket tillhandahöll mer konsekventa resultat.

Detta projekt är relevant ur ett akademiskt perspektiv eftersom det omfattar flera forskningsområden. Arbetet kan även ge en inblick i hur lättillgängliga teknologier kan användas för att komplettera traditionella mätmetoder av atmosfären. Forskare skapar modeller för att förutspå väder och klimat med hjälp av numeriska modeller med hög precision [12] vilka behöver valideras mot resultat från uppmätta atmosfärsmätningar.

1.2 Syfte

Arbetets syfte är att utveckla och konstruera en komplett farkost för atmosfärsmätningar. Studien fokuserar särskilt på konstruktion av farkosten samt möjligheten att utföra noggranna mätningar.

Följande frågeställningar är:

- Vilken farkost är bäst lämpad för projektet?
- Hur bör farkosten designas och konstrueras?
- Hur ska mätutrustningen integreras med farkosten för att optimera mätningens noggrannhet?

1.3 Problemformulering

Det övergripande problemet för att kunna uppnå flygningen är farkosten. Den ska klara utföra mätningar och tillhandahålla tillförlitlig mätdata från atmosfären på en till fem kilometers höjd för att kunna validera numeriska modeller. Ett kritiskt delproblem som kommer att analyseras är hur atmosfärens väderförhållande förändras vid ökande altitud, då detta direkt påverkar farkostens operativa förmåga. Förändringarna av väderförhållandena påverkar farkostens komponenter, och därav behöver arbetet säkerställa att störningar av mätdata minimeras. Vilket kräver en farkost med hög strukturell integritet och aerodynamisk stabilitet. Detta skapar ett behov av en flexibel och adaptiv design. Arbetet fokuserar därför på att utveckla ett optimalt koncept, och att optimera designen för att resultera i en slutprodukt som uppfyller alla krav.

1.4 Avgränsningar

På grund av projektets omfattande problem och strikta tidsram är avgränsningar av arbetet nödvändigt.

Vad gäller analysen av den mätdata som samlas in från atmosfären avgränsar sig arbetet från detta. Motiveringen är att tanken med projektet är att designa och bygga en farkost vars uppgift är att hjälpa forskare med att samla in data från atmosfären och därav ligger fokuset snarare på själva farkostens design och sammansättning av mätinstrument än analysen av den mätdata som samlas in.

En annan avgränsning är höjden som farkosten ska kunna utföra mätningar på, vilket är en till fem kilometer. Detta är baserat på det planetära gränsskiktet.

Kapitel 2

Förarbete för konceptval

I detta avsnitt behandlas farkosterna grundläggande funktionsprinciper samt lyfter deras deras funktioner och begränsningar, för att lägga en grund för valet av koncept senare i rapporten. Avsnittet kommer också avhandla informationen kring matriserna som används senare i metoden.

2.1 Raket

En raket är en farkost som drivs framåt genom att materia accelereras bakåt i ett kontinuerligt massflöde. Raketmotorns skapande av massflöde varierar, de mest relevanta och använda lösningarna är tryckraketer eller flytande/fast bränsleraketer [13].

Tryckraketer använder lagrat tryck från en sluten behållare. När en ventil eller liknade koncept öppnas, skapar det ett massflöde ut som trycker raketen i andra riktningen. Trycket skapas antingen med gas, koldioxid, eller vatten. I de flesta fallen är det koldioxid [14].

En bränsleraket använder förbränning där bränslet antänds i förbränningskammaren, vilket producerar ett gasflöde som strömmar ut från raketen och skapar drivkraft. Det finns två alternativ för bränsle. Första är fast bränsle, det är en blandning av bränsle och oxidationsmedel som antänds utifrån och skapar gasströmmen. Flytande bränsle kombinerar istället direkt i motorn bränsle och oxidationsmedel och när de blandas antänds de och skapar gasströmmen [13].

För att raketen ska följa sin planerade rutt behövs både goda styregenskaper och bra aerodynamik. Styrsystemet för en raket utgörs av en kombination eller enbart av en gimbal motor, styrraketer och kontrolltytor. På en gimbal motor styrs flödesvektorn genom att vinkla motorn och där med färdriktningen. Styrraketer är små motorer som sitter på raketens utsida som justera raketens riktning i rummet med hjälp av små utskjutning av drivmedel, oftast koldioxid [14]. Styrfenor använder sig av aerodynamik och luftflöden under uppskjutningen för att styra raketen genom att ändra vinkeln på fenorna.

För att interagera mätutrustningen finns det olika metoder. Ett alternativ är att raketerna fraktar upp mätutrustningen, delar på sig och släpper mätutrustning med fallskärm. Ett annat alternativ är att raketerna och mätutrustningen förblir integrerat hela färden.

2.2 Väderballong

En väderballong är en gasfylld gummiballong utrustad med en radiosond. Dess syfte är att stiga genom atmosfären, oftast till en höjd av maximalt 40 kilometer, för att registrera meteorologiska data. När ballongen når sin maximala höjd expanderar den till följd av det låga yttre trycket tills ballongens material brister. Därefter återvänder instrumenten till markytan, vanligtvis med hjälp av en fallskärm.

I Sverige används väderballonger [15] främst av SMHI för att mäta fukt, temperatur och vind. SMHI:s brukar använda Vaisala Radiosonde RS41-SG och släpper tre ballonger per dag och när de når 15-20 kilometer i höjd, spricker dem. Rymdsektorn har också en vana att släppa stora väderballonger som når höjder upp till 40 kilometer. Dessa är viktiga för forskningen av den övre atmosfären.

En av de vanligaste väderballong radiosonder som används i Sverige och Europa är Vaisala Radiosonde RS41-SG. Denna radiosond [16] har sensorer för mätning av temperatur och luftfuktighet, samt har den en *Global Navigation Satellite System*, GNSS, för positionering. Vilket möjliggör mer data om vindvektorer, geopotentiell höjd och lufttryck.

De bästa materialen [17] för väderballonger är en naturgummi latex eller en syntetisk latex gjort av polykloropren, även kallad neopren. Neopren brukar ha en långsammare nedbrytningshastighet än naturligt latex, så därför föredras den. Egenskaperna som skiljer ballonger åt varandra är deras förmåga att hålla sig till sin nominell vikt. De ska också kunna expandera fyra till sex gånger sin diameter och hålla expansionen minst en timme.

För att ballongen ska kunna stiga krävs det en större lyftkraft än tyngdkraft. Lyftkraften kan beräknas av skillnaden i tryck mellan ballong och atmosfär. Ballongen kommer stiga med en hastighet som beror på lyftkraften, tyngdkraften och luftmotståndet.

2.3 Drönare

Enligt Transportstyrelsen så ingår drönare i definitionen av obemannade luftfartyg enligt "alla luftfartyg som flygs eller konstruerat för att fungera självständigt eller fjärrstyras utan pilot ombord" [18]. Med andra ord är en drönare en obemannad farkost som antingen styrs manuellt av en drönarpilot eller så är drönaren programmerad till att styras helt autonomt och kunna genomföra ett flyguppdrag helt självständigt utan en pilot. Drönaren eller *UAV*, *Unmanned Aerial Vehicle* som far-

kosten också benämns kan flyga helt autonomt genom ett mjukvaror kontrollsystem som är integrerat i system som fungerar i samverkan med sensorer och GPS som sitter på drönaren.

Ett exempel på drönarteknik som används för insamling av atmosfärisk väderdata är CopterSonde-SWX vilket är ett projekt som utvecklats vid University of Oklahoma i samarbete med National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [19]. Drönartekniken har lyckats med att samla väderdata från det planetära gränsskiktet och beskrivs som ett komplement för de stationära väderstationerna som inte kan samla in väderdata från samma höjd. Vidare konstaterar artikeln även att drönarna kan skickas upp för atmosfärsmätningar mer frekvent än väderballonger som just nu endast skickas upp två gånger om dagen. På så sätt kan drönarna bidra med frekvent mätdata för bättre väderprognoser och som nämns i artikeln även hjälpa till med att förutsäga stormar.

Begreppet *vena contracta* refererar till den smalaste punkten i luftflödet. Enligt en rapport [20] så är vena contracta den punkt där flödet når sin max hastighet medan ytan av flödet är vid sitt minimum. Källan säger vidare att det är axialhastigheten längs centrumlinjen vilket då ökar ju närmare flödet når punkten. Bortom denna punkt så kommer hastigheten att minska. Ytterligare enligt rapporten så måste energin bevaras vid alla punkter i området och därför minskar trycket när flödet når vena contracta och når därmed sitt minimum för att därefter återhämta sig.

På liknande sett som beskrivet med *vena contracta* ser det ut för luftflödet kring drönarens roterande rotorblad. En drönare flyger genom att leda luften nedåt för att skapa dragkraft, vilket leder till att luften förskjuts runt kroppen [21]. Enligt artikeln genomfördes en beräkning med datorbaserad vätskedynamik som skulle resultera i hur luften påverkas kring rotorerna och kroppen vilket mynnade ut i att störningar orsakades i upp till 5 meter under drönarens centrum. Det framgick även att storleken på störningarna avtar snabbt vid området ovanför drönaren. Ytterligare en artikel antyder att propellrarnas downwash kan påverka mätinstrumentet [10]. Artikeln beskrev att genom inomhus experiment och simulationer blev resultatet att placera mätinstrumentet ovanför i mitten av drönaren för att reducerar påverkan av störningar.

2.4 Flygplan

Som en del av konceptutvecklingen utvärderades konventionella flygplan som potentiella medel för atmosfärsmätningar. Jämfört med drönare erbjuder flygplan tydliga fördelar i form av räckvidd, maximal flyghöjd och energieffektivitet vid långvarig drift. Samtidigt medför de stora utmaningar vad gäller mätinstrument och allmän komplexitet.

Huvudsakligen så finns det två tillvägagångssätt att genomföra dessa mätningar: Montering av ett system med mätinstrument direkt på flygplanet, eller genom att

släppa en fallskärmsutrustade sond. Mätningarna kan på så sätt genomföras på vägen ner. Denna metod kräver inte heller att en separat flygande sond behöver utvecklas. Båda system medför sina egna styrkor och svagheter. Trots utmaningarna så finns sedan tidigare liknande system i syfte att göra atmosfärsmätningar, men användningen av flygplan som transportmedel innebär många begränsningar angående regler och lagar som måste tas hänsyn till.

En sond som släpps från ett flygplan, även kallad dropsond, ger mindre kontroll över mätområde samt begränsar tidsfönstret då mätningarna kan genomföras. Resultatet blir högre mätnoggrannhet eftersom sonden får färdas genom den naturliga och ostörda luftströmmen. Om detta komplimenteras av ett antal sonder i en sekvens så är det möjligt att täcka ett större område, och samla mätdata på. Dessutom kommer flera sonder på olika höjder parallellt kunna skapa en profil av atmosfären. Problemen uppstår kring återhämtning. Metoden begränsar även något var mätningarna kan genomföras. Om sonden till exempel inte är designad för att flyta på vatten så är det inte längre möjligt att genomföra mätningar över hav och sjöar.

Att montera en sond på ett flygplan kan göras på många olika sätt, exempelvis under en vinge eller i nosen på flygplanet. Detta möjliggör kontinuerliga mätningar och datauppsamlingar över ett större geografiskt område. Ett system likt detta kräver ingen separat återupphämtningsmekanism då data kan lagras direkt i modulen och hämtas efter landning. Problemen uppstår kring aerodynamiska störningar då flygplanet skapar turbulens runt kroppen. Detta riskerar att förvränga mätvärdena, särskilt vid känsliga mätningar såsom av partiklar eller iskristaller. Den omgivande luften riskerar att inte vara representativ för den omgivande atmosfären. Det finns även andra risker såsom; avgaser, motorvärme och friktionsvärme från flygkroppen som kan påverka mätningarna.

2.5 Operativa Förutsättningar

Här presenteras operativa förutsättningar som uppkommer från lagar på farkostkategorierna. De påverkar hur farkosten behöver designas och konstrueras för att kunna få användas.

2.5.1 Lagar och regler kring raket och flygplan

När det gäller uppskjutning av raketer så krävs det tillstånd från Transportstyrelsen om raketen i fråga är av metall eller väger mer än 500 gram[22].

För ett flygplan kräver varje fysisk modifiering ett certifierat, såsom montering av externa mätmoduler ett godkännande i form av ett "Supplemental Type Certificate" (STC) enligt EU-lag [23]. Denna process kan vara både tidskrävande och kostsam, då modifieringen måste bevisas vara säker ur ett aerodynamiskt och strukturellt perspektiv. Detta utgör ett stort hinder för mindre forskningsprojekt eller utveckling av teknik såsom detta.

Att släppa föremål från flygplan eller liknande som krävs för användning av dropsonder, är reglerat i Sverige genom Transportstyrelsens [24] och av EU [25] enligt SERA (Standardised European Rules of the Air). SERA beskriver hur inget får kastas eller släppas under flygning om det kan utgöra någon fara för personer eller egendom.

2.5.2 Lagar och regler kring väderballonger

Utsläpp av väderballonger i Sverige kräver tillstånd från Transportstyrelsen där väderballonger omfattas av "Obemannade friballonger" [26]. Obemannade friballonger får endast släppas ut över områden där risken för att påverka luftfarten är liten. Det finns typiskt tre huvudsakliga indelningar av obemannade friballonger vilka är: lätta friballonger, medeltunga friballonger och tunga friballonger. Denna klassificering av obemannade friballonger sker enligt Tillägg 2 i EU:s genomförandeförordning 2012/923.[27]. Allmänt gäller att friballonger med en sammanlagd massa under 4 kilogram klassas som lätt, sammanlagd massa mellan 4-6 kilogram som medeltung och över 6 kilogram som tung.

Vidare för vilka regler som gäller för utsläpp av obemannad friballong hänvisar Transportstyrelsen till en kravspecifikation [26]. Både last och lina ska ha en reflekterande yta och friballongen får ej släppas ut inom terminalområdet för en flygplats. Dessutom skall positionen ballongen har meddelas minst var 15:e minut till den flygtrafikledningsenheten som berörs av positionen.

Alltså måste en mängd olika krav vara uppfyllda för att få ett tillstånd till att släppa upp en obemannad friballong. För att ansöka om tillståndet tar Transportstyrelsen ut antingen en fast eller löpande avgift beroende på friballongens klassificering [28]. För en lätt friballong tas en fast avgift på 7000 kronor. För medeltunga och tunga friballonger tas en löpande avgift på 1700 kronor per timme som debiteras utefter tidsåtgången för myndighetens handläggning.

2.5.3 Lagar och regler kring drönare

Ju mer drönaren väger, desto fler lagar och regler finns det att förhålla sig till. En drönare får flygas enligt Transportstyrelsen [18] inom den öppna kategorin om drönaren väger mindre än 25kg. I den öppna kategorin får drönaren maximalt flygas på en höjd 122 meter över havsnivån och den måste dessutom vara inom synhåll för piloten. Om drönaren väger över 250 gram men under 25 kg kräver det även att piloten har ett drönarkort som tillåter flygning för den motsvarande vikten. Det är förbjudet att flyga över stora samlingar av människor och beroende på drönarens c-klassificering finns det även avståndsregler till personer som inte är involverade i flygningen. Det är troligt att en egenbyggd drönare för atmosfärsmätningar överstiger 250 gram med hänsyn till alla komponenter som krävs och därför är det relevant att ta hänsyn till reglerna för en privatbyggd drönare som saknar c-klassificering. För en sådan drönare krävs ett A1/A3 drönarkort och operatörsregistrering.

Den specifika kategorin består primärt av tre olika tillstånd att ansöka om där

alla tillstånd innefattar någon typ av riskbedömning [29]. Första tillståndet kallas för PDRA (Pre-Defined Risk Assessment) vilket är ett tillstånd där det görs en riskanalys av drönaren och flygningen. Andra tillståndet kallas för LUC (Light UAS Operator Certificate) vilket är ett tillstånd som en organisation eller verksamhet kan ansöka om där de själva får möjligheten att flyga enligt PDRA med privilegiet att besparas från att göra en ansökan enligt PDFA till Transportstyrelsen. Genom ett LUC tillstånd anses det att verksamheten har tillräckligt med kunskap för att göra riskanalyser. Tredje tillståndet kallas för SORA (Specific Operation Risk Assessment) vilket är ett tillstånd som går utanför PDRA där en komplett riskanalys krävs som innefattar en beskrivning av den avsedda verksamheten. En riskklassning tilldelas i samband med ansökan där klassificeringen baseras på pilotens kompetens, drönarens egenskaper samt beskrivningen av verksamheten vilket innefattar bedrift och plats. Alla tre ovan nämnda tillstånd innefattar även en årsavgift på 6500 kronor, en avgift på 2100 kronor för varje operativt tillstånd samt en handläggaravgift på 1700 kronor per timme.

Den certifierade kategorin omfattas generellt av större drönare och större risker [30]. Detta tillstånd ansöks om drönarens mått överstiger tre meter där den planerade flygningen ska ske över folksamlingar. Ansökning om tillstånd inom den certifierade kategorin görs även om den planerade flygningen har för avsikt att transportera personer eller transport av farligt gods där det finns en hög risk för att personer skadas om en olycka sker. Inom den certifierade kategorin finns inga specifika regler eller bestämmelser utan drönaren och piloten hänvisas till att följa reglerna för bemannad luftfart.

2.6 Framdrivningssystemets arkitektur

Delkapitlet innehåller en djupare förståelse för hur drönare fungerar och dess komponenter.

2.6.1 Drönarens reglersystem

När det kommer till hur drönare styrs så kan den antingen styras manuellt eller automatiskt. För att kunna samla information kring drönarens rörelse och position används drönarens inbyggda sensorer som är gyro och accelerometer, [31]. Den insamlade informationen som sensorerna samlar in skickas sedan vidare till *Flight Management Unit*, FMU, digitalt [32]. FMU fungerar på samma sätt som en dators *Central Processing Unit*, CPU, som har den huvudsakliga uppgiften att köra maskininstruktionerna så snabbt som möjligt för att uppnå maximala utgång, [33].

Det finns flera olika kontrollalgoritmer som är implementerade för att kontrollera drönarens flygning, däribland en PID-regulator. Syftet med en proportional-integral-deriverande-regulator, PID, är att upprätthålla stabilitet och precis kontroll, [34]. Utöver att källan nämner en PID regulator kan drönarens reglersystem bygga på ett neutralt nätverk istället för det traditionella reglersystemet [35]. Grunden till hur en PID-regulator fungerar är att tre stycken kontrollåtgärder summeras; pro-

portionell kontrollåtgärd där åtgärden är proportionell mot felsignalen, integrerande kontrollåtgärd som integrerar felsignalen och till sist en deriverande kontrollåtgärd som deriverar felsignalen, och dessa hjälper automatiskt systemet att kompensera för fel och störningar, [36].

Kontrollmetoderna kan kategoriseras utifrån linjära eller olinjära kontrollmetoder. Enligt källan [37] är linjära kontrollmetoder baserade på PID och *Linear Quadratic regulator*, LQR, styrning. Denna typ av metod för att styra anses vara av simpel struktur, enkel att förverkliga och kostnadseffektiv. Däremot kan den i vissa fall anses vara begränsad och robustheten är svag. Exempel på en olinjär kontrollmetod är *Sliding Mode Control*, SMC, som till skillnad från linjära kontrollmetoder har stark robusthet, [38],[39].

SMC fungerar på det sättet att den designar en sliding surface i 3D-rummet som drönaren förhåller sig till och regleras utifrån positionen relativt planet, [38]. Att drönaren stannar inom det önskade området sker matematiskt enligt källan[39]. För att detta ska fungera så har SMC systemet en teknik som kallas *Reaching phase* som reglerar drönaren till den önskade nivån som sliding phase designar. Beräkningarna sker sedan likt en PID-regulator där det beräknas skillnaden mellan positionen och glidytan och sedan regleras strömmen till motorerna utifrån differensen.

Oavsett kontrollmetod så regleras strömmen med hjälp av styrsystemets ESC, *Electronic Speed Controller*, och strömmen i sin tur bestämmer hastigheten hos drönaren.

2.6.2 ESC

En Electronic Speed Controller är en komponent som används för att styra hastigheten på elektriska motorer och som i sin tur driver propellrarna. ESC sitter mellan flygkontrollern och den elektriska motorn och fungerar som en mellanhand; den tar emot en styrsignal från kontrollerna och skickar därefter ut en elektriskt puls som driver den elektriska motorn [40].

Drönare använder sig vanligtvis av borstlösa likström elektriska motorer [40]. ESC komponenten kan justera strömpulserna från *Power Distribution board*, PDB, och reglerar dessa efter instruktionerna från flygkontrollerna och därefter skicka ut rätt frekvens till motorn som genererar rätt varvtal [40], [41], [42].

Det som bestämmer flygkontrollens styrsignal är indata från sensorer, gyroskop och accelerometrar. Genom att justera varvtalet på varje motor kan drönaren stabiliseras och justeras för att flyga stabilt [31], [34].

2.6.3 Propeller

Propellern är en viktig del för att producera lyftkraft för drönaren. För att både få en energieffektiv drönare behöver diametern på propellrarna vara anpassade efter drönaren och för att generera korrekt lyftkraft vid stigning krävs en korrekt anfalls-

vinkel [43]. En propeller har en vridning, som minskar desto längre ut. Detta leder till en mer konstant anfallsvinkel. En anfallsvinkel refererar till vinkeln mellan propellern och relativa luftflödesriktningen. Högre anfallsvinkel och rotationshastighet ger högre lyftkraft och effektivitet [44].

2.7 Ingenjörsmetodik för konceptgenerering

Nedan följer information kring matriser och tabeller som kommer att nyttjas för en ingenjörsmetodisk konceptgenerering.

2.7.1 Morfologisk matris

Den Morfologiska matrisen är en metod för att generera koncept givet delfunktioner som behöver uppfyllas i den slutgiltiga designen [45]. Matrisen är uppbyggd med en rad olika delfunktioner som listas kolumnvis enligt figuren nedan ???. Dessa delfunktioner har i sin tur möjliga dellösningar vilka är förslag till hur delfunktionen löses. Dellösningarna formuleras radvis i matrisen vilket även detta exemplifieras i figuren ??.

Sub-Function 1	Sub-Solution 1.1	Sub-Solution 1.2	Sub-Solution 1.3
Sub-Function 2	Sub-Solution 2.1	Sub-Solution 2.2	Sub-Solution 2.3
Sub-Function 3	Sub-Solution 3.1	Sub-Solution 3.2	Sub-Solution 3.3
Sub-Function 4	Sub-Solution 4.1	Sub-Solution 4.2	Sub-Solution 4.3

Figur 2.1: Exempel på Morfologisk matris (Bilderna är skapade med [46])

Det matrisen sedan gör är att för varje delfunktion välja ut en dellösning och kombinera alla dellösningar till ett möjligt koncept till den slutgiltiga designen. Den Morfologiska matrisen genererar alltså alla möjliga kombinationer av dellösningar givet att alla delfunktioner uppfylls. Resultatet blir förslag på lösningsvarianter till den design och delfunktioner som formulerats.

2.7.2 Elimineringsmatris

Användningen av en elimineringsmatris underlättar sällningen genom att direkt utgå från minimikrav i kravspecifikationen och identifiera olämpliga koncept. Varje koncept ställs mot varje krav, och skulle ett koncept inte lösa delproblemet till något av de fastställda kraven elimineras konceptet direkt. Se ??.

Koncept	Krav 1	Krav 2	Krav 3	Krav 4	Krav 5	Resultat
Koncept 16	-	+	-	-	+	Eliminerad
Koncept 2	-	+	-	+	+	Eliminerad
Koncept 3	-	+	-	+	+	Eliminerad
Koncept 4	-	+	-	-	+	Eliminerad
Koncept 5	-	+	-	-	+	Eliminerad
Koncept 6	-	+	+	+	+	Eliminerad
Koncept 7	-	+	+	+	+	Eliminerad
Koncept 8	-	+	-	+	+	Eliminerad
Koncept 9	-	+	+	+	+	Eliminerad
Koncept 10	+	+	+	+	+	Godkänd
Koncept 11	+	+	+	+	+	Godkänd
Koncept 12	+	+	+	+	+	Godkänd
Koncept 13	-	+	+	-	-	Eliminerad
Koncept 14	+	+	+	+	+	Godkänd
Koncept 15	+	+	+	+	+	Godkänd
Koncept 16	+	+	+	+	+	Godkänd
Koncept 17	+	+	-	-	+	Eliminerad
Koncept 18	+	+	+	+	+	Godkänd
Koncept 19	+	+	+	+	+	Godkänd
Koncept 20	+	+	+	+	+	Godkänd

Figur 2.2: Exempel på Elimineringsmatris

Elimineringsmatrisen används fördelaktigt till att tidigt eliminera de, ibland många 100, olika koncept som den morfologiska matrisen genererar. De koncept som löser samtliga delproblem går sedan vidare till Pugh-matrisen.

2.7.3 Pugh matrix

I tidigare metoder har koncepten sållats efter möjligheten att lösa delfunktioner. Pugh-matrisen är en metod där koncepten istället rangordnas efter hur väl de uppfyller en formulerad kravspecifikation [47]. Arbetsgången går ut på att jämföra alla koncept med en referens, och rangordna efter hur väl dem löser ett visst kriterium. Referensen är ett av koncepten, därmed så kommer det finnas en Pugh-matris till varje koncept. Ifall det finns väldigt många koncept kan det skapa svårigheter då det genereras väldigt många Pugh-matriser. Ett sätt att lösa detta problem är att endast använda referenskoncepten som är mest olika varandra.

Rangordningen genomförs på följande sätt:

- Tilldela (1) om konceptet uppfyller kravet bättre än referensen.
- Tilldela (0) om konceptet uppfyller kravet lika bra som referensen.
- Tilldela (-1) om konceptet uppfyller kravet sämre än referensen.

Denna rangordning exemplifieras enligt figuren nedan ??.

Kriterie	Referenskoncept	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4	Koncept 5	Koncept 6	Koncept 7	Koncept 8	Koncept 9	Koncept 10
Kriterie 1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Kriterie 2	0	-1	1	1	0	1	0	0	1	1
Kriterie 3	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	1	1
Kriterie 4	0	-1	1	1	0	0	1	1	1	1
Kriterie 5	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0
Kriterie 6	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0
Kriterie 7	0	-1	1	1	1	1	0	0	0	0
Kriterie 8	0	0	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
Summering	0	-5	0	1	-1	1	3	3	5	5

Figur 2.3: Exempel på Pugh-matris

Efter att alla koncept har fått poäng och rangordnats efter resultat, ska dessa koncept tas vidare i processen till Kesselringmatrisen.

2.7.4 Kesselringmatris

Efter att ha sammanställt de bästa koncepten från Pugh-matrisen jämförs dessa med fördel i en Kesselringmatris. I Kesselringmatrisen används vikter kopplade till

kriterier för att rangordna koncepten efter hur stor inverkan kriterierna har. Varje kriterium har en vikt och summan av alla vikterna hos alla kriterierna skall bli 1. Varje koncept ger en värdeskala mellan 1-5 hur väl denna lösning uppfyller kriteriet. Värdet 1 betyder att konceptet uppfyller kriteriet mindre bra och 5 betyder att konceptet uppfyller kriteriet mycket bra.

Matrisen går ut på att jämföra varje koncept med en ideal lösning, dvs en lösning som uppfyller alla kriterier med högst värdeskala. Fördelarna med användningen av ett idealfall är att det möjliggör identifiering av styrkor och svagheter hos koncepten. Därefter rangordnas koncepten efter poäng och slutligen väljs det koncept med flest poäng. En viktig notering kring rangordningen är att det koncept med flest poäng nödvändigtvis inte alltid blir det slutgiltiga valet. Detta beror på att det valda konceptet, trots högsta poäng, presterar väldigt dåligt i ett av kriterierna. Då är det vanligt att titta på andra koncept som också presterade bra i Kesselringmatrisen för att göra en avvägning, så att alla kriterier uppfylls godtyckligt bra. Se ??.

Kriterier	Vikt	Ideal		Koncept 1		Koncept 2		Koncept 3	
		Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng
Kriterie 1	0,3	5	1,5	4	1,2	4	1,2	4	1,2
Kriterie 2	0,05	5	0,25	5	0,25	3	0,15	3	0,15
Kriterie 3	0,15	5	0,75	5	0,75	2	0,3	3	0,45
Kriterie 4	0,1	5	0,5	5	0,5	1	0,1	3	0,3
Kriterie 5	0,15	5	0,75	4	0,6	3	0,45	2	0,3
Kriterie 6	0,1	5	0,5	3	0,3	2	0,2	4	0,4
Kriterie 7	0,15	5	0,75	1	0,15	4	0,6	3	0,45
Totalt Viktat värde	1		5		3,75		3		3,25
Total / ideal	-		-		0,75		0,6		0,65
Rangordning					1		3		2

Figur 2.4: Exempel på Kesselringmatris

2.8 Materialegenskaper

Följande avsnitt beskriver material relevanta för konstruktion av luftsonder.

2.8.1 Kolfiber

Kolfiber är ett material bestående av minst 90 % kolfiber och karakteriseras som ett material med hög styrka, hög tryck- och skjuvhållfasthet, hög modul samtidigt som materialet har låg densitet [48]. Enligt [49], vilket är en sandwichkomposit-skiva bestående av två yttre kolfiberlaminat och en skumkärna i mitten, väger skivorna 2.71 kg/m^2 . Sandwichkompositen har en tryckhållfasthet på 1.33 MPa vilket motsvarar 1.33 N/mm^2 . En motsvarande kolfiberskiva utan skumkärna med liknande materialegenskaper väger enligt [50] 4.22 kg/m^2 vilket är ungefär 56% mer än en sandwichkomposit-skiva.

2.8.2 Plast

Plast och polymer förekommer i många olika former, från akryl till polyester. De klassificeras efter sina fysiska egenskaper så som densitet, hårdhet och temperatur tålighet. Plast används huvudsakligen på grund av sin låga vikt i förhållande till styrka. Det är även ett hanterbart material som kan underlätta tillverkningsprocesser [51].

Plast är vanligt vid tillverkningen av fordon och motsvar ungefär 50 % av volymen hos bilar men endast 12-17 % av totalvikten [51].

3D-printning existerar i många former, huvudsakligen polymer i form av PLA och PETG [52]. Båda dessa material kommer med olika egenskaper, respektive för och nackdelar. Båda polymer kategoriseras som polyester, PLA är dock en form av bioplast med naturligt nedbrytningsbara egenskaper [53]. PLA har en densitet av $1210\text{-}1430\text{ kg/m}^3$ med en smältpunkt mellan 150° till 160° , och elasticitetsmodulen $2,7\text{-}16\text{ GPa}$ [53].

PETG har motsvarande en smältpunkt på 250° till 260° , densiteten $1370\text{-}1455\text{ kg/m}^3$ och elasticitetsmodulen $1,10\text{-}20,3\text{ GPa}$ [54][55].

Kapitel 3

Metod

I detta avsnitt beskrivs arbetsprocessen. Det inleds med val av farkost sedan konceptgenerering, design och konstruktion av vald farkost och avslutningsvis numeriska beräkningar.

3.1 Val av farkosttyp

För att objektivt utvärdera vilken av de fyra farkosttyperna som var bäst lämpad för projektets mål genomfördes en strukturerad urvalsprocess. Det beslutades att den föredragna metoden för denna studie var att använda en Kesselringsmatris 2.4.

En Kesselringmatris användes för att vikta de olika kriterierna mot varandra. Det som jämfördes är farkosterna där definitionen av dem etablerades i kapitel 2. Av de fyra farkosterna, kunde de delas upp ytterligare till totalt sju stycken som ska jämföras. De farkosterna som jämfördes är väderballong, flygplan, drönare (copter), drönare (glidare), tryckracket, fastbränsleraket och flytande bränsleraket.

Farkosterna har nio krav som togs fram utifrån relevanta egenskaper som är viktiga för projektet. Dessa listas här:

- Höjdkrav
- Mätningens kvalitet
- Konstruktionskostnad
- Driftkostnad
- Lagar: Kan lagar göra utvecklingsprocessen mer komplex?
- Designkomplexitet
- Styrbarhet
- Återanvändningsbarhet
- Kontaminering: Försämras mätdata av farkosten?

Utifrån dessa krav kunde alla farkoster jämföras och sedan kunde den bästa farkosttypen motiveras.

3.2 Design och konceptgenerering av en oktocopter

Efter val av farkosttyp blev det slutgiltiga resultatet att vidareutveckla en drönare, mer specifikt en oktocopter. Designen baseras delvis på en tidigare modell av en oktocopter och huvudidén var att designa om den befintliga drönaren och göra den bland annat mer kompakt, lättare och mer modulär. Farkostvalet utfördes innan det visade sig finnas en redan existerande drönaren. Drönaren påverkade därför inte farkostvalet. Den tidigare drönaren hade följande problem:

- Arminfästningarnas konstruktion var för vek där M3 gängorna gick sönder vid åtdragning. Ytan som klämde åt varje kolfiberrör var dessutom för tunn för att bära hela oktocopterns vikt. Rotation av armarna var också ett problem vid flygning.
- Chassit var avlångt och uppbyggt som ett rätblock vilket gjorde oktocoptern instabil vid flygning då plattan böjdes.
- Chassits yta var ej optimerad, vilket innebar att stora delar av ytan var oanvänd och resulterade i onödig vikt.
- Kolfiberrören som motorparet tillsammans med rotorbladen var fästa i var olika långa vilket gjorde det svårare för oktocoptern att stabilisera sig
- Den tidigare konstruktionen använde ett elektroniskt bräde som PDB. Fördelen med den är att den är modulär samt använder sig av en boost bar vars uppgift är att fördela spänningen från batterierna till systemet jämt. Nackdelen med brädet är dess storlek och tyngd. Plattan var konstruerad av metallskenor och plywood vilket resulterade i en estimerad vikt på 1 kg. Dess stora designen påverkade drönarens ram att bli större vilket också adderar vikt.

Med dessa problem i åtanke formulerades nya krav till den nya designen av oktocoptern enligt följande tabell:

- Batterierna ska vara enkla att koppla in och ut. Det ska även finnas plats för upp till 6 stycken batterier inkopplade samtidigt för flygning.
- Chassit ska vara mer kompakt för att minska vingspannet och vikten.
- Chassit ska ha plats för alla sensorer som styr oktocopterns flygning och landning.
- Chassit ska ha plats för all mätutrustning och en fallskärm av säkerhetsskäl.
- Masscentrum bör vara placerat på ett sådant sätt att pendeleffekten undviks.
- Elektroniska komponenter bör vara skyddade mot vatten enligt IP45, vilket är samma IP-klassificering som motorerna har.
- Arminfästningarna ska dimensioneras för ökad robusthet för att klara av belastningen under flygning.

Enligt lagar om drönare i Sverige, vilket nämndes tidigare i konceptstudien, får oktocoptern inte överstiga 25 kilogram i vikt. För att bygga en konstruktion som inte överstiger vikten gjordes följande viktuppskattningar för att underlätta materialvalet:

	Vikt (gram)
Batterier (6st)	12000
Arm inklusive 2 motorer och 2 rotorblad (4st)	4200
Elektroniska komponenter	1500
Sensorer	1000
Totalt	18700
Återstående vikt under 25 kilogram	6300

Vikten som återstod blev approximativt 6300 gram vilket är den vikt hela oktocopterns bärande struktur fick väga. Detta innebar att vikten av alla komponenter och material blev ett centralt optimeringsproblem.

3.2.1 Schematisk modellering av en oktocopter

Den valda farkosttypen ska designas och byggas. Det finns begränsningar eftersom designen ska hålla sig till kraven från den äldre revisionen och utifrån dessa krav ska farkostens design optimeras. För att säkerställa en objektiv och spårbar beslutsprocess användes en serie matriser. De jämför koncept och lyfter de effektiva lösningarna medan de sämre elimineras. Koncepten som beskriver och delar upp farkosten utgår ifrån skisser. Det var viktigt att ha en bra grund, därför utnyttjades tre olika skisser av tänkbara designar av en oktocopter.

3.2.2 Morfologisk matris

Genom skisserna skapades en morfologisk matris 2.1 vars syfte var att generera alla möjliga kombinationer av dellösningar. De formulerade dellösningarna baserades på de olika konceptens lösningar av till exempel batteriplacering, arminfästningar, elektronisk utrustning och placering av mätutrustning. Då matrisen var färdigkonstruerad med alla dellösningar och delfunktioner användes pragmatisk kombineringsmetod för att generera koncept.

3.2.3 Elimineringssmatris

Elimineringssmatrisens 2.2 uppgift är att eliminera koncept som inte uppfyller kraven på drönaren. Följande krav formulerades för elimineringssmatrisen:

- **Vikt** - Oktocopterns vikt får ej överstiga 25 kilogram.
- **Storlek** - Drönaren får inte överstiga storlekskraven från lagar.
- **Temperatur** - Oktocoptern och dess elektroniska utrustning ska klara av temperaturerna upp till fem kilometers höjd.
- **Tidskomplexitet** - Oktocoptern design ska vara genomförbar inom tidsramen för arbetet.
- **Styvhet och hållfasthet** - Oktocopterns konstruktion ska tåla de mekaniska belastningar som uppstår under flygning och landning.

Genom dessa krav skapades en elimineringssmatris för koncepten från konceptkatalogen.

3.2.4 Pugh matrix

Efter elimineringsmatrisen gick de resterande koncepten in i en Pugh-matris 2.3 för att sälla ytterligare. Kriterierna som användes för jämförelsen i matrisen presenteras och förklaras i punktlistan nedan. Kriterierna valdes från hur konstruktionen och användningen av oktocoptern påverkas. Kriterierna är annorlunda från kraven då de kan uppnås på ett bättre eller sämre sätt än andra koncept.

- **Tid/komplexitet** - Hur lång tid och hur komplex blir konceptet att bygga?
- **Storlek** - Hur stort blir det byggda konceptet?
- **Vikt PDB** - Hur mycket väger kraftfördelningskorten?
- **Modulär** - Hur modulär blir slutkonceptet vid konstruktion?
- **Kabellängd** - Hur långa kablar krävs för konstruktion av konceptet?

Utifrån resultatet framställdes att vissa koncept var bättre än andra. Endast de bättre koncepten går vidare till nästa steg.

3.2.5 Kesselringmatris

Sista steget i konceptgenereringen är Kesselringmatrisen 2.4. Den utgick från kriterierna nedan.

- Tid / Komplexitet
- Storlek
- Hållfasthet: Hur mycket belastning klarar systemet?
- Modularitet
- Kabellängd: Behövs långa kablar för monteringen?

Efter detta steg presenterades koncepten som var mest lämpliga. Vilket ledde till att koncepten med mest poäng valdes.

3.3 CAD-modellering av en oktocopter

I syfte till att skapa förståelse kring hur oktocopters olika komponenter samspelar och hur dessa kan placeras på ett effektivt sätt för att komprimera och optimera copters yta används CAD (Computer-aided design) som verktyg. Genom att skapa en CAD-modell av oktocoptern blir det enklare att placera ut komponenter på ett effektivt sätt då verktyget använder komponenternas verkliga mått. Vad gäller hållplacering för arm-, komponent- och benfästen görs även detta med stor fördel i CAD där verktyget analyserar om komponenter eller hål kolliderar. Därav användes CAD som ett viktigt verktyg i detta arbete för att konstruera en drönare.

Då många komponenter inte är enskilda från varandra så möjliggör CAD snabba förändringar, för att utforska alternativ och passformen mellan dessa. Det börjades med att utforska de koncepten som bestämdes komponentvis för att sedan sammanföra dessa i en assembly, därefter blev det uppenbart var fästpunkter och skruvar borde placeras.

3.4 Konstruktion av oktocopter

I detta avsnitt förklaras processen av byggandet utifrån CAD-designen. För att underlätta byggprocessen vidareutvecklades en annan oktocopter, därför är vissa komponenter såsom ben, armar och elektronik redan färdigställda. Primära fokuset är då anpassning och sammanfogning av de tilldelade delar samt nya tillverkade delar.

För projektet gjordes flertalet materialval där olika material analyserades, framförallt kolfiber, plast, stål och aluminium. Baserat på projektets materialval gjordes en materialinventering i verkstaden. Det som finns tillgängligt utnyttjas i första hand, som gängstavar, medan annat material införskaffas på andra sätt. Specifika komponenter som kolfiber skivor beställs från leverantörer. När materialet har levererats, påbörjas bearbetning av materialet. Råvaran ska transformeras till färdiga komponenter enligt CAD-modellen.

Delar som monteringsplattformer och väggar måste bearbetas för korrekt yttermått samt andra utskärningar för kablar och skruvförband. När drönaren kräver unika sammanfogningar, används gängstavar för att skruvförbandet ska ha tillräcklig längd. Enklaste sättet är att såga gängstavarna till den rätta längden.

En stor del av drönarens mekaniska struktur tillverkades med additiv tillverkning, specifikt 3D-printing i polymer material. Processen inleddes genom att konvertera CAD filer från CAD modellen till stl filer. Vilket behövs för att generera instruktioner till 3D skrivarna. Sedan skrevs de ut och om de misslyckades, felsöktes det och sedan skrevs ut igen. Specialdesignade komponenter har tillverkats för att fixera drönaren armar och ben, där hög precision och styvhet är viktigt. En annan viktig del är komponenthållare för att säkerställa att batterier, sensorer och elektronik sitter stabil.

Efter bearbetning av materialet som kolfiber och PETG har färdigställts, kan delar monteras. Alla permanenta delar skruvas fast med låsmuttrar, medan frekventa använda elektronikdelar monteras med dubbelsidig tejp. Ben har en monteringspunkt som kan skruvas in på en plattform. Medan armarna är rör och får klämmas ihop. Alla sensorer utnyttjar en 3D-print för att monteras i rätt höjd och vinkel.

Jämfört med den tidigare oktocoptern har elektronika komponenter flyttats och då krävs nya kabellängder. Dessa löds och skarvas om med längre kablar. Efteråt verifieras det att strömkretsarna är slutna samt polariteten mellan positiva och negativa ledare för att förhindra skador på känslig elektronik.

Utöver drönaren designas en låda för att förvara mätinstrument. Denna förvaringsmodul ska säkerställa att oktocoptern kan mäta data under flygning. Modulen designades efter färdigställandet av oktocoptern eftersom formen och mätinstrumenten kan ändras med tiden och inte ska påverka de andra komponenterna. Lådan konstrueras med additiv tillverkning; 3D-printing, för att behålla en flexibel design.

Placering av mätutrustningen analyserades också med kunskap om downwash och propellerarnas luftströmmar.

3.5 Flygberäkningar

För att se till att oktocoptern klarar av kraven behövs simuleringar göras. En modell i Python som undersöker vad drönaren klarar av. Modellen består av tre huvudsakliga delar; stigning till höjd, hovring på konstant höjd, och nedstigning till markhöjd. Modellen är förenklad och tar inte hänsyn till väderförhållanden. Modellen visualiserar resultatet i Python.

Modellen programmeras i Python och körs för att simulera hur oktocoptern presterar utifrån olika förhållanden. Modellen börjas med att fylla i krav som oktocoptern ska klara av; höjd, stigningshastighet och nedstigningshastighet. Modellen beräknar hur mycket energi och effektbehov som oktocoptern kräver och räknar ut om höjden är möjlig. Modellen har gjort följande förenklingar:

- Oktocoptern följer en konstant stig- och nedstigningshastighet.
- Ingen regulator används i modellen.
- Dragkraften antas minska proportionerligt med luftdensiteten.
- Luftmotståndskoefficienten antas vara konstant.
- Batterispänningen antas vara konstant.
- Ingen vind, turbulens eller markeffekt påverkar modellen.
- Ingen energiåtervinning antas ske vid nedstigning.
- Den koaxiella verkningsgraden uppskattas till 0.78 enligt en tidigare studie [56].
- En motor med tillhörande propellerblad har en verkningsgrad som uppskattas till 0.85 vilket motortillverkaren specificerar i en studie [57].

3.5.1 Grundläggande beräkningar

Oktocoptern tyngdkraft beräknas med hjälp av Newtons andra lag [58].

$$F_g = mg \tag{3.1}$$

Där m är oktocopterns massa och g är gravitationskonstanten. Den maximala dragkraften som alla motorer tillsammans har är följande.

$$T_{\text{max, ideal}} = n \cdot T_{\text{motor}} \tag{3.2}$$

Där n är antalet motorer oktocoptern har och T_{motor} är den maximala dragkraften per motor. Eftersom oktocoptern är koaxiellt utformad (propellerarna är monterade i par ovanför och under varandra) fås en extra verkningsgrad tas hänsyn till. Då blir den maximala dragkraften av motorerna följande.

$$T_{\text{max}} = T_{\text{max, ideal}} \cdot \eta_{\text{koaxiell}} \tag{3.3}$$

Utifrån detta kan hovringsthrottelnivån beräknas vid marknivå, genom att beräkna relationen mellan tyngdkraften på oktocoptern och dragkraften på motorerna fås throttnivån.

$$\text{throttle}_{\text{hover}} = \frac{F_g}{T_{\text{max}}} \quad (3.4)$$

3.5.2 Grundläggande beräkningar om batteriet

Oktocoptern kan vara utrustad med upp till 6 stycken batterier. Totalt kan då drönaren ha en batterikapacitet upp till 96000 mAh. Batteriets totala energi i joule beräknas följande enligt [59].

$$E_J = U \cdot Q \cdot k \cdot 3600 \quad (3.5)$$

Där U är spänningen, Q är batterikapaciteten, k är den användbara batteriandelen och 3600 är för att omvandla energienheten från watt till joule.

3.5.3 Luftdensitetens och luftmotståndets inverkan på olika höjder

För att göra modellen så realistisk som möjligt måste modellen ta hänsyn till att luftdensiteten minskar exponentiellt med höjden. Detta kan beräknas med den barometrisk höjdformeln [60].

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}} \quad (3.6)$$

Där ρ_0 är luftdensiteten vid havsnivå, M är luftens molmassa, g är gravitationskonstanten, h är höjden, R är gaskonstanten för luft och T är temperaturen. Propellrarna i samband med att luftdensiteten minskar när drönaren stiger leder till att dragkraften minskar. För att beräkna detta används en förenklad modell där dragkraften minskar linjärt med sänkt luftdensitet.

$$T_{\text{max}}(h) = T_{\text{max},0} \cdot \frac{\rho(h)}{\rho_0} \quad (3.7)$$

När oktocoptern befinner sig i stigning eller nedstigning, så verkar ett bromsande luftmotstånd på oktocoptern. Den kan beräknas av följande formel [61].

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (3.8)$$

Där ρ är luftdensiteten, C_d är den uppskattade luftmotståndskoefficienten, A är den uppskattade tvärsnittsarean och v är hastigheten.

Vid stigning måste oktocopterns dragkraft övervinna både tyngdkraften och luftmotståndet till följd av hastigheten och den beräknas som följande.

$$T_{\text{krav}} = F_g + F_D \quad (3.9)$$

Vid nedstigning måste oktocoptern endast övervinna tyngdkraften minus luftmotståndet eftersom luftmotståndet verkar i motsatt riktning mot rörelsen och därmed bromsar oktocoptern. Därav kräver inte nedstigningen lika mycket energi.

3.5.4 Oktocopterns effektkrav

Den effekt som oktocoptern kräver kommer beräknas med en förenklad rotorbaserad momentumteori enligt [62]. Det vill säga den effekt som krävs för att oktocoptern ska ha en specifik dragkraft. Den beräknas på följande sätt.

$$P = n * \sqrt{\frac{(T/n)^3}{2\rho A}} \quad (3.10)$$

Där T är den totala dragkraften, n är antal motorer, ρ är luftdensiteten och A är den totala propellerarean. För att modellen också ska ta hänsyn till förlusterna från ESC, motorerna, propellrar och den koaxiella konfigurationen, så blir den verkliga rotoreffekten följande.

$$P_{\text{rotor}} = \frac{P_{\text{ideal}}}{\eta_{\text{koaxiell}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{ESC}} \cdot \eta_{\text{propeller}}} \quad (3.11)$$

För att göra modellen mer anpassad till verkligheten behövs den mekaniska effekten som krävs för att oktocoptern ska öka sin potentiella energi också tas hänsyn till [63]. Den mekaniska effekten är derivatan med avseende på tiden av potentiella energin och blir följande.

$$P_{\text{mekaniska}} = mg \frac{dh}{dt} = mgv \quad (3.12)$$

Totalt blir effekten:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{rotor}} + P_{\text{mekaniska}} \quad (3.13)$$

Den mekaniska effekten kan inte tas hänsyn till vid nedstigning, då den potentiella energin inte kan återvinnas effektivt till batteriet. Därav blir effektbehovet vid nedstigning lika med effektbehovet från rotorerna.

Kapitel 4

Resultat

I detta avsnitt beskrivs projektets resultat.

4.1 Konceptval luftsond

Resultatet från Kesselringmatrisen är en objektiv och systematisk rankning av samtliga koncepten vilket möjliggör ett objektivt och grundat konceptval av en luftsond. Konceptvalet resulterade i följande matris A.

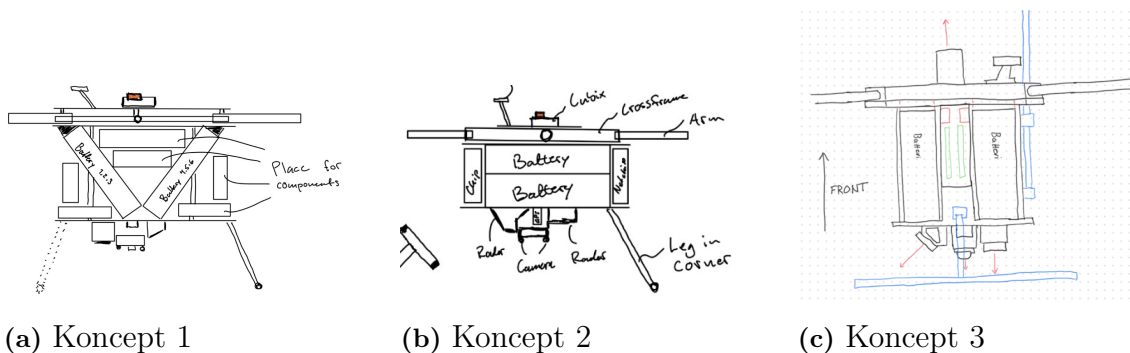
Den farkost som valdes för vidareutveckling var copter drönaren eftersom den var högst rankad utefter projektets uppdrag.

4.2 Konceptval oktocopter

Följande avsnitt beskriver resultaten från konceptgenereringen och konceptvalet av en oktocopter.

4.2.1 Schematisk modellering

Genom kraven som formulerades i metoden togs tre tänkbara skisser fram som ligger till grund för den slutgiltiga metoden där Kesselringmatrisen avgör det vinnande konceptet. Följande tre skisser beskriver tänkbara koncept vilket även fungerar som indata för den morfologiska matrisen.



Figur 4.1: Tre skisser över tänkbara koncept

Koncept 1 är optimerat för höjd- och breddmått för att göra oktocoptern kompakt samtidigt som den triangulära formen ökar hållfastheten i chassit. Batterierna är monterade med en 45 graders vinkel relativt bottenkivan. Koncept 2 är optimerat för ett kompakt mått på bredden där de liggande batterierna möjliggör för en mindre dimension på bottenkivan. Koncept 3 är optimerat för modularitet där de vertikalt placerade batterierna möjliggör enkla insticksmoduler.

4.2.2 Morfologisk matris

Följande figur visar den slutgiltiga morfologiska matrisen för alla dellösningar. En mer utförlig förklaring till alla dellösningar återfinns i bilaga F.

Sub-Functions	Sub-Solutions			
Infästning armar	Kors	Ramen	Uppdelat kors	Blocken
Batterilutning	Liggande	Stående	Lutande	
Elektronik	Elektronisktbräde liggande	Sladdlösning	Elektronisktbräde stående	
Batteriplacering	Ett lager	Flertal lager		
Väggar	Kolfiber	Plast	Tyg	Inga väggar
Armplacering	Upp	Ner	Mitten	
Mätutrustning	Ovan	Sidan		
Fallskärm	Centrerad på	Sidan		

Figur 4.2: Morfologisk matris med dellösningar

Unnamed Morphological Matrix

Sub-Functions	Sub-Solutions			
Infästning armar	Kors	Ramen	Uppdelat kors	Blocken
Batterilutning	Liggande	Stående	Lutande	
Elektronik	Elektronisktbräde liggande	Sladdlösning	Elektronisktbräde stående	
Batteriplacering	Ett lager	Flertal lager		
Väggar	Kolfiber	Plast	Tyg 	Inga väggar 
Armplacering	Upp	Ner 	Mitten 	
Mätutrustning	Ovan	Sidan 		
Fallskärm	Centrerad på	Sidan 		

Figur 4.3: Morfolgisk matris efter pragmatisk sällning

Från den morfologiska matrisen genererades totalt 88 möjliga koncept enligt bilaga. B vilka sedan matades in i elimineringsmatrisen enligt nedan.

4.2.3 Elimineringsmatris

Genom dessa krav skapades elimineringsmatris för de 88 koncepten enligt bilaga C. Koncept 1-22 hade alla infästningsdesignen *block*” vilket ansågs ge en sämre styvhet och hållfasthet och därmed blev dessa koncept eliminerade. Koncept 33-38, 55-60 samt 77-82 hade alla designen med lutande batteriplacering vilket ansågs vara en för tidskrävande konstruktion och därmed eliminerades koncepten. Totalt eliminerades 40 koncept via elimineringsmatrisen vilket lämnade 48 koncept.

Nästa steg i konceptsällningen är Pughmatrisen. 48 koncept i matrisen är inte hanterbart så en förenkling behöver göras. Förenkling blev att eliminera material på väggar som en funktion. Det minskade antalet koncept till 24. Detta på grund av att när väggarna försvann, så kunde vartannat koncept kombineras till ett. En till förenkling var att koncept med stående bräde, liggande batterier och ett lager ansågs som orimligt komplex design för ingen fördel. Då kunde ytterligare 3 koncept elimineras vilket resulterade i 21 koncept. Dessa gick vidare till Pughmatrisen.

4.2.4 Pugh matrix

Resultatet av utvärderingen av designkoncepten presenteras i Pugh-matrisen nedan i bilaga D. Sammanfattningsvis var resultatet att koncept 30, 44, 52, 54, 62, 74, 76, 84 och 88 sällades bort. De som kvarstod var koncept 26, 28, 42, 48, 50, 64, 70, 72 och 86. De nio koncepten infogades i Kesselringmatrisen för en avslutande värdering och till slut konceptval.

4.2.5 Kesselringmatris

Den slutgiltiga metoden som användes i konceptgenereringsprocessen var en Kesselringmatris enligt bilaga E. Resultatet från Kesselringmatrisen presenteras i följande figur 4.1 där alla koncept rangordnats.

Tabell 4.1: Resultat från Kesselringmatrisen

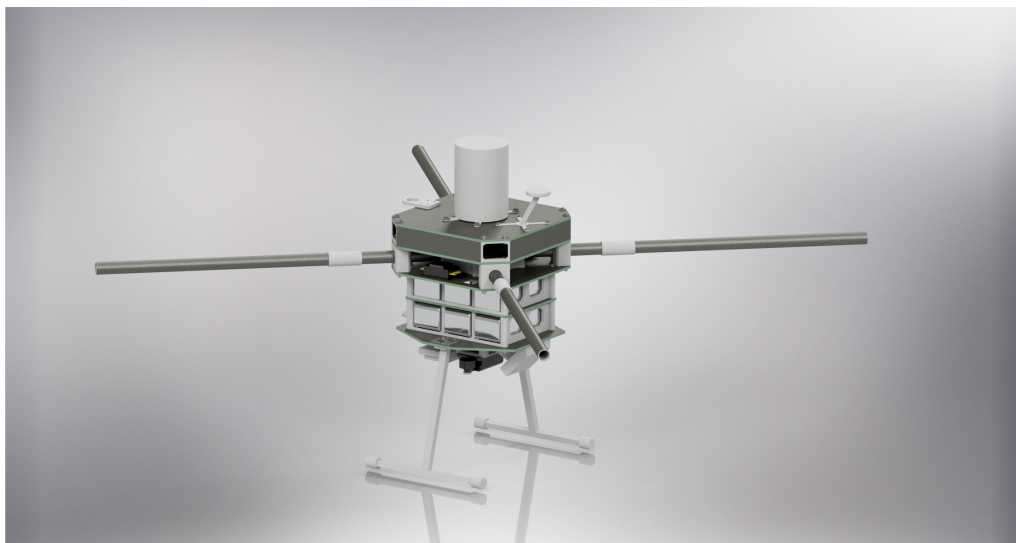
Rangordning	Koncept
1.	26
2.	42
3.	70
4.	72
5.	28
6.	64
7.	86
8.	48
9.	50

Koncept 26 valdes därmed som det slutliga konceptet och vidareutvecklades i CAD.

4.3 Slutgiltig design

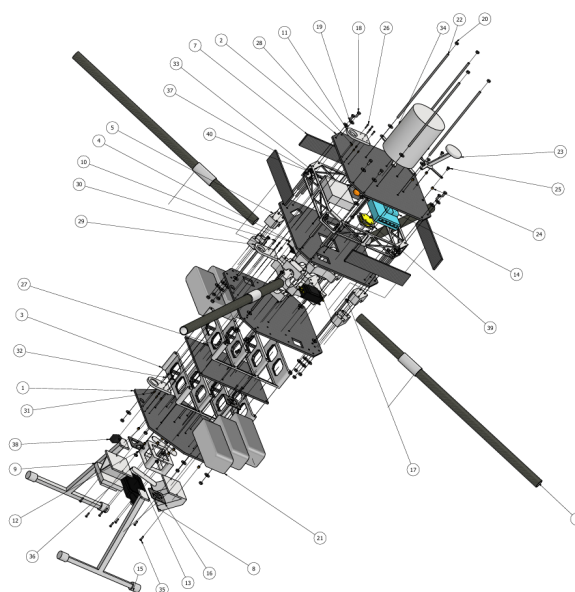
Detta avsnitt behandlar och presenterar resultatet av designprocessen i form av, komponenter, CAD-modeller, kretsschema och modelleringar.

4.3.1 CAD-modell



Figur 4.4: Rendering av oktocopter

Designen bygger på en central ryggrad av vertikala stänger som går genom hela oktocoptern då den huvudsakliga belastningen är vertikal. Majoriteten av oktocopterns vikt består av batterierna på 12 kg. Lyftkraften från rotorerna via armarna översätts med hjälp av våning 3 till vertikal kraft. Vikten av oktocoptern behöver också kunna bäras via den översta plattan med hjälp av fallskärm. Användningen av en fallskärm kräver även att designen klarar stötblastning. Centrala stänger blir den bärande strukturen som innefattar och översätter krafterna mellan batterier, fallskärm, armar och ben.



Figur 4.5: Sprängvy Komponenter

Tabell 4.2: Bill of Materials

Quantity	Component
1	Bottom carbon fiber plate slanted edges
3	Carbon fiber plate 35mm chamfered
1	Battery rack subassembly - 3 parts
1	Arm cross subassembly - 2 parts
4	Arm mount subassembly - 2 parts
4	Arm subassembly - 4 parts
1	Electronics cover subassembly - 12 parts
1	45 degree sensor - radar
1	Vertical sensor - radar
2	PM08 power module
2	Sensor arm mount bottom
1	Wide-angle sensor mount
1	Snydair vision
1	Netgear
2	Legs
4	Leg washer / spacer
4	Threaded rod battery rack
24	M6 screw/bolt
52	M6 washer
44	M6 nut
6	Battery
4	Strut
1	GPS
12	Insert 7 mm
4	M5 7 mm
16	M3 screw/bolt
8	Insert M3
1	Sensor arm middle
1	Ardupilot parachute
8	M4 screw/bolt
2	Herelink
1	Computer
1	Height sensor
1	Electronics
1	Ardupilot

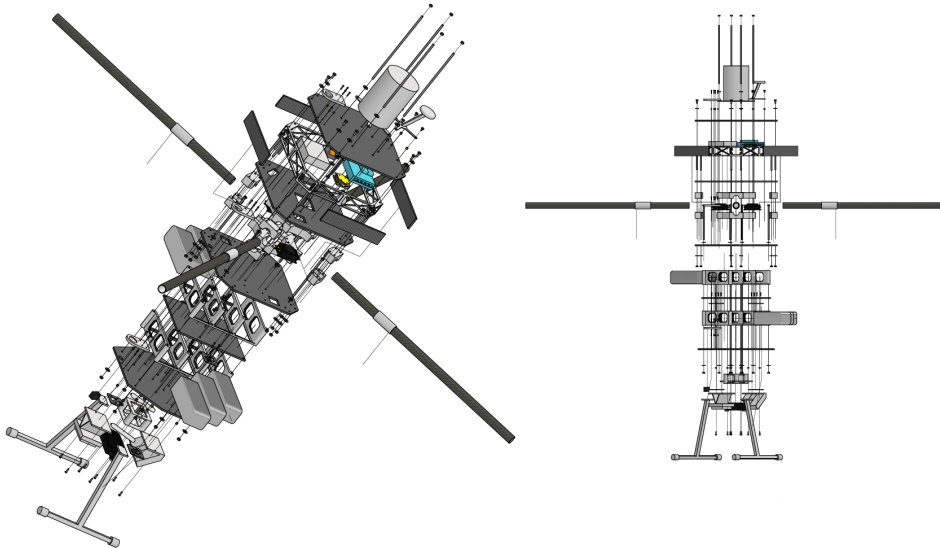
Den slutgiltiga designen består enligt Figur 4.6 av fem kolfibervåningar, mellan och på dessa befinner sig sensorer och olika sektioner för komponenter. Överst befinner sig fallskärm, GPS, och partikelmätinstrument. Under den första våningen placeras elektroniken i en försluten låda.

Nästa våning representerar den centrala strukturen bestående av korsmekanismen och klämmorna för armarna. Både korset och klämmorna är delade på mitten vilket innebär att de kan separeras vertikalt. Detta för att sedan kunna klämma fast

rotor-armarna.

Våning tre och fyra skiljer sig från resten av oktocopterns profil, våningarna består av den struktur som ska hålla de sex batterierna som kraven specificerat. Enligt elimineringsmatrisen och konceptgenereringen placerades och staplades batterierna i två våningar, med tre batterier vardera.

Den femte och sista våningen försluter strukturen och ansvarar huvudsakligen för att bära vikten av batterihyllorna, fästa ben och bära mätinstrument.



Figur 4.6: Sprängvy av den slutgiltiga CAD-modellen

Alla komponenter bortsett från kolfiberplattorna och elektroniken är designade i syfte att 3D-printas. Med andra ord bygger de i många fall uppåt och undviker plana överhängande ytor.

4.3.2 Kretsschema för drönaren

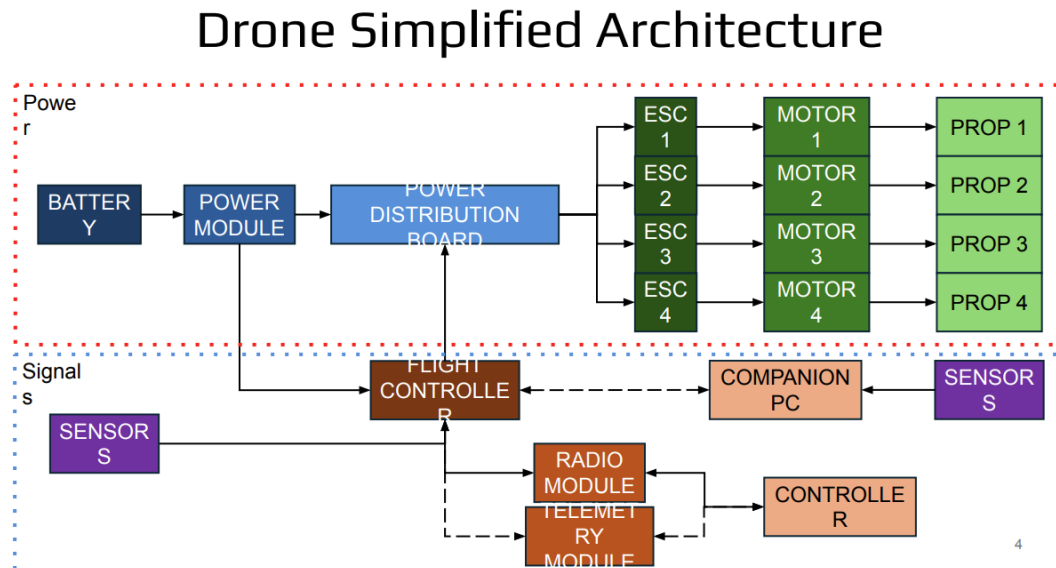
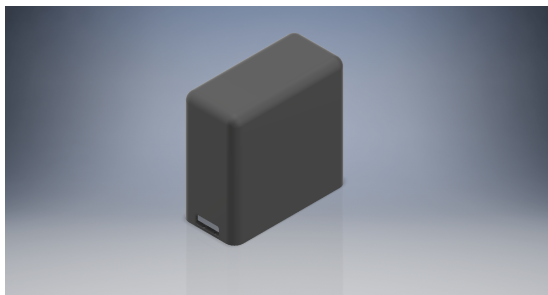


Figure 4.7: Simplifierat drönarsystem [64]

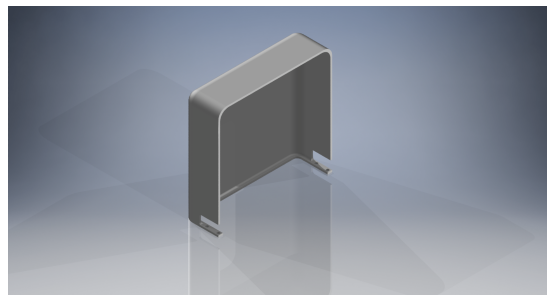
Figur 4.7 beskriver de två integrerade delsystemen i drönaren; *power* och *signals* samt hur de elektriska komponenterna i drönaren är kopplade. Viktigt att belysa i *signals* är kopplingen mellan sensorerna och *flight controllern*. Sensorerna är dels direkt kopplade direkt till FMU:n, men även genom ett datorkort där det sker en återkoppling regelbundet, vilket beror på PID-regulatorn. Hur PID regleringen fungerar är djupare beskrivet i underavsnitt 2.6.1. Flight controllern i sin tur skickar vidare information till nästa delsystem, *power*, där batterier, kraftmoduler, kraftfördelningskortet, Electronic Speed Controller, motorerna och propellrarna samverkar. Hur dessa samspelar är beskrivet i avsnitt 2.6.

4.4 Design och konstruktion av mätutrustning

Designen av mätutrustningen blev enligt figur 4.8 och 4.9. Mätutrustningen placeras i facket och behållaren skruvas på topplagret på drönaren. Figur 4.10 och figur 4.11 visar mätutrustningen tillverkad och monterad på drönaren. Fötterna som mätutrustningen står på används för montering på drönaren.



Figur 4.8: Mätutrustning



Figur 4.9: Mätutrustning, insidan



Figur 4.10: Mätutrustning tillverkad



Figur 4.11: Mätutrustning monterad

4.5 Materialval

Följande avsnitt presenterar materialvalet för oktocopterns konstruktion.

Oktocopterns alla fem våningar konstruerades med 6 mm tjocka kolfiberskivor av typen sandwichkomposit. Dessa skivorna hade en tryckhållfasthet på 1.33 N/mm^2 . För att undvika punktbelastning över denna nivå användes större brickor till konstruktionen för att öka arean som belastades.

Många av delarna i drönaren är 3D skrivna och alla dessa har skrivits i Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG). Andra alternativet är Polylaktid (PLA) men PETG fyller funktionen för denna projekt bättre. Eftersom PETG [65] [66] har högre styrka,

mer tålighet samt flexibel för stötar och temperatur ändringar. Valet av en infillgrad på 20–30% räcker för att optimera förhållande mellan material till mekanisk prestanda.

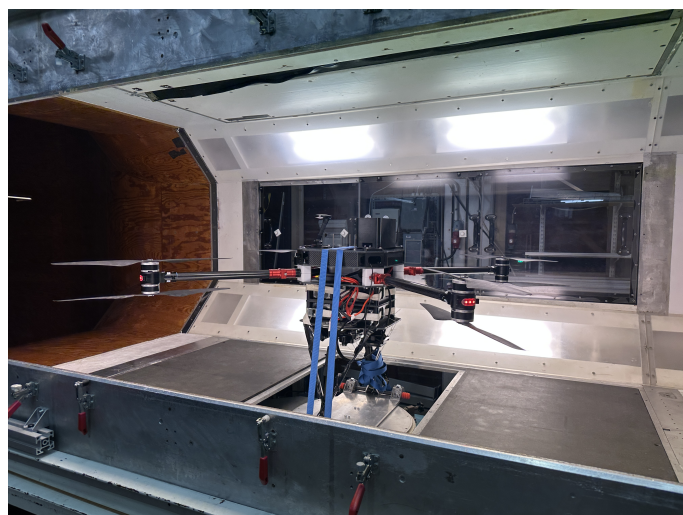
4.6 Slutgiltig konstruktion

Avsnittet presenterar den slutgiltiga konstruktionen av drönaren CAD-modellen som utgångspunkt.

Konstruktionen blev enligt figur 4.12 och 4.13 nedan.



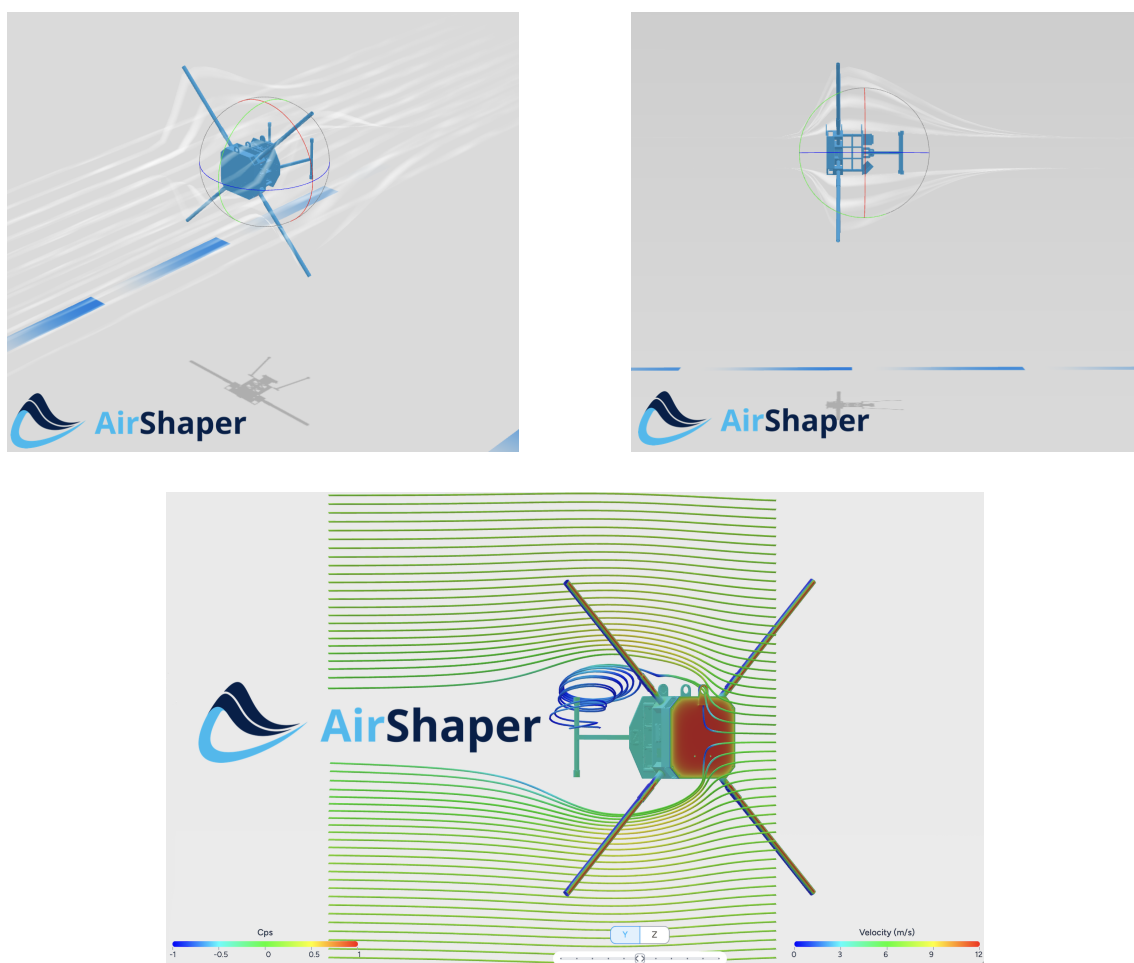
Figur 4.12: Färdigkonstruerad drönare



Figur 4.13: Färdigkonstruerad drönare under testning i vindtunnel

4.7 Teoretiska analyser av oktocoptern

Följande simulering genomfördes för det externa flödet av luft med hastigheten 8 m/s i syfte att ta fram oktocopterns C_d konstant. Den slutgiltiga CAD-modellen av oktocoptern simulerades med hjälp av programmet *AirShaper* enligt figur 4.14 nedan, [67]. Den egendesignade CAD-modellen simulerades i *AirShapers* webbaserade miljö som ett verktyg för analys av modellen.



Figur 4.14: Simulering av oktocopter med externt luftflöde via AirShaper [67], återgiven med tillåtelse.

Tryckkoefficienten C_p [68] tolkas att vara konstant över hela frontarean normalt mot färdriktningen enligt bilden från figur 4.14, då kan C_d -konstanten approximeras som $C_p \approx C_d$ vilket motsvarar $C_d = 1$.

Den analytiska beräkningsmetoden använde följande parametrar.

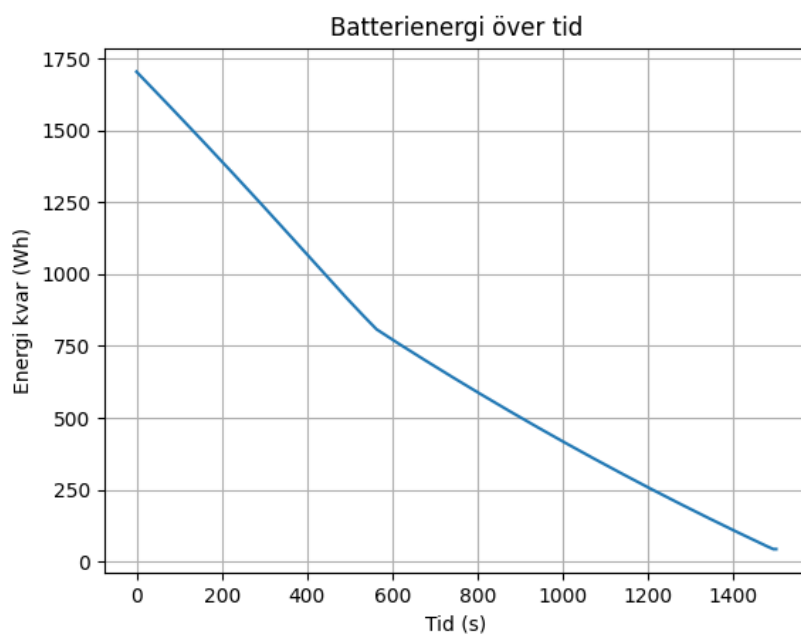
Tabell 4.3: Parametrar som används i simuleringen

Parameter	Värde	Enhet	Beskrivning
m	25	kg	Massa
g	9.82	m/s ²	Tyngdacceleration
n_{motorer}	8	st	Antal motorer
d_{prop}	0.5588	m	Propellerdiameter
$F_{\text{max,motor}}$	65.5976	N	Maximal dragkraft per motor
$P_{\text{max,motor}}$	1250	W	Maximal effekt per motor
U	22.2	V	Batterispänning
Q	$16.0 \cdot 6 = 96$	Ah	Batterikapacitet
k	0.80	–	Användbar batteriandel
η_{motor}	0.85	–	Motorverkningsgrad
η_{ESC}	0.95	–	ESC-verkningsgrad
η_{koaxiell}	0.78	–	Koaxiell verkningsgrad
η_{prop}	1	–	Propellerverkningsgrad
ρ_0	1.225	kg/m ³	Luftdensitet vid havsnivå
C_d	1	–	Luftmotståndskoefficient
A	0.16	m ²	Tvärsnittsarea
Δt	0.1	s	Tidssteg
t_{sim}	1500	s	Simuleringstid
τ_{min}	0.20	–	Minsta throttle
τ_{max}	1.00	–	Största tillåtna throttle
$h_{\text{mål}}$	4500	m	Målhöjd
v_{upp}	8	m/s	Vertikal hastighet uppåt
v_{ner}	–5	m/s	Vertikal hastighet nedåt
t_{hovring}	30.0	s	Hovringstid på toppen
T	288.15	K	Temperatur, motsvarande 15°C

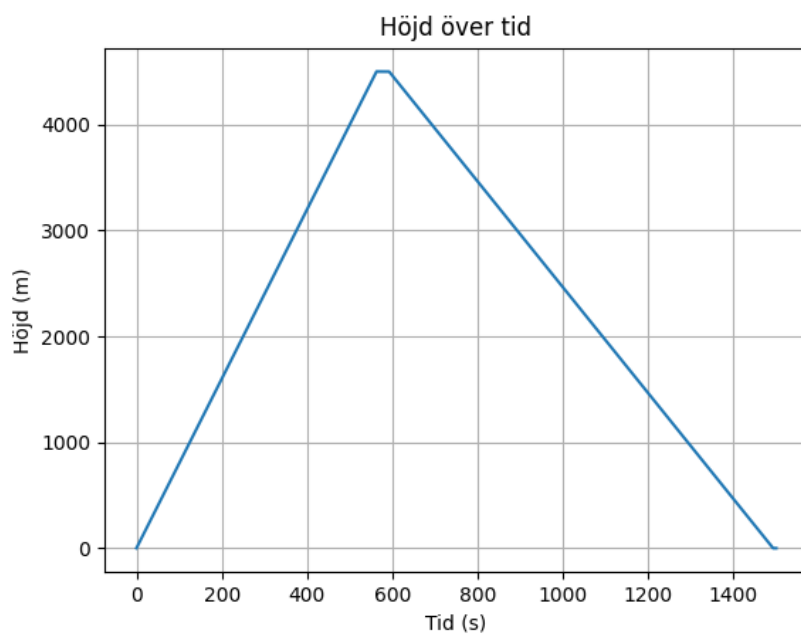
Med värdena i tabellen ovanför fås följande resultat.

Tabell 4.4: Resultat från simuleringen

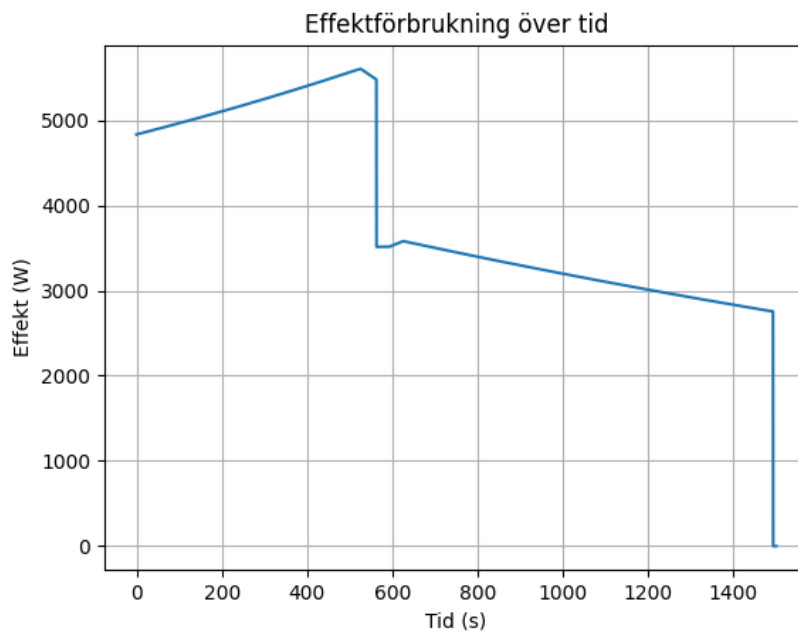
Parameter	Värde	Enhet
Maxhöjd uppnådd	4500.0	m
Total simulerad flygtid	1492.5	s
Batteri kvar av utnyttjbar kapacitet	2.54	%



Figur 4.15: Batterinivå som funktion av tid



Figur 4.16: Höjd som funktion av tid



Figur 4.17: Effektförbrukning som funktion av tid

4.7.1 Vindtunneltest

I vindtunneln genomfördes ett test för att testa lyftkraften för olika thrust på motorerna. Resultatet presenteras i tabell 4.5. Drönaren testades utan mätutrustning och med fyra av sex batterier. Testet genomfördes utan sidovind och lyftkraften mättes med en våg placerad inuti tunnel.

Thrust [%]	Vågmätning [N]	Lyftkraft [N]
0	-238	0
8	-231	7
16	-211	27
40	-120	118
80	70	308

Tabell 4.5: Genererad lyftkraft vid olika Thrust-nivåer

Diskussion

Diskussionen avser att analysera och utvärdera resultaten för ytterligare förståelse kring resultatet och validitet. Metoden granskas också i efterhand för att hitta luckor och förbättringar som kan hjälpa ett framtida projekt med liknande arbetssätt.

5.1 Konceptgenerering

Användningen av matriser kontinuerligt genom konceptgenereringen och konceptvalet ökar trovärdigheten och kvalitén på slutprodukten. Eftersom matriser bidrar med objektivitet och ett metodiskt arbetssätt i ett arbete där det finns en risk för subjektivitet och att perspektiv överses.

5.1.1 Luftsond

För konceptvalet användes endast en kesselringmatris för att nå den slutgiltiga luftsonden. Valet att bara använda en kesselringmatris grundades i att det inte krävdes någon konceptgenerering då konceptet redan existerade som de olika typerna av farkoster. Eliminering och Pugh-matrisen ansågs som överflödiga eftersom de används främst för att minska antalet koncept och sälla bort dem värsta innan kesselringmatrisen. Det gör kesselringmatrisen mer rimlig och hanterbar. Att utföra konceptgenereringen med samtliga matriser hade gett ett mer utförligt svar men hade sannolikt inte ändrat resultatet. Problematiken med att använda en kesselringmatris är att det finns inslag av subjektivitet. Subjektiviteten finns i hur koncepten värderas i varje kriterie. Matrisen hjälper till med att minimera mängden subjektivitet vilket gör metoden värd att använda men inte perfekt.

Kesselringmatrisens resultat var att en copterdrönare passade bäst för flygningen. Copterdrönaren presterade bäst på grund av kriterierna och deras vikter. Ändring av vikterna kan resultera i ett annat vinnande koncept, därför grundades vikterna utifrån projektets avgränsningar och anpassats till flygningen för farkosten. Detta resulterar i ett realistiskt konceptval för arbetet. Om flygningen skulle ändras, hade det medfört att viktningen också ändrats vilket möjliggör för ett annat koncept att vinna. Detta visar att metoden är anpassbar och mångsidig.

5.1.2 Oktocopter

Konceptgenereringen för oktocoptern har större krav på genomgående struktur och användning av flertalet matriser. Därför används först en morfologisk matris för att kombinera koncept, elimineringsmatris för att eliminera utifrån kraven och en Pugh matris för att jämföra koncepten mot varandra. Slutligen användes en kesselringmatris för att på de resterande koncept utföra en viktad värdering som ger ett konceptval. Det är fördelaktigt att sälla bort med eliminering och Pugh innan kesselring eftersom de är simplare och ena fokuserar på krav medan andra ser trender som kan ta bort konceptkategorier. Konceptgenereringsmetoden ger en gedigen och arbetad metod som krävs för att göra ett komplett konceptval ner på design-nivå.

Morfologisk matris

En begränsning av antal koncept i konceptkatalogen användes i resultatet från morfologiska matrisen. Risker med begränsningen är att koncept försvinner utan att värderas. Det användes eftersom utan begränsningen genereras tiotusentals koncept och tillsammans med en pragmatisk kombineringsmetod erhöles bara de lämpligaste konceptet. Risker att därmed tappa viktiga koncept är på så sätt minimerade och det höjer trovärdigheten för matrisens resultat.

Delfunktionerna och dellösningarna bygger upp resultatet och därför är det viktigt att studera dem för att kunna utvärdera resultat. För att få ett mer precist resultat från matrisen bör alla delar på drönaren ingå i matrisen med samtliga dellösningar. Endast de viktigaste delarna ingår som delfunktioner och de mindre vitala delarna inkommer senare i designprocessen. Det valet gjordes med tid och hanterbarhet av resultatet från matrisen i åtanke eftersom matrisen hade både tagit längre tid att göra samt resultatet med fler antal lösningar hade varit svårförståeligt. Det går inte heller att ha allt i åtanke i början av designprocessen. En förenklad morfologisk matris är därför att föredra framför en helt utvecklad och förklarande matris.

Likt kesselringmatrisen är den morfologiska matrisen inte helt riskfri. Risker är att dellösningar till funktionerna glöms bort och inte kommer med vilket påverkar resultatet negativt. Risker minimeras dock med användningen av en systematisk matris.

Elimineringsmatris

Resultatet från elimineringsmatrisen var att koncept innehållande lutande batterirotation eliminerades på grund av kriteriet tid och komplexitet samt att koncept med armfästningen block eliminerades på grund av styvhetsproblem. Att kriteriet styvhet eliminerade koncept är rimligt eftersom konstruktionen behöver vara tillräckligt robust eftersom flygning är en krävande miljö för även små brott och förändringar i geometri kan leda till allvarliga konsekvenser som försämrade flygning eller i värsta fall totalt haveri. Arbetet har en begränsad tidshorisont därmed gör sällning med tidskonceptet rimligt.

Att de två krav ovan eliminerar visar antingen på att gränsvärdena för de andra kraven var för snälla eller att de två kraven är betydande för konstruktionen. I det

tidiga designstadiet som elimineringsmatrisen befinner sig i är det dock svårt att veta om koncepten klarar sig eller inte mot kraven eller om gränsvärdena är realistiska vilket är en begränsning med samtliga matriser. Matrisen underlättar dock processen, minimerar risken för subjektiv värdering samt möjligheten för iteration och vidareutveckling av krav, kriterier och koncept förbättrar och gör metoden mer trovärdig.

Pugh matris

Pugh matrisen sållade bort koncept som använde det elektroniska brädet. De presterade sämre på två kriterier, vikt och storlek, vilket visas i bilaga D eftersom de alla fick negativ värdering medan andra koncept låg positivt eller vid noll. Anledningen till att brädet ansågs som tyngre var eftersom det var gjort av plattor av plywood och krävde större utrymme vilket adderar vikt men också ökar storlek på drönaren. Det presterade dock bättre på andra kriterier som moduläritet men eftersom vikten på drönaren påverkar viktiga delar som flygning, konstruktion och batteritid ansågs den som mer viktig och ligger till grund för eliminering av det elektroniska brädet.

Kesselringmatris

Resultatet från kesselringmatrisen var att koncept 26 vann och därmed valdes för konstruktion. Det värderades högre än de andra på grund av viktningen som återigen var anpassad till flygningen och drönarens uppdrag. Eftersom viktningen likt första kesselringmatrisen är baserad på uppdraget ger det trovärdighet men också frihet att ändra uppdrag och viktning och se hur resultatet ändras. Kriteriernas viktning valdes enligt hur viktigt kriteriet är för flygningen och hur det påverkar prestandan på slutprodukten. Kriterier angående byggnationen introducerades också här för att sälla bort lösningar som var bra men för komplexa för att bygga på tidshorisonten.

Kriterierna till matrisen valdes med hänsyn till byggnation, tidsåtgång samt robusthet på drönaren. De valdes eftersom de anses som viktiga för drönarens användning och livslängd eftersom de värderades högt i första konceptgenereringen. Värdeskalorerna på varje kriterier för varje koncept var också olika vilket visade på att de behövdes för att särskilja dem och lyfta fram varje koncepts fördelar och nackdelar. Det tyder på att kriterierna var välvalda och bidrog positivt till genereringsprocessen.

5.2 Oktocopterns slutgiltiga design och konstruktion

Följande avsnitt beskriver de motiveringar som gjordes under designen och byggandet av oktocoptern. Därefter diskuteras det huruvida den slutgiltiga konstruktionen av oktocoptern uppfyller den kravspecifikation som formulerades i metoden eller inte.

5.2.1 Diskussion och motiveringar kring okticopterns konstruktion

Direkt under den översta våningen placerades okticopterns alla elektroniska komponenter med skyddande väggar av kolfiber. Detta gjordes med motiveringen att skydda komponenterna från vatten. Det finns många utmaningar kring detta och en del avvägningar behövde göras. Många av dessa komponenter behöver förslutas samtidigt som de kräver kylning. En lösning är att göra utrymmet större men på bekostnad av sidoprofil och kompakt design. Vattenskyddet mot elektroniken prioriterades men öppningar lämnades även för luftcirkulation. Det är möjligt att försluta dessa öppningar utefter väderförhållande och temperatur.

Våningen under elektroniken består av den centrala bärande strukturen för okticoptern och dess fyra armar. Idén bakom designen går ut på att både stötta de krafter från rotorerna och låsa armarna i alla riktningar under flygning. Eftersom att designen följer en uppdelad struktur där hävstångseffekten delas upp centralt och längst kanterna fördelas krafterna väl ut i resten av strukturen. Den originella idén var att först använda ett omfattande kors som skulle sträcka sig hela vägen ut till hörnen av kroppen. Den slutgiltiga designen resulterade istället i ett uppdelat kors för att minimera vikten. Detta valet kändes sunt då ett centralt problem i projektet är viktoptimering vilket denna design överensstämmer med.

Våningen under den centrala bärande strukturen består av två batterihållare med två våningar där varje våning har plats för upp till tre batterier. Designvalet gjordes då det möjliggör jämn viktfördelning oavsett batterikonfiguration, vare sig om en rutt kräver 2, 4, 6 eller 3 batterier går det att konfigurera utan att skapa ojämn viktfördelning. För att minimera höjden av drönaren placeras batterierna på långsidan i en ställning. Båda våningarna av ställningen är identiska för att förenkla tillverkningsprocessen. Mellan dessa två strukturer placerades en ytterligare kolfiberplatta. Detta gjordes med motiveringen att förstärka strukturen och hållfastheten för våningen då sex batterier motsvarar ungefär hälften av drönarens totala vikt. Ställningen har dessutom viktoptimerats genom fackverkstrukturer och skalstruktur. Längst väggarna löper kanter som batterierna vilar på för att fördela vikten nära bärande väggar. Den öppna strukturen bidrar även till god luftcirkulation för att kyla de i drift mycket varma batterierna.

5.2.2 Okticopterns konstruktion utifrån kravspecifikationen

I metoden formulerades en lista med krav som den nya konstruktionen av okticoptern bör uppfylla. Generellt omfattade kraven modularitet och hållfasthet i chassit och arminfästningarna. Den slutgiltiga konstruktionen av okticoptern uppfyller de krav på modularitet som formulerades. Batterierna är enkla att koppla in och ut från de 3D-printade batterihållarna. De största kolfiberskivorna på okticoptern har dimensionerna 35x35 cm vilket är tillräckligt med yta för montering av alla befintliga sensorer samtidigt som de finns utrymme för montering av fler sensorer och mätutrustning i framtiden. Det finns även möjlighet att montera en fallskärmsmo-

dul i de fyra centrala M5 gängstavarna som går genom hela konstruktionen. Med dessa resultat anses den slutgiltiga konstruktionen av oktocoptern uppfylla kraven för modularitet.

Vidare formulerades krav för arminfästningarna där kravet var ökad robusthet för att klara av belastningen under flygning. Den slutgiltiga konstruktionen för arminfästningarna blev ett centralt kors samt fyra block placerade i varje hörn av kolfiber-skivan. Arminfästningarna anses därav vara mer robusta än den föregående designen där M3 gängorna nu ersatts med M5 gängor och kontaktytan med armarna och fästena har ökat.

Motorerna på drönaren är klassificerade enligt IP-45 vilket innebär skydd mot vatten spolat från ett munstycke. Med detta i åtanke konstruerades en elektronik-våning ovanför armarna med kolfiberväggar för att skydda utrustningen mot vatten. Denna lösningen anses vara lika vattenresistent enligt IP-45 men detta har inte verifierats med fysiska tester vilket borde genomföras i en framtida studie.

5.2.3 Materialval

Från resultatet valdes materialen PET-G för den adaptiva tillverkningen, aluminium 6061 för aluminium komponenterna och kolfiberplattan med Easy 75 skum mellan lagren. Skruvarnas hållfasthetsklassen valdes till 8.8 och gängstavarnas till 4.6.

PET-G valdes eftersom det klarar yttre påverkan. Copterdrönarens 3D-printade detaljer som batterihållaren och armfästningen har hållfasthetskrav eftersom de utsätts för högbelastning speciellt vid armarna på grund av propellrarnas lyftkraft och rotation vilket PET-G klarar av. Plastfilamentet är också anpassat för att klara av yttre påverkan som regn vilket drönaren utsätts för. PLA var ett alternativ eftersom tillverkningen är snabbare än PET-G men det eliminerades. Det valdes bort eftersom det blir för sprött vid tillverkning och klarar inte väderförhållandena som drönaren utsätts för. Kolfiberstärkta filament valdes också bort eftersom printing med dem är mer komplex och kräver längre tid även om de har strukturella fördelar. De resulterande delarna presterade bra under monteringen vilket visar att materialvalet på komponenterna är bra och styvare filament med kolfiber inte var nödvändigt.

Aluminium valdes eftersom det bidrog med styvare komponenter med relativt hög hållfasthet i relation till densitet. Vikten på drönaren påverkar effektiviteten och prestandan så att göra avvägningen mot vikt än bättre material är grundad. Aluminium är också resistent mot korrosion vilket är oundvikligt i farkostens operativa tillstånd. Valet mot rostfrittstål hade fungerat i aspekterna hållfasthet och vädertålig men med högre densitet valdes det bort.

Kolfiberplattorna med skum presterade bra i böjning på grund av det ökade tröghetsmomentet som uppkom med den högre tjockleken. En nackdel med plattorna var att vid åtdragning av skruvar och gängstavar deformerades dem inåt. Det försämra-

de förspänningen och då klämkraften mellan lagren. För att lösa det användes större brickor vilket fördelade kraften mer överskivan men det löste inte det grundläggande problemet. Att istället välja en kolfiberplatta med solid mitten av expoy lim hade ökat hållfastheten på plattan och möjliggjort hårdare åtdragning med mindre deformation i plattan. För att de dock ska erhålla samma styvhet i böj behövs dock en tjockare skiva vilket ökar vikten mer än en tjockare platta med skum. Avvägningen som gjorde var att uppnå tillräcklig hållfasthet med minimerad vikt.

Hållfastheten på både skruvarna och gängstavarna presterade bra under monteringen. Gängorna skadades inte av åtdragningen vilket möjliggjorde åtdragning. Detaljerna i dragkraft presterade också som väntat eftersom de presterar bra i drag på grund av deras längd och materialets dragegenskaper. I böj presterar dem dock sämre med deras låga relation mellan diameter och längd. Det ökar risken för böjning om drönaren landar fel eller hårt. Lösning hade varit att höja hållfasthetsklassen eller öka diametern på skruvförbandet. Ökad hållfasthetsklass speciellt på de långa gängstavarna hade ökat hållfastheten vid böjning men enbart marginellt medan större diameter hade avsevärt ökat styvheten radiellt men också vikten. Böjstyrkan som ökat med högre hållfasthetsklass hade varit försumbar och styrkan från ökad diameter hade varit bra men fokus för drönaren låg på viktreducering.

5.3 Mätinstrumentet

Resultatet från konstruktionen av hållaren för mätutrustningen blev en 3D-printad låda. Den monteras med skruvar i samma hål som elektronikväggarna monteras med. Anledningen till att bara lådan och fästelementet på drönaren designades var för att framhäva mångsidigheten med mätutrustningen. Projektets mål var att utföra atmosfäriska mätningar och behållarens mångsidighet möjliggör för flertalet mätningar att utföras med enbart byta av mätutrustningen. Fästelementet fungerade som planerat och sitter ej i vägen för andra komponenter som fallskärmen eller GPS modulen. En mätutrustningshållare mer anpassad för just projektets mätutrustning hade möjliggjort en lättare och säkrare montering. Däremot borde inte mätningens kvalitet försämrats av behållarens mångsidighet. Avvägningen att prioritera mot mångsidighet och flera olika mätningar istället för perfekt anpassad för ett uppdrag anses därför som grundad. Mätutrustningens placeringen på toppen av drönaren minskar risken för mätdata att bli påverkad av luftflödet propellrarna skapar. Att utrustningen placerades direkt ovanför drönaren är icke-optimalt i avseende på minimera luftströmmarna från propellrarna. Placeringen är istället optimerad mot viktninskning och enkel montering. Mätbehållarens design är också designad så stora luftströmmar som avviker från nominella vädret minimeras. De uppnås med väggarna och mindre hål för att möjliggöra luftinsläpp.

5.4 Beräkningar

I metoden beskrivs all teori bakom modellen som simulerar oktocoptern förmåga att nå en viss höjd, hur mycket effekt som förbrukas och batterinivå över tid. Modellen

är förenklad för att vara genomförbar. Förenklingarnas påverkan på modellen är följande.

5.4.1 Konstant hastighet vid upp- och nedstigning

Modellen är förenklad på det sätt att upp- och nedstigning är konstant, vilket inte tar hänsyn till den acceleration som sker vid start och vändning. Den extra accelerationen kräver mer effekt och därmed så förbrukas batteriet snabbare just i det skedet. Accelerationen är dock under en väldigt kort tid och bör inte göra jättestor skillnad i den totala energiförbrukningen.

5.4.2 Konstant C_d -koefficient

I modellen används en konstant C_d -koefficient. I verkligheten kan denna koefficient ändras beroende på kroppens hastighet, turbulens i närheten och luftdensitet. Detta försämrar uppskattningen av luftmotståndet och därmed göra modellen mer oförutsägbar när det kommer till effektkrav för att stiga med en viss hastighet.

5.4.3 Verkningsgrader

Verkningsgrader är grovt uppskattade och utgår från tillverkarnas dokumentation. Verkningsgraderna är också konstanta i modellen som inte riktigt stämmer överens då friktionskrafter över i samband med högre rotationskrafter i motorerna. När ESC:n ökar i temperatur blir också verkningsgraden sämre på grund av att resistansen blir högre i ett varmare material.

5.4.4 Miljö och väder

I modellen antas helt perfekt väderförhållande. Detta stämmer inte överens med verkligheten då vindar och regn kan försvåra drönarens uppstigningshastighet. Energin det tar att reglera drönarens balans beror också på hur mycket det blåser och ifall turbulens uppstår i miljön drönaren befinner sig i. Temperaturen påverkar luftdensiteten enligt formel 3.6, i modellen antas en konstant temperatur på 15 °C. Detta temperatur kan variera beroende på årstid och tillfälligt väder, vilket gör modellen mindre överensstämmande mot verkligheten.

5.4.5 Dragkraften verkar proportionerligt med luftdensiteten

Dragkraften i modellen antas minska proportionerligt i samband med att luftdensiteten minskar. Detta är en förenkling som utgår att C_d -koefficienten och temperaturen är konstant, vilket den inte nödvändigtvis är som nämnt i tidigare del.

5.4.6 Sammanfattning av beräkningarna

Slutligen så kan beräkningarna användas främst som ett verktyg för att få en grov uppskattning vad drönaren klarar av. Dock så är detta en uppskattning och verkliga

tester kan se mycket annorlunda ut. En vidareutveckling hade varit att kombinera framtida verkliga tester för att iterera modellen och försöka anpassa verkningsgrader, strömningsförhållanden eller riktiga väderförhållanden för att göra modellen mer verklighetsanpassad.

Resultatet från beräkningarna visar att drönaren nådde en maximal höjd på 4500 meter. Höjden som mätningen måste utföras inom med hänvisning till *Planetary boundary layers* är mellan 1000-5000 meter. För att förlänga flygtiden och öka maxhöjden behöver drönaren främst reduceras i vikt, eller ha batterier med högre batterikapacitet.

En stor inverkan på effektbehovet berodde främst på upp- och nedstigningshastigheten. Genom att iterera olika hastigheter så framkom det att en uppstigningshastighet på 8 m/s och nedstigningshastighet på 5 m/s resulterade i en optimerad energiförbrukning utan att skapa styrproblem.

5.5 Vindtunneltest

Tabell 4.5 visade att vid noll thrust avlästes vågen till -238 N. Det betyder att vikten för drönaren med fyra batterier och monteringsanordning på 4 kg var cirka 24 kg. Den totala vikten för drönaren adderat mätutrustning (700 g), 6 batterier (plus 4 kg) och med alla datormoduler (500 g) samt subtraherat monteringsanordningen blir cirka 24 kg. Det är ett kilogram under kravet som sattes på drönaren från lagstiftningen på flygning av drönare. En lägre vikt kan åstadkommas genom mer optimerad design för viktreducering. De 3D-printade detaljerna är där mest viktreducering kan åstadkommas med både mindre design samt mindre infill. Det sänker dock hållfastheten för konstruktionen vilket inte ses som en värd prioritering.

Då motorerna startades och thrusten gradvis ökades, ökade också lyftkraften och vid 80% maximal thrust resulterande detta med en lyftkraft på 70 N.

Slutsats

Syftet för projektet var att konstruera en farkost för att utföra atmosfärsmätningar. Val av farkost och designfasen genomfördes på ett metodiskt och genomtänkt sätt med matriser. Det gick sedan vidare till konstruktion av den valda farkosten samt validering på systemet. Resultatet visade att en copterdrönare var bäst lämpad för mätningen. Copterdrönaren var bäst eftersom den presterade högt på kraven kostnad, återanvändning och styrning. Designmetoden visade att bygga på höjden med staplade batterier och sammanfogade elektronikkåringar med integrerade armfästningen var den bästa designen utifrån kraven. Koncept 26 presterade bra eftersom det var stabilt, modulärt med rimlig komplexitet relativt till prestanda. Efter design och konstruktionprocessen visade valideringen att systemet fungerade väl med alla elektroniska komponenter. Mätinstrumentet designades med fokus på mångsidighet, minskad effekt av luftströmmar och anpassning för framtida studier.

6.1 Återkoppling till frågeställningen

För att koppla resultatet och diskussionen till syftet ges svar på frågorna från frågeställningen.

Vilken farkost är bäst lämpad för projektet?

Den farkost som är bäst lämpad för projektet är en copterdrönare. Den presterade bra på punkterna mätningens kvalitet, återanvändbarhet och kostnad i konceptställningen för farkostens konceptval.

Hur bör farkosten designas?

Designen för konstruktionen fokuserar på att bygga på höjden istället för på bredden. Fokus på höjden innebar att lager behöver staplas på varandra vilket försämrar modulariteten men minskar storleken, kabellängden och ökar styvheten.

Hur ska mätutrustningen integreras med farkosten?

För att undvika att drönaren försämrar mätningen monterades mätinstrumentet på toppen av drönaren. Propellrarna genererar ett luftflöde främst under sig och det eliminerar placeringen där medan flödet över är fokuserat över själva propellrarna vilket möjliggör placering av mätutrustning på drönartoppen.

Behållaren för utrustning gjordes också standardiserad för att möjliggöra installation av olika mätinstrument. Det möjliggör då för olika mätningar att genomföras vilket breddar drönarens användningsområde.

6.2 Vidareutveckling

I syfte att förbättra och utvidga projektet finns ett antal delar som kan vidareutvecklas. De presenteras i listan nedan.

- **Stabilitetsproblem:** Då drönaren var färdig konstaterades ett stabilitetsproblem. Det härstammade främst från benens uppbyggnad och design men också höjden på drönaren. Förslag på nästa steg kan vara att laborera med olika ben för att stärka upp slutprodukten.
- **Mätutrustningsintegration:** I projektet konstruerades en drönare och en mätutrustningsenhet. Integrationen av delkomponenterna behöver vidareutvecklas för att i framtiden utföra mätningar och bidra till forskningen.
- **Materialval:** Materialvalsmetoden baserades på hållfasthetsberäkningar men också avvägningar mellan vikt och styvhet. För att vidareutveckla kan till exempel en annan typ av kolfiberplatta testa för att analysera om rätt avvägning var gjord.
- **Skydd mot yttre påverkan:** Som nämnt i diskussionen har skydd mot yttre påverkan tagits hänsyn till med design av drönaren. Den är dock inte helt skyddad och säker mot alla typer av väder vilket kan förbättras i en ny iteration av drönaren.
- **Testning och validering:** Konstruktionen av drönaren är slutförd och beräkningarna på den slutgiltiga konstruktionen blev förenklade som nämnt i beräkningsmodellen. En mer noggrann framtida testning av den färdiga drönaren kan bidra med mer förståelse hur väl drönaren presterar gentemot uppdraget samt ge lärdomar för framtida studier.

6.3 Framtida studier

Listan nedan presenterar punkter som kan utveckla projektet och bidra till fortsatt forskning.

- **Hantering och analys av mätutrustningens data:** Projektet fokuserade på design och konstruktion av oktocopterns mätutrustning. Mätutrustningen används för att utföra mätningar vilket genererar data. Mängden data behöver sedan analyseras för att ge ett resultat som kan bidra till kunskap om atmosfäriska förhållanden. Denna data behöver hanteras och analyseras, detta är något som behövs göras i en framtida studie.

- **Drönarens mångsidighet:** Drönarens aktuella uppgift är att utföra atmosfäriska mätningar men eftersom en drönare är mångsidig kan den användas inom flera olika områden. För att drönaren ska kunna användas i andra forskningsområden så kan den behöva modifieras, exempelvis andra mätinstrument eller sensorer. Denna möjlighet finns på oktocoptern till en viss mån.

Användning av AI och arbetsfördelning

Användning av AI

Under projektets gång har inget generativ AI-program använts för att generera data eller text. Däremot har AI-verktyg används som ett stöd under arbetet. Det vill säga; AI har använts som hjälpmedel för att ge pedagogiska förklaring av komplexa tekniska koncept, identifiera relevanta termiska termer eller synonymer, och förklara formatering av latex kod. Dessutom har AI använts, specifikt Scopus AI, för att söka källor. De övriga AI-programmen som utnyttjats är Gemini 3 och ChatGPT 5.5. Författarna tar ansvar för allt innehåll i rapporten samt källhanteringen.

Arbetsfördelning

Samtliga gruppmedlemmar har deltagit aktivt och bidragit lika mycket i planering, genomförande och analys av projektet. Arbetsfördelningen fördelades mellan rapport och konstruktion i omgångar.

Roller för projektet etablerades inledningsvis i planeringsrapporten. Ordförande, sekreterare och inlämningsansvarig är rollerna som identifierades. Rollerna roterades till alla gruppmedlemmar för att utveckla kompetens inom uppdragen varje roll erbjöd.

Litteraturförteckning

- [1] B. Weigel m. fl., "Ice particle imaging and classification in mixed-phase clouds using airborne instrumentation," *Atmospheric Measurement Techniques*, årg. 17, nr 8, s. 2335–2356, 2024. DOI: 10.5194/amt-17-2335-2024. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/17/2335/2024/>.
- [2] T. Wei, M. Wang, K. Wu, J. Yuan, H. Xia och S. Lolli, "Characterizing urban planetary boundary layer dynamics using 3-year Doppler wind lidar measurements in a western Yangtze River Delta city, China," *Atmospheric Measurement Techniques*, årg. 18, nr 8, s. 1841–1857, 2025. DOI: 10.5194/amt-18-1841-2025. URL: <https://amt.copernicus.org/articles/18/1841/2025/>.
- [3] D. Divakar och R. S. B L, "Simulation of The International Standard Atmosphere for Flight Reference," i *2022 International Interdisciplinary Humanitarian Conference for Sustainability (IIHC)*, Bengaluru, India: IEEE, 18 nov. 2022, s. 65–68, ISBN: 978-1-66545-687-6. DOI: 10.1109/IIHC55949.2022.10060718. hämtad 13 febr. 2026. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10060718/>.
- [4] J. Jaguemont, L. Boulon, P. Venet, Y. Dube och A. Sari, "Low temperature aging tests for lithium-ion batteries," i *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Buzios, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, juni 2015, s. 1284–1289, ISBN: 978-1-4673-7554-2. DOI: 10.1109/ISIE.2015.7281657. hämtad 13 febr. 2026. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7281657/>.
- [5] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 9. utg. McGraw-Hill, 2021, s. 504–513, ISBN: 978-1-260-57554-5.
- [6] H. A. Kutty, P. Rajendran och A. Mule, "Performance Analysis of Small Scale UAV Propeller with Slotted Design," s. 695–700, 2015. DOI: 10.1109/I2CT.2017.8226219. hämtad 13 febr. 2026. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8226219>.
- [7] Y. Zhu m. fl., "CFD simulation and measurement of the downwash airflow of a quadrotor plant protection UAV during operation," *Computers and Electronics*

- in Agriculture*, årg. 201, s. 107286, 2022, ISSN: 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107286>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922005981>.
- [8] N. Krishnan, M. TP, A. N. Geethanjali, D. Kumar, N. Seenu och G. Balaji, "Design and Development of Drone," i *2022 IEEE Bombay Section Signature Conference (IBSSC)*, 2022, s. 1–6. DOI: 10.1109/IBSSC56953.2022.10037366.
 - [9] D. Perikleous, K. Margariti, P. Velanas, C. S. Blazquez och D. Gonzalez-Aguilera, "Aerial Drones for Geophysical Prospection in Mining: A Review," *Drones*, årg. 9, nr 5, 2025, ISSN: 2504-446X. DOI: 10.3390/drones9050383. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/5/383>.
 - [10] K. Sasaki, M. Inoue, T. Shimura och M. Iguchi, "In situ, rotor-based drone measurement of wind vector and aerosol concentration in volcanic areas," *Atmosphere*, årg. 12, nr 3, s. 376, 2021. DOI: 10.3390/atmos12030376. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/3/376>.
 - [11] L. Barbieri m.fl., "Intercomparison of Small Unmanned Aircraft System (sUAS) Measurements for Atmospheric Science during the LAPSE-RATE Campaign," *Sensors*, årg. 19, nr 9, s. 2179, 2019. DOI: 10.3390/s19092179. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2179>.
 - [12] C. O. de Burgh-Day och T. Leeuwenburg, "Machine learning for numerical weather and climate modelling: a review," *Geoscientific Model Development*, årg. 16, nr 22, s. 6433–6477, 2023. DOI: 10.5194/gmd-16-6433-2023. URL: <https://gmd.copernicus.org/articles/16/6433/2023/>.
 - [13] NASA Glenn reaserch center. "Rocket Propulsion," hämtad 13 maj 2026. URL: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/rocket.html>.
 - [14] Wikipedia. "Cold gas thruster," hämtad 13 maj 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_gas_thruster.
 - [15] Rymdstyrelsen, *Ballonger ovanför våra huvuden*, Rymdstyrelsen Bloggen, hämtad 4 maj 2026, febr. 2023. URL: <https://www.rymdstyrelsen.se/upptack-rymden/bloggen/2023/02/ballonger-ovanfor-vara-huvuden/>.
 - [16] Vaisala, "Radiosonde RS41 GNSS-based Height and Pressure," Vaisala, Technical Paper B212981EN-A, 2025, hämtad 4 maj 2026. URL: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Radiosonde-RS41-GNSS-based-height-and-pressure-TechnicalPaper-B212981EN.pdf>.
 - [17] World Meteorological Organization, *Guide to Instruments and Methods of Observation* (WMO-No. 8), 2021. utg. Geneva, Switzerland: WMO, 2021, ISBN: 978-92-63-10008-5. URL: <https://library.wmo.int/viewer/68661/>.

-
- [18] Transportstyrelsen. "Drönare," hämtad 24 febr. 2026. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/luftfartyg-och-luftvardighet/dronare/>.
- [19] J. Muñoz. "OU Research Team Testing Drone Technology to Improve Weather Forecasting," University of Oklahoma, hämtad 25 mars 2026. URL: <https://www.ou.edu/news/articles/2026/january/ou-team-testing-drone-technology-to-improve-weather-forecasting>.
- [20] M. S. Shah, J. B. Joshi, A. S. Kalsi, C. Prasad och D. S. Shukla, "Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation," *Chemical Engineering Science*, årg. 71, s. 300–309, 2012, ISSN: 0009-2509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.11.022>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250911008219>.
- [21] J. F. Dooley m.fl., "A New Aerial Approach for Quantifying and Attributing Methane Emissions: implementation and Validation," *Atmospheric Measurement Techniques*, årg. 17, s. 5091–5111, 2024. DOI: 10.5194/amt-17-5091-2024. URL: <https://doaj.org/article/9c260754af194f6a91f0d0f2a74d53e7>.
- [22] Transportstyrelsen. "Raketer," hämtad 25 mars 2026. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/flygplatser-flygtrafiktjanst-och-luftrum/luftrum/raketer-ballonger-och-svavande-lyktor/raketer/>.
- [23] European Union Aviation Safety Agency (EASA), *Commission Regulation (EU) No 748/2012: Initial Airworthiness (Part 21)*, Consolidated version with amendments up to 2023, European Union, Brussels, Belgium, 2012. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012R0748>.
- [24] Transportstyrelsen, *Luftfartsstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om flygning (LFS 2007:44)*, Kap. 4, 13 §: Fällning av föremål eller sprayning, 2007. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/regler/ts-foreskrifter/luftfart/lfs-serie-ops/>.
- [25] European Union Aviation Safety Agency (EASA), *Commission Implementing Regulation (EU) No 923/2012 (Standardised European Rules of the Air)*, Section 3: General Rules and Collision Avoidance, SERA.3101, 2012. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32012R0923>.
- [26] Transportstyrelsen. "Obemannade friballonger." Tillgänglig: 2026-03-03. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/flygplatser-flygtrafiktjanst-och-luftrum/luftrum/raketer-ballonger-och-svavande-lyktor/obemannade-friballonger/>.

- [27] Europeiska unionen, EUR-Lex. ”Kommissionens genomförandeförordning (EU) nr 923/2012 – Tillägg II (Annex II),” hämtad 3 mars 2026. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2012/923/oj/swe.
- [28] Transportstyrelsen. ”Flygoperativa tillstånd för bruksflyg, luftballong och segelflyg,” hämtad 17 mars 2026. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/om-oss/avgifter/avgifter-inom-luftfart/flygoperativ-verksamhet/flygoperativa-tillstand-for-bruksflyg-luftballong-och-segelflyg/>.
- [29] Transportstyrelsen. ”Tillstånd för drönare – Kategori specifik,” hämtad 3 mars 2026. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/luftfartyg-och-luftvardighet/dronare/tillstand-for-dronare/kategori-specifik/>.
- [30] Transportstyrelsen. ”Tillstånd för drönare – Kategori certifierad,” hämtad 3 mars 2026. URL: <https://www.transportstyrelsen.se/sv/luftfart/luftfartyg-och-luftvardighet/dronare/tillstand-for-dronare/kategori-certifierad/>.
- [31] S.-H. Lee, D.-H. Kim och K.-H. Han, ”A study on control of drone swarms using depth camera,” *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, årg. 67, nr 8, s. 1080–1088, 2018. DOI: 10.5370/KIEE.2018.67.8.1080. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053003524&doi=10.5370%2fKIEE.2018.67.8.1080&partnerID=40&md5=665e5ec5aeec20dd2b92bc7a90090069>.
- [32] PX4 Autopilot Development Team. ”PX4 Reference Flight Controller Design,” PX4 User Guide, hämtad 11 maj 2026. URL: https://docs.px4.io/main/en/hardware/reference_design.
- [33] G. Küçük, I. Güney och D. Ponomarev, ”Instruction scheduling in microprocessors,” *Studies in Computational Intelligence*, årg. 505, s. 39–60, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-39304-4_2. URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84880438150&doi=10.1007%2f978-3-642-39304-4_2&partnerID=40&md5=d7d6bc2da1b73dcca04cc3bd32175cd0.
- [34] H. González, C. Arizmendi, C. Valencia, D. Valle, B. Bernal och A. Vera, ”Modelling and control system design for uav tri-rotor,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, årg. 685 LNEE, s. 84–93, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-53021-1_9. URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089717390&doi=10.1007%2f978-3-030-53021-1_9&partnerID=40&md5=c408a507d99f8057b376a1c4fa4d8a73.
- [35] PX4 Autopilot Development Team. ”Multicopter Neural Network Control,” PX4 User Guide, hämtad 11 maj 2026. URL: https://docs.px4.io/main/en/neural_networks/mc_neural_network_control.

- [36] J. Monsen, "Fundamentals of PID Control," *InTech*, årg. 70, nr 3, s. 12–22, 2023. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85183190683&partnerID=40&md5=2e1e6b290a3f6aced9e126e25f9bdb5d>.
- [37] Z. Li, X. Ma, Z. Xu, Y. Wang och Y. Li, "Chattering free sliding adaptive attitude control for quadrotor," i *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, 2016, s. 707–712. DOI: 10.1109/CGNCC.2016.7828872.
- [38] P. Leśniewski, "Sliding mode control with time-varying sliding hyperplanes: A survey," i *2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2017, s. 81–86. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2017.7970375.
- [39] S. Mouslim, S. Jenkal, B. Imodane, M. Ajaamoum och M. Oubella, "Simulation and analyses of Buck converter using SMC with two control techniques," i *2022 International Conference on Microelectronics (ICM)*, 2022, s. 185–188. DOI: 10.1109/ICM56065.2022.10005344.
- [40] B. A. Malyshev, P. A. Troshin, S. Y. Zanegin och D. M. Shishov, "Research of Electronic Speed Controllers Designs and Functional for Unmanned Aerial Vehicles," 2024, s. 1150–1155. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10615216. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85201954412&doi=10.1109%2fEDM61683.2024.10615216&partnerID=40&md5=9de170e0265c84b36e80b29a7529bdbd>.
- [41] Á. Kis och I.-C. Gros, "Implementation of an Electronic Speed Controller for BLDC Motor Using AVR Microcontroller," i *2025 International Conference on Future Energy Solutions (FES)*, 2025, s. 1–5. DOI: 10.1109/FES65767.2025.11341821.
- [42] C. P. Reddy, M. Jayakumar, K. Raj, K. S och S. S. Pandey, "Development of BLDC Motor Controller using Sensor-Based Method," i *2024 Second International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE)*, 2024, s. 1–6. DOI: 10.1109/ic-ETITE58242.2024.10493279.
- [43] T. G och N. J, "Aerodynamic Analysis of UAV Propeller with Various Angle of Attack Using Computational Fluid Dynamics," i *2022 IEEE Silchar Subsection Conference (SILCON)*, 2022, s. 1–7. DOI: 10.1109/SILCON55242.2022.10028876.
- [44] M. D. Arifin och F. M. Felayati, "Numerical Study of Kaplan Series Propeller using CFD: Effect of Angle of Attack and Number of Blade Variations," *CFD Letters*, årg. 15, nr 8, s. 200–213, 2023. DOI: 10.37934/cfdl.15.8.200213. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85163864082&doi=10.37934%2fcfdl.15.8.200213&partnerID=40&md5=5ddf77f3a12a99de7ef7f292ad16818f>.

- [45] J. M. Bonde, A. Mallalieu, M. Panarotto, O. Isaksson, L. Almfelt och J. Malmqvist, "Morpheus: The Development and Evaluation of a Software Tool for Morphological Matrices," i *Proceedings of NordDesign 2022: How Product and Manufacturing Design Enable Sustainable Companies and Societies*, Copenhagen, Denmark: The Design Society, 2022. DOI: 10.35199/NORDDDESIGN2022.38. URL: <https://doi.org/10.35199/NORDDDESIGN2022.38>.
- [46] J. M. Bonde, *MORPHEUS*, 2026. hämtad 9 maj 2026. URL: https://morpheus-matrix.netlify.app/?fbclid=IwY2xjawRuZcdleHRuA2FlbQIxMQBzcnRjBmFwcF9pZAEwAAEeE9M83PQTAn0dtuyR_EbGBZFHYYQYmf0V1np10t1E5dmlCYUwM17fop-UuaQ_aem_OwMx-KqDR06KTJLZzL1iLQ.
- [47] H. F. Cervone, "Applied digital library project management: Using Pugh matrix analysis in complex decision-making situations," *OCLC Systems Services: International digital library perspectives*, årg. 25, nr 4, s. 228–240, 2009. DOI: 10.1108/10650750911001815. URL: <https://www.emerald.com/dlp/article-pdf/25/4/228/2044280/10650750911001815.pdf>.
- [48] M. L. Minus och S. Kumar, "The Processing, Properties, and Structure of Carbon Fibers," *JOM*, årg. 57, nr 2, s. 52–58, 2005. DOI: 10.1007/s11837-005-0217-8.
- [49] Easy Composites Ltd. "Foam Cored Carbon Fibre Panel – Technical Datasheet," Easy Composites Ltd, hämtad 8 maj 2026. URL: <https://media.easycocomposites.eu/datasheets/EC-TDS-Foam-Cored-Carbon-Fibre-Panel.pdf>.
- [50] Easy Composites Ltd. "Double Sided High Strength Carbon Fibre Sheet – Technical Datasheet," Easy Composites Ltd, hämtad 8 maj 2026. URL: <https://media.easycocomposites.eu/datasheets/EC-TDS-Double-Sided-High-Strength-Carbon-Sheet.pdf>.
- [51] Wikipedia contributors. "Plastic." Senast redigerad 8 Maj 2026, hämtad 12 maj 2026. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic>.
- [52] Wikipedia contributors. "3D printing." Senast redigerad 1 Maj 2026, hämtad 12 maj 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing.
- [53] Wikipedia contributors. "Polylactic acid." Senast redigerad 23 March 2026, hämtad 12 maj 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid.
- [54] Wikipedia contributors. "Polyethylene terephthalate." Senast redigerad 8 Maj 2026, hämtad 12 maj 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate.
- [55] matweb. "Overview of materials for PETG Copolyester," hämtad 12 maj 2026. URL: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0.

- [56] B. Theys, G. Dimitriadis och W. Hendrick, "Experimental and Computational Study of the Performance of a Co-Axial Rotor System," *Aerospace*, årg. 3, nr 4, s. 32, 2016. DOI: 10.3390/aerospace3040032.
- [57] T-Motor. "MN505-S KV320 Motor Navigator Type." hämtad: 2026-05-12. URL: <https://store.tmotor.com/product/mn505-s-kv320-motor-navigator-type.html>.
- [58] Wikipedia contributors. "Newtons rörelselagar." Senast redigerad 26 november 2024, hämtad 10 maj 2026. URL: https://sv.wikipedia.org/wiki/Newton_s_r%C3%B6relselagar.
- [59] Sailing Sally. "Elsystem, del 1 – Ohms lag," hämtad 10 maj 2026. URL: <http://svsally.com/2022/03/01/elsystem-del-1-ohms-lag/>.
- [60] Wikipedia contributors. "Barometrisk höjdformeln." Senast redigerad 28 december 2022, hämtad 10 maj 2026. URL: https://sv.wikipedia.org/wiki/Barometrisk_h%C3%B6jdformeln.
- [61] Wikipedia contributors. "Luftmotstånd." Senast redigerad 26 december 2025, hämtad 10 maj 2026. URL: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Luftmotst%C3%A5nd>.
- [62] Wikipedia contributors. "Momentum theory." Senast redigerad 20 April 2026, hämtad 10 maj 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Momentum_theory.
- [63] Wikipedia contributors. "Potentiell energi." Senast redigerad 1 juli 2024, hämtad 10 maj 2026. URL: https://sv.wikipedia.org/wiki/Potentiell_energi.
- [64] D. P. Pi, *Drone Systems Architecture Lecture*, PowerPoint-presentation, Chalmers Revere Lab, Chalmers Revere Lab, Göteborg, 2026.
- [65] Makelab. "Choosing Materials for 3D Printing: PETG vs PLA," Makelab, hämtad 22 maj 2024. URL: <https://www.makelab.com/blog/choosing-materials-for-3d-printing-petg-vs-pla>.
- [66] B. Budziński och K. Federowicz, "Evaluation of PLA and PETG as 3D-Printed Reference Materials for Compressive Strength Testing," *Materials*, årg. 18, nr 16, s. 3794, 2025. DOI: 10.3390/ma18163794. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18163794>.
- [67] AirShaper. "AirShaper," hämtad 11 maj 2026. URL: <https://airshaper.com>.

- [68] Wikipedia contributors. "Pressure coefficient." Senast redigerad 7 January 2026, hämtad 12 maj 2026. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_coefficient.

A Kesselringmatris för val av luftsond

Kriterier	# Vikt	Ideal		Värdetallong		Flygplan		Dronare (Copter)		Dronare (Glider)		Tryskivskott		Fästare/bärare		Flyande bärare	
		Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng	Värdeskala	Poäng	Kolonn 5	Kolonn 6
Höjden		0,20	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	0,2	5	1	5	1
Männigens kvalitet		0,20	5	1	3	0,6	3	0,6	5	1	4	0,8	3	0,6	3	0,6	3
Konstruktionskostnad		0,05	5	0,25	3	0,15	4	0,2	2	0,1	2	0,1	4	0,2	3	0,15	2
Driftkostnad		0,10	5	0,5	3	0,3	3	0,3	4	0,4	4	0,4	3	0,3	3	0,3	3
Lager		0,05	5	0,25	4	0,2	5	0,25	4	0,2	4	0,2	2	0,1	2	0,1	2
Designkomplexitet		0,12	5	0,6	4	0,48	5	0,6	3	0,36	3	0,36	4	0,48	2	0,24	1
Synbar		0,10	5	0,5	0	0	4	0,4	5	0,5	5	0,5	1	0,1	2	0,2	2
Ärskänslighet		0,13	5	0,65	3	0,39	5	0,65	5	0,65	4	0,52	2	0,26	3	0,39	3
Kontamination		0,05	5	0,25	3	0,15	3	0,15	5	0,25	5	0,25	4	0,2	2	0,1	2
Totalt Viktat värde		1,00															
Total / Ideal	-				3,27			4,46		4,13			2,44				2,91
Rangordning					4		2	1		3		7			5		6

Figur A.1: Kessleringmatrisen ovan användes för att ranka farkosttyperna för att utföra ett metodiskt och objektivt farkostval

B Konceptkatalog

MORPHEUS - Concept catalogue Unnamed Morphological Matrix

Name	Combination	Description	Sketch	Weight
Solution1	Blocken Liggande Elektroniskt bräde stående Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution2	Blocken Liggande Elektroniskt bräde stående Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution3	Blocken Liggande Sladdlösning Flertal lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution4	Blocken Liggande Sladdlösning Flertal lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution5	Blocken Liggande Sladdlösning Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution6	Blocken Liggande Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution7	Blocken Liggande Elektroniskt bräde liggande Flertal lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution8	Blocken Liggande Elektroniskt bräde liggande Flertal lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution9	Blocken Liggande Elektroniskt bräde liggande Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution10	Blocken Liggande Elektroniskt bräde liggande Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution11	Blocken Lutande Elektroniskt bräde stående Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution12	Blocken Lutande Elektroniskt bräde stående Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution13	Blocken Lutande Sladdlösning Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution14	Blocken Lutande Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution15	Blocken Lutande Elektroniskt bräde liggande Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution16	Blocken Lutande Elektroniskt bräde liggande Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution17	Blocken Stående Elektroniskt bräde stående Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution18	Blocken Stående Elektroniskt bräde stående			Unset

Bilaga B

Solution18	Ett lager Centrerad	Kolfiber	Upp	Ovan			
Solution19	Blocken Ett lager Centrerad	Stående	Sladdlösning	Plast	Upp	Ovan	Unset
Solution20	Blocken Ett lager Centrerad	Stående	Sladdlösning	Kolfiber	Upp	Ovan	Unset
Solution21	Blocken Elektroniskt bräde liggande Ett lager Centrerad	Stående		Plast	Upp	Ovan	Unset
Solution22	Blocken Elektroniskt bräde liggande Ett lager Centrerad	Stående		Kolfiber	Upp	Ovan	Unset
Solution23	Uppdelat kors Elektroniskt bräde stående Ett lager Centrerad	Liggande		Plast	Upp	Ovan	Unset
Solution24	Uppdelat kors Elektroniskt bräde stående Ett lager Centrerad	Liggande		Kolfiber	Upp	Ovan	Unset
Solution25	Uppdelat kors Sladdlösning Plast	Liggande	Flerfart lager	Upp	Ovan	Centrerad	Unset
Solution26	Uppdelat kors Sladdlösning Kolfiber	Liggande	Flerfart lager	Upp	Ovan	Centrerad	Unset
Solution27	Uppdelat kors Sladdlösning Upp	Liggande	Ett lager	Plast	Ovan	Centrerad	Unset
Solution28	Uppdelat kors Sladdlösning Kolfiber	Liggande	Ett lager	Upp	Ovan	Centrerad	Unset
Solution29	Uppdelat kors Elektroniskt bräde liggande Flerfart lager Centrerad	Liggande		Plast	Upp	Ovan	Unset
Solution30	Uppdelat kors Elektroniskt bräde liggande Flerfart lager Ovan	Liggande		Kolfiber	Upp	Ovan	Unset
Solution31	Uppdelat kors Elektroniskt bräde liggande Ett lager Centrerad	Liggande		Plast	Upp	Ovan	Unset
Solution32	Uppdelat kors Elektroniskt bräde liggande Ett lager Centrerad	Liggande		Kolfiber	Upp	Ovan	Unset
Solution33	Uppdelat kors Elektroniskt bräde stående Ett lager Centrerad	Lutande		Plast	Upp	Ovan	Unset
Solution34	Uppdelat kors Elektroniskt bräde stående Ett lager Centrerad	Lutande		Kolfiber	Upp	Ovan	Unset
Solution35	Uppdelat kors Sladdlösning Upp	Lutande	Ett lager	Plast	Ovan	Centrerad	Unset
Solution36	Uppdelat kors Sladdlösning Kolfiber	Lutande	Ett lager	Upp	Ovan	Centrerad	Unset
Solution37	Uppdelat kors Elektroniskt bräde liggande	Lutande					Unset

	Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			
Solution38	Uppdelat kors Lutande Elektroniskt bråde liggande Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution39	Uppdelat kors Stående Elektroniskt bråde stående Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution40	Uppdelat kors Stående Elektroniskt bråde stående Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution41	Uppdelat kors Stående Sladdlösning Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution42	Uppdelat kors Stående Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution43	Uppdelat kors Stående Elektroniskt bråde liggande Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution44	Uppdelat kors Stående Elektroniskt bråde liggande Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution45	Ramen Liggande Elektroniskt bråde stående Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution46	Ramen Liggande Elektroniskt bråde stående Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution47	Ramen Liggande Sladdlösning Flertal lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution48	Ramen Liggande Sladdlösning Flertal lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution49	Ramen Liggande Sladdlösning Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution50	Ramen Liggande Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution51	Ramen Liggande Elektroniskt bråde liggande Flertal lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution52	Ramen Liggande Elektroniskt bråde liggande Flertal lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution53	Ramen Liggande Elektroniskt bråde liggande Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution54	Ramen Liggande Elektroniskt bråde liggande Ett lager Kolfiber Upp Ovan Centrerad			Unset
Solution55	Ramen Lutande Elektroniskt bråde stående Ett lager Plast Upp Ovan Centrerad			Unset

Bilaga B

Solution56	Ramen Lutande Elektroniskt bråde stående Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			unset
Solution57	Ramen Lutande Sladdlösning Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution58	Ramen Lutande Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution59	Ramen Lutande Elektroniskt bråde liggande Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution60	Ramen Lutande Elektroniskt bråde liggande Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution61	Ramen Stående Elektroniskt bråde stående Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution62	Ramen Stående Elektroniskt bråde stående Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution63	Ramen Stående Sladdlösning Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution64	Ramen Stående Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution65	Ramen Stående Elektroniskt bråde liggande Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution66	Ramen Stående Elektroniskt bråde liggande Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution67	Kors Liggande Elektroniskt bråde stående Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution68	Kors Liggande Elektroniskt bråde stående Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution69	Kors Liggande Sladdlösning Flertal lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution70	Kors Liggande Sladdlösning Flertal lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution71	Kors Liggande Sladdlösning Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution72	Kors Liggande Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution73	Kors Liggande Elektroniskt bråde liggande Flertal lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution74	Kors Liggande Elektroniskt bråde liggande Flertal lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
	Kors Liggande			Unset

Solution75	Kors Liggande Elektroniskt bräde liggande Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution76	Kors Liggande Elektroniskt bräde liggande Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution77	Kors Lutande Elektroniskt bräde stående Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution78	Kors Lutande Elektroniskt bräde stående Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution79	Kors Lutande Sladdlösning Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution80	Kors Lutande Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution81	Kors Lutande Elektroniskt bräde liggande Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution82	Kors Lutande Elektroniskt bräde liggande Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution83	Kors Stående Elektroniskt bräde stående Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution84	Kors Stående Elektroniskt bräde stående Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution85	Kors Stående Sladdlösning Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution86	Kors Stående Sladdlösning Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset
Solution87	Kors Stående Elektroniskt bräde liggande Ett lager Plast Upp Övan Centrerad			Unset
Solution88	Kors Stående Elektroniskt bräde liggande Ett lager Kolfiber Upp Övan Centrerad			Unset

Figur B.1: Resultatet från morfologiska matrisen är koncept redo för sällning. Samtliga koncept presenteras i konceptkatalogen

C Elimineringsmatris för konceptval

Koncept	Vikt	Storlek	Temperatur	Tid	Styvhet	Resultat
1	+	+	+	+	-	Eliminerad
2	+	+	+	+	-	Eliminerad
3	+	+	+	+	-	Eliminerad
4	+	+	+	+	-	Eliminerad
5	+	+	+	+	-	Eliminerad
6	+	+	+	+	-	Eliminerad
7	+	+	+	+	-	Eliminerad
8	+	+	+	+	-	Eliminerad
9	+	+	+	+	-	Eliminerad
10	+	+	+	+	-	Eliminerad
11	+	+	+	+	-	Eliminerad
12	+	+	+	+	-	Eliminerad
13	+	+	+	+	-	Eliminerad
14	+	+	+	+	-	Eliminerad
15	+	+	+	+	-	Eliminerad
16	+	+	+	+	-	Eliminerad
17	+	+	+	+	-	Eliminerad
18	+	+	+	+	-	Eliminerad
19	+	+	+	+	-	Eliminerad
20	+	+	+	+	-	Eliminerad
21	+	+	+	+	-	Eliminerad
22	+	+	+	+	-	Eliminerad
23	+	+	+	+	+	Godkänd
24	+	+	+	+	+	Godkänd
25	+	+	+	+	+	Godkänd
26	+	+	+	+	+	Godkänd
27	+	+	+	+	+	Godkänd
28	+	+	+	+	+	Godkänd
29	+	+	+	+	+	Godkänd
30	+	+	+	+	+	Godkänd
31	+	+	+	+	+	Godkänd
32	+	+	+	+	+	Godkänd
33	+	+	+	-	-	Eliminerad
34	+	+	+	-	-	Eliminerad
35	+	+	+	-	-	Eliminerad
36	+	+	+	-	-	Eliminerad
37	+	+	+	-	-	Eliminerad
38	+	+	+	-	-	Eliminerad
39	+	+	+	+	+	Godkänd
40	+	+	+	+	+	Godkänd
41	+	+	+	+	+	Godkänd
42	+	+	+	+	+	Godkänd
43	+	+	+	+	+	Godkänd
44	+	+	+	+	+	Godkänd
45	+	+	+	+	+	Godkänd

Koncept	Vikt	Storlek	Temperatur	Tid	Styvhet	Resultat
46	+	+	+	+	+	Godkänd
47	+	+	+	+	+	Godkänd
48	+	+	+	+	+	Godkänd
49	+	+	+	+	+	Godkänd
50	+	+	+	+	+	Godkänd
51	+	+	+	+	+	Godkänd
52	+	+	+	+	+	Godkänd
53	+	+	+	+	+	Godkänd
54	+	+	+	+	+	Godkänd
55	+	+	+	-	-	Eliminerad
56	+	+	+	-	-	Eliminerad
57	+	+	+	-	-	Eliminerad
58	+	+	+	-	-	Eliminerad
59	+	+	+	-	-	Eliminerad
60	+	+	+	-	-	Eliminerad
61	+	+	+	+	+	Godkänd
62	+	+	+	+	+	Godkänd
63	+	+	+	+	+	Godkänd
64	+	+	+	+	+	Godkänd
65	+	+	+	+	+	Godkänd
66	+	+	+	+	+	Godkänd
67	+	+	+	+	+	Godkänd
68	+	+	+	+	+	Godkänd
69	+	+	+	+	+	Godkänd
70	+	+	+	+	+	Godkänd
71	+	+	+	+	+	Godkänd
72	+	+	+	+	+	Godkänd
73	+	+	+	+	+	Godkänd
74	+	+	+	+	+	Godkänd
75	+	+	+	+	+	Godkänd
76	+	+	+	+	+	Godkänd
77	+	+	+	-	-	Eliminerad
78	+	+	+	-	-	Eliminerad
79	+	+	+	-	-	Eliminerad
80	+	+	+	-	-	Eliminerad
81	+	+	+	-	-	Eliminerad
82	+	+	+	-	-	Eliminerad
83	+	+	+	+	+	Godkänd
84	+	+	+	+	+	Godkänd
85	+	+	+	+	+	Godkänd
86	+	+	+	+	+	Godkänd
87	+	+	+	+	+	Godkänd
88	+	+	+	+	+	Godkänd

Figur C.1: Elimineringssmatris för konceptval

D Pugh-matris

Kriterie	26	28	30	32	40	42	44	48	50	52	54	62	64	66	70	72	74	76	84	86	88
Tid/Komplexivitet	Ref	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1
Storlek	Ref	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1
Vikt PDB	Ref	0	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	-1	-1	0	-1
Modulär	Ref	0	-1	-1	-1	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	-1
Kabellängd	Ref	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
Summering	Ref	0	-2	-1	-1	1	-1	0	0	-2	-1	-1	1	-1	-1	-1	0	-2	-1	1	-1

Figur D.1: Pugh-matris för konceptgenneringen för copterdrönaren

E Kesselringmatris

44	Kriterier	# Vikt	Ideal		Koncept 26		Koncept 28		Koncept 42		Koncept 48		Koncept 50		Koncept 64		Koncept 70		Koncept 72		Koncept 86	
			Värde	Polng	Värde	Polng	Värde	Polng	Värde	Polng	Värde	Polng	Värde	Polng	Värde	Polng	Värde	Polng	Värde	Polng	Värde	Polng
	Tid / Komplex	0,25	5	1,25	3	0,75	3	0,75	3	0,75	3	0,75	3	0,75	3	0,75	3	0,75	4	1	2	0,50
	Storlek	0,20	5	1,00	4	0,80	1	0,20	4	0,80	4	0,80	1	0,20	5	1,00	4	0,80	2	0,4	4	0,80
	Hållfast	0,30	5	1,50	5	1,50	5	1,50	5	1,50	1	0,30	1	0,30	1	0,30	4	1,20	4	1,2	4	1,20
	Modulär	0,20	5	1,00	4	0,80	4	0,80	3	0,60	2	0,40	2	0,40	5	1,00	4	0,80	4	0,8	2	0,40
	Kabellängd	0,05	5	0,25	4	0,20	3	0,15	4	0,20	3	0,15	3	0,15	4	0,20	4	0,20	3	0,15	4	0,20
Total / Ideal				5,00		4,05		3,40		3,85		2,40		1,80		3,25		3,75		3,55		3,10

Figur E.1: Kesselringmatrisen för konceptvalet

F Förklaringar till dellösningar i den morfologiska matrisen

- **Infästning armar**
 - Kors - ett kors med fyra ingångshål placerat i mitten av kolfiberskivan.
 - Ramen - en ram som följer ytterkanten av kolfiberskivan.
 - Uppdelat kors - samma design som korset med ett tillägg på fyra block i respektive hörn av kolfiberskivan.
 - Blocken - fyra block med cylindriskt ingångshål placerade i respektive hörn av kolfiberskivan.
- **Batterilutning**
 - Liggande - batteriernas långsida är orienterade parallellt med kolfiberskivan.
 - Stående - batteriernas kortsida är orienterade parallellt med kolfiberskivan.
 - Lutande - batterierna är orienterade med en 45 graders lutning relativt kolfiberskivan.
- **Elektronik**
 - Elektroniskt bräde liggande - större elektroniskt bräde med syftet att fördela spänningen jämnt från samtliga batterier in till kraftmodulen där brädets långsida är orienterad parallellt med kolfiberskivan.
 - Sladdlösning - Ett mindre kretskort som fyller samma funktion som brädet med skillnaden att kretskortet tillåter mer modularitet.
 - Elektroniskt bräde stående - identiskt med "elektroniskt bräde liggande" med skillnaden att brädets kortsida är orienterad parallellt med kolfiberskivan.
- **Batteriplacering**
 - Ett lager - Batterierna placeras i ett enda lager vilket leder till större dimensioner i bredd och mindre dimensioner i höjd.
 - Flertal lager - Batterierna placeras i flertalet lager vilket minskar dimensionerna i bredd och ökar dimensionerna i höjd.
- **Väggar**
 - Kolfiber - väggar tillverkade i kolfiber med syfte att skydda elektroniska komponenter från vatten.
 - Plast - väggar tillverkade i plast med syfte att skydda elektroniska komponenter från vatten.
 - Tyg - väggar tillverkade i tyg med syfte att skydda elektroniska komponenter från vatten.
 - Inga väggar - alternativ om komponenterna är tillräckligt vattenresistenta utan skyddande väggar.
- **Armplacering**
 - Upp - armplacering ovanför tyngdpunkten.
 - Ner - armplacering under tyngdpunkten.
 - Mitten - armplacering vid tyngdpunkten.
- **Mätutrustning**
 - Ovan - placering av mätutrustning ovanför armarna.

- Sidan - placering av mätutrustning mellan armarna.
- **Fallskärm**
 - Centrerad på - fallskärm placerad centralt på översta kolfiberskivan.
 - Sidan - fallskärm placerad vid någon av sidorna på översta kolfiberskivan.