



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2021 30 stp**

Fakultet for realfag og teknologi

# **Dolphin Sky: Videreutvikling av testrigg og eksperimentoppsett for fullskala propell- og thrusterkonfigurasjoner**

Dolphin Sky: Further development of test rig and  
experimental layout for full scale propeller and  
thruster configurations

**Sander Sælthun Haugsbø**

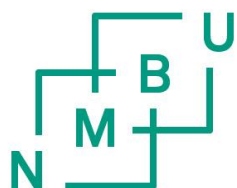
Maskin, prosess- og produktutvikling

# Dolphin Sky:

Videreutvikling av testtrigg og eksperimentoppsett for  
fullskala propell- og thrusterkonfigurasjoner

av

Sander Sælthun Haugsbø



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Mastergradsoppgave – Maskin, prosess- og produktutvikling

Fakultet for realfag og teknologi, NMBU

Våren 2021



## Forord

Dette prosjektarbeidet avrunder mine fem år som student på masterprogrammet maskin, prosess- og produktutvikling ved Fakultetet for realfag og teknologi, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Masterarbeidet er gjennomført våren 2021, og har en arbeidsramme på 30 studiepoeng.

Årene mine ved Fakultet for realfag og teknologi har latt meg dyrke og utvikle min interesse for tekniske og mekaniske innretninger. Tidligere har jeg drevet med bygging og flyving av droner på hobbybasis, og jeg har en sterk interesse for kjøretøy generelt. Sammen med NMBU har jeg et ønske om å kunne bidra i samfunnet med bærekraftige og miljøorienterte løsninger for fremtiden. Dronekonseptet Dolphin Sky vekket raskt min interesse da jeg hørte om det, og jeg er takknemlig for å få være en del av dette nyskapende og fremtidsrettede prosjektet.

Dette masterarbeidet tar for seg et produktutviklingsoppdrag med bakgrunn i Dolphin Sky i samarbeid med førsteamanuensis Jan Kåre Bøe. Arbeidet er en respons på prosjektets nåværende stadium knyttet til fremdrift, og søker å produsere en løsning for testing av aktuelle motorer og propeller til dronekonseptet.

Jeg ønsker å takke førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for jevnlig og utmerket veiledning gjennom hele arbeidsforløpet. I tillegg vil jeg rette en takk til senioringeniørene Egil Stemsrud og Henrik Folke Holmberg for faglige innspill, og til overingeniør Øyvind Hansen ved Realteks hovedverksted.

Ås, 31. mai 2021

Sander Sælthun Haugsbø



## Sammendrag

I nyere tid har urbaniseringen på verdensbasis økt betraktelig, og prognoser viser at denne trenden kommer til å fortsette. Denne økningen fører til problematikk innen transportsektoren med økende trafikk og lokal forurensning. En stadig mer lovende løsning på dette problemet er å flytte deler av trafikkbildet fra bakkeplanet opp i luften. Teknologiske fremskritt innen el-drift og automasjon gjør at dette nærmer seg en realitet, og flere store aktører har valgt å satse på feltet.

I 2007 startet Dolphin-prosjektet ved Fakultet for realfag og teknologi på NMBU. Det var et småbilkonsept med fokus på lav vekt, lave utslipp og kompakthet. De følgende årene utviklet prosjektet seg videre, og i 2015 ble det for første gang utredet for en flyversjon av Dolphin, som fikk navnet Dolphin Sky. Siden den gang har flyversjonen vært i fokus og det har blitt gjort flere masterarbeid knyttet til prosjektet. Det har blitt arbeidet med dronens utforming, fremdriftssystem og muligheten for å implementere et modulbasert system som tillater enkelt og raskt bytte mellom flymodus og kjøremodus. Omtrentlig vekt for kjøretøyet er nå kjent og det har blitt redegjort for aktuelle elmotorer og potensielle propellkonfigurasjoner.

Det neste steget i prosessen er å teste de aktuelle motorene og propellkonfigurasjonene i virkeligheten. Hovedmålsetningen med dette prosjektarbeidet er å utrede, utvikle og dimensjonere en testtrigg for laboratorietesting av motorer og propeller til sveveløsningen i Dolphin Sky. For å sikre fullførelse av prosjektet innenfor det gitte tidsrom ble det utformet en prosjektplan med inndeling etter prosjektdelmålene. Prosjektplanen gir en oversikt over avsatt tid til prosjektets ulike seksjoner, og er etterfulgt av en milepælsliste med fullføringsdato. Det er også satt begrensinger for prosjektet slik at arbeidsmengden sammenfaller med disponibel tid.

Videre ble metodegrunnlaget for arbeidet lagt. Her ble det redegjort for prosjektrelevante produktutviklingsmetoder som benyttes gjennom masterarbeidet. Prosjektarbeidet baseres på IPD, for å sikre struktur i utviklingsprosessene og tverrfaglig samarbeid gjennom hele prosjektforløpet. Ved konstruksjon av seleksjonsmatriser og ved valgtakning basert på kriterier ble Pughs metodikk benyttet. Dette for å sikre objektivitet ved beslutning av endelige løsningsforslag. SCAMPER ble brukt som verktøy i konseptgenereringsfasen for å assistere med idegenerering og for å finne nye løsninger. For å visualisere prosjektets forskjellige faser og prosesstrinn ble det utarbeidet et prosessdiagram med sløyfer som representerer arbeidets prosesstankegang. Til slutt i utredningsfasen ble det redegjort for relevant teori og teknologi for å gi nødvendig grunnlag til utviklingsfasen.

Utviklingsfasen startet med å fastsette produktets hoved- og delmål, samt de viktigste egenskapene. Deretter ble det fastsatt metriske grensespesifikasjoner for riggen, etterfulgt av grovspekifikasjoner for å danne konstruksjonsrunnlaget, samt å gi et bilde av

riggens størrelsesforhold og forventede belastninger. For å danne en oversikt over testriggens funksjoner og elementer ble det foretatt en funksjonsanalyse. Funksjonsanalysen ble videre brukt som utgangspunkt for konseptgenereringen der det ble lagt frem ulike løsningsalternativ til hver funksjon. Disse løsningsalternativene ble vektet opp mot forhåndsbestemte kriterier for å gi en objektiv vurdering av løsningene på bakgrunn av ønskede produkt egenskaper. De valgte løsningene ble deretter kombinert for å lage en fullstendig skisse av konseptet, som ble diskutert med konstruksjonsteknisk ekspertise ved fakultetet for å forsikre at valgene var realiserbare og fornuftige. Deretter ble det konstruert en komplett 3D-modell med eksplosjonstegninger i SolidWorks.

I analyse- og ferdigstillingsfasen ble det utført grunnlagsberegninger og profilvalg for motorarmen. Videre ble det utført FEM-analyser for å dobbeltsjekke spenningsberegningene på armen, samt en undersøkelse av deformasjon med endelig materialvalg. Materialvalget ble foretatt på bakgrunn av spenningspåkjenningene, med sikkerhet i henhold til Terje Johannesens "Tekniske tabeller", og kommersiell tilgjengelighet. Med materialer og standardkomponenter kjent ble det redegjort for produksjonsmetoder og foretatt en kostnadsestimering for testriggen. Avslutningsvis ble det laget renderte bilder av riggen, samt monteringsanvisning og bruksanvisning for produktet.

Prosjektet resulterte i et konseptforslag som benytter en lastcelle og vektstangprinsippet for måling av thrust fra motor og propell. Testriggen er en fleksibel konstruksjon med avtagbar motorarm som kan roteres 90° mellom vertikal og horisontal posisjon. Motorarmen er utformet for å kunne teste forskjellige motorkonfigurasjoner, med både en og to motorer. Motorfestet er en modulbasert del som kan byttes eller modifiseres for å passe andre motortyper, og propellnavet er utformet for å kunne montere propellblader i flere konfigurasjoner. Riggens rammeverk er bygget opp av kommersielt tilgjengelige stålprofiler som tillater enkel produksjon og gir god strukturell integritet, mens motorfestet og propellnavet lages av 6061-T6 aluminium. Testriggen måler 2120 x 1160 x 961 mm med motorarm i horisontal posisjon uten propell, og 2062 x 1160 x 1930 mm i vertikal posisjon. Konstruksjonens totalvekt uten motor er 192,2 kg. Totalkostnadene for konseptutviklingsarbeidet og ferdigstilt testrigg er estimert til 572 782 kr, og 72 782 kr inklusive motorer dersom utviklingskostnadene utelates.

For videre arbeid må det redegjøres for elektriske systemer, motorstyring og en nødstoppsfunksjon i tilfelle det oppstår feil ved testing. Det må også foretas et endelig valg om sikkerhetsgjerde rundt riggen, og beskyttelsesvegg rundt operatør. For festing av testriggen må det gjøres undersøkelser rundt mulighetene for fastskruing, eller om riggen må fundamenteres ved bruk av ballastvekter. Videre må testriggens sveiseforbindelser dimensjoneres, og det må gjøres undersøkelser på dynamiske belastninger og utmatting. Det må også foretas FEM-analyser på motorfestet og propellnavet for å sjekke at dimensjoneringen er tilstrekkelig på disse komponentene.

## Abstract

The worldwide urbanization has seen a considerable increase the last years, and prognoses indicate that this trend will continue. This increase leads to complications within the transportation sector regarding congestion and increasing local emissions. A promising solution to this problem is to move parts of the traffic from ground level to the skies. Technological leaps in terms of electric propulsion systems and automation makes this an increasingly realistic approach, and several big companies are investing in urban air mobility.

The Dolphin project started in 2007 at NMBUs Faculty of Science and Technology. It is a compact car concept that focuses on a low vehicle weight and low emissions. The project has since evolved and in 2015, a version capable of flying was presented, by the name Dolphin Sky. Since then, the majority of work on the project, including several master theses, have been related to the flying module of the vehicle. There has been development in terms of design, propulsion and a module based system for changing between air and ground mode. Weight approximations have been conducted and potential electric motors and propeller configurations have been investigated.

The next step in the development process is therefore to test the motor- and propeller configurations in real world testing conditions. The main goal of the project is to study, develop and design a test rig for laboratory testing of potential motors and propellers to be used in the flying module of Dolphin Sky. To ensure completion of the project within the specified time period, a project plan based on the project sub-goals was constructed. The project plan gives an overview of the time set aside for each of the thesis' sections, and is followed by a list of milestones with corresponding completion dates. Limitations are also set to make sure the workload corresponds with the available time.

Following this, the product development methods used in the project were presented. The project uses integrated product development to structure the development processes and to facilitate interdisciplinarity cooperation throughout project. The Pugh method was used for creating selection tables and choosing the optimal ideas based on chosen criteria. This ensured that choices were made objectively. SCAMPER was used as a tool to assist with generating ideas and to find new solutions. To visualize the different phases and processes of the project a process diagram was created, which included loops to represent the process-based mindset the project is based upon. To conclude the study phase, the relevant theory and technology required to support the development phase was presented.

The development phase was initiated by determining the main- and sub-goals of the product, as well as the most important product properties. The boundary specifications of the product were then set, followed by early course specifications set to create the construction basis, and to give an idea of the size of the rig and the loads acting upon it. To create an overview

of the functions and elements of the test rig, a function analysis was conducted. This analysis was used as a basis for the concept generation where different solutions for each function were presented. These solutions were then evaluated against a set of chosen criteria to give an objective evaluation of the solutions based on wanted product properties. The chosen solutions were then combined to create a complete sketch of the concept, which was discussed with professionals on technical constructions, to ensure it was realizable and feasible. Thereafter a complete 3D-model with exploded views was created.

In the analysis- and completion phase, calculations and profile choice for the motor arm were conducted. Finite Element Analyses were then done to double check the stress calculations on the arm, as well as to examine the deformation with the chosen material. The material selection was done based on the stress loads with safety factors, and commercial availability. With the materials and standardized components known, production methods were chosen, and cost estimations were made. Finally, rendered pictures of the test rig were produced, as well as instructions for assembly and use of the product.

The project resulted in a concept proposal that utilizes a lever with a load cell to measure the thrust from the motor and propeller. The test rig is a flexible construction with a removable motor arm that can be rotated 90 degrees between a vertical and horizontal position. The motor arm is designed to be used with different motor configurations, with both one and two motors. A module based approach was used for the motor mount, which can be changed or modified to fit different motor types. The propeller hub is designed to mount propeller blades in multiple configurations. The framework of the construction is made from commercially available steel profiles, which simplifies production and provides good structural integrity. 6061-T6 aluminium is used for the motor mount and the propeller hub. The test rig measures 2120 x 1160 x 961 mm with the motor arm horizontally mounted without a propeller, and 2062 x 1160 x 1930 mm with the arm vertically mounted. The total weight of the construction without motors is 192,2 kg. Estimated costs for the complete rig including concept development work is 572 782 NOK. If the concept development costs are excluded, the estimated price for the test rig including motors is 72 782 NOK.

For further work, a study on electrical systems, motor control and an emergency stop function in case of malfunction must be conducted. Additionally, a final choice concerning the safety fence around the rig, and the shelter around the operator must be made. Research concerning fastening of the rig must be done to find out if the rig can be fastened with bolts, or if it must be held in place by adding ballast weight. Furthermore, the welds on the rig must be dimensioned, and investigations in regard to dynamic loads and fatigue must be done. FEM-analyses must also be conducted to ensure that the dimensioning of the motor mount and propeller hub is sufficient.

# Innhold

|   | Side: |
|---|-------|
| 1. Innledning.....  | 12    |
| 1.1. Bakgrunn .....   | 12    |
| 1.2. Eksisterende løsninger og konsepter .....  | 13    |
| 1.2.1. PAL-V .....  | 13    |
| 1.2.2. CityAirbus .....   | 14    |
| 1.2.3. Andre prosjekter og fremtidsvisjoner .....                                     | 14    |
| 1.3. Dolphin-prosjektet .....   | 14    |
| 1.4. Tidligere arbeid og utviklingsstatus .....                                       | 15    |
| 1.4.1. Utredning av thrusterfunksjon og skala-testtrigg .....                         | 15    |
| 1.4.2. Utvikling av sammenfoldbart propell- og thrustersystem .....                   | 16    |
| 1.4.3. Videreutvikling av sammenfoldbare oppheng for propell- og thrustersystem ..... | 17    |
| 1.4.4. Utviklingsstatus .....   | 18    |
| 1.5. Oppdragsbeskrivelse .....  | 18    |
| 1.6. Problemstillinger og flaskehalsar .....  | 19    |
| 2. Prosjektplan .....   | 20    |
| 2.1. Prosjekt målsetninger .....  | 20    |
| 2.1.1. Hovedmål .....   | 20    |
| 2.1.2. Delmål .....   | 20    |
| 2.2. Arbeidsplan og milepæler .....   | 20    |
| 2.3. Begrensninger .....  | 22    |
| 3. Metodebruk .....   | 24    |
| 3.1. Terminologi og begreper .....  | 24    |
| 3.1.1. Begreper .....   | 24    |
| 3.1.2. Symboler .....   | 25    |
| 3.1.3. Formler .....  | 27    |
| 3.2. Metodebruk .....   | 28    |
| 3.2.1. IPD (Integrated Product Development) .....                                     | 28    |
| 3.2.2. Pughs metodikk .....   | 29    |
| 3.2.3. House of Quality og QFD (Quality Function Deployment) .....                    | 30    |
| 3.2.4. SCAMPER .....  | 30    |
| 3.3. Datahjelpemidler og søk .....  | 31    |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.4.   | Kvalitetssikring .....                           | 32 |
| 3.5.   | Prosesdiagram .....                              | 33 |
| 4.     | Teori og teknologiutredning.....                 | 34 |
| 4.1.   | Virkemåte for propeller .....                    | 34 |
| 4.1.1. | Propellens aerodynamikk.....                     | 34 |
| 4.1.2. | Virkningsgrad .....                              | 35 |
| 4.2.   | Forhold ved elektriske motorer og luftfart ..... | 35 |
| 4.2.1. | Motortyper.....                                  | 36 |
| 4.2.2. | Lynch motor .....                                | 36 |
| 4.3.   | Statiske belastninger .....                      | 36 |
| 4.4.   | Dynamiske belastninger .....                     | 39 |
| 4.5.   | Testing av motorer og propeller .....            | 39 |
| 4.5.1. | Forsøksoppsett.....                              | 39 |
| 4.5.2. | Konfigurasjoner og propelloppsett .....          | 40 |
| 4.5.3. | Måleutstyr.....                                  | 42 |
| 5.     | Spesifisering .....                              | 43 |
| 5.1.   | Produktmålsetninger.....                         | 43 |
| 5.1.1. | Hovedmål .....                                   | 43 |
| 5.1.2. | Delmål .....                                     | 43 |
| 5.2.   | Produktegenskaper .....                          | 43 |
| 5.3.   | Metriske grensespesifikasjoner .....             | 45 |
| 5.4.   | Metriske grovspekifikasjoner .....               | 46 |
| 6.     | Konseptgenerering.....                           | 48 |
| 6.1.   | Funksjonsanalyse .....                           | 48 |
| 6.2.   | Løsningsalternativer.....                        | 49 |
| 6.2.1. | Feste testrigg til fundament.....                | 49 |
| 6.2.2. | Feste nav til motor .....                        | 50 |
| 6.2.3. | Feste propell til nav.....                       | 50 |
| 6.2.4. | Motorvinkling.....                               | 51 |
| 6.2.5. | Måling av data.....                              | 53 |
| 6.2.6. | Sikkerhetsvegg .....                             | 54 |
| 6.3.   | Tidligvurdering av brukspåkjenninger.....        | 55 |
| 6.4.   | Tidlige materialvurderinger.....                 | 55 |
| 7.     | Egenscreening og konseptvalg .....               | 57 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 7.1.    | Utvikling av seleksjonsmatrise .....                         | 57 |
| 7.2.    | Egen konseptscreening .....                                  | 57 |
| 7.3.    | Foretrukne løsninger .....                                   | 60 |
| 7.3.1.  | Fundamentering av testtrigg .....                            | 60 |
| 7.3.2.  | Festeløsning mellom nav og motor .....                       | 61 |
| 7.3.3.  | Festeløsning mellom propell og nav .....                     | 61 |
| 7.3.4.  | Motorvinkling .....  | 61 |
| 7.3.5.  | Måling av data .....   | 62 |
| 7.3.6.  | Sikkerhetsvegg .....   | 62 |
| 7.3.7.  | Helhetsskisse med valgte løsningsforslag og forklaring ..... | 62 |
| 8.      | Eksperttesting .....   | 64 |
| 8.1.    | Testmålsetninger .....                                       | 64 |
| 8.1.1.  | Hovedmål .....   | 64 |
| 8.1.2.  | Delmål .....   | 64 |
| 8.2.    | Ekspertgruppe .....  | 64 |
| 8.3.    | Resultater .....   | 65 |
| 9.      | Grunnlagsberegninger .....                                   | 68 |
| 9.1.    | Beregningsmålsetninger .....                                 | 68 |
| 9.1.1.  | Hovedmål .....   | 68 |
| 9.1.2.  | Delmål .....   | 68 |
| 9.1.3.  | Beregningsforutsetninger .....                               | 68 |
| 9.2.    | Beregninger på motorarm .....                                | 69 |
| 9.2.1.  | Krefter og momenter på motorarm .....                        | 69 |
| 9.2.2.  | Valg av tverrsnitt .....                                     | 71 |
| 10.     | Produktarkitektur og konseptdesign .....                     | 74 |
| 10.1.   | Sammenstilling .....   | 74 |
| 10.2.   | Design av hovedelementer .....                               | 77 |
| 10.2.1. | Fundamentets hovedelementer .....                            | 77 |
| 10.2.2. | Motorarmens hovedelementer .....                             | 79 |
| 10.2.3. | Motorfestets hovedelementer .....                            | 80 |
| 10.3.   | Design av komponenter .....                                  | 82 |
| 10.4.   | Standardkomponenter og modularisering .....                  | 86 |
| 10.4.1. | Standardkomponenter .....                                    | 86 |
| 10.4.2. | Modularisering .....   | 87 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 10.4.3. | Forslag til sikkerhetsvegger .....                     | 88  |
| 11.     | Robusthet, optimering og sikkerhet.....                | 89  |
| 11.1.   | FEM-analyse .....                                      | 89  |
| 11.1.1. | Betingelser for analysen .....                         | 89  |
| 11.1.2. | Resultater.....  | 90  |
| 11.2.   | Materialvalg .....                                     | 91  |
| 11.3.   | Sikkerhet og dimensjoneringsvalg .....                 | 92  |
| 12.     | Visualisering og tekniske anvisninger.....             | 94  |
| 12.1.   | Renderte fremstillinger .....                          | 94  |
| 12.2.   | Tekniske anvisninger .....                             | 99  |
| 12.2.1. | Monteringsanvisning .....                              | 99  |
| 12.2.2. | Bruksanvisning tillatte forsøksoppsett .....           | 106 |
| 13.     | Produksjon og økonomibetraktninger .....               | 110 |
| 13.1.   | Produksjonsmetoder.....                                | 110 |
| 13.2.   | Kostnadskalkyle for prototype .....                    | 114 |
| 14.     | Prosessevaluering og diskusjon.....                    | 117 |
| 14.1.   | Læring og kompetanseutvikling .....                    | 117 |
| 14.2.   | Konseptutviklingsarbeidet, forbedringspotensialer..... | 118 |
| 14.3.   | Designrevisjon, produksjon og kostnadsreduksjon.....   | 120 |
| 15.     | Konklusjon .....                                       | 122 |
| 15.1.   | Resultater og anbefalinger .....                       | 122 |
| 15.2.   | Videre arbeid.....                                     | 124 |
| 16.     | Referanser .....                                       | 125 |
| 16.1.   | Skriftlige kilder .....                                | 125 |
| 16.2.   | Personlig meddelelse .....                             | 126 |
| 16.3.   | Nettbaserte kilder .....                               | 126 |
| 17.     | Vedlegg.....   | 130 |



## 1. Innledning

Her presenteres bakgrunnen for Dolphin-prosjektet, med spesielt fokus på sveveversjonen Dolphin Sky, for å gi et grunnlag for oppdragsbeskrivelsen og oppgavens helhet. Det blir sett på tidligere arbeid og eksisterende løsninger, samt en gjennomgang av tidlige problemstillinger og potensielle flaskehalsar.

### 1.1. Bakgrunn

I dagens samfunn er det stor problematikk knyttet til utslipp og effektivitet innen transportsektoren. Enkeltindivider benytter seg av unødvendig store og tunge kjøretøy, og tilnærmet alt av lokaltransport foregår på bakkeplan. Dette fører til store lokale utslipp og tett trafikkerte veier som gir lav effektivitet og skaper frustrasjon blant befolkningen.

Potensielle løsninger på trafikkproblemen er utbygging av veinettet og økt bruk av kollektivtransport. Erfaringer viser dog at mange har vanskeligheter med eller er lite villige til å bytte til kollektivtransport, og at veiutbygging som oftest er en svært dyr løsning. I mange tettbefolkede områder er veiutbygging også en umulighet, da det ikke er plass til et større veinett [1]. Dette, kombinert med økt urbanisering i nyere tid, har gjort trafikk til et økende problem. I 2018 bodde 55% av verdens befolkning i urbane områder, og estimater fra FN tilsier at dette tallet vil øke til 68% innen 2050 [2].



Figur 1.1. Tettbefolkede byer og økt urbanisering fører til trafikkproblemer med stillstand og økte utslipp [3].

Interessen og utviklingen av nye muligheter som vil føre til mindre kø, og som samtidig opprettholder friheten som private kjøretøy gir, har derfor økt de siste årene. En slik løsning er å flytte deler av lokal person- og varetransport fra bakkeplanet til luften. Løsninger som tillater både bakke- og lufttransport har lenge vært en fremtidsvisjon, men med dagens teknologi og nye innovative visjoner er dette nærmere en realitet enn noen gang før.

Norge har som klimamål å senke utslippene med 50-55% innen 2030 sammenlignet med nivåene i 1990 [4]. For å nå disse målene foregår det nå et grønt skifte i den norske transportsektoren, der det gis statlig støtte og fordeler for el- og hybridbiler. Statistikk fra Opplysningsrådet for veitrafikken viser at elbiler, hybrider og ladbare hybrider stod for 78,3% av nybilsalget i første halvdel av 2020, der rene elbiler var den klart mest populære kategorien [5]. Denne salgsøkningen har ført til en stadig bedret tilrettelegging for elektriske kjøretøyer i form av infrastruktur og ladenett.

Det grønne skiftet gjør elektrisk drift til det naturlige valget for et urbant rettet moderne luftfartøy. Lenge har rekkevidde vært det største problemet for elektrisk drift av kjøretøy, men den store økningen i satsing på elbiler blant store aktører har ført til mer effektive batteripakker. Dette har ført til en betraktelig økning i elektrisk rekkevidde de siste årene, men som stadig ikke er helt på nivå med rekkeviddemulighetene en forbrenningsmotor tilbyr. Spesielt for et multicopter, der minimal vekt er essensielt, kan de tunge batteriene by på utfordringer ved lengre reiser. Dette gjør at det naturlige bruksområdet for tidlige elektriske leverings- og persondroner vil være urbane områder der transport foregår over kortere avstander. Tall fra FN viser at byer konsumerer 78% av verdens energi og produserer 60 prosent av drivhusgassene [6]. Her vil persondronene kunne effektivisere lokaltransporten ved å flytte deler av trafikken over bakkeplanet og samtidig minke den lokale forurensningen.

Med økt satsing på feltet ser framtiden til persondroner og lufttaxier lys ut. I 2019 kom EASA ut med retningslinjer og reguleringer for utvikling og drift av eVTOL-farkoster med kapasitet på opptil ni personer og maksimal vekt opptil 3175 kg [7]. Dette viser at offentlige organer anerkjenner utviklingen og inntoget av lufttaxier, og at det kan nærme seg kommersiell realitet.

## 1.2. Eksisterende løsninger og konsepter

Flere store aktører har utviklet konsepter og visjoner for fremtidige persondroner, der enkelte prosjekter har kommet så langt at det er produsert prototyper som har foretatt autonome flytester. Under vil det presenteres noen av foregangsprosjektene for persondroner og autonom urban luftfart.

### 1.2.1. PAL-V [8]

PAL-V markedsførers som verdens første kommersielle flybil. Kjøretøyet har tre hjul for kjøring på vei og veier 664 kg uten fører og passasjer. Farkosten er en autogyro, som betyr at fremdriften kommer fra en tradisjonell vertikal propell, mens kjøretøyet løft produseres av en frittrotterende horisontal rotor. Den frittrotterende rotoren tillater bilen å fly med lave hastigheter og minimerer distansen som er nødvendig for å lette. I kjøremodus foldes rotorene sammen slik at kjøretøyet kan benyttes på veien. Kjøretøyet framdrift kommer fra en forbrenningsmotor som yter 100 hk (74,6 kW), og produsenten oppgir en rekkevidde på 1315 km ved kjøring og 400-500km ved flyving, avhengig av last. De første bilene forventes å leveres til kunder i 2022, og det krevers både bil- og flysertifikat for å operere kjøretøyet.



Figur 1.2. PAL-V Pioneer Edition i kjøremodus [8].

### 1.2.2. CityAirbus [9]

Airbus har utviklet et konsept for å demonstrere deres visjon av fremtidens fremkomstmidler. Konseptet heter CityAirbus og er et helelektrisk multicopter med kapasitet på opptil 4 personer. Tanken er at den skal fungere som en flyvende taxi med autonom drift for å forbedre fremkommeligheten og minke trafikken på bakkeplanet. Det har allerede blitt foretatt flere testflyvninger, og det er estimert at cruisehastigheten vil være 120 km/t over faste ruter med 15 minutters autonom flyving. Motoroppsettet består av fire armer med to motorer på hver arm. De åtte motorene yter 100 kW hver og konfigurasjonen gjør at CityAirbus trygt kan lande dersom en av motorene slutter å virke. Propellene har fast vinkling og roterer ved rundt 950 omdreininger per minutt ved flyving for å minke lydforurensningen. Maks vekt for flyving er 2,2 tonn.



Figur 1.3. CityAirbus klargjøres for test-flyving [9].

### 1.2.3. Andre prosjekter og fremtidsvisjoner

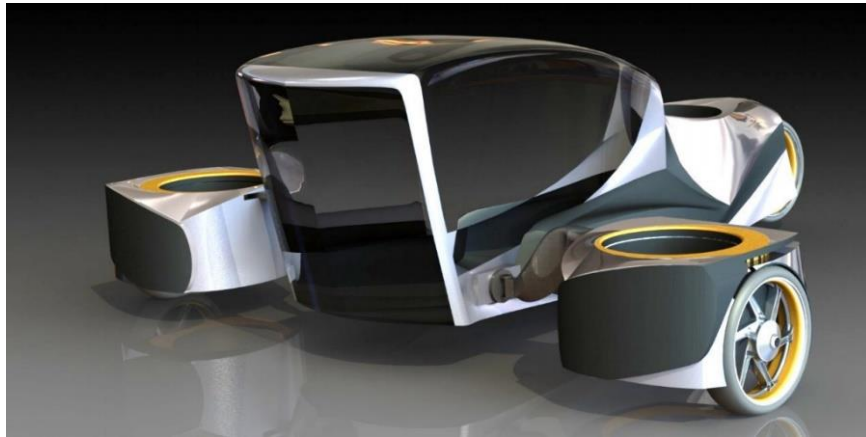
Flere andre store aktører har laget visjoner for fremtidens luftfarkoster. Boeing og Porsche startet i 2019 et samarbeid om å utvikle en eksklusiv persondrone for urbane områder [10]. Målet med prosjektet er å undersøke markedspotensialet for persondroner, som de mener vil ta seg opp fra 2025, og å være en ledende aktør i persondroneutviklingen fra en tidlig fase. Transportgiganten Uber inngikk nylig en avtale med Joby Aviaton, som utvikler elektriske fly med vertikale lette- og landingsmuligheter [11]. Avtalen innebærer at Uber investerer i Joby Aviaton sitt eVTOL-fly, som skal ta over for Uber Elevate, som er Uber sitt lufttaxi-program. Planen er at Joby sitt fly skal bruke Uber sin app for å la kunder booke turer.

## 1.3. Dolphin-prosjektet

Utviklingen av Dolphin-prosjektet startet i 2007 i det teknologiske miljøet ved NMBU. Det begynte som et småbilkonsept med fokus på kompakt, lav vekt og et lavt energiforbruk. Med disse verdiene som hovedfokus ble det utredet to hovedutgaver, "Dolphin Duo" og "Dolphin Family", med ulike hjulkonfigurasjoner. Hensikten med prosjektet var å konstruere et kompakt, bærekraftig og energieffektivt fremkomstmiddel spesialisert mot person- og varetransport.

I 2015 ble det sett på muligheten for å utrede et svevesystem for småbilkonseptet, og i 2016 ble den første masteroppgaven for sveveversjonen publisert. Denne utgaven med mulighet for lufttransport fikk navnet "Dolphin Sky", og det er denne delen av Dolphin-prosjektet som har vært hovedfokuset de siste årene. Konseptet der det er i dag bygger på en modulbasert

tilnærming der svevemodulen skal være avtagbar med mulighet for enkel montering ved behov. Visjonen er en tredelt modulbasert løsning med kjøremodul, kabinmodul og drone-modul.



*Figur 1.4. Tidlig visjon av Dolphin Sky fra Kristoffer Ø. Rummelhoff sitt masterarbeid "Dolphin Sky, Del A: Utvikling av integrert design- og helhetkonsept for sveveløsning" [12].*

### 1.4. Tidligere arbeid og utviklingsstatus

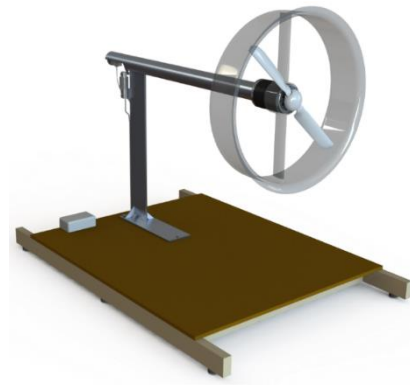
Siden den første utredningen av Dolphin Sky har det blitt utført flere masterprosjekter knyttet til konseptet. Oppgavene har fokusert på ulike utviklingsområder, der de mest relevante for dette prosjektet er arbeidet knyttet til motoroppheng, thrustersystem og en nedskalert testrigg. Videre i denne seksjonen vil disse rapportene oppsummeres for å gi et bilde av utviklingsstatusen og danne rammeverket for det videre arbeidet.

#### 1.4.1. Utredning av thrusterfunksjon og skala-testrigg

Våren 2017 publiserte Anders C. Thømt masteroppgaven "Utredning, dimensjonering og utvikling av testoppsett for thrusterfunksjon til persondrone" [13]. Arbeidet er to-delt med fokus på dronens fremdriftssystem i første del, og utredning av en nedskalert testrigg for å teste teori og utføre simuleringer.

Rapportens første del omhandler teorien rundt aerodynamikk og propellfysikk for å utrede et system for dronens fremdrift og løft. På bakgrunn av disse studiene presenterer Thømt resultater knyttet til dimensjonering, oppsett og effekt for thrustersystemet til dronen. Undersøkelsene viser at med fire thrustere, hver med to kontraroterende motorer, vil hver motor kreve 9 kW for hover og 25 kW for flyving dersom totalvekten på dronen er 450 kg. Dette gjelder en gitt propell med diameter 1,2 m og gir et vektforhold på 2,25 kg/kW. Ut ifra undersøkelsene presenteres Lynch LEM 200-serien og Joby Motor JM2 som aktuelle motorer.

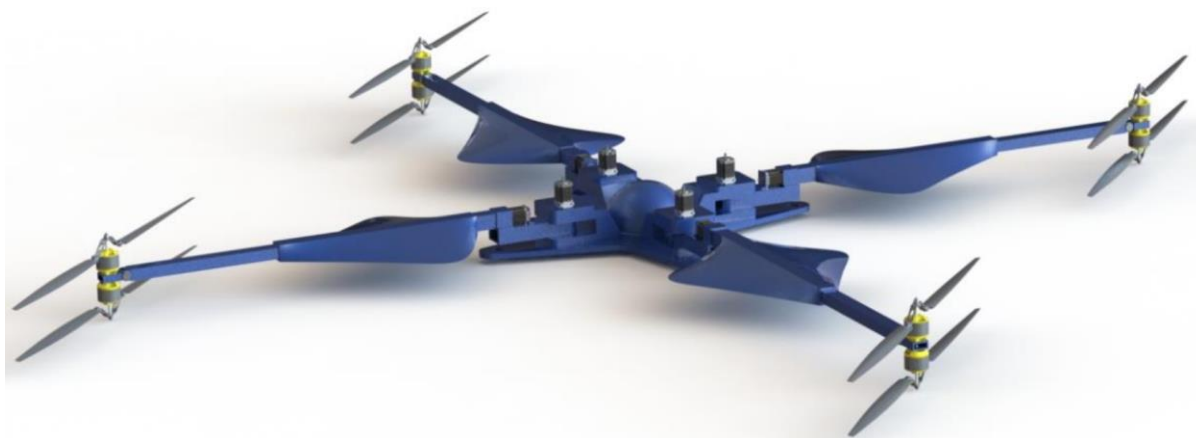
Den andre delen omhandler utredningen av en nedskalert testrigg for å muliggjøre forsøk knyttet til teorien i del en. Testtriggen er utviklet for å måle trekraft og moment som produseres fra propellene med og uten thrustertrakt. Den er optimalisert for å teste motorer med effekt omkring 1 kW og propeller med diameter på 600 mm, men den er dimensjonert til å tåle motorer på 3 kW og propelldiameter på opptil 800 mm. Riggen veier 29 kg med motor og måler 1500 x 1000 x 890 mm uten propell, og har en total-kostnad på 595 000 kr inkludert utviklingskostnader. Konstruksjonens hovedkomponenter er bygget opp av aluminiumslegeringer og basen er laget av tre.



Figur 1.5. Testtriggen fra Thømt sitt masterarbeid [13].

### 1.4.2. Utvikling av sammenfoldbart propell- og thrustersystem

I 2018 la Tarek El-Gewely frem masterarbeidet "Dolphin Sky: Utredning og utvikling av sammenfoldbart propell- og thrustersystem" [14]. Oppgaven tok for seg flykomponenten i Dolphin Sky, med fokus på utredning av et sammenfoldbart ramme- og propellsystem. Konseptet som ble presentert består av fire motorarmer som hver huser to kontraroterende motorer, som anbefalt i arbeidet til Thømt. Ytterdimensjonene, målt fra propelltuppene, er 4310,7 x 4310,7 x 313 mm. Armene har mulighet for teleskopering og de kan roteres inn mot rammen for å oppta mindre plass når de ikke er i bruk. Propellsystemet er også sammenfoldbart, og de kan vinkles for økt framdrift når nødvendig. For å assistere thrusterene og for å minke energikonsum er det montert vinger i armene som gir ekstra løftekraft. Konstruksjonen er laget i aluminiumslegeringene 7075 T651 og 7075 T6 og er valgt på bakgrunn av gode styrkeegenskaper i forhold til vekt. Rammevekten, ekskludert motorer og annet tilleggsutstyr, er beregnet til å være 106,5 kg.



Figur 1.6. Rendering av dronekonseptet til El-Gewely med fire foldbare armer som kan teleskoperes [14].



### 1.4.3. Videreutvikling av sammenfoldbare oppheng for propell- og thrustersystem

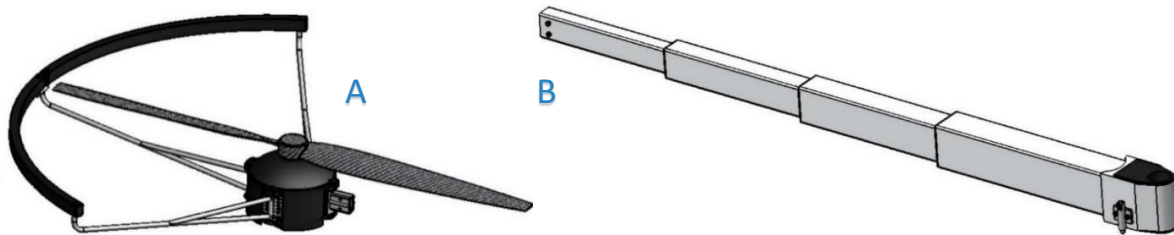
Henrik Falstad tok på seg arbeidet med å videreutvikle systemet til El-Gewely, og presenterte oppgaven sin, "Dolphin Sky: Videreutvikling av sammenfoldbare oppheng for propell- og thrustersystem med sikkerhetsfunksjoner", i 2019 [15]. Arbeidet fokuserer på den avtagbare dronemodulen og det utredes et sikkerhetssystem for nød-situasjoner. I motsetning til tidligere konsepter, presenterer Falstad en løsning med seks armer og motorer, der de teleskopiske og sammenfoldbare armene videreføres fra tidligere konsepter. Ytterdimensjonene på 5287 x 5897 x 351 mm er høyere enn El-Gewely sitt konsept for å gi dronen økt stabilitet i luften. I sammenfoldet tilstand er derimot ikke forskjellene så store, siden fraværet av vinger på Falstad sitt konsept gjør at armene kan foldes tettere sammen. Resultatet er at modulen blir svært smal i sammenfoldet tilstand, som er hensiktsmessig om kjøretøyet skal brukes på vei med dronemodulen fastmontert. Hovedkonstruksjonen er laget i aluminiumslegeringene 6082 T6 og 6082 T651 og beregnet vekt er på 125,6 kg uten motorer, propeller og sikkerhetssystem. Det nevnte sikkerhetssystemet skal kunne muliggjøre tryggere nødlanding og består av en fallskjerm med en rakett for utskytning.



Figur 1.7. Falstad sin dronemodul med sammenfoldede armer i bakke-modus med en visualisering av fører-modulen [15].



Figur 1.8. Dronekonsept i flymodus med ustrakte armer [15]. Halvbuen i enden av armene er propellskjermer for å unngå personskader. Det runde plastlokket i senter av dronemodulen huser fallskjermen som skal assistere ved nødlandinger.



Figur 1.9. Utvalgte komponenter fra Falstad sin dronemodul: A) thruster med propellskjerm, og B) utstrakt teleskoparm [15].

#### 1.4.4. Utviklingsstatus

Ettersom det nå er utredet flere konsepter for Dolphin Sky har det blitt klarere hvordan spesifikasjonene for dronemodulen kommer til å se ut. På bakgrunn av tidligere arbeid kan derfor en grundigere undersøkelse av aktuelle motorer foretas. Mye av teorien knyttet til motorsystemer og propeller er redegjort for, men for å sikre at dette fungerer i praksis kreves det fullskala testing i virkeligheten. Utredning av en fullskala testrigg som tillater utprøving av aktuelle motor- og propellkonfigurasjoner er derfor neste steg i utviklingen av dronemodulens fremdriftssystem. Denne testtriggen må gi mulighet for å teste flere realistiske oppsett som kan være aktuelle for Dolphin Sky.

#### 1.5. Oppdragsbeskrivelse

Dette arbeidet skal ta for seg et produktutviklingsoppdrag for fullskala testing av løfteevnen til aktuelle motor- og propellkonfigurasjoner for Dolphin Sky. Prosjektet skal dokumenteres skriftlig i en rapport, samt presenteres for sensor i form av et muntlig foredrag. Det skal benyttes relevante produktutviklingsmetoder, og utviklingsprosessen systematiseres gjennom prosesstrinn for å sikre jevn fremgang, objektivt gode løsninger og en oversiktlig arbeidsprosess. Prosjektarbeidet vil søke å bygge videre på relevante elementer fra tidligere arbeid, samt finne nyskapende løsninger for de aktuelle problemstillingene.

Dette oppdraget bygger videre på Thømt sitt arbeid fra 2017 [13] som utredet for aktuelle motor og propelltyper, samt en nedskalert testrigg. Erfaringer fra hans oppgave vil bli brukt til å utrede, utvikle og designe en fullskala testrigg for testing av aktuelle motor- og propellkonfigurasjoner til Dolphin Sky ved NMBU.

Tidligere arbeid og eksisterende løsninger for testing av mindre luftfartsmotorer, propell- og thrusterkonfigurasjoner skal gjennomgås og kartlegges for å danne grunnlaget for spesialisering og konseptgenerering. Testtriggen skal utvikles med hensyn til aktuelle motorstørrelser og krefter som er knyttet til aktuelle propellkonfigurasjoner. Riggens skal tilpasses for å tillate raskt bytte mellom ulike propelltyper, antall propellblader og eventuelle motorkonfigurasjoner (skyv vs. trekk). For å sikre best mulige måleresultater vil det foretas vurderinger i forhold til riggens utforming og måleteknisk utrustning.

## 1.6. Problemstillinger og flaskehals

Følgende listes punkter som blir relevante og viktige for produktutredningen og utviklingen.

### Sentrale fokuspunkter og problemstillinger

- Gjennomgå tidligere arbeid, og kartlegge eksisterende løsninger og tekniske rammer for testing av propell- og motorkonfigurasjoner for mindre luftfarkoster med vertikal og horisontal løftefunksjon.
- Utarbeide spesifiseringsgrunnlag for utvikling av testtriggen med hensyn til belastninger knyttet til aktuelle motorstørrelser og propellkonfigurasjoner.
- Vurdering av funksjonsløsninger i riggen med hensyn til fleksibel tilkopleing av motor- og bladkonfigurasjoner, og mulighet for raskt bytte mellom propelltyper.
- Tilpassing og vurdering av måleteknisk utrustning til den valgte testtriggen for å måle og registrere thrustkraft for ulike motor- og propellkonfigurasjoner.
- Foreta grunnlagsberegninger for å danne dimensjoneringsgrunnlag for riggen.
- Konstruere tydelige og realistiske 3D-modeller av riggens deler, samt tekniske anvisninger som tillater produksjon, montering og bruk av testtriggen.
- Gjøre analyser på ferdig produkt med fokus på belastninger, sikkerhet og materialvalg.
- Lage en kostnadsoversikt for utvikling og produksjon av testtriggen med estimater for tilvirkningskostnader.

### Teknologiske flaskehals og utfordringer

- Masterarbeidet bygger videre på et begrenset utredningsgrunnlag og enkelte dimensjoner kan dermed være vage slik at det må gjøres antagelser.
- Riggen må være godt fundamentert under testing av sikkerhetshensyn og for å sikre gode måleresultater.
- Propellfestet må være kompatibelt med ulike propellkonfigurasjoner. Det kan bli utfordrende å finne en felles løsning for å montere ulikt antall propellblader til motoren.
- Propellene vil potensielt rotere svært fort, så det må lages en sikkerhetsinnretning for å hindre skader på personer og omgivelser.
- Det kan bli utfordrende å lage en konstruksjon som skal kunne tillate testing med og uten bakkeeffekt samtidig som den skal kunne huse relativt store motorer og måleutstyr.
- Riggen burde utformes med muligheter for integrering av motorarmer som ligner Dolphin Sky sine tidligningsløsninger (El-Gewey og Falstad) for å gi mest mulig realistisk testing.
- Majoriteten av riggen burde kunne produseres og monteres ved NMBUs verksted. Komponentene til testtriggen må derfor være av begrenset kompleksitet.



## 2. Prosjektplan

*I dette kapittelet fastsettes prosjektets faglige målsettinger og tidsmessige rammer. Det konstrueres en arbeidsplan for de ulike fasene i prosjektet, samt en milepælstabell med ferdigstillingsdatoer. Det blir også gjort nødvendige avgrensninger for å sikre ferdigstillelse innenfor den gitte tidsrammen.*

### 2.1. Prosjekt målsettinger

#### 2.1.1. Hovedmål

Målet for prosjektet er å utrede, utvikle og designe en fleksibel testtrigg for fullskala laboratorietesting av motor og propeller i svevløsningen til Dolphin Sky, som gjør det mulig å granske løfteevne. Utredning- og utviklingsarbeidet skal dokumenteres skriftlig i rapporten, med tilhørende konstruksjonsgrunnlag for testtriggen, forsøksoppsett og tekniske anvisninger for å kunne bygge og bruke den.

#### 2.1.2. Delmål

For å bygge opp under og presisere hovedmålet er følgende trinnvise delmål definert:

1. Gjennomgå tidligere arbeid og bakgrunn for oppdraget, utforme prosjektplan og identifisere og beskrive relevante metoder.
2. Utrede grunnlagsteori, teknologistatus og spesifiseringsgrunnlag.
3. Gjennomføre funksjonsanalyse og generere konseptalternativer for testtrigg og tilhørende utstyr.
4. Foreta egenscreening, eksperttesting og valg av endelig konsept.
5. Utforme og ferdigstille DAK-arbeid og tekniske anvisninger.
6. Utføre nødvendige grunnlagsberegninger og FEM-analyser for modellen.
7. Gjøre rede for produksjonsmetoder og utforme kostnadsestimater.
8. Ferdigstille rapport med nødvendige tekniske anvisninger og konkludering av arbeidet.

### 2.2. Arbeidsplan og milepæler

På neste side følger en arbeidsplan for masterarbeidet med avmerking for når delmålene er gjennomført. Arbeidsplanen er nøye utarbeidet for å sikre at den disponerte tiden blir fornuftig fordelt over prosjektets ulike faser, og at oppgaven ferdigstilles innen leveringsfristen 01.06.2021. Markøren "✓" brukes i arbeidsplanen for å angi fullførelsestid for hvert delmål. Under arbeidsplanen listes prosjektets milepæler med gjennomføringsdato [16].

Tabell 2.1. Arbeidsplan for masterarbeidet. Hakene viser når aktiviteten ble utført.

| Delmål                        | Januar | Februar | Mars | April | Mai |
|-------------------------------|--------|---------|------|-------|-----|
| 1. Bakgrunn og planlegging    |        | ✓       |      |       |     |
| - Bakgrunn for oppdrag        | ■      |         |      |       |     |
| - Prosjektplan                | ■      |         |      |       |     |
| - Metodebruk                  | ■      | ■       |      |       |     |
| 2. Teori og spesifisering     |        |         | ✓    |       |     |
| - Grunnlagsteori og teknologi |        | ■       |      |       |     |
| - Spesifiseringsgrunnlag      |        | ■       | ■    |       |     |
| 3. Konseptutforming           |        |         | ✓    |       |     |
| - Funksjonsanalyse            |        |         | ■    |       |     |
| - Konseptgenerering           |        |         | ■    |       |     |
| 4. Valg av konsept            |        |         |      | ✓     |     |
| - Konseptvalg                 |        |         |      | ■     |     |
| - Eksterntesting              |        |         |      | ■     |     |
| 5. 3D-Modellering             |        |         |      |       | ✓   |
| - DAK-arbeid                  |        |         |      | ■     | ■   |
| - Tekniske anvisninger        |        |         |      |       | ■   |
| 6. Styrkeberegninger          |        |         |      |       | ✓   |
| - Grunnlagsberegninger        |        |         |      | ■     |     |
| - FEM-analyse                 |        |         |      |       | ■   |
| 7. Kostnad og produksjon      |        |         |      |       | ✓   |
| - Produksjonsmetoder          |        |         |      |       | ■   |
| - Kostnadsestimater           |        |         |      |       | ■   |
| 8. Ferdigstilling             |        |         |      |       | ✓   |
| - Fullføre rapport            |        |         |      |       | ■   |
| - Korrektur og levering       |        |         |      |       | ■   |

Tabell 2.2. Milepæler med dato for utførelse.

| Milepæl  | Dato       |
|--|------------|
| 1. Tidligere arbeid og bakgrunn for prosjektet er gjennomgått, med prosjektplan og redegjørelse for relevante metoder. | 12.02.2021 |
| 2. Det er utredet grunnlagsteori, teknologistatus og spesifiseringsgrunnlag.   | 14.03.2021 |

Tabell 2.2. Forts.

| Milepæl  | Dato       |
|--|------------|
| 3. Funksjonsanalyse er gjennomført og det er generert konseptalternativer for testtrigg og utstyr. | 30.03.2021 |
| 4. Det er foretatt eksperttesting og valg av endelig konsept.                                      | 20.04.2021 |
| 5. DAK-arbeid og tekniske tegninger er utformet og ferdigstilt.                                    | 09.05.2021 |
| 6. Det er utført nødvendige grunnlagsberegninger og FEM-analyser.                                  | 21.05.2021 |
| 7. Produksjonsmetoder er redegjort for, og det er utformet kostnadsestimater.                      | 27.05.2021 |
| 8. Rapporten er ferdigstilt med tekniske anvisninger og konklusjon.                                | 31.05.2021 |

### 2.3. Begrensninger

Masteroppgaven er vektet til 30 studiepoeng, som tilsvarer omkring 900 timers arbeid. For å sikre ferdigstilling av prosjektet med tilfredsstillende resultater innen den gitte tidsrammen gjøres derfor følgende begrensninger:

- Produktet skal ikke konstrueres fysisk, men nødvendig konstruksjonsgrunnlag skal legges ved rapporten.
- Det vil bare bli inkludert teori om propelleffekt og momentforhold i den grad dette kan bli aktuelt som grunnlag for videre arbeid.
- Detaljerte grunnlagsberegninger skal kun utføres på motorarmen i riggen, og bare i begrenset grad vurderes med hensyn til riggens øvrige komponenter.
- Detaljerte beregninger knyttet til dynamiske belastninger og utmatting vil ikke foretas, men inkluderes gjennom valg av sikkerhetsfaktorer.
- Det vil ikke gjøres detaljerte beregninger på sveis, skruer og andre festelementer.
- Oppstartmoment fra motoren, samt sideveis thrustmoment vil ikke inkluderes i beregningene siden disse har neglisjerbar betydning i forhold til maksbelastning fra thrustkraften.
- Kostnadsberegninger for produksjon vil basere seg på estimater.
- Enkelte mål, spesielt knyttet til motor og utvalgte skrueløsninger, vil bli estimater basert på tilgjengelig informasjon. Disse må evalueres og eventuelt revideres når nøyaktige dimensjoner er kjent.
- Det vil bare bli laget forslag til valg av lastcelle og propellblader. 3D-modellene som brukes kommer til å bli hentet fra nettet for å visualisere og vise funksjon.
- Festesystem for riggen blir ikke utviklet videre, men det skal redegjøres for aktuelle løsningsalternativer. Endelig beslutning er hensiktsmessig å ta når faktorer rundt mulighet for fastskruing er kjent.

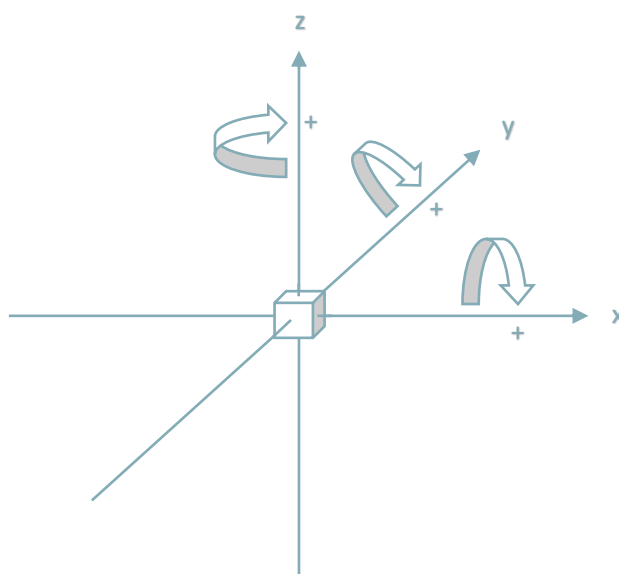
- Det vil ikke bli foretatt endelig valg av sikkerhetsgjerde, men det vil bli presentert ulike alternativer.
- Styringssystem for motor, kabling og tilkobling av andre elektriske komponenter vil ikke redegjøres for. Dette vil være hensiktsmessig å gjøre når delene er tilgjengelige.
- Det vil ikke bli integrert et nødstoppsystem for testtriggen, siden mange faktorer rundt motorstyring er ukjente. Dette er et krav i maskinforskriften, og må gjøres rede for når motorstyringssystemer er kjente, og implementeres før bruk.
- Det skal visualiseres en løsning for en komplett teknisk forsøksrigg, men andre mindre deler som styringssystem, PC, osv. vil hentes fra nettet, siden det er mange usikkerhetsmomenter knyttet til disse elementene ved nåværende tidspunkt.
- NMBUs hovedverksted vil kontaktes for innspill knyttet til produksjon, men nedstengninger som følger av pandemisituasjonen kan forsinke prosessen og gjøre kontakt vanskelig.

### 3. Metodebruk

Her fremlegges terminologi, symboler og formler som brukes i rapporten. Det foretas også en kartlegging av metodiske verktøy og hjelpemidler som brukes for å systematisere og hjelpe utviklingsprosessen.

#### 3.1. Terminologi og begreper

Under defineres koordinatsystemet med akser og romretninger som vil brukes som utgangspunkt for beregninger i arbeidet.



Figur 3.1. Koordinatsystem med seks frihetsgrader, dvs. tre romakser ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) og tre rotasjonsakser. Rotasjonsretningen regnes positiv med urviseren i klokka sett fra origo med mindre annet er oppgitt.

##### 3.1.1. Begreper

Tabell 3.1. Oversikt over begreper som benyttes i rapporten.

| Prosjektspesifikke begreper | Beskrivelse   |
|-----------------------------|---|
| Drone                       | Ubemannet fartøy som fjernstyres eller er selvstyrende. Brukes også i dagligtalen som et fellesbegrep for multikoptere.   |
| Persondrone                 | Drone med kapasitet til å ha med seg personer.  |
| VTOL og eVTOL               | Forkortelsen står for "vertical take-off and landing" og brukes om flymaskiner som har mulighet til vertikal letting og landing. eVTOL brukes om elektriske VTOL-flymaskiner. |

Tabell 3.1. Forts.

| Prosjektspesifikke begreper | Beskrivelse  |
|-----------------------------|--|
| EASA                        | European Union Air Safety Agency   |
| Dolphin Sky                 | Flybilkonsept under utvikling ved NMBU.  |
| Dolphin Duo                 | Bakkeversjon av Dolphin med kapasitet til to voksne personer.  |
| Dolphin Family              | Bakkeversjon av Dolphin med kapasitet til en voksen og to barn.  |
| Multicopter                 | Et rotorfartøy med tre eller flere rotorer som genererer løft.   |
| Quadcopter                  | Multicopter med fire motorarmer.   |
| Hexacopter                  | Multicopter med seks motorarmer.   |
| Flymodus                    | Modus som benyttes for å tillate flyving.  |
| Kjøremodus                  | Modus som benyttes for å tillate kjøring.  |
| Kjøremodul                  | Dolphin-konseptet sin chassismodul.  |
| Kabinmodul                  | Dolphin-konseptet sin kabinmodul som kan brukes med kjøremodulen og dronemodulen.                              |
| Dronemodul                  | Dolphin-konseptet sin flymodul som tillater flyving.   |
| Thrust                      | Aerodynamisk trekk-/skyvekraft.  |
| Thruster                    | Motor- og propellkonfigurasjon som skaper thrust og gir fartøyet løft og fremdrift.                            |
| Thrustertrakt               | Trakt rundt thrusteren for å forbedre løfteevne.   |
| Si-enhet                    | Standard måleenhetssystem.   |
| DAK                         | Dataassistert konstruksjon.  |
| CAE                         | Computer aided engineering.  |
| FEM                         | Finite element method.   |
| RC                          | Remote Control – Brukes i oppgaven om fjernstyrte skala-flymaskiner som radiostyrte modellfly og multicoptere. |
| HM                          | Horisontal motorarm  |
| VM                          | Vertikal motorarm  |

## 3.1.2. Symboler

Tabell 3.2. Liste over symboler som benyttes i rapporten.

| Symbol | Beskrivelse            | SI-Enhet |
|--------|------------------------|----------|
| $m$    | Masse                  | $kg$     |
| $v$    | Hastighet              | $m/s$    |
| $t$    | Tid                    | $s$      |
| $g$    | Gravitasjonskonstanten | $m/s^2$  |
| $F$    | Kraft                  | $N$      |

Tabell 3.2. Forts

| Symbol        | Beskrivelse                          | SI-Enhet |
|---------------|--------------------------------------|----------|
| $F_x$         | Krefter i x-retning                  | $N$      |
| $F_y$         | Krefter i y-retning                  | $N$      |
| $R$           | Resultantkraft                       | $N$      |
| $N$           | Aksialkraft                          | $N$      |
| $L$           | Løftekraft for vingetverrsnitt       | $N$      |
| $D$           | Luftmotstand                         | $N$      |
| $\eta$        | Virkningsgrad                        | -        |
| $P$           | Effekt                               | $W$      |
| $n$           | Turtall                              | $rpm$    |
| $M$           | Moment                               | $Nm$     |
| $Q$           | Dreimoment til propell               | $Nm$     |
| $V$           | Skjærkraft                           | $N$      |
| $M_A$         | Moment i A                           | $Nm$     |
| $l$           | Lengde                               | $m$      |
| $\sigma$      | Spenning                             | $MPa$    |
| $\sigma_s$    | Strekkspenning                       | $MPa$    |
| $\sigma_t$    | Trykkspenning                        | $MPa$    |
| $A$           | Areal                                | $mm^2$   |
| $\tau$        | Skjærspenning                        | $MPa$    |
| $\sigma_b$    | Bøyenspenning                        | $MPa$    |
| $M_b$         | Bøyemoment                           | $Nm$     |
| $y$           | Avstand fra nøytralaksen             | $mm$     |
| $W$           | Motstandsmoment                      | $mm^3$   |
| $I$           | Annet arealmoment                    | $mm^4$   |
| $\sigma_{jf}$ | Jevnførende spenning                 | $MPa$    |
| $\eta_f$      | Sikkerhetsfaktor mot flyt            | -        |
| $R_e$         | Flytegrense                          | $MPa$    |
| $R_m$         | Bruddgrense                          | $MPa$    |
| $T_n$         | Nødvendig thrust                     | $N$      |
| $F_{A,T}$     | Maks aktuell thurstkraft             | $N$      |
| $M_{b,t}$     | Bøyemoment ved tidligberegninger     | $Nm$     |
| $l_t$         | Motorarmlengde ved tidligberegninger | $m$      |
| $m_m$         | Motorvekt                            | $kg$     |
| $d_m$         | Motordiameter                        | $mm$     |
| $l_{ma}$      | Lengde på motorarm                   | $mm$     |
| $F_{A,y}$     | Kraft som følger av motorvekt        | $N$      |
| $M_C$         | Moment om C                          | $Nm$     |

Tabell 3.2. Forts.

| Symbol                 | Beskrivelse  | SI-Enhet |
|------------------------|--|----------|
| $l_{AC}$               | Lengden mellom A og C  | $mm$     |
| $F_{B,y,1}$            | Opplagerkraft i B (y-retning) ved horisontal testing         | $N$      |
| $l_{BC}$               | Lengden mellom B og C  | $mm$     |
| $F_{C,y}$              | Opplagerkraft i C (y-retning) ved horisontal testing         | $N$      |
| $M_{B,h}$              | Maks bøyemoment i motorarmen i horisontal stilling.          | $Nm$     |
| $F_{B,y,2}$            | Opplagerkraft i B (y-retning) ved vertikal testing           | $N$      |
| $F_{B,x}$              | Opplagerkraft i C (x-retning) ved vertikal testing           | $N$      |
| $F_{C,x}$              | Opplagerkraft i C (y-retning) ved vertikal testing           | $N$      |
| $M_{B,v}$              | Maks bøyemoment i motorarmen i vertikal stilling.            | $Nm$     |
| $\sigma_{b,tillatt,1}$ | Nedre verdi for tillat spenningsområde for hulprofil av S355 | $MPa$    |
| $\sigma_{b,tillatt,2}$ | Øvre verdi for tillat spenningsområde for hulprofil av S355  | $MPa$    |
| $\sigma_{b,p}$         | Bøyespenning i profilets ytterste fiber ved opplager B       | $MPa$    |
| $y_p$                  | Avstand fra ytterste fiber i profilet til nøytralaksen       | $mm$     |
| $I_y$                  | Annet arealmoment om sterk akse                              | $mm^4$   |
| $\tau_p$               | Gjennomsnittlig skjærspenning i profilet mellom B og C       | $MPa$    |
| $A_p$                  | Profilets tverrsnittsareal                                   | $mm^2$   |
| $\eta_{f,ma}$          | Sikkerhetsfaktor mot flyt i motorarmen                       | -        |
| $R_{e,S355}$           | Flytegrense for S355 konstruksjonsstål                       | $MPa$    |
| $\sigma_{jf,ma}$       | Maks jevnførende spenning i motorarmen                       | $MPa$    |

## 3.1.3. Formler

Tabell 3.3. Liste over hovedformler som benyttes i rapporten.

| Beskrivelse               | Hovedformel  | Indeks |
|---------------------------|--|--------|
| Newtons andre lov         | $F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$                        | (1)    |
| Virkningsgrad for propell | $\eta = \frac{\text{Propelleffekt}}{\text{Motoreffekt}}$ | (2)    |
| Effekt tilført propell    | $P = 2\pi nQ$  | (3)    |



Tabell 3.3. Forts.

| Beskrivelse                      | Formel  | Indeks |
|----------------------------------|---|--------|
| Moment                           | $M = Fl$  | (4)    |
| Normalspenning                   | $\sigma = \frac{F_x}{A}$  | (5)    |
| Skjærspenning                    | $\tau = \frac{F_y}{A}$  | (6)    |
| Bøyepening                       | $\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{M_b y}{I}$                                    | (7)    |
| Jevnførende spenning (Von Mises) | $\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$ | (8)    |
| Sikkerhetsfaktor mot flyt        | $\eta_f = \frac{R_e}{\sigma_{jf}}$  | (9)    |

### 3.2. Metodebruk

For å effektivisere og systematisere prosessene i arbeidet benyttes det flere relevante produktutviklingsmetoder. Disse metodene fungerer som verktøy for å sikre god arbeidsflyt, tverrfaglig samarbeid og struktur i arbeidet. Videre presenteres metodene som benyttes i rapporten.

#### 3.2.1. IPD (Integrated Product Development) [17]

Integrert produktutvikling er et rammeverk som brukes innen konseptutvikling og produktrealisering for å nå prosjektets målsetninger. Metoden benyttes for å sikre at utviklingsprosessen blir ryddig og strukturert, med tverrfaglig samarbeid fra prosjektets tidlige faser. Dette tillater de ulike fagområdene å iverksette og samkjøre ideer og egenskaper i prosjektet på en naturlig og organisk måte. For å muliggjøre dette er god data- og informasjonsflyt en essensiell del av integrert produktutvikling. Siden dette prosjektet gjøres for NMBU inngår også HMS i IPD-rammeverket. Under listes hovedelementene i IPD, som brukes som en sjekklister gjennom produktutviklingsprosessen.

#### Hovedelementer i IPD [18]

1. Forstå og tilpasse seg kunde- og markedsbehov.
2. Planlegge og administrere produktutviklingsprosessen.
3. Benytte produktutviklingsgrupper og team.
4. Integrere prosessdesign.
5. Administrere kostnader fra prosjektets start.
6. Involvere leverandører og underleverandører tidlig i prosjektet.
7. Utvikle robuste design.
8. Integrere relevante dataverktøy som DAK/CAE i utviklingsprosessen.

9. Simulere egenskaper og fremstillingsprosesser digitalt.
10. Lage en effektiv utviklingstilnærming.
11. Kontinuerlig forbedre utviklingsprosessen.

Tabell 3.4. Oversikt over bruk av IPDs hovedelementer i rapporten.

| Element | Implementering i masterarbeidet  |
|---------|--|
| 1.      | Tilpasse produkt og prosesser i henhold til NMBUs retningslinjer og verdier ved bruk av Pughs metodikk og QFD.                   |
| 2.      | Systematisere og danne rammeverk for prosjektet ved bruk av prosjektplan og milepæler.   |
| 3.      | Regelmessig samarbeid med veileder og fagfolk ved fakultetet.  |
| 4.      | Tilpasse produktdesignet til produksjonsprosesser og fokusere på holdbarhet.   |
| 5.      | Holde oversikt over arbeidstimer for involverte parter og kostnader knyttet til produksjon og materialer.                        |
| 6.      | Involvere NMBUs verksted og danne oversikt over potensielle delleverandører tidlig.  |
| 7.      | Foreta grundig spesifisering, funksjonsanalyse og konseptvalg for å sikre et gjennomtenkt design og en robust produktoppbygning. |
| 8.      | Bruke relevante dataverktøy der de kan assistere og effektivisere prosessen. Eks. Solidworks, Lucidchart etc.                    |
| 9.      | Benytte Solidworks til konstruksjon og Ansys til FEM-beregninger.  |
| 10.     | Sette opp prosessdiagram for å visualisere og systematisere prosjektets faser og hvordan de er knyttet sammen.                   |
| 11.     | Bruke prosessdiagrammet aktivt, og gå tilbake og gjøre endringer i tidligere prosesstrinn ved behov.                             |

### 3.2.2. Pughs metodikk [19]

Pugh introduserte mot slutten av 1980-tallet et metodesett for produktutvikling som heter Total Design. Metoden bygger på tre hovedelementer, som er design- og utviklingskjernen (Design Activity Model), produksjonsspesifisering (Product Design Specification) og konseptvalg (Method of Controlled Convergence).

Design- og utviklingskjernen dekker en markedsbetraktning for produktets utvikling og design. Her kartlegges behovene som må dekkes for at produktet skal kunne innlemmes i det etablerte markedet eller om det kan konstruere et nytt marked.

Produktsspesifiseringen bruker betraktningene som er gjort i design- og utviklingskjernen til å spesifisere mål og krav for produktet. Her fastlegges metriske toleranser og grenseverdier som produktet skal overholde, noe som gjør at videre faser har tydeligere retningslinjer å jobbe ut fra.

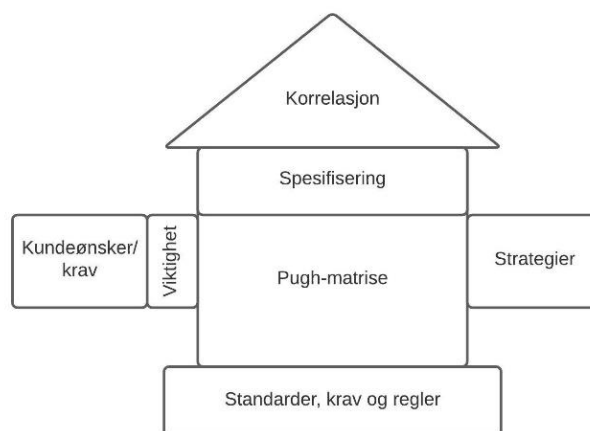
Konseptvalget omtales gjerne som metoden for styrt konvergens, og er en systematisk metode for å utføre objektiv seleksjon i utviklingsprosesser basert på ønskede egenskaper. Verktøyet fungerer ved at hvert løsningsalternativ får en poengsum basert på hvor godt det oppfylder hvert kriterium. Disse kriteriene kan også tildeles en vektingsgrad som multipliseres med poengsummen for hvert av kriteriene. Dette gjør at metoden kan brukes til å selektere med gitte egenskaper i fokus der den gir en objektiv oversikt over hvordan løsningsalternativene oppfylder kriteriene. I arbeidet videre benyttes det poengsum mellom 1 og 5, med vektning og oppfyllelsesgrad som vist under.

Tabell 3.5. Poengskala for konseptvalg ved Pughs metodikk.

| Poengskala for løsningsalternativer |             |        |              |                 |
|-------------------------------------|-------------|--------|--------------|-----------------|
| 1                                   | 2           | 3      | 4            | 5               |
| Dårlig                              | Lite bra    | Bra    | Meget bra    | Særdeles bra    |
| Vekting av kriterier                |             |        |              |                 |
| 1                                   | 2           | 3      | 4            | 5               |
| Ikke viktig                         | Lite viktig | Viktig | Meget viktig | Særdeles viktig |

### 3.2.3. House of Quality og QFD (Quality Function Deployment) [20], [21]

Quality Function Deployment er et hjelpemiddel innen produktutvikling som brukes for å gjøre om kundens forventninger og tilbakemeldinger til tekniske egenskaper og spesifikasjoner. For å systematisere og strukturere denne prosessen brukes verktøyet House of Quality. Dette er en matrise som huser kundenes ønsker med viktighetsgrad på den ene siden og tilhørende strategier, egenskaper og tekniske krav på den andre siden. Tanken bak QFD er å skreddersy produktet med kundenes krav og ønsker i fokus på en oversiktlig og systematisk måte.



Figur 3.2. Illustrasjon av kvalitetshuset med arbeidsrelevante elementer.

### 3.2.4. SCAMPER [22]

Osbornes SCAMPER-metodikk er et verktøy som brukes til å finne alternative løsninger ved å vri og vende på en tankegang eller ide. Akronymet representerer ordene Substitute (Erstatte), Combine (Kombinere), Adapt (Tilpasse), Magnify (Forstørre), Minify (Minimere), Eliminate (Fjerne), Elaborate (Utdype), Rearrange (Omorganisere) og Reverse (Reversere). Hvert av

ordene angir et trinn som strukturerer den kreative prosessen og tankegangen. Verktøyet brukes i utviklingsprosesser for å tenke ut av boksen eller som et hjelpemiddel når en har kjørt seg fast, og den foregår gjerne intuitivt.

### 3.2.5. Modularisering [23]

Modularisering er en teknikk som brukes for å øke et produkts fleksibilitet og minke kompleksiteten. Ved å benytte standardiserte komponenter og smarte løsninger i produktets oppbygning kan produksjonslinjen, lagerhold og vedlikehold forenkles, og prisen holdes nede. Modularisering gjør det også mulig å justere produktegenskapene ved å sette sammen deler i ulike konfigurasjoner. Typiske konfigurasjoner innen moduloppbygning er lineær sammensetning, perpendikulær sammensetning, samt delvis- og fullstendig integrert sammensetning. Moduloppbygning brukes blant annet i store batteripakker til elektriske biler. Disse er gjerne bygd opp av standardiserte moduler, slik at kapasiteten justeres etter behov i forskjellige modeller. Et annet godt eksempel på fleksibiliteten moduloppbygning gir, er mulighetene ved bygging med legoklosser.

## 3.3. Datahjelpemidler og søk

Datahjelpemidlene er valgt på bakgrunn av brukserfaring og i hvilken grad de er relevante for arbeidsfasene. Dataverktøyene som benyttes i prosjektarbeidet er listet i tabellen under.

Tabell 3.6. Dataverktøy som benyttes i prosjektet

| Dataverktøy                                | Anvendelse                                 |
|--|--|
| Microsoft – <i>Word 2021</i>               | Rapportering og dokumentering              |
| Microsoft – <i>Excel 2021</i>              | Konstruksjon og framstilling av diagrammer |
| AutoDesk - <i>SketchBook</i>               | Konstruksjon av skisser                    |
| Microsoft - <i>Paint</i>                   | Konstruksjon og redigering av figurer      |
| Lucid Software – <i>Lucidchart</i>         | Fremstilling av flytskjema                 |
| Dassault Systèmes – <i>Solidworks 2019</i> | DAK-arbeid                                 |
| Ansys – <i>Mechanical 2020</i>             | FEM-analyser                               |
| Ansys – <i>Granta EduPack 2020</i>         | Materialdata                               |

For innhenting av testmateriell og andre ressurser på nettet ble søkemotoren Google brukt. GrabCad ble benyttet for å hente DAK-modeller som ble brukt i visualiseringer og sammenstillinger. I tabellen på neste side listes brukte søkeord med oversikt over hvilke seksjoner de ble brukt i.

Tabell 3.7. Oversikt over søkeord og tilhørende kapitler.

| Seksjon | Kapittel                        | Søkemotor   | Søkerord:  |
|---------|---------------------------------|-------------|--|
| 1.1.    | Bakgrunn                        | Google.no   | Traffic, congestion, urbanization, klimamål, miljø, nybilsalg      |
| 1.2.    | Eksisterende løsninger          | Google.no   | Persondrone, PAL-V, Airbus, Uber                                   |
| 4.1.    | Virkemåte for propeller         | Google.no   | Propeller, lift aerodynamics,                                      |
| 4.2.    | Forhold ved elektriske motorer  | Google.no   | Electric motor, lynch motor, AC, DC                                |
| 4.3.    | Statistiske beregninger         | Google.no   | Statikk, krefter, spenning, moment                                 |
| 4.5.    | Testing av motorer og propeller | Google.no   | Propeller test rig, thrust, force, Load cell, compression, tension |
| 11.2.   | Materialvalg                    | Google.no   | Aluminium, konstruksjonsstål, hulprofil                            |
| 10.1.   | Sammenstilling                  | GrabCad.com | LEM 200, propeller, load cell                                      |
| 12.1.   | Renderte fremstillinger         | GrabCad.com | Fence, computer, controller, office chair, workshop                |

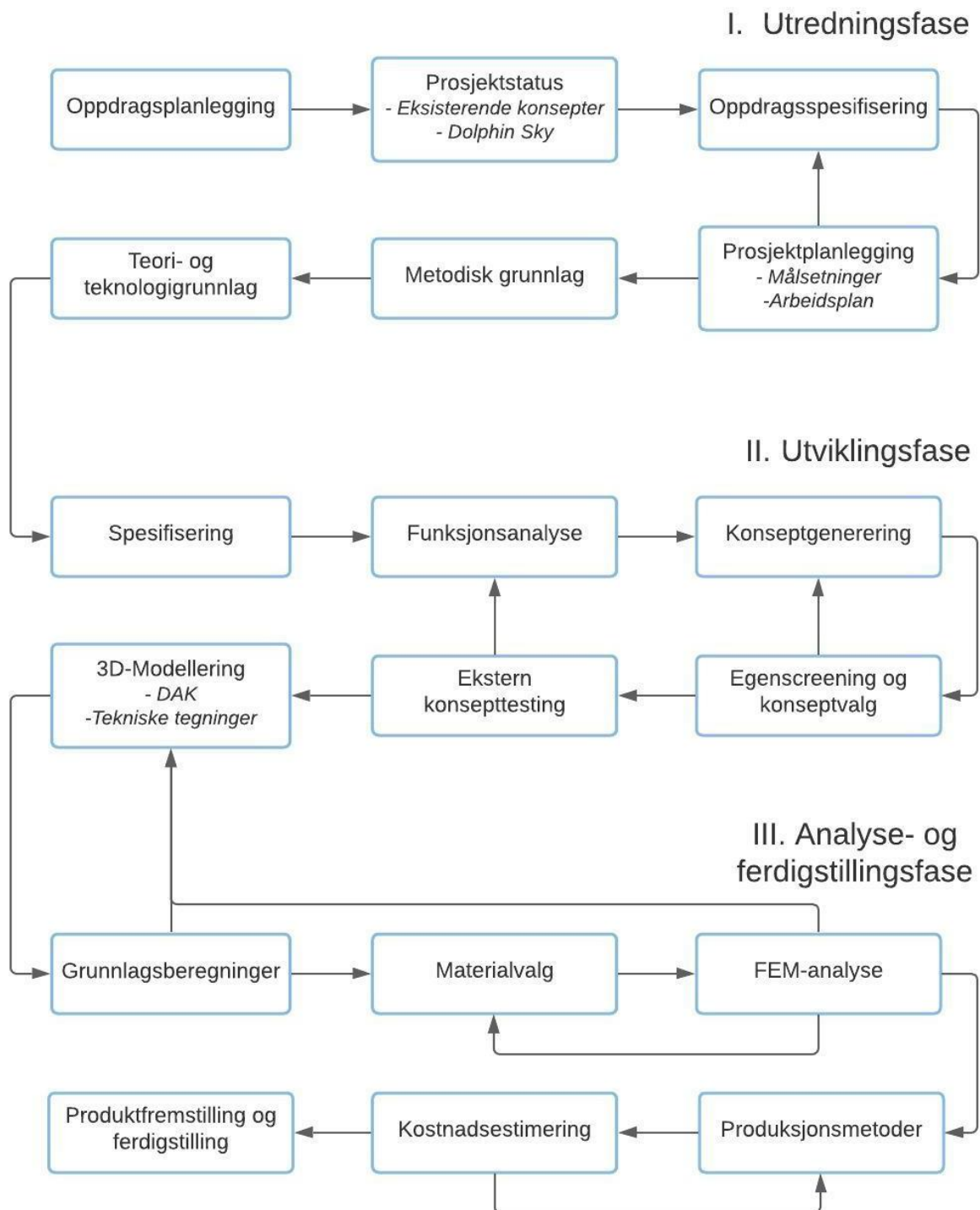
### 3.4. Kvalitetssikring

Prosjektet er kvalitetssikret ved bruk av anerkjente og relevante standarder og forskrifter. Følgene verktøy er brukt i arbeidet:

- Utviklingsprosesser og forhold ved produksjon knyttes til relevante deler av NS-EN ISO 9000 og NS-EN ISO 9001 [36].
- For tekniske tegninger benyttes standarden NS-EN ISO 128, som er integrert i Solidworks.
- Grunnlagsberegninger, løsningsvalg og produksjonsmetoder blir vurdert og kontrollert ved eksperttesting [34], [45], [46].
- Maskinforskriften legges til grunn for konstruksjonsarbeidet [37].
- Ved bruk av kilder og henvisninger er det lagt spesielt vekt på bakgrunns litteratur via anerkjente publiseringskanaler, dvs. fagbøker og vitenskapelige artikler på forlag.
- For å sikre at rapportens illustrasjoner er relevante og konkrete er alle skisser og figurer uten kildehenvisning produsert av forfatter.

### 3.5. Prosesdiagram

Prosesdiagrammet gir en oversikt over prosjektets faser med piler som representerer fremdrift og prosesstankegangen.



Figur 3.2. Prosesdiagrammet er en visualisering av prosjektets prosesstrinn. Iterasjonene representerer prosess- og kvalitetstankegangen fra ISO9000 og ISO 9001 for å systematisere de interagerende fasene og utviklingsprosessen som helhet.

## 4. Teori og teknologiutredning

I dette kapitlet gjøres det rede for det teoretiske grunnlaget som er relevant for utredning og utvikling av testrigger. Det blir redegjort for propell- og belastningsteori, elektriske motorer og eksisterende testrigger.

### 4.1. Virkemåte for propeller

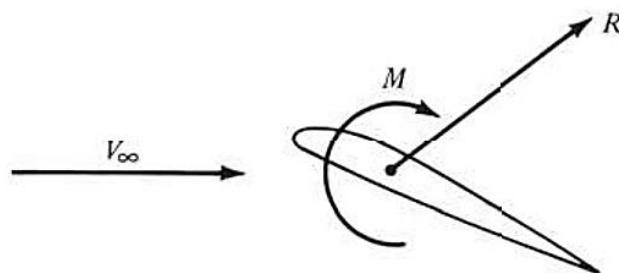
En propell er et redskap som brukes til å konvertere en rotasjonsbevegelse til fremdrift i fluider. Prinsippet baserer seg på Newtons tredje lov, der propellens bevegelse gjennom luften fører til en endring i væskestrømmen som produserer en kraft på propellen. Fremdriftssystemet benyttes hovedsakelig i skipsfart, og i luftfart der andre metoder som jet-fremdrift ikke er hensiktsmessig.

#### 4.1.1. Propellens aerodynamikk

Et propellblad kan anses som en liten flyvinge som produserer løft. Propellens bevegelse gjennom vinden endrer retningen på væskestrømmen slik at den blir pekende skrått nedover fra baksiden av vingen. Denne endringen i strømningsretning og tilhørende løftkraft forklares ved Newtons andre og tredje lov. Newtons andre lov er gitt ved:

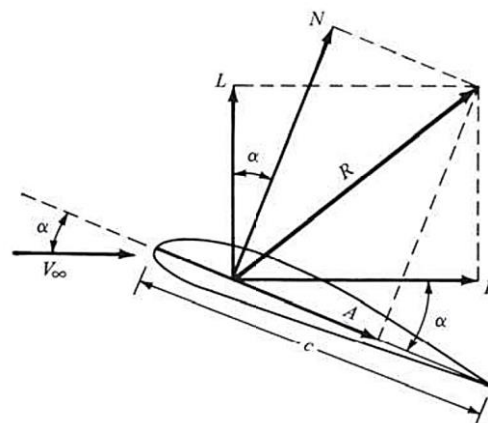
$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \quad (1)$$

Alle aerodynamiske krefter og momenter som oppstår kommer som følger av trykk- og skjærspenningsfordeling på vingen. Trykket virker normalt på en gitt flate, og skjærspenningen virker tangentielt på flaten. Sammen gir disse en resultantkraft og et moment på vingen når den beveger seg gjennom en fluid som vist under [24].



Figur 4.1. Resultantkraft og moment på et vingetverrsnitt der  $V_\infty$  representerer vindhastigheten før den har blitt påvirket av vingens tilstedeværelse [24].

Resultantkraften kan videre dekomponeres for å se på de individuelle kraftkomponentene som vist på neste side.



Figur 4.2. Resultantkraften på vingen med tilhørende kraftkomponenter [24].

I figur 4.2. representerer D luftmotstand, N normalkraft, A aksialkraft og L løftekraft for vingetversnittet.

#### 4.1.2. Virkningsgrad

Virkningsgraden til en propell forklarer hvor mye av motorens effekt som omgjøres til propelleffekt [33]:

$$\eta = \frac{\text{Avgitt propelleffekt}}{\text{Tilført motoreffekt}} \quad (2)$$

Her spiller propelltype, profil og antall blader inn. Testtriggen må dimensjoneres for å håndtere den kraftigste aktuelle motoren og den mest effektive propellkonfigurasjonen. Virkningsgraden påvirkes også i stor grad av om propellen har fast eller variabel stigningsgrad. Det må tas en vurdering om dette skal implementeres på Dolphin Sky da det vil føre til økt kompleksitet.

Tilført effekt til propellen kan finnes ved følgende formel [28]:

$$P = 2\pi nQ \quad (3)$$

Der  $n$  er omdreininger per minutt og  $Q$  er dreiemomentet tilført propellen.

## 4.2. Forhold ved elektriske motorer og luftfart

For å produsere dreiemomentet som driver propellen kreves det en motor. Innenfor flyindustrien har dette momentet tradisjonelt kommet fra forbrenningsmotorer, siden det ikke har vært praktisk mulig å oppnå lang nok rekkevidde med elektriske systemer. I nyere tid har det dog blitt eksperimentert med elektrisk drift på luftfartøy, og med dagens teknologi viser el-drift seg å være den løsningen med størst potensial for lokal lufttransport.



#### 4.2.1. Motortyper

En elektrisk motor er en maskin som overfører elektrisk energi til mekanisk energi. Elektriske motorer finnes i forskjellige typer, der noen går på likestrøm (DC) og andre på vekselstrøm (AC). Innenfor likestrømsmotorer er det to hovedkategorier, børstemotorer og børsteløse motorer. Børstemotorene er robuste, rimelige og er enkle å regulere, mens børsteløse varianter har høyere effektivitet og lavere vekt på bekostning av høyere pris. Vekselstrømsmotorer er gjerne noe kraftigere enn likestrømsmotorer, men mindre effektive. For bruk i elektriske kjøretøy er både AC- og DC-motorer aktuelle, og valget må tas på bakgrunn av ønskede egenskaper [30].

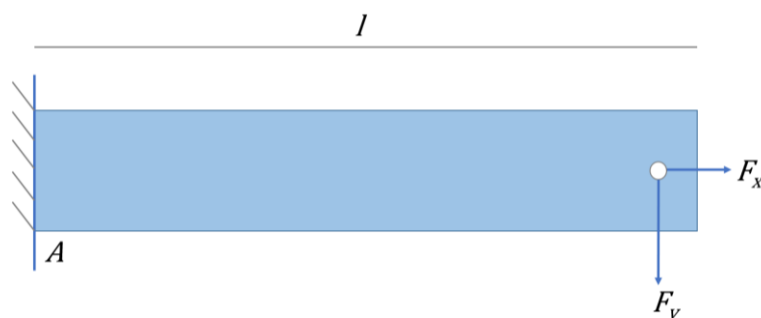
#### 4.2.2. Lynch motor

Den til nå mest aktuelle motorserien for Dolphin Sky, Lynch LEM-200, er likestrøms børstemotorer. Dette er lettevektsmotorer med permanent magnetfelt som kan nå opptil 93% effektivitet [25]. Den kraftigste modellen i serien, D135 RAGS, har en oppgitt effekt på 36 kW og veier 11 kg (vedlegg I). Siden motoren drives av likestrøm brukes det børster til å reversere strømretningen i armaturen. Børstene er slidedeler som må byttes periodisk, men det er en pålitelig og velprøvd teknologi. Lynch motorene har også justerbare børster, som gjør det mulig å kjøre motoren i begge retninger.

#### 4.3. Statiske belastninger

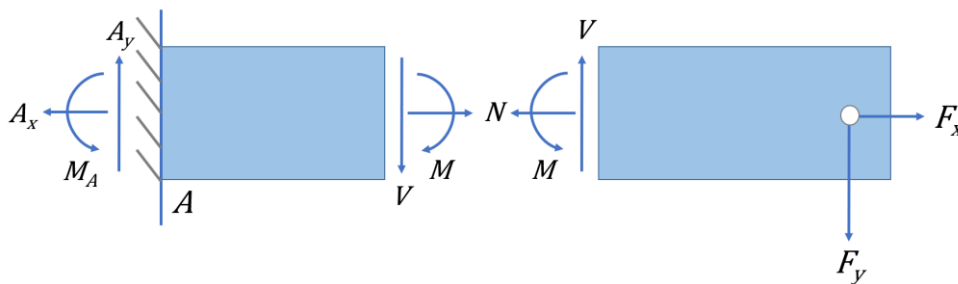
For testriggen blir de statiske belastningene som følger av egenvekt og påkjenninger fra motor sentrale for dimensjoneringen. Ved testing vil belastningene kunne bli store, og det må tas hensyn til sikkerhetsfaktorer for å sikre strukturell integritet. Også fra et sikkerhetsperspektiv er det essensielt at riggen er solid og ikke opplever plutselige brudd. Videre vil viktige begreper innen statikk gjennomgås for å danne grunnlaget slik at konstruksjonen blir robust, med smarte løsninger for å unngå unødvendige belastninger.

For å illustrere krefter og momenter i et element brukes en utkragerbjelke som er fast opplagret i den ene enden, og som utsettes for en last med x- og y-komponent i andre enden, som vist under:



Figur 4.3. Utkragerbjelke med last og fast opplagring i A.

Kreftene som oppstår i opplageret kalles opplagerkrefter. Opplagertypen avgjør hvilke krefter og momenter som kan tas opp av opplageret. Denne bjelken er fast opplagret og kan derfor ta opp krefter i alle retninger, samt momenter. Når elementet utsettes for en last, vil det også oppstå krefter i elementet for å motvirke lastkreftene. Disse indre kreftene omtales som aksialkrefter (N) og skjærkrefter (V) og kan vises ved å lage et snitt i bjelken. Aksialkreftene virker normalt på elementtverrsnittet og skjærkreftene virker på tvers av tverrsnittet. Siden y-komponenten til lasten ikke er på samme linje som V oppstår det også et moment i snittet [26]. Figuren under viser bjelken med innlagt snitt og beskriver situasjonen:

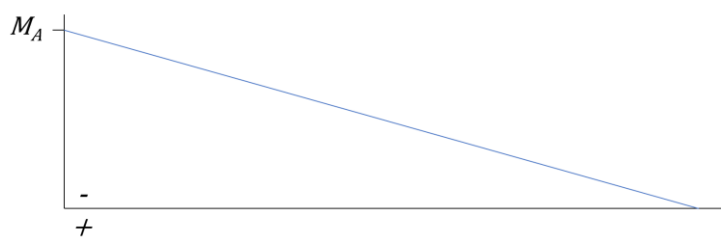


Figur 4.4. Utkragerbjelke med snitt som viser krefter og momenter i bjelken.

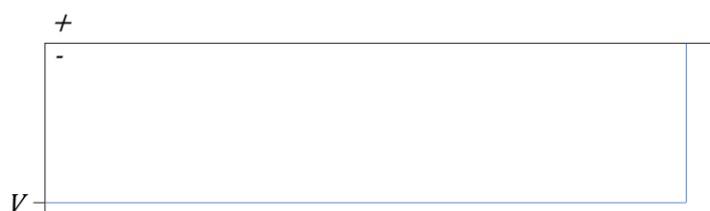
Opplagerkreftene i x- og y-retning vil tilsvare lastkreftene, men i motsatt retning. Momentet i opplageret er gitt ved formelen:

$$M_A = F_y l \tag{4}$$

Momentet vil derfor øke lineært med lengden, og være størst ved opplageret A i bjelkesituasjonen over. For å visualisere momentet over armen tegnes det gjerne momentdiagrammer. Momentdiagrammet og skjærkraftdiagrammet for bjelken er vist under, med strekkspenning på oversiden av bjelken og trykkspenning på undersiden:



Figur 4.5. Momentdiagram for utkragerbjelken.



Figur 4.6. Skjærkraftdiagram for utkragerbjelken.

Normalspenning, som er normalkraften per arealenhet i tverrsnittet, er gitt ved følgende formel:

$$\sigma = \frac{F_x}{A} \quad (5)$$

Om denne gir trykkspenning ( $\sigma_t$ ) eller strekkspenning ( $\sigma_s$ ) kommer an på kraftretningen. I tilfellet som vist i figur 4.1. blir det strekkspenning, siden kraften  $F_x$  strekker utkragerbjelken.

Den gjennomsnittlige skjærspenningen i et snitt finnes på samme måte, ved å ta skjærkraften i det aktuelle snittet og dele på tverrsnittarealet:

$$\tau = \frac{F_y}{A} \quad (6)$$

Bøyespennning er gitt ved følgende formel:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{M_b y}{I} \quad (7)$$

Der  $M_b$  er bøyemoment,  $W$  er motstandsmoment,  $I$  er annet arealmoment og  $y$  er avstand fra nøytralaksen til spenningspunktet.

Von Mises hypotese er foretrukket ved beregninger for duktile materialer, som aluminium og konstruksjonsstål. Hypotesen angir at formendringsarbeidet som følger av skjærspenningene (deviasjonsarbeidet) må holdes lavere enn arbeidet som tilføres på strekkstaven ved flyting eller brudd. Von Mises gir [27]:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

Der flyting oppstår når:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \sigma_y} \geq R_e$$

Når  $\sigma_y = 0$ , blir formelen:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Sikkerhetsfaktor mot flyt er gitt ved:

$$\eta_f = \frac{R_e}{\sigma_{jf}} \quad (9)$$

#### 4.4. Dynamiske belastninger

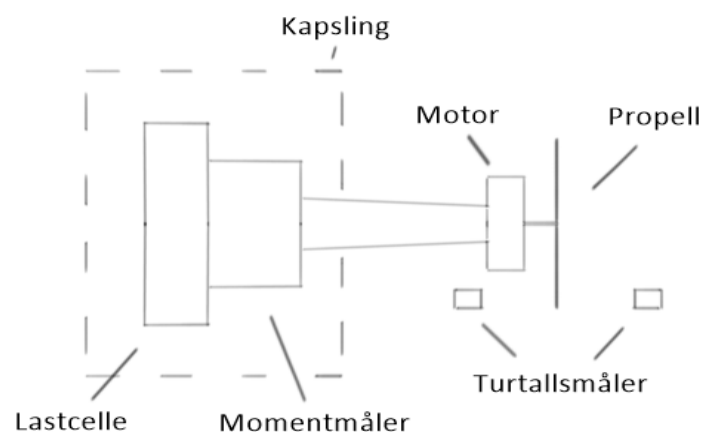
Dynamiske belastninger er kraftpåkjenninger som varierer med tiden. Testtriggen vil under testing oppleve dynamiske belastninger som resultat av turtallsendringer i motor og vibrasjoner fra roterende deler. Dette er påkjenninger som over tid vil kunne utsette konstruksjonen for utmatting. Grunnet begrenset tid i prosjektarbeidet vil det ikke gjøres beregninger på dynamiske belastninger, men det vil inkluderes tiltak for å begrense faren for utmatting. Dette gjøres ved å dimensjonere for utmatting i konstruksjonen gjennom høyere sikkerhetsfaktorer.

#### 4.5. Testing av motorer og propeller

For å utvikle en velfungerende testtrigg som oppfyller produktmålene er det flere hensyn som må tas. Det har blitt undersøkt eksisterende testoppsett, så vel som Thømt [13] sin tidlige nedskalerte rigg, for å danne en oversikt over viktige elementer og faktorer som kan påvirke testresultatene. Spesielt testtriggen knyttet til forsøk på RC-motorer har blitt nøye gjennomgått, da disse deler mange likheter til metode og oppsett som riggen for Dolphin Sky. Slike rigger er utformet for å kunne teste forskjellige motor- og propellkonfigurasjoner, samtidig som de må ta hensyn til aerodynamikk og forstyrrelser i luftstrømmen.

##### 4.5.1. Forsøksoppsett

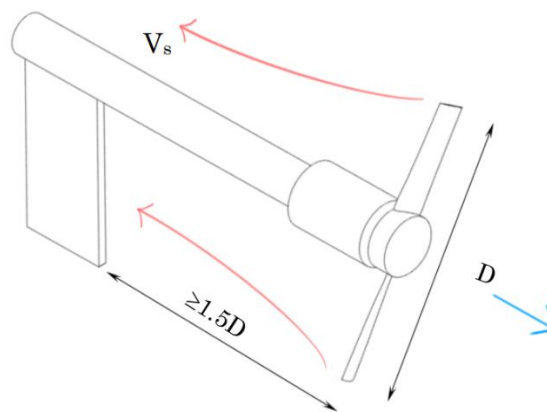
Hovedmålet for testtriggen er å måle thrustverdien for aktuelle motor- og propellkonfigurasjoner. For å måle thrustkraften er det mest naturlig å bruke en egnet lastcelle som er i mest mulig upåvirket kontakt med motoren. Under testing kan også andre faktorer som motorturtall og avgitt moment fra thrusteren være ønskelig å logge. Momentet kan avleses ved bruk av en momentmåler. Figuren under viser en skjematisk fremstilling av en testtrigg brukt for statisk testing av mikropropeller med diameter mellom 57 og 127 mm [28].



Figur 4.7. Illustrasjon av testtrigg med mulighet for logging av turtall, thrust og moment.

Illustrasjonen på forrige side viser de viktigste komponentene for måling av relevante verdier ved testing. Lastcellen brukes til å måle thrustkraften fra motor- og propellkonfigurasjonen, mens momentmåleren logger det avgitte momentet. Et rimeligere alternativ til momentmåleren er en lastcelle som måler moment. Turtallsmåleren oppgir propellens turtall. Måling av momentet som tilføres propellen, og turtall er nødvendig dersom propelleffekten skal regnes ut (jfr. formel 2.). Kapslingen er et element som beskytter måleapparatene mot luftstrømmen fra den roterende propellen.

Ved strømnings simuleringer i SolidWorks kom Thømt frem til at sammentrekningen av dragsuget bak propellen flatet ut ved en avstand  $1,5 D$ , der  $D$  er propellens diameter [13]. Rigger ble derfor utformet for å minimere forstyrrelser i dette området for å kunne måle thrusten fra propellen i et svevescenario, upåvirket av andre faktorer. På figuren representerer de røde linjene strømningsretningen, mens den blå pilen viser fremdriftsretningen.

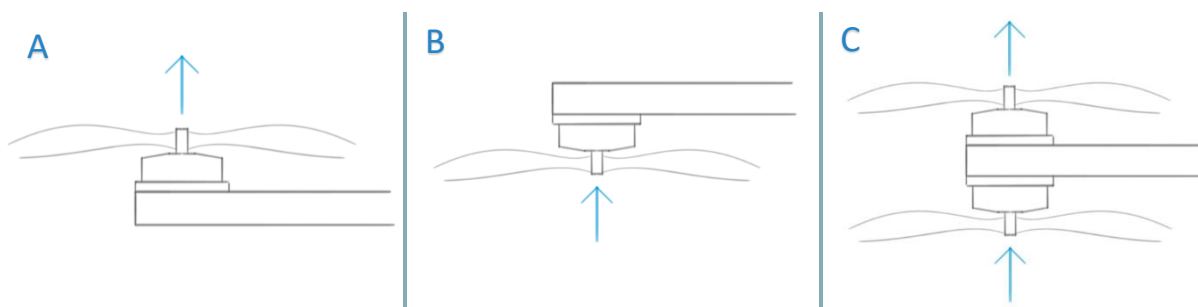


Figur 4.8. Illustrasjon av dragsuget bak propellen [13].

#### 4.5.2. Konfigurasjoner og propelloppsett

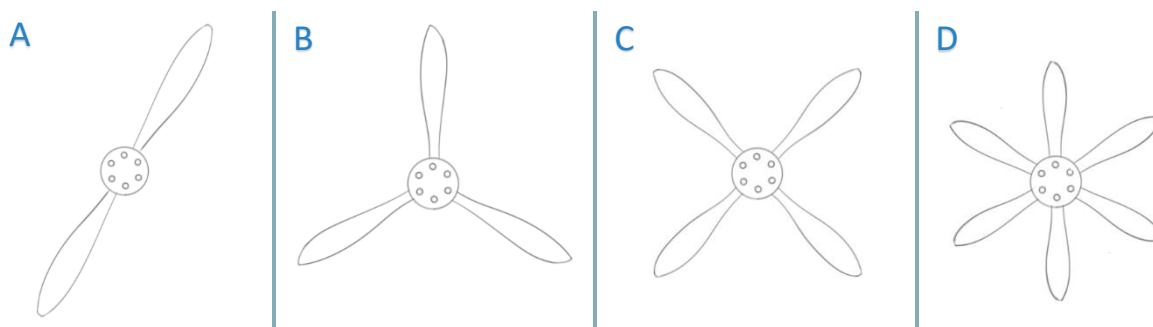
Avhengig av testscenariet kan forstyrrelser fra propellens luftstrøm være kritiske. For Dolphin Sky vil det være aktuelt å kjøre forsøk med uforstyrret luftstrøm for å simulere flyving, og med bakkeeffekt for å simulere et lettings- og landingsscenario. For testing av motor og propell som brukes i fly er det mest vanlig å bruke testtrigger med propell som står vinkelrett på bakken, da motorakslingen vil være rettet parallelt med bakken under flyving og letting. For multicoptere og andre VTOL-fartøy må også ytelsen til motor og propell kunne testes med bakkeeffekt. Dette kan f.eks. gjøres ved å ha justerbar vinkling til motoren på testtriggeren for å endre mellom vertikal og horisontal stilling, eller ved å benytte en rigg med vertikalstilt motoraksel som kan kjøre propellen i begge retninger.

Som nevnt tidligere er det utredet versjoner med både fire og seks motorarmer for Dolphin Sky. Konseptet med seks armer benytter seg av seks motorer i trekkekonfigurasjon, men det kan også bli aktuelt med skyvekonfigurasjon. Med fire armer er det derimot aktuelt å kjøre to motorer per arm med kontraroterende propeller. Dersom det skal testes for denne konfigurasjonen må rigger utstyres med doble motorfester og et målesystem som tillater dette. Motorarmene vil også kunne påvirke thrusten under flyving fordi luftstrømmen vil passere armen. Det er derfor ønskelig å modellere rigger med en arm som i størst mulig grad simulerer den faktiske armen på Dolphin Sky. På neste side vises aktuelle thrusterkonfigurasjoner for Dolphin Sky:



Figur 4.9. Aktuelle thrusterkonfigurasjoner: A) Trekk, B) Skyv og C) Dobbel kontraroterende.

Foretrukket propelloppsett påvirkes av faktorer som motoreffekt, turtall, propellklaring og ytelseskrav. Generelt, under de samme forholdene, vil færre propellblader gi høyere effektivitet, men ta større plass. Det kan derfor bli aktuelt å øke propellantallet for å minke diameteren til propellen. Med lavere diameter blir også hastigheten på propellens tupp lavere, noe som videre fører til lavere støynivåer [29]. For å undersøke hvilke rotor-konfigurasjoner som gir ønskede egenskaper må det utredes en løsning for raskt bytte mellom ulike propelloppsett. Rigger skal tillate testing med 2, 3, 4, og 6 propellblader.



Figur 4.10. Aktuelle propellkonfigurasjoner: A) 2-blads, B) 3-blads, C) 4-blads og D) 6-blads. Legg merke til at propelldiameteren synker ved høyere bladantall.

I arbeidet til Thømt [13] ble totalvekten på luftfartøyet estimert til 450 kg. Med maks vertikal akselerasjon valgt til  $2,0 \text{ m/s}^2$  ble nødvendig thrust beregnet til 1,4 ganger fartøyet totalvekt. Fordelt på fire armer gir dette nødvendig thrust per arm:

$$T_n = \frac{450 * 1,4 * 9,81}{4} = 1545 \text{ N}$$

Dette er anbefalt thrust dersom fartøyet veier 450 kg. Det er et tidlig vektestimat, og konseptet er i stadig endring. Derfor tas det videre i rapporten utgangspunkt i at det kan bli aktuelt å øke denne thrusten med 33%, og at rigger skal ha kapasitet til å kjøre motor- og propellkombinasjoner som da gir 2055 N med thrust. Dette er nok thrust til flyving med en anbefalt flyvekt på 600 kg. Dersom konseptet med seks armer blir aktuelt vil thrusten bli noe lavere per arm, men rigger må dimensjoneres for å kunne teste begge scenariene.

#### 4.5.3. Måleutstyr

En lastcelle med riktige spesifikasjoner er det naturlige valget for å måle thrusten fra den gitte motor- og propellkonfigurasjonen. Standard lastceller som måler trykk og strekk er gjerne rimelige og kan leveres med stor massekapasitet. 2055 N tilsvarer 210 kg og er vel innenfor størrelsesordenen til kommersielle lastceller. Et eksempel på en slik lastcelle er lagt ved (vedlegg II), og er tilgjengelig i forskjellige kapasiteter fra 50 kg til 10 tonn. Senere vil det gjøres en vurdering på om det er hensiktsmessig med en stor lastcelle, eller flere små for å måle thrust fra motor og propell. Figur 4. viser ulike typer lastceller som kan være aktuelle.



Figur 4.11. Et utvalg forskjellige typer lastceller: A) Etpunkts lastcelle, B) S-type lastcelle for måling av strekk/trykk og C) kompresjonscelle [32].

## 5. Spesifisering

Her fastsettes produktets hovedmål med utfyllende delmål, samt produktegenskaper med egenskapsvekting. Det settes metriske grensespesifikasjoner for testriggeren som vil brukes videre som utgangspunkt for riggens grovspekifikasjoner.

### 5.1. Produktmålsetninger

#### 5.1.1. Hovedmål

Hovedmålet for produktet er å tillate stasjonær testing av aktuelle flymotorer for Dolphin Sky med relevante propelltyper. Testriggeren skal muliggjøre utprøving av ulike fullskala motor- og propellkonfigurasjoner med variasjonsmuligheter i propellbladformer og antall. Den skal i hovedsak kunne produseres og opereres i forsøk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.

#### 5.1.2. Delmål

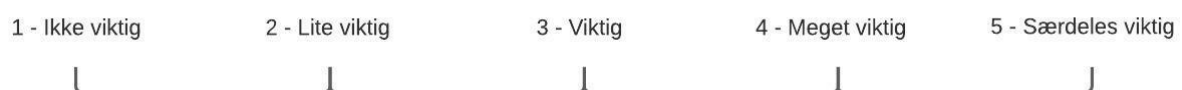
**Bruksmål** - Produktet skal være intuitivt og enkelt å bruke. Bytte av testkomponenter skal kunne gjøres raskt uten behov for spesialverktøy. Fremkommelighet for reparasjoner og vedlikehold skal være god.

**Konstruksjonsmål** - Riggeren skal ha en enkel konstruksjon og utforming med et åpent design der funksjonalitet og fleksibilitet er viktigere enn estetisk utforming. Det skal tilrettelegges for implementering av nødvendig sikkerhetsutstyr, og riggens utforming skal gjøre at det er lite rom for operatør å gjøre feil.

**Økonomimål** - Produktets kompleksitet skal holdes på et fornuftig nivå for å tillate produksjon ved NMBUs verksted og begrense produksjonskostnadene. Riggeren skal bestå av standardiserte deler og ha en symmetrisk oppbygning så langt det lar seg gjøre.

### 5.2. Produktegenskaper

Produktegenskapene er en rekke egenskaper produktet burde inneha og defineres på bakgrunn av produktmålene. Hver av egenskapene får en tilhørende vektingsgrad som angis etter hvor viktig egenskapen anses å være for oppnåelse av målene. Vektingen er gjort med Pughs metodikk (jfr. seksjon 3.2.2.) og følger poengskalaen i tabell 3.5.:



Figur 5.1. Skala for vektrangering av produktegenskaper.



Under følger produktegenskapene med vekting valgt på bakgrunn av produktets delmål. Egenskapene er fokusert omkring de viktigste forholdene, og som følger av dette har kun to av produktegenskapene oppnådd vektingsgrad mindre enn 3.

Tabell 5.1. Oversikt over produktegenskaper med vektingsgrad.

| Kriterium                   | Vekting | Begrunnelse  |
|-----------------------------|---------|--|
| <b>Bruksmål</b>             |         |  |
| Brukervennlighet            | 3       | Produktet skal være enkelt å operere for brukeren. For at bytte mellom testkomponenter skal foregå effektivt skal behovet for verktøy minimeres.   |
| Vedlikehold og reparasjoner | 4       | Reparasjoner, vedlikehold og kalibrering skal kunne utføres uten fullstendig demontering av produktet. En åpen konstruksjon med god fremkommelighet er ønskelig.   |
| Mobilitet                   | 2       | Det kan bli aktuelt å forflytte produktet samtidig som det kan ankres fast ved testing. Tilrettelegging for dette vil øke kompleksiteten, men kan bli nødvendig med mindre riggen får en designert plass der den kan være stasjonert.                        |
| <b>Konstruksjonsmål</b>     |         |  |
| Sikkerhet                   | 5       | Ved testing vil det oppstå store laster på riggen og det vil være roterende deler med svært høy fart. Sikre og solide løsninger er derfor essensielt for å minimere sjansene for brukerfeil og personskader.   |
| Estetikk                    | 1       | Produktets funksjonalitet og strukturelle integritet prioriteres over estetisk utseende. Det er de praktiske egenskapene som er viktige, og utformingen vil reflektere dette. Elegante løsninger som er funksjonelle vil dog implementeres der det er mulig. |
| Smart design                | 4       | Løsninger som forbedrer funksjonalitet og fleksibilitet vil prioriteres. Konstruksjonen skal designes med smarte løsninger, og en utforming som minimerer momenter og andre unødvendige påkjenninger.  |
| Tilpasset design            | 3       | For å sikre at flest mulig deler kan lages ved NMBU må konstruksjonen tilpasses for produksjon med tilgjengelige maskiner og produksjonsteknikker ved verkstedet.  |
| <b>Økonomimål</b>           |         |  |
| Kompleksitet                | 3       | Ved å holde kompleksiteten på riggen lav vil kostnadene og tidsbruken for konstruksjon av komponenter reduseres. Redusering av kompleksiteten skal ikke gå ut over funksjonalitet.   |
| Standarddeler og symmetri   | 4       | Bruk av standarddeler og symmetri i konstruksjonen vil senke produksjonskostnadene betraktelig. Dette vil også være fordelaktig ved reparasjoner.  |

### 5.3. Metriske grensespesifikasjoner

Grensespesifikasjoner defineres for å danne et utgangspunkt for design- og konsept-generering. De metriske spesifikasjonene brukes som et toleranseregister for målene testriggen skal holde seg innenfor. Det redegjøres for minimums- og maksimumsverdier som senere finpusses i prosjektets videre faser. For å fastsette grensespesifikasjonene brukes resultater fra tidligere arbeid knyttet til Dolphin Sky sitt fremdriftssystem. Siden testriggen skal være fleksibel og ha mulighet for testing av diverse motorer og propellstørrelser er det spesielt viktig at den er designet med litt ekstra kapasitet. Dette i fall det skulle bli aktuelt med større motorer og propeller enn først antatt.

Videre følger punkter som danner grunnlaget for grensespesifikasjonene. Flere av antagelsene baserer seg på tidligere masterarbeid og er valgt ut fra de største verdiene for de aktuelle målene:

- Thømt [13] redegjorde for propellstørrelser ved forskjellige motorkonfigurasjoner. Ved seks motorer ble propelldiameteren satt til 1300 mm for å gi nødvendig thrust med to propellblader for flyving med en totalvekt på 450 kg. Dette betyr at klaringen mellom propellsenter og riggen må være minst 650 mm for å kunne teste disse propellene. I quadcopter-format med dobbelmotorer vil nødvendig propelldiameter bli noe lavere per motor.
- Grensespesifikasjonene knyttet til riggens yttermål og vekt er valgt på bakgrunn av antagelser knyttet til propellsenterets høyde. Dette er omtrentlige verdier som kan endres når riggens utforming og konstruksjonsmessige begrensninger blir tydeligere underveis i designarbeidet.
- Bredden på motorarmen er valgt for å lage en realistisk representasjon av Dolphin Sky sin faktiske motorarm. Falstad sitt konsept [15] med seks armer og motorer, og El-Gewey [14] sitt konsept med fire armer og åtte motorer er begge aktuelle å teste og vil brukes som utgangspunkt for dimensjonering av testarmen. Falstad sitt konsept, som per dags dato er det mest aktuelle konseptet, er utformet med et teleskoperings-system der motorarmene har ulik bredde. For testriggen vil det kun være aktuelt å simulere ytterste delen av motorarmen som er med på å påvirke luftstrømmen bak propellen.
- Lastverdi vil variere under testing, men i tabellen tas det utgangspunkt i verdier ved full last. Fra seksjon 4.5.2 ble 1545 N funnet til å være nødvendig thrust per arm i quadcopter-format for flyving med en flyvekt på 450 kg, og 2055 N for 600 kg.
- For å oppnå nødvendig thrust i quadcopter-format med doble motorer på hver arm må effekten per motor være 25 kW dersom propelldiameteren settes til 1200 mm ifølge Thømt [13]. For hover kreves 9 kW per motor. Dette gjelder flyvekt på 450 kg.
- For å tillate testing av ulike propellkonfigurasjoner skal riggen konstrueres for å kunne huse oppsett med opptil seks propellblader per motor.

Tabell 5.2. *Metriske grensespesifikasjoner med utgangspunkt i tidligere gradsoppgaver.*

| Mål                                  | Min  | Maks | Enhet |
|--------------------------------------|------|------|-------|
| Klaring mellom propellsenter og rigg | 650  | 1000 | mm    |
| Riggbredde                           | 1000 | 2000 | mm    |
| Rigglengde                           | 1000 | 2000 | mm    |
| Rigghøyde uten propell               | 1000 | 2000 | mm    |
| Bredde på motorarm                   | 38   | 55   | mm    |
| Vekt eks. motor                      | 100  | 200  | kg    |
| Thrust                               | 1545 | 2055 | N     |
| Motoreffekt per motor                | 9    | 25   | kW    |
| Propellblader                        | 2    | 6    | -     |

Tabellen viser makslasten som ble funnet under seksjon 4.5.2 dersom flyvekten overgår tidlige estimater. Det vil legges inn ytterligere sikkerhetsmarginer (etter maskinforskriften) senere for å sikre mot slitasje på riggen og i fall det blir aktuelt å teste kraftigere motorer.

#### 5.4. Metriske grovspesifikasjoner

De metriske grovspesifikasjonene er tidlige estimater for produktdimensjonene som danner grunnlaget for videre designarbeid, og gir et bilde av størrelsesordenen til det ferdige produktet. Grovspesifikasjonene er valgt på bakgrunn av grensespesifikasjonene og holder seg innenfor toleranseområdene som ble valgt i tabell 5.2.

Tabell 5.3. *Metriske grovspesifikasjoner.*

| Mål                                  | Verdi | Enhet |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Klaring mellom propellsenter og rigg | 1000  | mm    |
| Riggbredde                           | 1500  | mm    |
| Rigglengde                           | 1500  | mm    |
| Rigghøyde uten propell               | 1000  | mm    |
| Bredde på motorarm                   | 50    | mm    |
| Vekt eks. motor                      | 150   | kg    |
| Maks thrust                          | 2055  | N     |
| Maks total motoreffekt               | 66,5  | kW    |
| Maks propellblader                   | 6     | -     |

Grovspesifikasjonene baserer seg på følgende begrunnelser:

- Klaringen mellom propellsenter og testriggen velges til maksverdien fra grensespesifikasjonene. Dette for å gi rom for testing av større propeller i fall dette blir aktuelt, og for å minimere påvirkningen fra konstruksjonselementer rundt propellen.

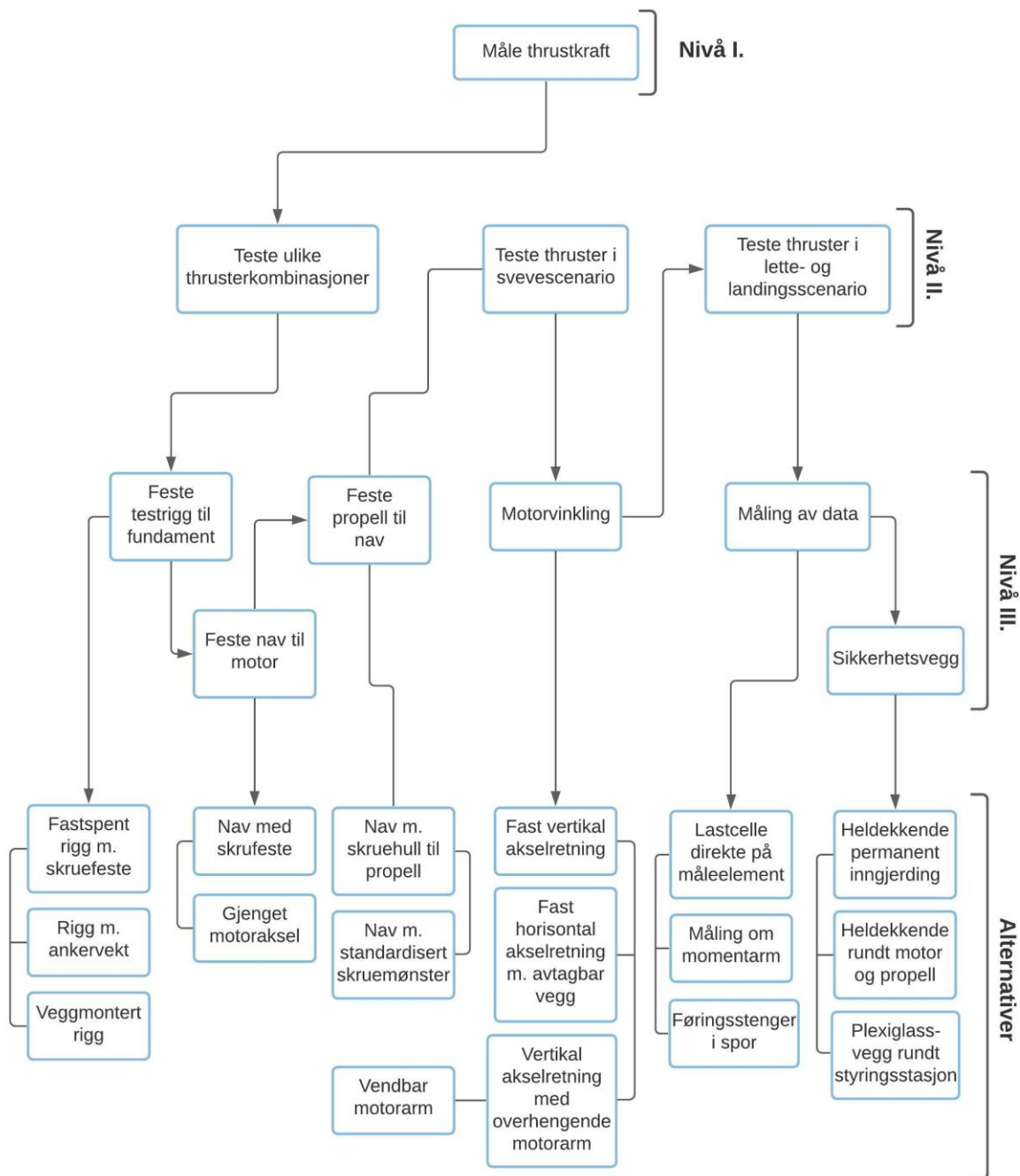
- Målene på riggens lengde og bredde er tidlige estimater og kan endre seg etter hvert som riggens utforming blir kjent.
- Motorarmens bredde blir på nåværende tidspunkt valgt til å være 50 mm, mellom Falstad og El-Gewey sine konsepter. Motorarmen vil med dette målet i stor grad representere begge konseptene samtidig som strukturell integritet opprettholdes.
- Riggens vekt er vanskelig å beregne på nåværende tidspunkt, men lav vekt vil ikke være et mål for konstruksjonen.
- Maks thrust blir satt til 2055 N, da dette vil tillate testing for quadcopter-oppsett med flyvekt opptil 600 kg.
- Maks total motoreffekt er satt til 66,5 kW da dette er nødvendig dersom det skal testes for doble motorer og en flyvekt på 600 kg. Her er nødvendig effekt multiplisert med 33%, og det antas at forholdet mellom thrust og effekt er lineært i dette området.
- Det blir aktuelt å teste for opptil 6 propellblader per motor.

## 6. Konseptgenerering

Her gjøres en funksjonsanalyse for testtriggen for å spesifisere produktets funksjoner og tilhørende elementer. Deretter legges det frem løsningsforslag til de forskjellige elementene med styrker og svakheter for hvert forslag.

### 6.1. Funksjonsanalyse

Oversikt over testtriggens funksjoner med løsningsalternativer



Figur 6.1. Skjematisk visning av testtriggens funksjoner med tilhørende løsningsalternativer.

## 6.2. Løsningsalternativer

Her legges alternativene fra funksjonsanalysen systematisk frem i tabeller med tidligskisser og beskrivelser. Det gjøres også en vurdering av fordeler og ulemper ved hvert løsningsforslag.

### 6.2.1. Feste testrigg til fundament.

Testrigger skal være i stand til å holde igjen motoren ved full last samtidig som den måler aktuelle krefter. Riggeren må derfor være forankret i et solid fundament på en måte som ikke påvirker sikkerheten.

Tabell 6.1. Løsningsforslag for fundamentering med beskrivelse, fordeler og ulemper.

| Skisse                                  | Beskrivelse   | Fordeler  | Ulemper   |
|---|---|---|---|
| <b>I. Fastspent rigg med skruefeste</b> |   |   |   |
|   | Riggeren skrues fast i bakken for å forankre den under testing. Dette vil i praksis si at riggeren er stasjonær og krever en større operasjon om den skal flyttes.  | Svært stødig og sikker løsning. Det alternativet som gir størst sikkerhet.  | Riggeren er mer eller mindre stasjonær, og krever underlag med hull for fastskruing.  |
| <b>II. Rigg med ankervekt</b>           |   |   |   |
|   | Riggeren utstyres med ekstra balast for å hindre bevegelse under testing. Vektene kan enten være integrert i riggeren eller være avtagbare for å forenkle flytting. | Enkelt system som ikke krever fastskruing. Dersom vektene er avtagbare blir dette det mest mobile forslaget slik at testing kan foregå på ulike steder. | Mindre stabilt og sikkert enn skruing. Skaper et potensielt faremoment dersom operatør glemmer å montere ankervektene før testing.  |
| <b>III. Veggmontert rigg</b>            |   |   |   |
|   | Riggeren er permanent festet mot en egnet vegg. Dette gir en enkel konstruksjon, men krever at riggeren har en designert plass.                                     | Plasseffektiv løsning som vil være klar for testing uten forankring.  | Krever en solid monteringsvegg som kan bære riggeren og tåle påkjenninger under testing. Gir lite rom for fleksibel rigg-utforming. |

## 6.2.2. Feste nav til motor

For å kunne feste propellen til motorakslingen må det utformes et festesystem som er sikkert og slitesterkt. Systemet skal være avtagbart, men samtidig sikre en trygg og pålitelig festing av propellnavet.

Tabell 6.2. Løsningsforslag for navfeste med beskrivelse, fordeler og ulemper.

| Skisse                        | Beskrivelse   | Fordeler  | Ulemper   |
|-------------------------------|---|---|---|
| <b>I. Nav med skrufeste</b>   |   |   |   |
|                               | Navet festes til motorakslingen gjennom et skruehull i navet og akslingen. Kan ha gjenger i navet eller være gjennomgående og festes med mutter.  | Navet er meget enkelt å løsne/feste til motorakslingen med kun en festeskruer.  | Stiller store krav til festeskruen som vil utsettes for store belastninger, spesielt skjærkrefter. Vil også være en potensiell kilde til vibrasjoner og ubalanse i navet. |
| <b>II. Gjenget motoraksel</b> |   |   |   |
|                               | Løsning der enden av motorakslingen er gjenget slik at navet kan låses på plass av en passende mutter. Mutteren må være utstyrt med en låsefunksjon for å unngå at den skrues av under testing. | Vil være en mer solid løsning siden kreftene er fordelt på en større flate enn for alternativ I. Vil også gi mindre utfordringer knyttet til balanse rundt akselen. | Stiller store krav til festemutteren, som må ha en låsemekanisme for å unngå at den løsner under testing.   |

## 6.2.3. Feste propell til nav

For å kunne teste og bytte mellom ulike propeller på en effektiv måte må det utredes et system for enkelt bytte mellom forskjellige propelltyper. Festesystemet må også tillate montering og testing av propeller med 2, 3, 4, og 6 propellblader.

Tabell 6.3. Løsningsforslag for festing av propell til nav med beskrivelse, fordeler og ulemper.

| Skisse  | Beskrivelse   | Fordeler  | Ulemper  |
|---|---|---|--|
| <b>I. Nav med skrueshull til propell</b>      |   |   |  |
|   | <p>Skruehull i navet gjør det mulig å montere enkeltstående propellblader i flere konfigurasjoner. Hullene er plassert med 60 graders vinkel i forhold til hverandre for å tillate testing med to, tre og seks rotor.</p> | <p>Bladene lages enkeltvis, og kan testes i ulike konfigurasjoner uten behov for forskjellige komplette propeller som har ulikt bladantall.</p> | <p>Siden hvert blad må monteres individuelt vil det ta lengre tid å bytte mellom ulike propellkonfigurasjoner og det gir rom for feilmontering av blader som kan skape ubalanse.</p> |
| <b>II. Nav med standardisert skruemønster</b> |   |   |  |
|   | <p>Propell og nav er konstruert med seks skrueshull som passer overens. Mønsteret er standard slik at propeller med forskjellig bladantall og utforming kan monteres på det samme navet.</p>                              | <p>Tillater enkel festing og raskt bytte av ulike propellkonfigurasjoner. I tillegg er det ikke mulig å feilmontere propellen.</p>              | <p>For denne løsningen må propellene konstrueres hele. For å teste forskjellige bladantall må det derfor lages flere hele propeller.</p>   |

#### 6.2.4. Motorvinkling

For å kunne sette opp realistiske forsøksoppsett må riggen kunne simulere flyving med og uten bakkeeffekt. Dette kan gjøres enten ved å fysisk rotere motoren slik at luftstrømmen fra propellen kan pekes mot bakken eller parallelt med bakken, eller ved å reversere motor og propell og kjøre tester i forskjellig retning. Spesielt viktig for denne funksjonen er muligheten til å kunne foreta nøyaktige målinger i begge konfigurasjoner uten at målesystemet blir for komplekst. Blå pil i skissene representerer fremdriftsretning.



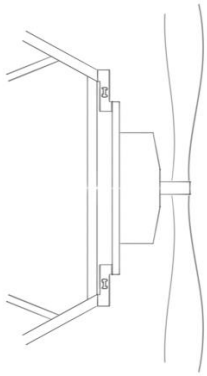
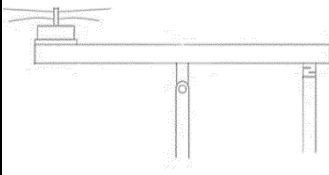
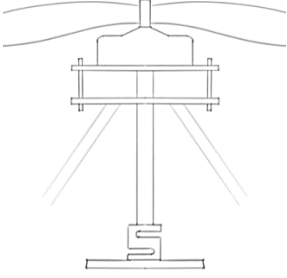
Tabell 6.4. Løsningsforslag for motorvinkling med beskrivelse, fordeler og ulemper.

| Skisse  | Beskrivelse  | Fordeler   | Ulemper  |
|---|--|--|--|
| <b>I. Fast vertikal akselretning</b>                        |  |  |  |
|   | <p>Motorakselen har fast orientering vertikalt som gir bakkeeffekt ved normal testing. For testing uten bakkeeffekt reverseres motoren og propellen.</p> | <p>En svært enkel konstruksjon med lav kompleksitet. Kan kjøres i begge retninger uten ekstra funksjoner eller tilleggsutstyr.</p>             | <p>Forutsetter at kjøreretning for motor kan reverseres, og at propellen kan snus. Kan være vanskelig å lage et system for testing av dobbelmotor-konfigurasjon.</p> |
| <b>II. Fast horisontal akselretning med avtagbar vegg</b>   |  |  |  |
|   | <p>Motorakselen har fast orientering parallelt med bakkeplanet, og en avtagbar vegg brukes for testing med bakkeeffekt.</p>                              | <p>En enkel konstruksjon med lav kompleksitet som kan dimensjoneres for krefter i kun en retning.</p>  | <p>Den avtagbare vegg blir stor og tung og krever et robust feste-system. Kan være vanskelig å lage et system for testing av dobbelmotor-konfigurasjon.</p>          |
| <b>III. Vertikal akselretning med overhengende motorarm</b> |  |  |  |
|   | <p>Riggoppsett med overhengende motorarm som tillater testing med to motorer i begge retninger med og uten bakkeeffekt.</p>                              | <p>Oppsettet er tilpasset for testing med dobbelmotor-konfigurasjon, og er mindre komplekst enn alternativ IV.</p>                             | <p>Forutsetter at kjøreretning for motor lett kan reverseres. Tilbyr mindre fleksibilitet enn løsning IV.</p>  |
| <b>IV. Vendbar motorarm</b>                                 |  |  |  |
|   | <p>Riggen kan roteres mellom horisontal og vertikal konfigurasjon for å simulere flyving med og uten bakkeeffekt.</p>                                    | <p>Oppsettet er tilpasset for testing med dobbelmotor-konfigurasjon, og det er enkelt å bytte mellom horisontal og vertikal konfigurasjon.</p> | <p>Flere bevegelige deler og en noe kompleks konstruksjon. Måleutstyr må plasseres med omhu.</p>   |

## 6.2.5. Måling av data

For å oppnå gode måleresultater for riggen må måleutstyret være i størst mulig upåvirket kontakt til elementet som skal måles. Faktorer som kan påvirke måleresultatene må elimineres og konstruksjonen må tilpasses måleverktøyene som benyttes. Fra løsningsforslagene i seksjon 6.2.4. kan det bli aktuelt å foreta målinger både som trykk og strekk.

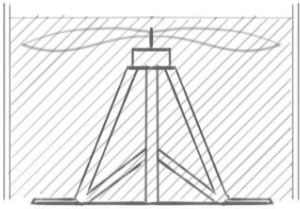
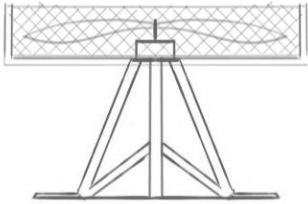
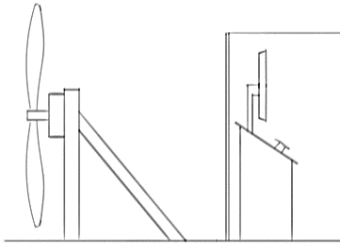
Tabell 6.5. Løsningsforslag for måling av data med beskrivelse, fordeler og ulemper.

| Skisse  | Beskrivelse   | Fordeler  | Ulemper  |
|---|---|---|--|
| <b>I. Lastcelle direkte på måleelement</b>  |   |   |  |
|   | Lastcellen er i direkte kontakt med motorfestet. Det kan benyttes en eller flere lastceller for å fordele lasten. Lastcelletypen avhenger av om det skal måles trykk, strekk eller begge deler. | Lastcellen er helt uforstyrret og i direkte kontakt med elementet som skal måles.   | Det kan det være nødvendig å bruke flere lastceller for å fordele lasten jevnt over motorfestet som vil gi mer kompleks kalibrering.         |
| <b>II. Måling om momentarm</b>  |   |   |  |
|  | Riggen benytter seg av en momentarm, med forhold 1:1 for å måle thrusten på motsatt side av motoren. Med dette forholdet vil kreftene på lastcellen være lik thrustkraften fra motoren.         | Forholdvis enkel og ryddig løsning der lastcellen kan ta opp kreftene fra motoren uten å være i direkte kontakt. Egner seg for måling av doble motorer. | Stiller krav til at lastcellen og motoren har samme avstand fra senter av armen. Vil også potensielt ta større plass enn andre alternativer. |
| <b>III. Føringsstenger i spor</b>   |   |   |  |
|  | Føringsstenger montert for å støtte opp mot uønsket bevegelse i sideretning, men med lav friksjon for å få best mulig målinger i lastcellen.  | Et mer stabilt oppsett enn alternativ I, men en mer kompleks løsning.   | Det kan oppstå noe friksjon i føringsstengene som kan påvirke måleresultatene.   |

## 6.2.6. Sikkerhetsvegg

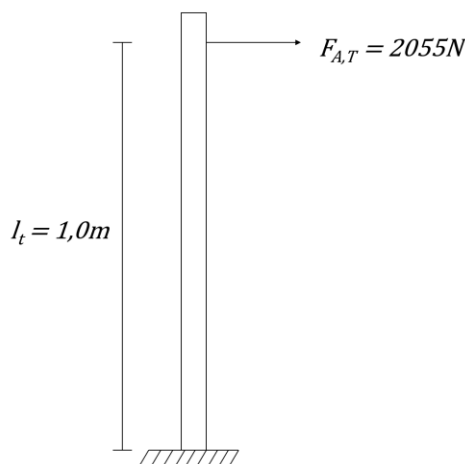
Motor og propell vil oppnå svært høye hastigheter ved testing og kan medføre alvorlige personskader ved bruksfeil eller materialsvikt. For å minimere sikkerhetsfaren ved forsøk skal det implementeres et skjermingssystem som hindrer adgang til riggen under testing. Skjermingen må være solid og gi best mulig beskyttelse for omgivelsene, og det bør være utformet på en måte som minimerer påvirkningen på måleresultatene.

Tabell 6.6. Løsningsforslag for sikkerhetsvegg med beskrivelse, fordeler og ulemper.

| Skisse  | Beskrivelse  | Fordeler  | Ulemper   |
|---|--|---|---|
| <b>I. Heldekkende permanent inngjerding</b>   |  |   |   |
|    | Permanent beskyttelsesforheng som dekker hele testriggen og som hindrer adgang ved testing. Inn-gjerdingen har en port som åpnes for å gi tilgang til riggen mellom kjøring. | Beskytter godt rundt hele riggen og som gjør det tilnærmet umulig å få tilgang til riggen ved kjøring.  | Tar større plass og vil kreve mer materiale ved produksjon enn de andre alternativene.  |
| <b>II. Permanent beskyttelse rundt motor og propell</b>                             |  |   |   |
|  | Fastmontert beskyttelsesforheng rundt motor og propell som er permanent festet til riggen. Vil ha en åpning for å få tilgang til motor og propell mellom kjøring.            | Fokuserer beskyttelsen rundt de kritiske delene og krever derfor mindre materialer ved produksjon.      | Gir dårligere tilgang til motor og propell siden gjerdet står tett til disse delene. Gjerdet kan også i større grad påvirke måleresultatene.      |
| <b>III. Pleksiglassvegg rundt styringsstasjon</b>                                   |  |   |   |
|  | Beskyttelsesvegg rundt styrings- og kontrollstasjonen som beskytter operatøren under testing.  | Tillater god tilgang til riggen mellom testing og gir god oversikt over motor og propell under kjøring. | Beskytter ikke øvrige omgivelser eller personer som befinner seg i området rundt testriggen. Begrenser heller ikke adgang til riggen ved testing. |

### 6.3. Tidligvurdering av brukspåkjenninger

For å danne et tidlig overblikk over belastningene riggen vil utsettes for er det foretatt en vurdering av brukspåkjenninger på bakgrunn av grovspesifiseringen. Det er rimelig å anta at riggen vil utsettes for relativt store påkjenninger ved testing, noe som må tas hensyn til ved valg av riggens utforming og for videre materialdrøfting. Siden endelig løsningsalternativ ikke enda er valgt vil det gjøres en vurdering på en forenklet rigg. Utformingen og testkonfigurasjonen vil ha stor innvirkning på belastningsbildet og det er ønskelig å finne en løsning som minimerer unødvendige påkjenninger, men som tillater grundig og realistisk testing.



Figur 6.2. Forenklet rigg som blir utsatt for maks estimert thrust.

I testscenarioet i figur 6.2. brukes lastverdien på 2055 N fra grovspesifiseringen (jfr. seksjon 5.4.). Dette er estimatet for maks thrust som vil være aktuelt å teste. Det tas utgangspunkt i at opplageret ligger 1,0 m fra angrepspunktet til lasten.

Her blir bøyemomentet på den forenklete riggen ved opplagringspunktet:

$$M_{b,t} = F_{A,T} * l_t = 2055N * 1,0m = \mathbf{2055Nm} \quad (4)$$

### 6.4. Tidlige materialvurderinger

Påkjenningene riggen vil bli belastet for gjør at det stilles høye krav til materialene som blir brukt. Av sikkerhetsmessige årsaker vil riggen overdimensjoneres der det er usikkerhet knyttet til belastningsscenarioer. Siden det ikke stilles krav til å dimensjonere riggen med lav vekt blir valgmulighetene for materialbruk større. Det vil imidlertid være fokus på at delene i riggen som havner i propellens luftstrøm skal ha lik form som den tilsvarende delen på Dolphin Sky sin dronemodul.

El-Gewey [14] og Falstad [15] sine konsepter brukte aluminiumslegeringer i henholdsvis 7075- og 6082-serien til hovedkonstruksjonen. Disse materialene kombinerer lav vekt og gode styrkeegenskaper, og betraktes som mulig aktuelle materialer for riggens sentrale deler. For testriggen vil dog høy vekt være en ettertraktet egenskap for visse komponenter siden det gir et solid og stødig fundament. Stål er derfor et meget attraktivt alternativ til bruk i riggens hovedkonstruksjon.

Stål er tyngre enn aluminium, har svært gode styrkeegenskaper og de fleste typene er godt sveisbare. Tre vanlige ståltypen med god tilgjengelighet er S235, S275 og S355. Bokstaven i navnet forklarer at det er et konstruksjonsstål, mens tallverdien representerer minste flytegrense i MPa for materialet. Flytegrensen kan variere over dette tallet, men aldri være lavere. Disse ståltypene er svært godt egnet for sveising.

I tabellen under vises utvalgte styrkeparametere for de ovennevnte materialene.

*Tabell 6.7. Materialdata for utvalgte materialer. Enhet for de ulike styrkeparameterene oppgis i klammeparentes.*

| Materiale*     | E-Modul [GPa] | Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ] | Flytegrense [MPa] | Bruddgrense [MPa] |
|----------------|---------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
| <b>6082-T6</b> | 70 – 74       | 2670 – 2730                  | 240 – 280         | 295 – 344         |
| <b>7075-T6</b> | 69 – 76       | 2770 – 2830                  | 460 – 530         | 530 – 580         |
| <b>S235</b>    | 205 – 215     | 7821 – 7890                  | 235 – 274         | 360 – 510         |
| <b>S275</b>    | 205 – 215     | 7800                         | 275 – 321         | 410 – 580         |
| <b>S355</b>    | 205 – 215     | 7830 – 7840                  | 355 – 414         | 470 – 680         |

\* Materialdata hentet fra Granta EduPack.

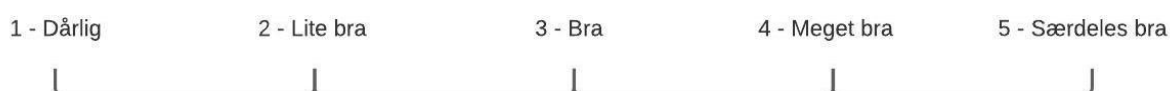
Av tabellen kommer det tydelig frem at stål er langt tyngre enn aluminiumslegeringene, men innehar balanserte styrkeegenskaper. 7075-T6 utmerker seg med meget gode styrkeegenskaper, men det er en dyrere legering og tilgjengeligheten for profiler som passer testriggen er dårlig. 6082-T6 legeringen har de dårligste styrkeegenskapene av de ovennevnte materialene og siden lav vekt ikke er en verdsatt egenskap anses konstruksjonsstålene som bedre alternativer. S355 innehar bedre styrkeegenskaper enn S235 og S275, og tilgjengeligheten for aktuelle profilstørrelser er svært god. Konstruksjonsstålet S355 anses derfor som det mest aktuelle materialet til riggens hoveddeler ved nåværende tidspunkt.

## 7. Egenscreening og konseptvalg

I egenscreeningen evalueres og selekteres løsningsalternativene fra konseptgenereringen ved bruk av seleksjonsmatriser basert på Pughs metodikk.

### 7.1. Utvikling av seleksjonsmatrise

Seleksjonsmatrisene er utformet på bakgrunn av Pughs metodikk (jfr. seksjon 3.2.3.) og poengskalaen som ble definert i tabell 3.5. Hvert av løsningsforslagene fra kapittel 6 veies opp mot de vektete produktegenskapene (jfr. seksjon 5.2.) etter hvor godt de oppfyller kriteriet etter følgende skala:



Figur 7.1. Skala for løsningsalternativenes oppnåelsesgrad.

Deretter blir oppfyllingsgraden for hver egenskap multiplisert med kriteriets vekting for å gi en objektiv vurdering basert på de viktigste egenskapene. Den vektete poengsummen vil være sentral når endelig seleksjon foretas. For noen løsningsforslag er enkelte kriterier irrelevante. Ved disse tilfellene gis det ikke poeng for de aktuelle kriteriene, som er markert med "-" i matrisen. For kriteriet som dekker kompleksitet vil komplekse løsninger resultere i lavere poengsum, og mindre komplekse løsninger gi høyere poengsum.

### 7.2. Egen konseptscreening

Tabell 7.1. Seleksjonsmatrise for festeløsninger mellom testrigg og fundament.

| Feste testrigg til fundament |         |            |           |           |
|------------------------------|---------|------------|-----------|-----------|
| Kriterium                    | Vekting | I.         | II.       | III.      |
| Brukervennlighet             | 3       | 5          | 3         | 4         |
| Vedlikehold og reparasjoner  | 4       | -          | -         | -         |
| Mobilitet                    | 2       | 3          | 5         | 1         |
| Sikkerhet                    | 5       | 5          | 3         | 4         |
| Estetikk                     | 1       | -          | -         | -         |
| Smart design                 | 4       | 4          | 4         | 3         |
| Tilpasset design             | 3       | 3          | 4         | 2         |
| Kompleksitet                 | 3       | 5          | 5         | 3         |
| Standarddeler og symmetri    | 4       | 4          | 5         | 3         |
| Sum                          |         | 29         | 29        | 20        |
| <b>Sum med vekting</b>       |         | <b>102</b> | <b>97</b> | <b>73</b> |

Alternativ I. "Fastspent rigg med skruefeste" kommer best ut av den vektete evalueringen.

Tabell 7.2. Seleksjonsmatrise for festeløsninger mellom nav og motor.

| Feste nav til motor         |         |           |           |  |
|-----------------------------|---------|-----------|-----------|--|
| Kriterium                   | Vekting | I.        | II.       |  |
| Brukervennlighet            | 3       | 4         | 5         |  |
| Vedlikehold og reparasjoner | 4       | -         | -         |  |
| Mobilitet                   | 2       | -         | -         |  |
| Sikkerhet                   | 5       | 4         | 5         |  |
| Estetikk                    | 1       | -         | -         |  |
| Smart design                | 4       | 3         | 4         |  |
| Tilpasset design            | 3       | 3         | 4         |  |
| Kompleksitet                | 3       | 4         | 5         |  |
| Standarddeler og symmetri   | 4       | 3         | 3         |  |
| Sum                         |         | 21        | 26        |  |
| <b>Sum med vekting</b>      |         | <b>77</b> | <b>95</b> |  |

Alternativ II. "Gjenget motoraksel" kommer best ut av den vektete evalueringen.

Tabell 7.3. Seleksjonsmatrise for festeløsninger mellom propell og nav.

| Feste propell til nav       |         |            |           |  |
|-----------------------------|---------|------------|-----------|--|
| Kriterium                   | Vekting | I.         | II.       |  |
| Brukervennlighet            | 3       | 4          | 5         |  |
| Vedlikehold og reparasjoner | 4       | -          | -         |  |
| Mobilitet                   | 2       | -          | -         |  |
| Sikkerhet                   | 5       | 5          | 5         |  |
| Estetikk                    | 1       | 3          | 5         |  |
| Smart design                | 4       | 5          | 3         |  |
| Tilpasset design            | 3       | 4          | 4         |  |
| Kompleksitet                | 3       | 4          | 4         |  |
| Standarddeler og symmetri   | 4       | 5          | 3         |  |
| Sum                         |         | 30         | 29        |  |
| <b>Sum med vekting</b>      |         | <b>104</b> | <b>93</b> |  |

Alternativ I. "Nav med skruehull til propell" kommer best ut av den vektete evalueringen.

Tabell 7.4. Seleksjonsmatrise for løsninger knyttet til motorvinkling.

| Motorvinkling               |         |            |            |            |            |
|-----------------------------|---------|------------|------------|------------|------------|
| Kriterium                   | Vekting | I.         | II.        | III.       | IV.        |
| Brukervennlighet            | 3       | 3          | 5          | 3          | 4          |
| Vedlikehold og reparasjoner | 4       | 5          | 5          | 4          | 4          |
| Mobilitet                   | 2       | -          | -          | -          | -          |
| Sikkerhet                   | 5       | 5          | 4          | 5          | 4          |
| Estetikk                    | 1       | 1          | 2          | 2          | 4          |
| Smart design                | 4       | 2          | 3          | 3          | 5          |
| Tilpasset design            | 3       | 5          | 5          | 5          | 5          |
| Kompleksitet                | 3       | 5          | 5          | 4          | 4          |
| Standarddeler og symmetri   | 4       | 4          | 4          | 3          | 4          |
| Sum                         |         | 32         | 32         | 31         | 32         |
| <b>Sum med vekting</b>      |         | <b>109</b> | <b>115</b> | <b>103</b> | <b>115</b> |

Alternativ II. "Fast horisontal akselretning med avtagbar vegg" og IV. "Vendbar motorarm" kommer best ut av den vektete evalueringen.

Tabell 7.5. Seleksjonsmatrise for løsninger til måling av data.

| Måling av data              |         |            |            |           |
|-----------------------------|---------|------------|------------|-----------|
| Kriterium                   | Vekting | I.         | II.        | III.      |
| Brukervennlighet            | 3       | 4          | 5          | 3         |
| Vedlikehold og reparasjoner | 4       | 5          | 5          | 4         |
| Mobilitet                   | 2       | -          | -          | -         |
| Sikkerhet                   | 5       | 4          | 4          | 5         |
| Estetikk                    | 1       | 3          | 2          | 2         |
| Smart design                | 4       | 4          | 5          | 3         |
| Tilpasset design            | 3       | 5          | 4          | 4         |
| Kompleksitet                | 3       | 5          | 4          | 2         |
| Standarddeler og symmetri   | 4       | 5          | 4          | 4         |
| Sum                         |         | 35         | 33         | 27        |
| <b>Sum med vekting</b>      |         | <b>105</b> | <b>117</b> | <b>98</b> |

Alternativ II. "Måling om momentarm" kommer best ut av den vektete evalueringen.



Tabell 7.6. Seleksjonsmatrise for løsninger til sikkerhetsvegg.

| Sikkerhetsvegg              |         |            |            |            |
|-----------------------------|---------|------------|------------|------------|
| Kriterium                   | Vekting | I.         | II.        | III.       |
| Brukervennlighet            | 3       | 5          | 3          | 5          |
| Vedlikehold og reparasjoner | 4       | 5          | 4          | 5          |
| Mobilitet                   | 2       | 4          | 5          | 3          |
| Sikkerhet                   | 5       | 5          | 4          | 3          |
| Estetikk                    | 1       | 3          | 3          | 3          |
| Smart design                | 4       | 4          | 4          | 3          |
| Tilpasset design            | 3       | 4          | 4          | 5          |
| Kompleksitet                | 3       | 4          | 3          | 5          |
| Standarddeler og symmetri   | 4       | 5          | 3          | 4          |
| Sum                         |         | 39         | 33         | 36         |
| <b>Sum med vektning</b>     |         | <b>131</b> | <b>107</b> | <b>117</b> |

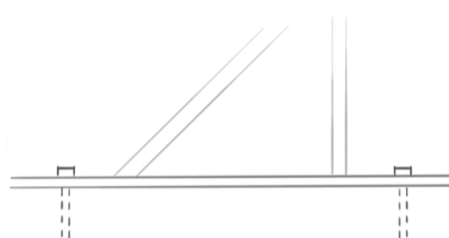
Alternativ I. "Heldekkende permanent inngjerding" kommer best ut av den vektede evalueringen.

### 7.3. Foretrukne løsninger

Seleksjonsmatrisene fra seksjon 7.2. gir en objektiv vurdering av løsningsalternativene basert på produktegenskapene og tilhørende vektning. Poengsummene fra matrisene er sentrale og er i stor grad gjeldene for konseptvalget, men det er gjort vurderinger der det er jevnt og om det anses å være kritiske punkter knyttet til funksjon ved løsningen. I tillegg er løsningene gjennomgått i eksperttestingen, og input herfra knyttet til funksjon og om løsningen er realiserbar er vektet tungt. Tilbakemeldinger fra eksperter knyttet til løsningsalternativene er gjennomgått i neste kapittel. Under presenteres de valgte løsningsalternativene med skisse av endelig løsning.

#### 7.3.1. Fundamentering av testrigg

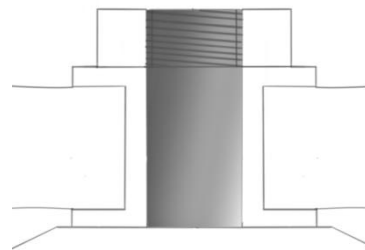
Av løsningene for fundamentering av testriggen kom alternativ I, "Fastspent rigg med skruefeste" best ut poengmessig i seleksjonsmatrisen. Løsningen skiller seg fra de andre ved at den utmerker seg på sikkerhet og brukervennlighet. Den gir den tryggeste fundamenteringen av alternativene og tillater flytting om nødvendig. Riggens ramme vil konstrueres slik at den også kan fundamenteres med balastvekt dersom den skal kjøres på områder som ikke tillater fastskruing.



Figur 7.2. Valgt løsning for fundamentering av testrigg.

### 7.3.2. Festeløsning mellom nav og motor

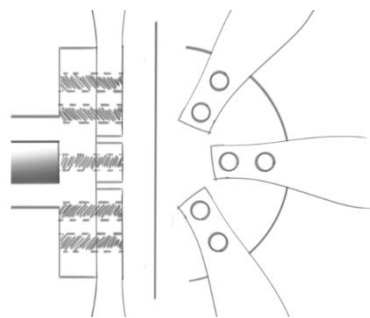
For festeløsning mellom nav og motor blir alternativ II, "Gjenget motoraksel" valgt som foretrukket løsning. Løsningen gjør det enkelt å montere propellnavet på motorakselen samtidig som løsningen er svært lite kompleks. I seleksjonsmatrisen utmerket systemet seg med hensyn til brukervennlighet, sikkerhet og lav kompleksitet. For at denne løsningen skal virke er det spesielt viktig at det benyttes en låsemutter for å hindre at rotasjonsbevegelsen under kjøring ikke løsner mutteren.



Figur 7.3. Valgt løsning for festing av nav til motor.

### 7.3.3. Festeløsning mellom propell og nav

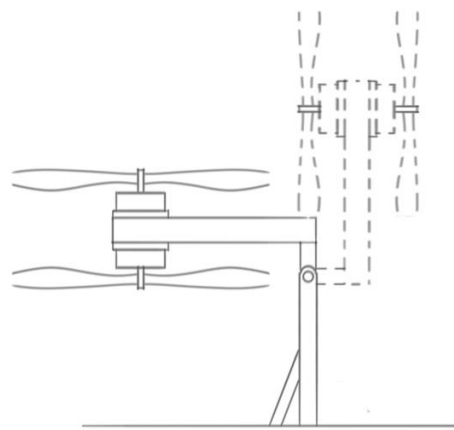
Løsningsalternativ I, "Nav med skruehull til propell" blir den valgte løsningen for festeløsning mellom propell og nav. Hovedfordelen med løsningen kontra alternativ II er muligheten for å legge til et og et propellblad uten å måtte ha forskjellige hele propeller med ulikt bladantall. Dette gir muligheten til å teste flere propellkonfigurasjoner til en lavere total kostnad. I seleksjonsmatrisen utmerker løsningen seg på implementering av smarte løsninger og at systemet bruker standardiserte deler. Ellers scorer løsningene jevnt over relativt likt.



Figur 7.4. Valgt løsning for festing av nav til motor.

### 7.3.4. Motorvinkling

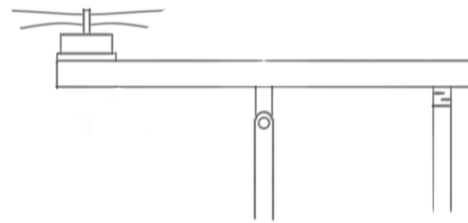
Av løsningsforslagene knyttet til motorvinkling for å tillate testing med og uten bakkeeffekt ble alternativ IV, "Vendbar motorarm" valgt. Alternativ II og IV oppnådde samme poengsum i seleksjonsmatrisen, men alternativ IV anses som en bedre løsning grunnet høyere fleksibilitet og bedre tilrettelegging for testing med doble motorer. Løsningen baserer seg på å vippe motorarmen 90 grader for å teste med og uten bakkeeffekt, men den kan i tillegg simulere bakkeeffekt mot en vegg dersom avstanden fra motor og bakke skal reguleres.



Figur 7.5. Valgt løsning for motorvinkling.

## 7.3.5. Måling av data

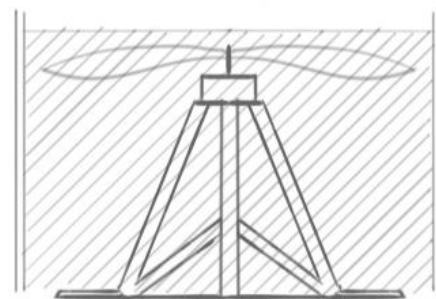
Alternativ II, "måling om momentarm" kom best ut av den vektete vurderingen og blir valgt som målesystem. Løsningen utmerker seg som brukervennlig og det er en lur løsning for testing av dobbelmotoroppsett siden det kun er behov for en enkelt lastcelle for måling av begge motorene. Systemet får gode poeng jevnt over og anses som lite komplekst. Alternativ I ble også nøye vurdert, men det taper på utfordringer ved testing av dobbelmotor og at det er behov for flere lastceller.



Figur 7.6. Valgt løsning for måling av data.

## 7.3.6. Sikkerhetsvegg

Valget av sikkerhetsvegg faller på alternativ I, "heldekkende permanent inngjerding". Løsningen kommer best ut i seleksjonsmatrisen og får jevnt over svært høye poengsummer. Alternativ I og II deler mange likheter, men alternativ I gir bedre tilgang til riggen, er enklere å produsere, samt at det gir en sikkerhetsperimeter rundt riggen under testing. Alternativ III. kommer dårlig ut på sikkerhet siden løsningen ikke hindrer adgang til riggen under testing.

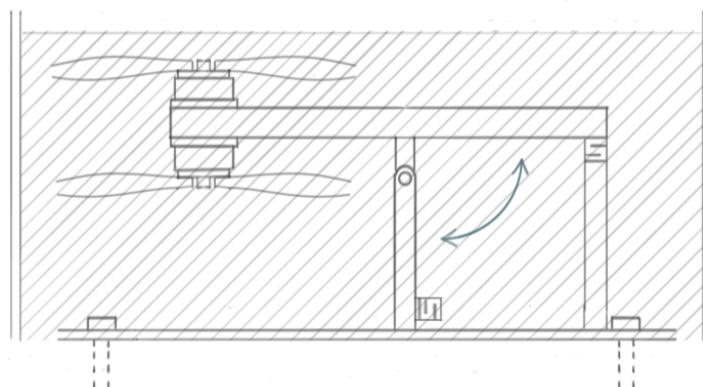


Figur 7.7. Valgt løsning for sikkerhetsvegg.

Omgivelsene er heller ikke sikret og kun operatør har en sikkerhetsvegg å forholde seg til. Sikkerhetsveggen vil trolig se noe annerledes ut siden valgt riggutforming ikke er den samme som på figuren.

## 7.3.7. Helhetsskisse med valgte løsningsforslag og forklaring

Under vises en illustrasjon av de valgte løsningsforslagene kombinert til en konseptskisse.



Figur 7.8. Konseptskisse med de utvalgte løsningsforslagene.

Det valgte konseptet er bygd opp av løsningene som er selektert på bakgrunn av seleksjonsmatrisene og eksperttesting. Løsningskonseptet kombinerer dermed løsningsforslagene som objektivt utfyller produktegenskapene best. Der det er mulig har funksjoner fra andre løsningsalternativer blitt implementert for å øke fleksibiliteten til riggen. Støttearmen med lastcellen er avtagbar for å tillate vipping for vertikal posisjonering av motorarmen. Det blir besluttet å dimensjonere momentarmen med forholdet 2:1 for å gjøre riggen mer kompakt. Med utgangspunkt i grovspesifiseringen blir motorarmen da ca. 1800 mm lang, med 1200 mm på motorsiden og 600 mm på målesiden. Dette vil gjøre at riggen kan bygges lavere, slik at armen ikke står unødvendig høyt i vertikal posisjon. Siden armen blir kortere på målesiden blir kravene til lastcellen høyere, og en lastcelle med kapasitet på opp mot 500 kg blir trolig nødvendig.

Riggen kan måle thrust uten bakkeffekt i vertikal stilling, og med bakkeffekt i horisontal stilling, samt i vertikal stilling mot vegg. Om riggen brukes til å teste i vertikal stilling mot vegg kan avstanden til veggen justeres for å simulere bakkeffekt ved ulike høyder. Navet tillater testing med opptil seks propeller per motor, og riggen kan kjøres med enkeltmotor i trekk- og skyvekonfigurasjon, samt med dobbelmotoroppsett. Det valgte sikkerhetsgjerdet vil beskytte riggen ved testing ved å begrense adgang til roterende deler, samt kunne stoppe større fragmenter ved eventuelle feil. Ved vertikal testing vil propellen stå over gjerdet, og etter samtaler med Holmberg [34] ble det besluttet å legge til et beskyttelsesbur rundt styringsstasjonen til operatør i form av alternativ III. "Pleksiglassvegg rundt styringsstasjon".

Forsøksoppsettet vil bestå av følgende elementer:

- Testtrigg i valgt konfigurasjon.
- Motor og propell i valgt konfigurasjon.
- Sikkerhetsgjerde rundt riggen for å begrense tilgang under testing.
- Stasjon for styring av motor med nødstopknapp og PC for logging av data, samt kabling til riggen.
- Pleksiglassvegg rundt styringsstasjonen.

## 8. Eksperttesting

*I dette kapittelet planlegges og utføres eksperttesting med utvalgte fagpersoner ved NMBU for å få konstruktive tilbakemeldinger på konseptet.*

### 8.1. Testmålsetninger

#### 8.1.1. Hovedmål

Hovedmålet med eksperttestingen er å kvalitetssikre konseptet gjennom tilbakemeldinger fra fagfolk med ekspertise på området. Det skal kartlegges fordeler og ulemper ved valgt konsept, og det skal undersøkes potensielle forbedringsområder for de valgte løsningsalternativene. Grunnlagsberegninger skal gjennomgås, og aktuelle produksjonsmetoder for testtriggen skal kartlegges. Tilbakemeldinger og resultater som fremkommer skal brukes til å videreutvikle konseptet.

#### 8.1.2. Delmål

Delmålene bygger opp under hovedmålsetningen med konkretiserte mål for å sikre oppnåelse. Delmålene er som følger:

- Gjennomgå valgte løsninger og undersøke om de er tilstrekkelige i forhold til dimensjonering og realisering, eller om det burde foretas endringer.
- Gjennomgå beregninger og antagelser knyttet til håndberegningene.
- Undersøke komponenter som kan endres for produksjonsoptimalisering.
- Kartlegge aktuelle produksjonsmetoder og få tilbakemeldinger på kostnadsestimater for produktet.

### 8.2. Ekspertgruppe

Ekspertgruppen består av erfarne fagpersoner ved fakultetet på NMBU og er valgt på bakgrunn av ekspertise innen respektive fagområder.

*Tabell 8.1. Ekspertpersoner med tittel og fagområde.*

| Navn                      | Tittel                   | Fagområde              |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| Henrik Folk Holmberg [34] | Senioringeniør           | Konstruksjon og design |
| Egil Stemsrud [45]        | Senioringeniør           | Statikk og beregninger |
| Øyvind Hansen [46]        | Overingeniør/Verksmester | Produksjon og verksted |

Møtene med ekspertgruppen ble foretatt digitalt over Teams og e-post grunnet restriksjoner for fysisk oppmøte. Rapportoversikt, relevant diskusjonsmateriale og skisser ble sendt på forhånd for å gi aktuell fagperson et overblikk over utviklingsstatus, underliggende prosess og diskusjonstema. Møtereferater og tilbakemeldinger er dokumentert i neste seksjon.

### 8.3. Resultater

Her fremkommer innspill og tilbakemeldinger fra ekspertgruppen.

Tabell 8.2. Innspill fra ekspertgruppen.

| Tema  | Ekspertinnspill   |
|---|---|
| <b>Løsningsvalg</b>                         |   |
| <b>Fundamentering</b>                       | Løsningsforslagene og konseptskissen ble gjennomgått med Holmberg med fokus på realiseringsmuligheter og eventuelle svakheter i konstruksjonen. Vedrørende fundamenteringsløsningen var han enig i at fastskruing var det beste alternativet med hensyn til sikkerhet og stødighet. Dersom fastskruing av riggen viser seg å bli en umulighet, ble jerseysteiners anbefalt som en kostnadseffektiv balastløsning. |
| <b>Festeløsning mellom nav og motor</b>     | Det valgte alternativet ble ansett som det klart beste alternativet av Holmberg, spesielt med hensyn til balansering og påkjenninger.   |
| <b>Sikkerhetsvegg</b>                       | For sikkerhetsinngjerdingen rundt riggen anbefalte Holmberg å benytte et heldekkende materiale, siden det planlagte gitteret ikke ville vært i stand til å stoppe mindre fragmenter ved et ulykkescenario. Det ble også anbefalt å implementere et sekundært sikkerhets-system rundt operatør, da dette er rimelig og vil gi ekstra beskyttelse.  |
| <b>Måling av data</b>                       | Holmberg meddelte at det kunne være fordelaktig å velge et annet forhold enn 1:1 på momentarmen for å gjøre riggen mer kompakt. Dette krever en kraftigere lastcelle, men anses som et fordelaktig kompromiss siden prisforskjellen på lastcellene ikke er nevneverdig for prosjektets total kostnader.   |
| <b>Beregninger</b>                          |   |
| <b>Valg av profil</b>                       | Ved valg av profil ble det regnet på spenninger uten at det ble tatt hensyn til hull i profilet. Etter korrespondanse med Stemsrud ble reduksjonen av annet arealmoment fra den estimerte hullstørrelsen ved opplager B ikke ansett som utslagsgivende for dimensjoneringen.  |
| <b>Dimensjonerende spenning på motorarm</b> | Bøyespenningen som oppstår i ytterste fiber i profilet ble ansett som den dimensjonerende spenningen i motorarmen. Egil verifiserte dette, og påpekte at motorarmens lengde i forhold profilhøyden ville gjøre bøyespenningen til den kritiske spenningen i denne situasjonen.  |

Tabell 8.2. Forts.

| Tema                                     | Ekspertinnspill   |
|--|---|
| <b>Produksjon</b>                        |   |
| <b>Montering av profiler</b>             | Det ble diskutert festemetode av profiler ved montering med Holmberg. Alternativene som ble presentert av forfatter var vinkelbeslag og sveising. Etter dialog ble sveis valgt som det beste alternativet grunnet økt sikkerhet, samt en stødligere og mer solid konstruksjon.  |
| <b>Festing og montering av akselbolt</b> | For konstruksjon av akselbolten ble det anbefalt å bruke et boltemne som gjenges slik at det kan festes med mutter. Opprinnelig var det planlagt å legge et rullelager mellom motorarm og aksling for å minimere friksjon, men her anbefalte Holmberg å heller benytte en vanlig stålforing med litt smøring. Dette er en rimeligere løsning som krever mindre plass og som er lettere å implementere, samtidig som friksjonen minimeres. |
| <b>Spor i propellnavet</b>               | Sporet i navets senterhull ble av Holmberg ansett som et element som øker kompleksiteten knyttet til produksjon. Sporet er tilpasset standardakselen som Lynch motoren leveres med, så her burde muligheten for spesialbestilling av aksel undersøkes nærmere for å forenkle produksjonen av propellnavet.  |

Grunnet pandemien ble kontakten med verksmester Hansen begrenset, og detaljert tilbakemelding rundt produksjon kom ikke frem i tide for implementering i masterrapporten. Det ble derfor foretatt et ekstramøte med Holmberg som var tilgjengelig, for å få noen generelle innspill knyttet til produksjon.

### Oppsummering tilbakemeldinger

Som følger av tilbakemeldinger og diskusjoner med ekspertpanelet ble følgende beslutninger tatt:

- Dersom fundamentering gjennom fastskruing av riggen ikke lar seg gjøre, anbefales jersey-steiner som en effektiv balastløsning.
- De valgte løsningsforslagene beholdes, men det gjøres følgende modifikasjoner:
  - Sikkerhetsgjerdet skal forsterkes med et tett materiale for å fange opp mindre fragmenter.
  - Det implementeres et sekundært sikkerhetssystem rundt operatør.
  - Momentarmen byttes til forholdet 2:1 for å gjøre riggen mer kompakt.
- Profilvalg tas på bakgrunn av spenningsberegninger uten hull i profilet siden hullets planlagte størrelse ikke anses å være utslagsgivende for dimensjoneringen.

- Ved sammenkobling av hulprofiler velges sveis over beslag. Maskinen kan potensielt være farlig og sveis anses som det tryggeste alternativet.
- Det legges inn en stålforing mellom motorarm og aksel for å minimere friksjon mellom komponentene. Akselbolten blir produsert ut av et boltemne som gjenges slik at det kan festes med en passende mutter.
- Ved bestilling av motor burde muligheten for spesialbestilling av aksel vurderes for å gjøre produksjon av navet enklere.



## 9. Grunnlagsberegninger

Her gjøres grunnlagsberegninger for å danne en oversikt over belastningene på riggens mest kritiske punkter. Beregningene vil videre brukes som utgangspunkt for dimensjonering av testrigger og som sammenligningsgrunnlag for FEM-analyser.

### 9.1. Beregningsmålsetninger

#### 9.1.1. Hovedmål

Målet med grunnlagsberegningene er å lage en oversikt over belastningene riggen vil oppleve under testing, og danne utgangspunktet for dimensjoneringen og materialvalget til riggen. Grunnlagsberegningene vil også benyttes som sammenligningsgrunnlag for FEM-analyser i kapittel 11.

#### 9.1.2. Delmål

- Kartlegge skjærkrefter og momenter på motorarmen.
- Konstruere moment- og skjærkraftdiagram for motorarmen.
- Velge tverrsnitt for motorarm.
- Undersøke spenninger på armen.
- Sjekke at spenningene er innenfor tillatt belastningsområde.

#### 9.1.3. Beregningsforutsetninger

Følgende forutsetninger benyttes for videre beregninger:

Tabell 9.1. Forutsetninger for beregninger.

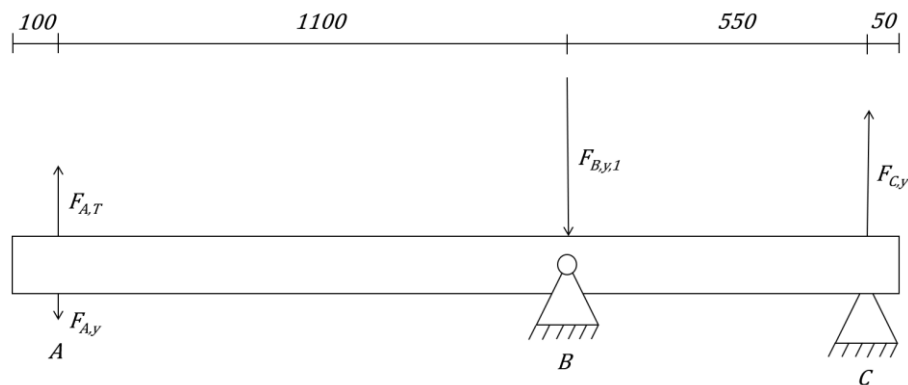
| Element   | Verdi              | Enhet | Symbol    |
|---|--------------------|-------|-----------|
| Maks last fra motorkonfigurasjon (Thrust)                         | 2055               | N     | $F_{A,T}$ |
| Motorvekt pr. stykk   | 11                 | kg    | $m_m$     |
| Motordiameter   | 194                | mm    | $d_m$     |
| Total lengde på motorarm  | 1800               | mm    | $l_{ma}$  |
| Forhold for momentarm mellom angrepspunkt for thrust og lastcelle | 2:1<br>(1100: 550) | -     | -         |

Konstruksjonens egenvekt tas ikke med i beregningene. For sikkerhet brukes tabeller i boka "Tekniske tabeller" av Johannessen, J. (vedlegg III).

## 9.2. Beregninger på motorarm

### 9.2.1. Krefter og momenter på motorarm

Figur 9.1. viser belastningen på motorarmen i horisontal stilling ved maks last fra motorkonfigurasjonen. Angrepspunktet for thrusten er 100 mm fra enden av motorarmen siden motordiameter er 194 mm og motorakselen da ligger omtrent 100mm fra enden på armen med litt klaring. Målepunktet er satt 50 mm fra den andre enden slik at avstandsforholdet mellom vippepunktet forblir 2:1.



Figur 9.1. Belastning på motorarm i horisontal stilling ved maks thrust.

Motorvekten vil gi en kraft nedover i y-retning. Ved maks belastning vil det være to motorer og kraften fra motorenes vekt blir:

$$F_{A,y} = 2 * m_m * g$$

$$F_{A,y} = 2 * 11 * 9,81 = \mathbf{216N}$$

Finner  $F_{B,y,1}$  ved å sette momentet om  $C = 0$ .

$$\Sigma M_C = 0$$

$$F_{A,T} * l_{AC} - F_{A,y} * l_{AC} - F_{B,y,1} * l_{BC} = 0 \Rightarrow 2055 * 1650 - 216 * 1650 - F_{B,y,1} * 550 = 0$$

$$F_{B,y,1} = \frac{2055 * 1650 - 216 * 1650}{550} = \mathbf{5517N} \quad (4)$$

Finner  $F_{C,y}$  som er kraften lastcellen vil måle:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_{A,T} - F_{A,y} - F_{B,y,1} + F_{C,y} = 0 \Rightarrow 2055 - 216 - 5517 + F_{C,y}$$

$$F_{C,y} = -2055 + 216 + 5517 = \mathbf{3678N}$$

Siden motorvekten ved horisontal testing motvirker lasten blir ikke målt verdi på lastcellen dobbelt så stor som thrusten. Her må lastcellen dermed kalibreres for å nulle ut motorvekten før testing.

Maks bøyemoment i motorarmen oppstår ved punkt B:

$$M_{B,h} = (2055 - 216) * 1,1 = \mathbf{2023Nm} \quad (4)$$

Figur 9.2. viser belastningen på motorarmen i vertikal stilling. I denne posisjonen vil motorvekten gi aksialkrefter i motorarmen.  $F_{A,y}$  blir her lik:

$$F_{A,y} = -\mathbf{216N}$$

$F_{B,y,2}$  er lik, men motsatt rettet og blir:

$$F_{B,y,2} = F_{A,y} = \mathbf{216N}$$

$F_{B,x}$  finnes ved å sette momentet om  $C = 0$ .

$$\Sigma M_C = 0$$

$$F_{A,T} * l_{AC} - F_{B,x} * l_{BC} = 0 \Rightarrow 2055 * 1650 - F_{B,x} * 550 = 0$$

$$F_{B,x} = \frac{-2055 * 1650}{550} = -\mathbf{6165N} \quad (4)$$

Finner  $F_{C,x}$  som er kraften lastcellen vil måle:

$$\Sigma F_x = 0$$

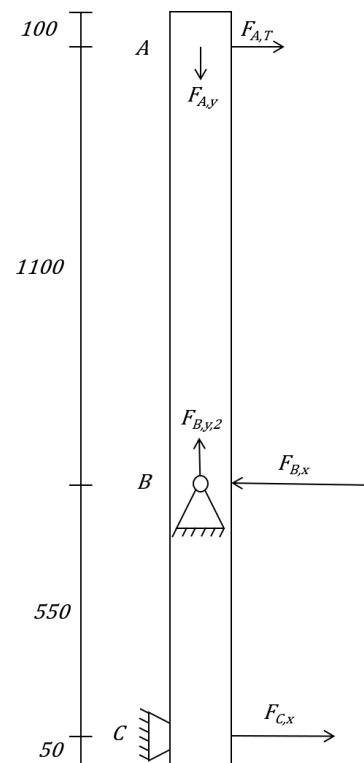
$$F_{A,T} - F_{B,x} + F_{C,x} = 0 \Rightarrow 2055 - 6165N + F_{C,x}$$

$$F_{C,x} = 6165 - 2055 = \mathbf{4110N}$$

I vertikal stilling blir forholdet mellom thrustkraft og målt kraft i lastcelle 1:2 og det må ikke kompenseres med kalibrering for å nulle ut krefter.

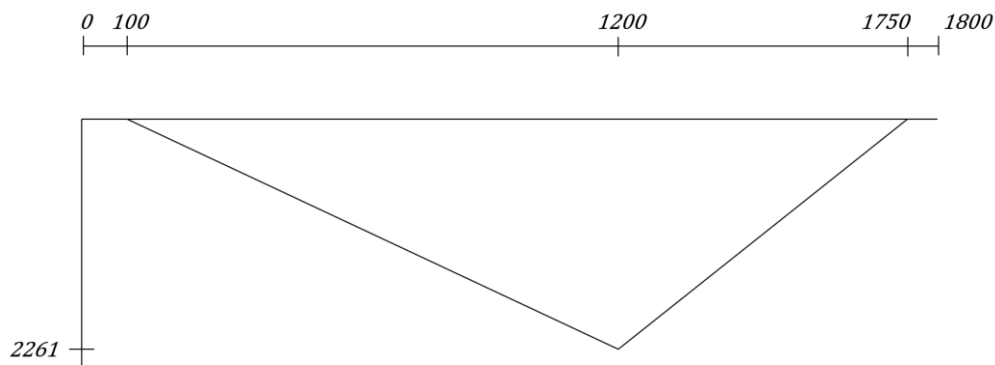
Maks bøyemoment i bjelken oppstår ved punkt B:

$$M_{B,v} = 2055 * 1,1 = \mathbf{2261Nm} \quad (4)$$



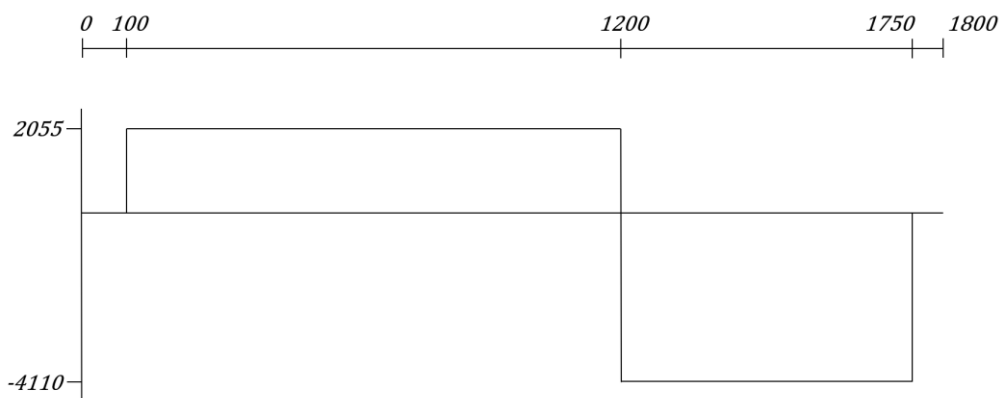
Figur 9.2. Belastning på motorarm i horisontal stilling ved maks thrust.

Bøyemomentdiagrammet for motorarmen i vertikal posisjon blir:



Figur 9.3. Bøyemomentdiagrammet for motorarmen i vertikal posisjon.

Skjærkreftene for motorarmen er konstante mellom A og B, og B og C, og vil se slik ut:

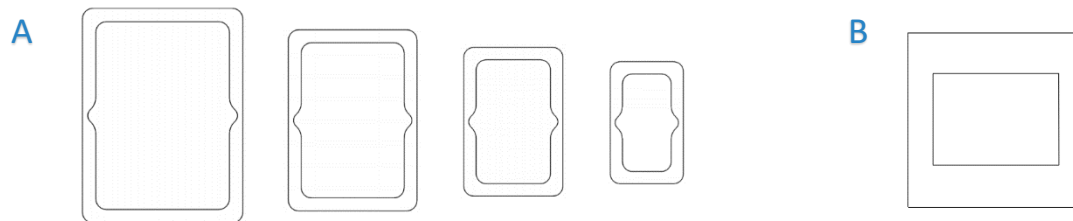


Figur 9.4. Skjærkraftdiagram for motorarmen i vertikal posisjon.

### 9.2.2. Valg av tverrsnitt

Bredden på motorarmen, som valgt i seksjon 5.4., skal være i samme størrelsesorden som motorarmene til El-Gewey [14] og Falstad [15]. Høyden vil ikke påvirke annet enn avstanden mellom motorene ved dobbelmotor-testing. Dette anses ikke som kritisk, slik at høyde og tykkelse vil velges uten restriksjoner for å gi tilstrekkelig dimensjonering i hensyn til laster og sikkerhetsfaktorer. Armen er bøyepåkjent og utsettes for trykkspenninger i overkant, og strekkspenninger i underkant. Det er vertikale krefter som gir bøyemomentet, som gjør at høyden i tverrsnittet er spesielt viktig.

Falstad valgte å benytte profiler med avrundede kanter og jevn godstykkelse, mens El-Gewey brukte kvadratiske standardprofiler med ulik veggtykkelse. Siden Falstad sitt konsept hadde teleskoperingsarmer, ble det lagt til et spor i armene for å implementere endestoppere på innsiden av profilene. På neste side vises tverrsnittprofilene til El-Gewey og Falstad.



Figur 9.5. Tverrsnittprofiler brukt i A) Falstad [15] sitt konsept og B) El-Gewey [14] sitt konsept.

Figur 9.4. viser teleskoptverrsnittene til Falstad og El-Gewey sitt standardprofil. Det velges å bruke et standardprofil for å senke kostnader og produksjonstid. Som i Falstad sitt konsept skal profilet ha avrundede kanter for å minke spenningskonsentrasjoner, men det vil ikke være behov for spor på innsiden. Videre utføres spenningsberegninger på det valgte profilet for å finne tilstrekkelige dimensjoner.

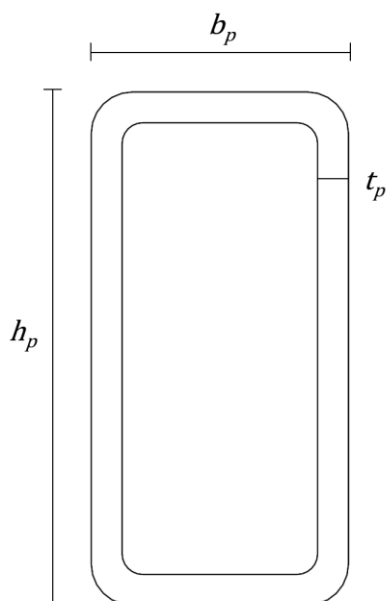
Fra Johannessen (vedlegg III) kan maks bøyespennning være 70-105 MPa ved belastningstype C III for S355J0 stål. For hulprofiler må tillatt bøyespennning reduseres med 20% som gir:

$$\sigma_{b,tillatt,1} = 70 * 0,8 = \mathbf{56 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{b,tillatt,2} = 105 * 0,8 = \mathbf{84 \text{ MPa}}$$

Tillatt belastningsområde for bøyespennning på hulprofilet blir dermed 56-84 MPa.

Hulprofilet velges fra Norsk Stål sine kataloger, og er av typen KF HUP S355J2H med følgende dimensjoner:



Tabell 9.2. Profildata, S355J2H

| Symbol  | Verdi   | Enhet           |
|---------|---------|-----------------|
| $h_p$   | 100     | mm              |
| $b_p$   | 50      | mm              |
| $t_p$   | 6       | mm              |
| $A_p^*$ | 1615    | mm <sup>2</sup> |
| $I_y^*$ | 1906374 | mm <sup>4</sup> |

\*Data hentet fra Section Properties i Solidworks

Figur 9.6. Tverrsnitt til motorarm.

Motorarmen er lang i forhold til høyden i profilet, slik at bøyemomentet blir den mest kritiske påkjenningen på armen. Det ses derfor på bøyespenningen i opplager B ved vertikal posisjon. Bøyespenningen i profilets ytterste fiber, uten hull blir:

$$\sigma_{b,p} = \frac{M_{b,v}y_p}{I_y} = \frac{2261000 * 50}{1906374} = \mathbf{59,3 \text{ MPa}} \quad (7)$$

I dette punktet er skjærspenningen lik null. 59,3 MPa er innenfor tillatt belastningsområde i henhold til belastningstype C III, hurtig vekslende belastninger, for S355J20 (vedlegg III).

Gjennomsnittlig skjærspenning i tverrsnittet mellom opplager B og C blir:

$$\tau_p = \frac{F_{C,x}}{A_p} = \frac{4110}{1615} = \mathbf{2,52 \text{ MPa}} \quad (6)$$

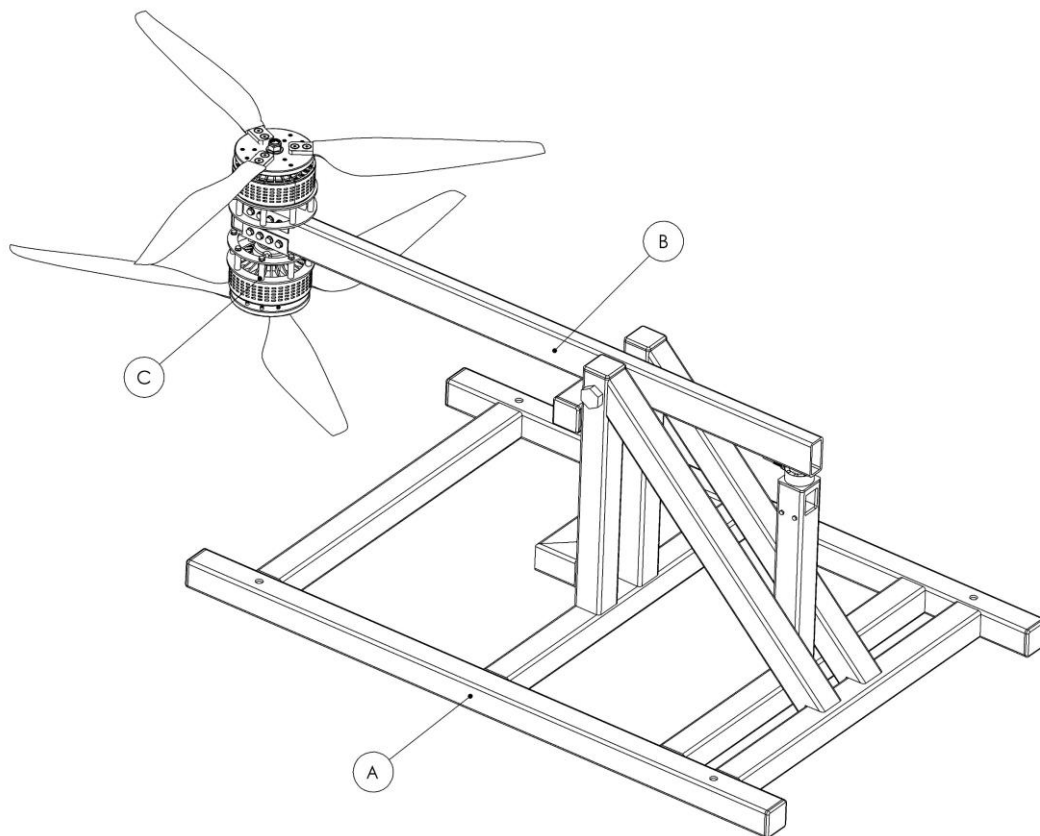
Normalspenning på motorarmen som følger av motorvekt anses som neglisjerbar siden lasten er så lav. Ved å sammenligne bøyespenning og skjærspenning kommer det tydelig frem at bøyespenningen er den dimensjonerende spenningen for motorarmen. Det blir foretatt en FEM-analyse for ferdig modell med hull i profilet som presenteres i kapittel 11.

## 10. Produktarkitektur og konseptdesign

I dette kapitlet presenteres 3D-modeller av konseptet, samt produktets oppbygning og arkitektur. Her vises sammenstillinger, konseptets ulike elementer og deler, samt en oversikt over standardkomponentene.

### 10.1. Sammenstilling

Under vises en komplett sammenstilling som viser testriggerens oppbygning. Det er fokusert på å utforme riggen med standardiserte deler der det er hensiktsmessig, og komponenter som er tilpasset for produksjonsmetodene som er tilgjengelige ved NMBUs verksted. Siden det er en omfattende konstruksjon med mange komponenter, deles den inn i tre hovedelementer: fundament, motorarm og motorfeste.



Figur 10.1. Sammenstilling av testriggeren med inndeling i hovedelementene A) fundament, B) motorarm og C) motorfeste.

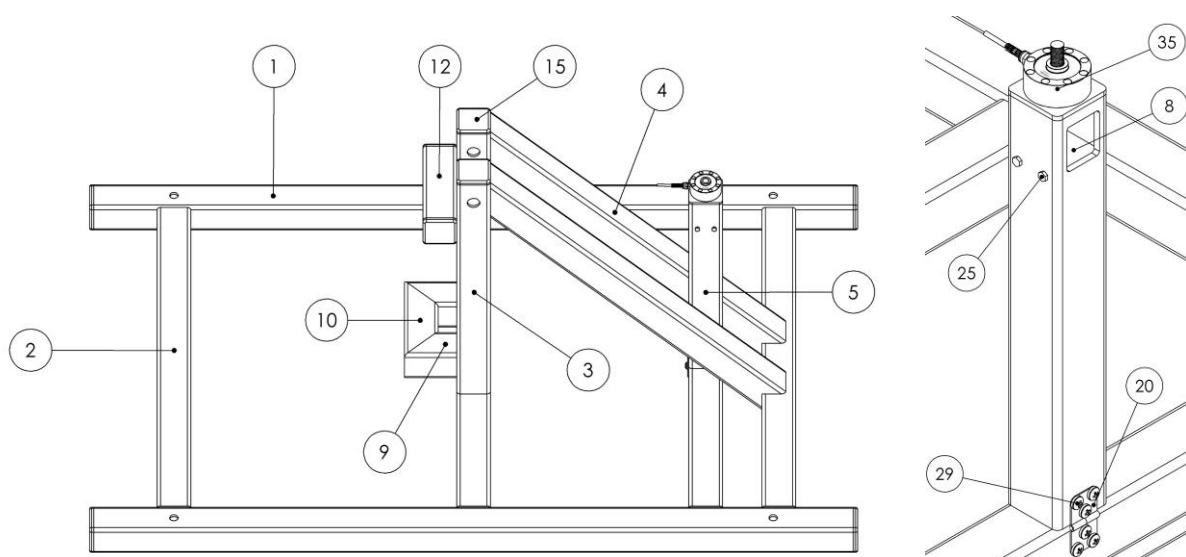
Videre følger en oversikt over riggens deler med nummerering og navngivning, samt figurer med henvisninger til delelisten. Totalt er det 37 deler, der delene med nummer 20-37 er standardkomponenter. Riggen er delt opp i de ovennevnte hovedelementene for å gi en bedre oversikt og et tydeligere bilde av de ulike komponentene.

Tabell 10.1. Oversikt over riggens deler med nummerering og navn. Figurer med delenummer presenteres etter tabellen.

| Del | Komponent                 | Del | Komponent              |
|-----|---------------------------|-----|------------------------|
| 1   | Sideprofil                | 20  | Hengsel                |
| 2   | Tverrprofil               | 21  | Hullplate*             |
| 3   | Støtteprofil for motorarm | 22  | Skive M8               |
| 4   | Støtteprofil 45°          | 23  | Skive M10              |
| 5   | Lastcelleprofil (HM)      | 24  | SKF – Washer           |
| 6   | Lastcelleplattform (HM)   | 25  | Skruefangerbolt        |
| 7   | Akselbolt                 | 26  | Motorpinskrue          |
| 8   | Skrueopsamler             | 27  | Propellskrue           |
| 9   | Lastcelleprofil (VM)      | 28  | Motorfestebolt         |
| 10  | Lastcelleplattform (VM)   | 29  | Hengsel og plateskrue  |
| 11  | Motorarm                  | 30  | Mutter - M6 x 1,0*     |
| 12  | Rotasjonssperre           | 31  | Mutter - M10 x 1,5     |
| 13  | Akselføring               | 32  | Lastcellemutter*       |
| 14  | Profilpropp 100 x 50      | 33  | Låsemutter – M18 x 1,5 |
| 15  | Profilpropp 80 x 80       | 34  | Mutter - M30 x 3,5     |
| 16  | Motorfundament            | 35  | Lastcelle              |
| 17  | Motorring                 | 36  | Propellblad            |
| 18  | Motorpins                 | 37  | LEM-200                |
| 19  | Propellnav                |     |                        |

\* Fremkommer i seksjon 10.2.

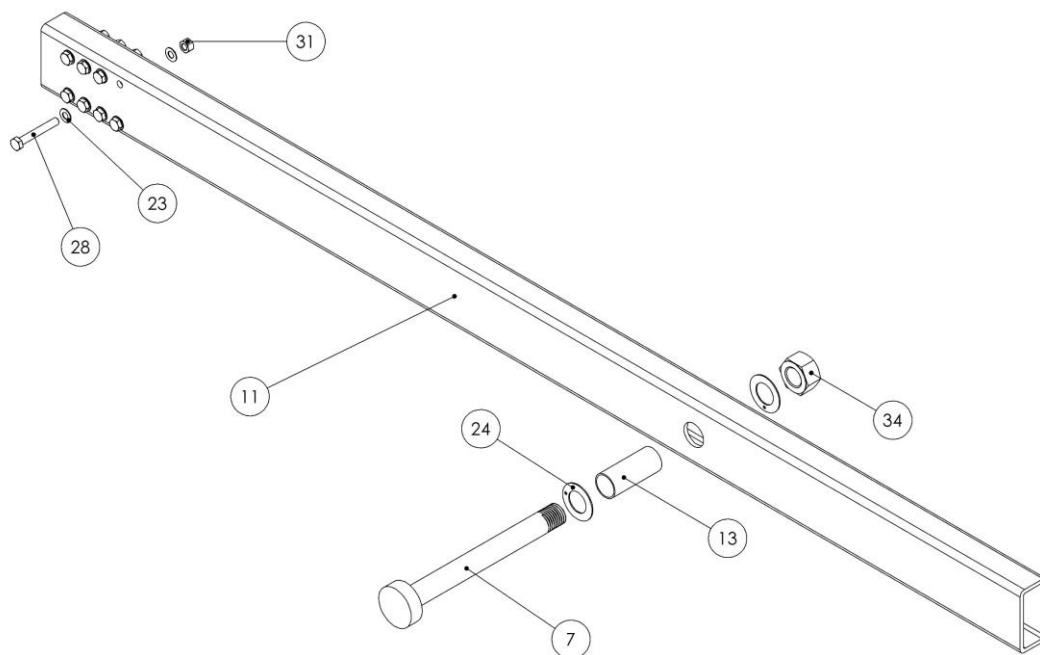
## A) Fundament



Figur 10.2. Sidestilt visning av komponentene i hovedelement A, med nærbilde av lastcelleprofilen (5) og tilhørende deler. Del nr. 21 og 34 fremkommer ikke her, men vises i seksjon 10.2.

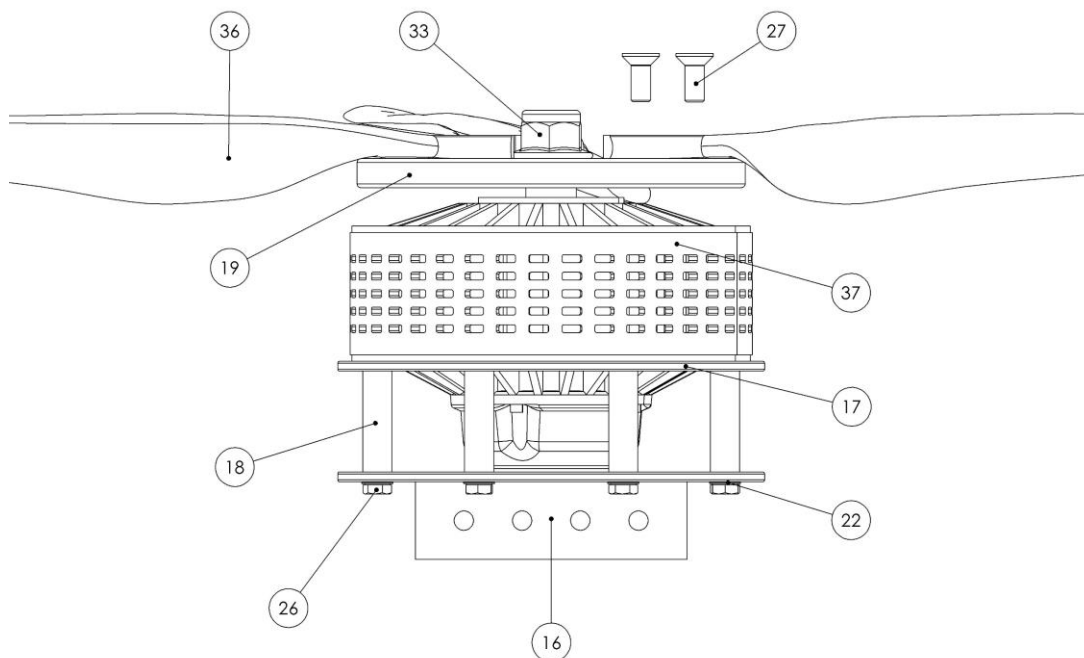


**B) Motorarm**



Figur 10.3. Eksplosjonsvisning av komponentene i hovedlement B, med nummerering.

**C) Motorfeste**

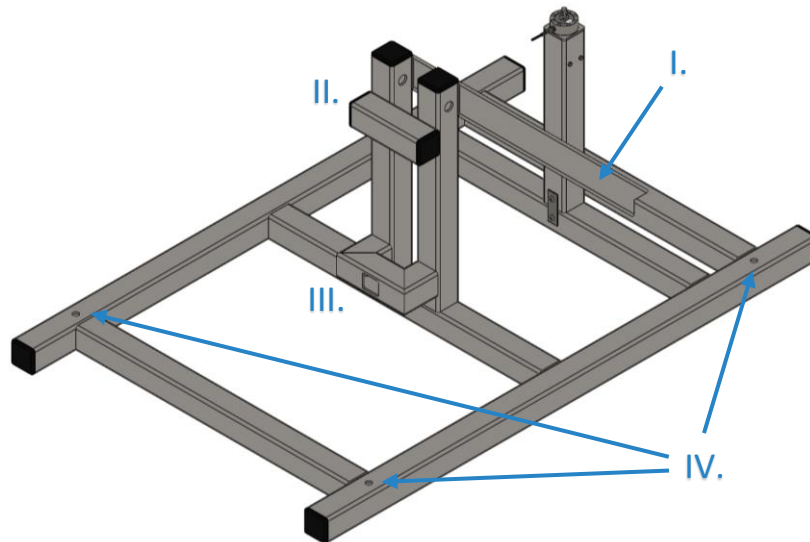


Figur 10.4. Sidestilt visning av hovedelement C, med nummererte komponenter. To av propellskruene er opphevet for å vise delenummer.

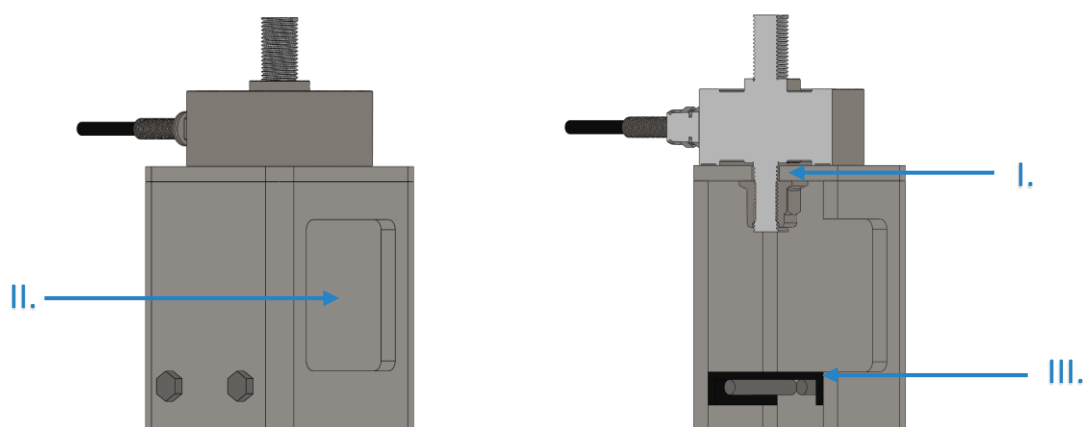
## 10.2. Design av hovedelementer

Her presenteres hovedelementene i større detalj med forklaringer knyttet til funksjoner, konstruksjonsvalg og virkemåte. Transparente komponenter er hentet fra andre hovedelementer for å tydeliggjøre funksjoner.

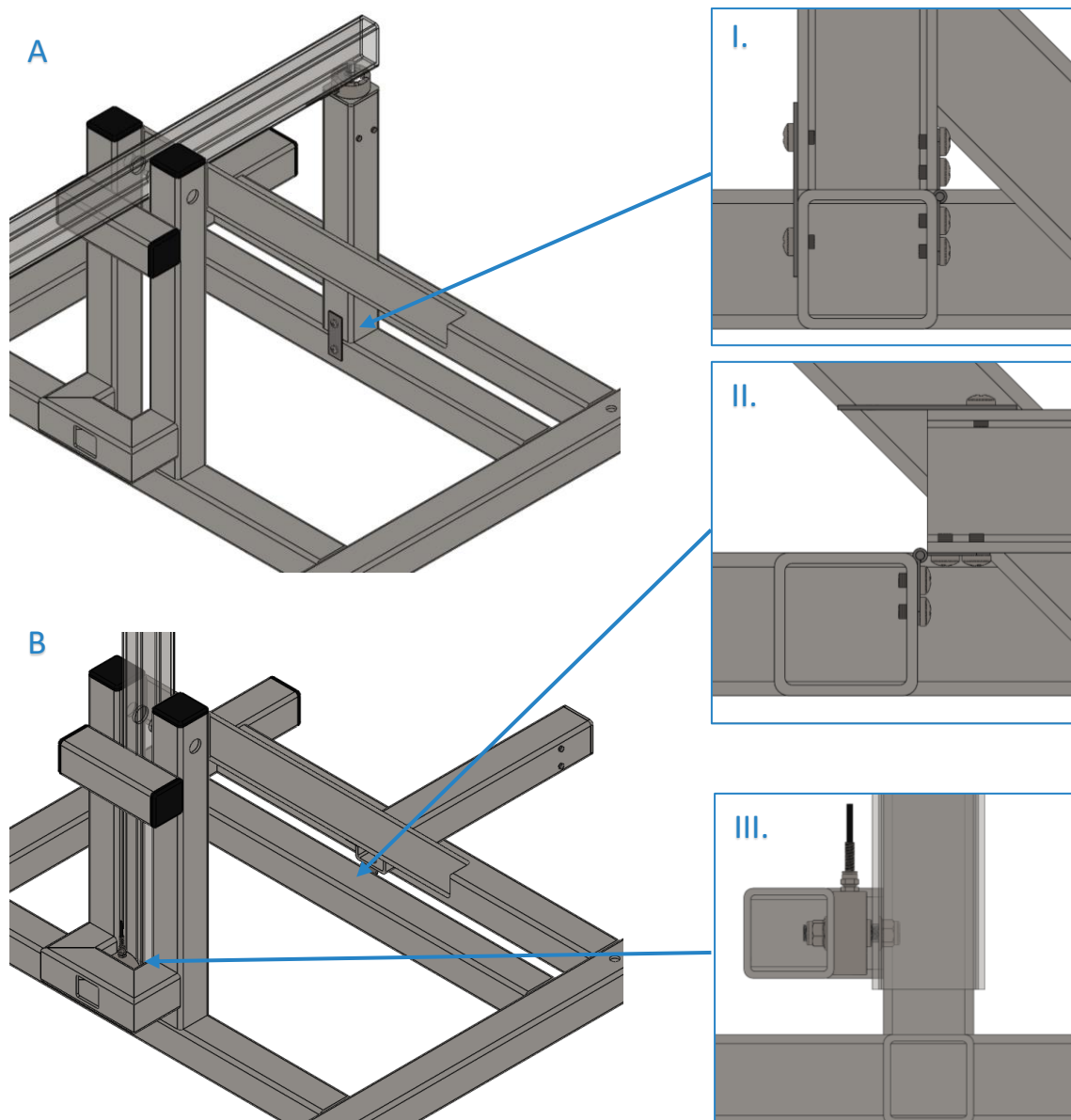
### 10.2.1. Fundamentets hovedelementer



Figur 10.5. Oversiktsbilde av fundamentkonstruksjonen. De vertikale profilene som holder motorarmen på plass, er støttet opp av to profiler (I.) i 45 graders vinkel. Den øverste av de tverrliggende profilene (II.) mellom de vertikale profilene har som hensikt å hindre at motorarmen kan vippe ned mot bakken ved bytte av testoppsett. Den nedre tverrliggende profilkonstruksjonen (III.) med hull i midten fungerer som plattform for lastcellen ved vertikal testing, der hullet er laget for å gi rom til å skru fast lastcellen. Hullene i sideprofilene (IV.) gir mulighet til å sikre riggen med fastskruing.



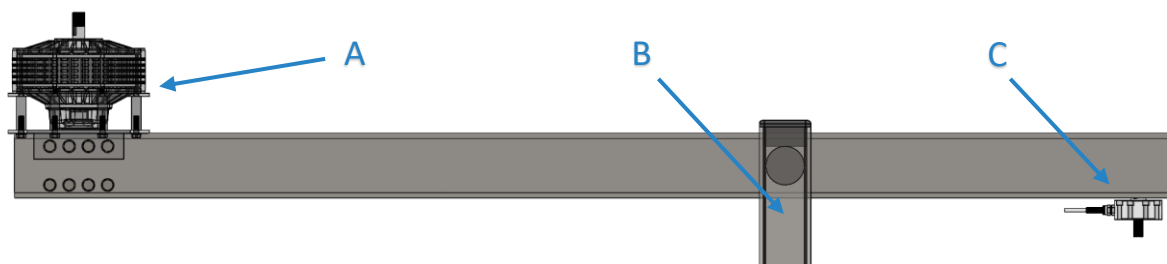
Figur 10.6. Her vises utformingen til toppen av lastcelleprofilen (HM) med og uten seksjonsvisning. Profilet har en plattform på toppen til lastcellen med et skruerull (I.) for å tillate festing. Hullåpningen i profilen (II.) er for å gi tilgang for festing av lastcellen, og plastplattformen (III.) er plassert for å hindre at mutter eller skrue fra lastcellen faller ned i profilen.



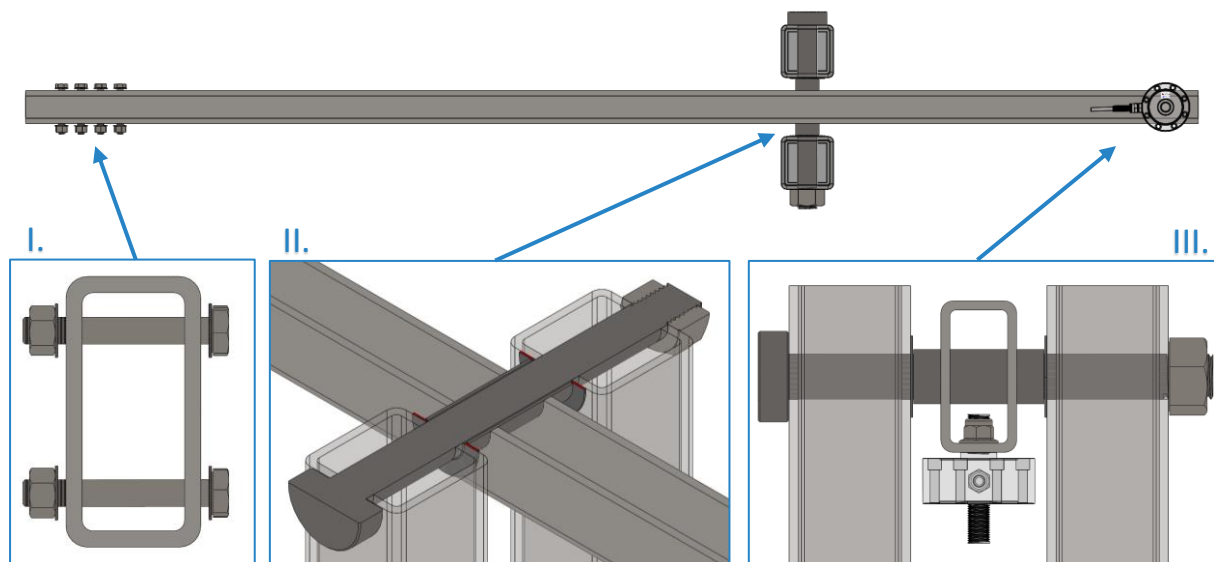
Figur 10.7. Figuren over viser hvordan lastcelleprofil (HM) vipres ned ved bytte mellom A) horisontal testkonfigurasjon og B) vertikal testkonfigurasjon. Profilet må kunne vipres for å tillate rotasjon av motorarmen til vertikal stilling. Mekanismen består av et hengsel og en hullplate (21) som er festet til lastcelleprofil (HM) og det underliggende tverrstilte profilet. De innrammede illustrasjonene viser:

- I. Hengsel og hullplate som er skrudd fast i begge ender for å sikre lastcelleprofilet (HM) under testing.
- II. Den ned nederste skruen i hullplaten er fjernet slik at profilet kan vipres om hengselet og gi klaring for at motorarmen kan roteres til vertikal stilling.
- III. Lastcellen er skrudd ut av lastcelleprofil (HM) og festet med lastcellemutteren (32) på det tverrliggende lastcelleprofilet (VM) for å måle thrust i den nye stillingen.

## 10.2.2. Motorarmens hovedelementer



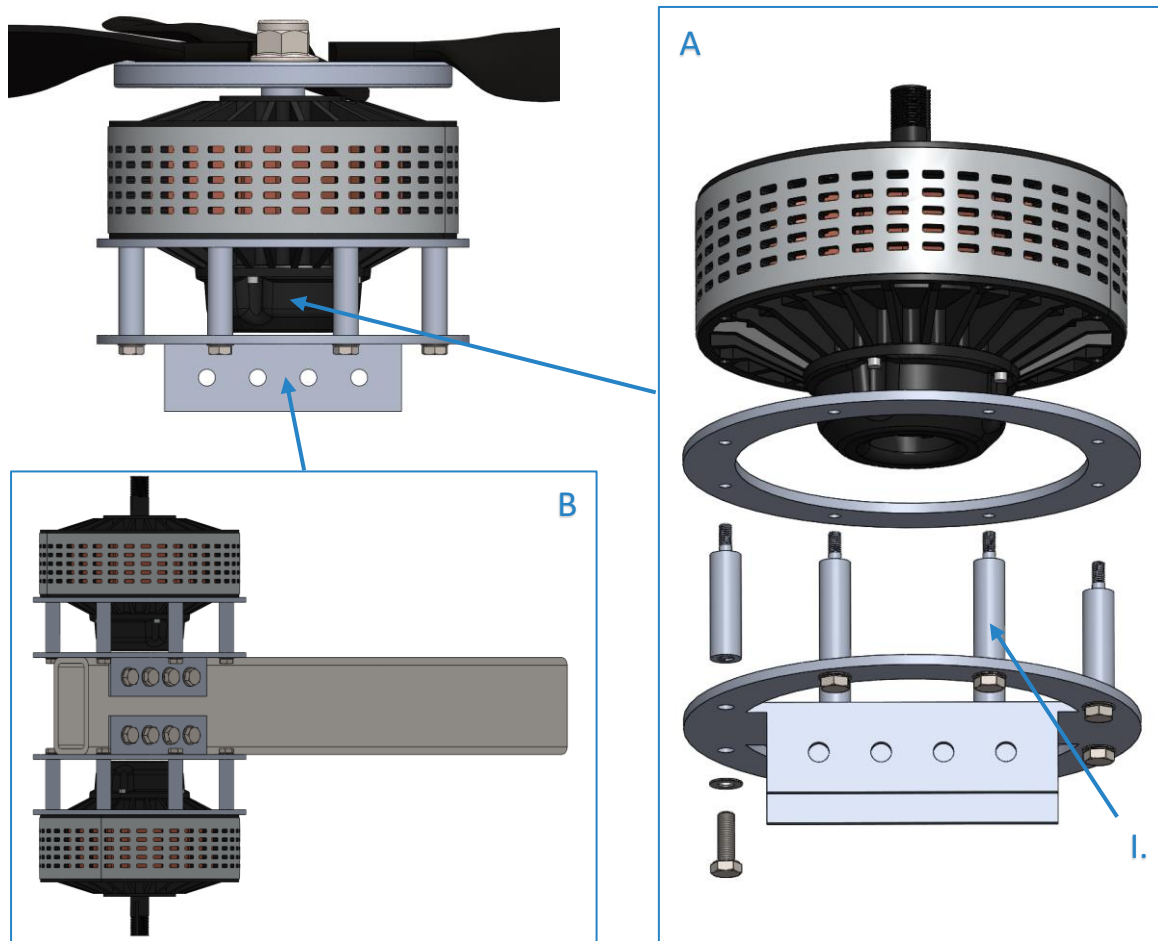
Figur 10.8. Illustrasjon av komplett motorarmelementet med A) motorfeste, B) støttearm og C) lastcelle. Avstand fra senter av motorfestet til vippepunktet er 1100mm, og avstanden fra lastcelle til vippepunkt er 550mm. Dette gir et forhold på 2:1, slik at lastcellen måler dobbelt så høy thrust som motoren leverer. Testtriggen kan kjøre med enkelmotor som vist i figuren, eller med dobbeltmotor ved å feste et motorfeste til på de nedre bolthullene. Dette gir også mulighet til å teste enkeltmotorer separat i trekkkonfigurasjon (motor på toppen) og i skyvekonfigurasjon (motor på bunn) for å se på forskjellene i løfteevne dette gir.



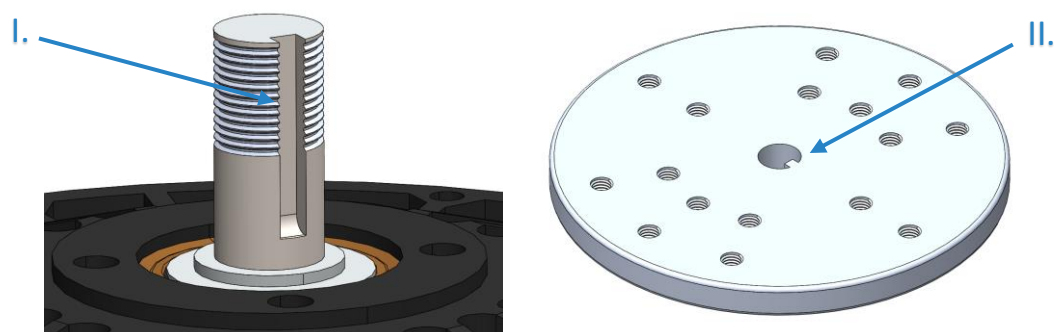
Figur 10.9. Figuren viser nærbilder av detaljer i motorarm-hovedelementet. De nummererte illustrasjonene viser:

- I. Festemekanismen for montering av motorfestet til motorarmen. Det benyttes fire bolter per motorfeste, som festes med muttere.
- II. Koblingen mellom motorarm og fundament. Det monteres en stålforing i motorarmen for å gi akselbolten en jevn glideflate slik at friksjonen blir lav. På sidene av foringen mot støtteprofilene er det plassert aksialskiver for å hindre slark, og friksjon mellom foringen og profilene. Akselbolten går gjennom begge profilene og motorarmen, og festes med mutter i enden.
- III. Lastcellen og medfølgende festemutter montert i motorarmen, samt akselbolt og interagerende komponenter.

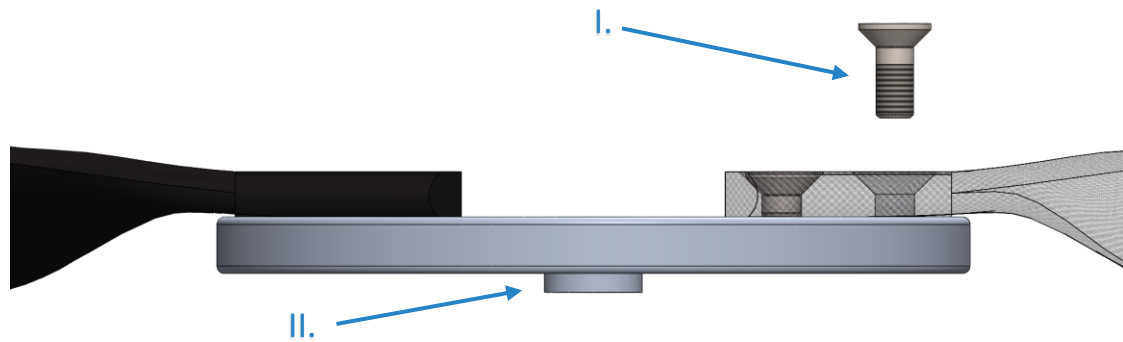
## 10.2.3. Motorfestets hovedelementer



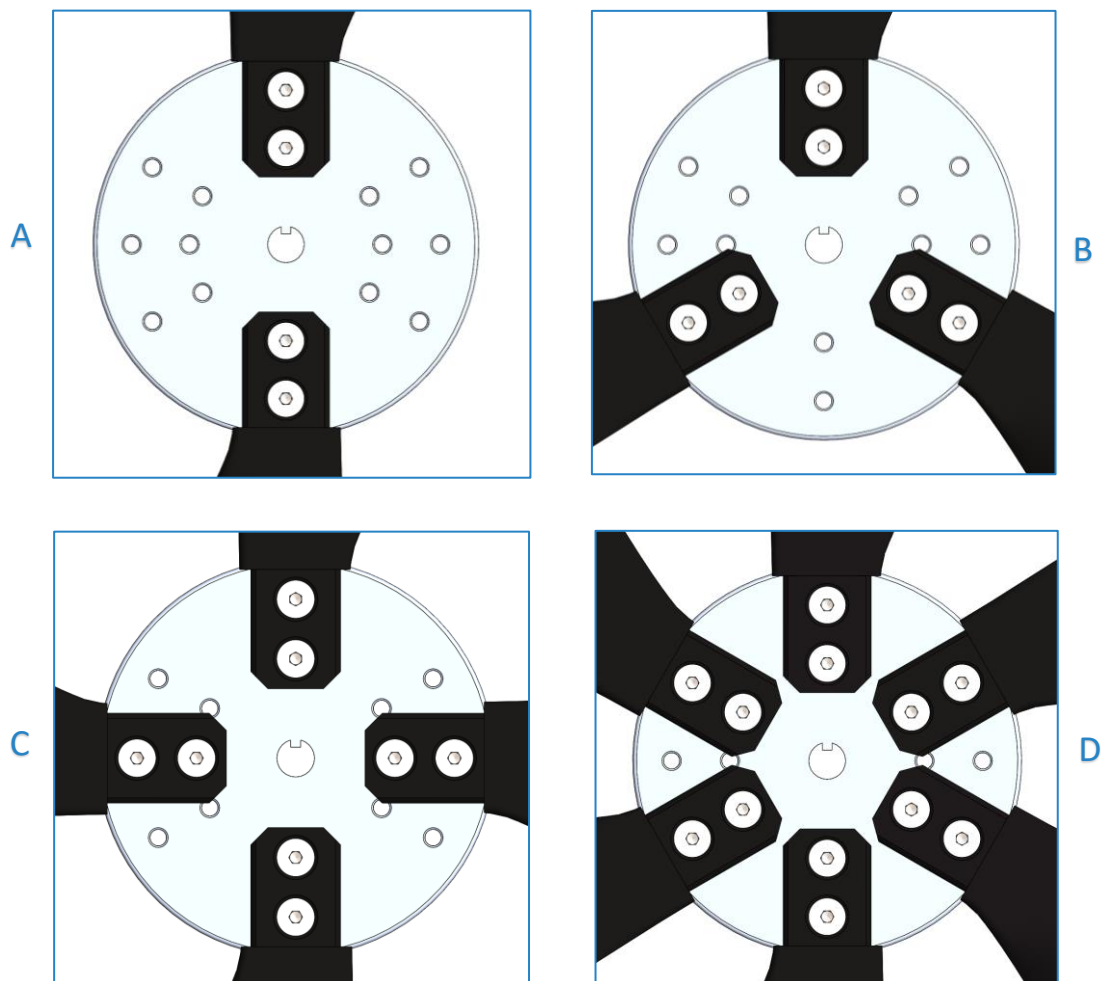
Figur 10.10. Figuren viser: A) hvordan Lynch-motoren monteres til motorfestet, og B) hvordan motorfestet er montert til motorarmen i dobbelmotor-konfigurasjon. Motorpinsene (I.) i motorfestet har som funksjon å lage klaring til motorens underside som stikker ned under de gjengede monteringshullene i motoren.



Figur 10.11. Nåværende aksel- og navløsning. Motorakselen er gjenget for å tillate festing med låsemutter. LEM-200 motoren leveres med kilespor som standard (I.), men kan spesialbestilles med andre utforminger. Legg merke til sporet i propellnavetets senterhull (II.) som går inn i akselens kilespor og hindrer navet i å rotere uavhengig av motorakselen.



Figur 10.12. Figuren viser hvordan propellbladene er festes til navet med skruer (I.). Nederst på navet er det en utheving (II.) som gjør at navet kun er i kontakt med roterende motordeler og ikke skraper mot motorens stasjonære deler.



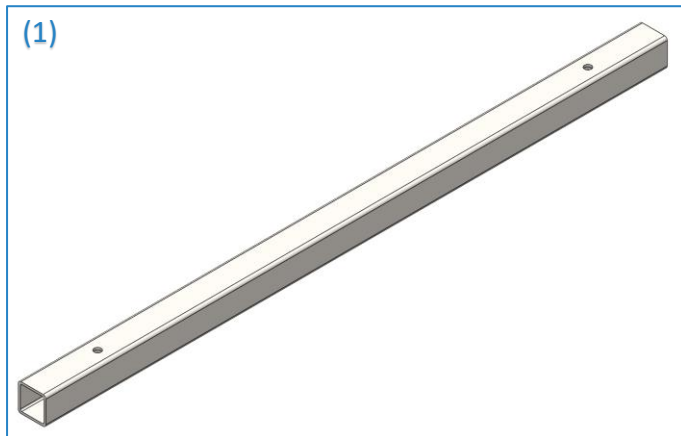
Figur 10.13. Illustrasjonen viser hvordan plasseringen hullene i propellnavet tillater montering av følgende konfigurasjoner: A) to-blads, B) tre-blads, C) fire-blads og D) seks-blads.



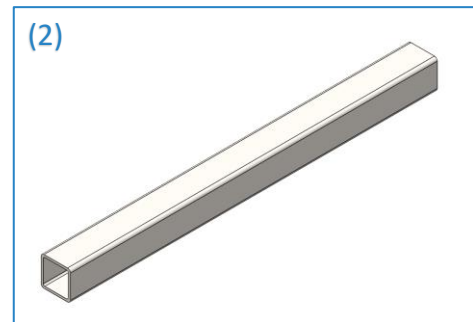
### 10.3. Design av komponenter

Her fremstilles alle riggens deler, med unntak av standarddeler, med forklaring. Det gjøres rede for elementer og detaljer for hver del. Delenummer er angitt i parentes i hver figur.

**Del 1: Sideprofil**

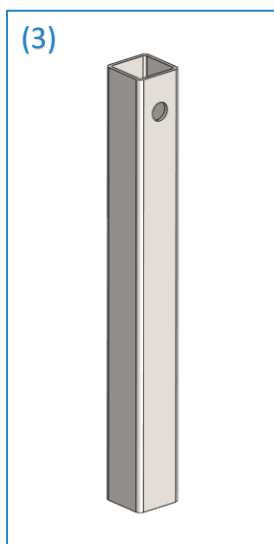


**Del 2: Tverrprofil**

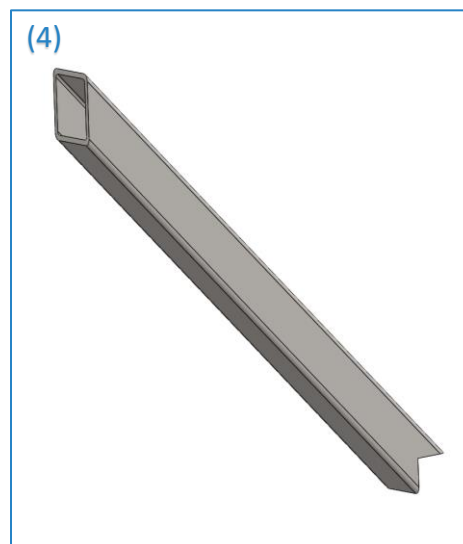


Figur 10.14. Sideprofil (1) og tverrprofil (2) er bygget opp av et standardisert 80x80x6 stålrør og danner basen i fundamentet. Hullene i (1) er gjennomgående for å tillate fundamentering ved fastskruing.

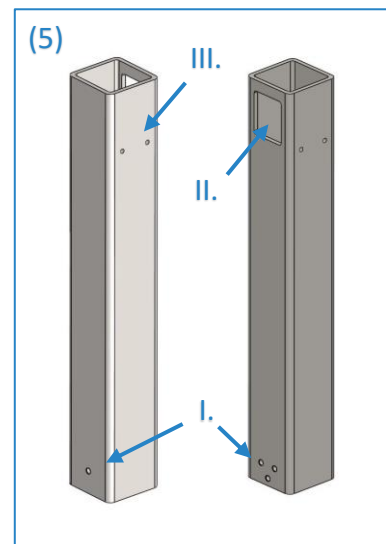
**Del 3: Støtteprofil for motorarm**



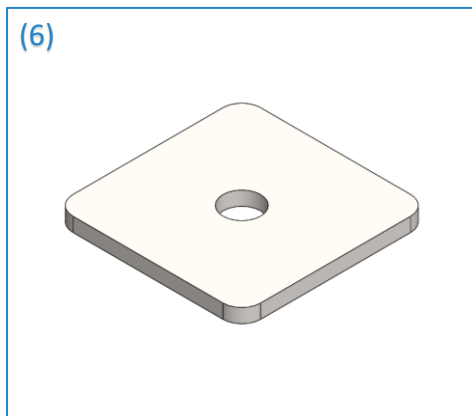
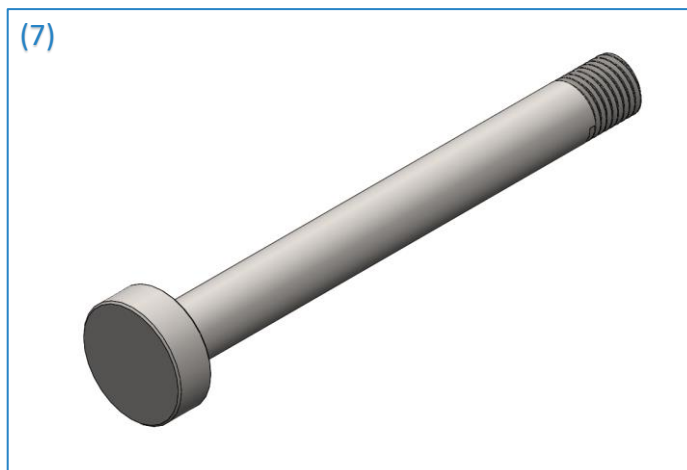
**Del 4: Støtteprofil 45°**



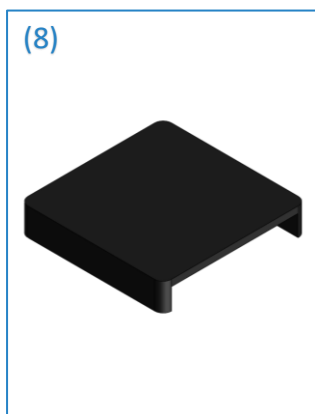
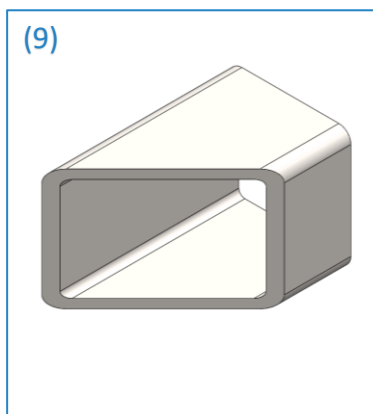
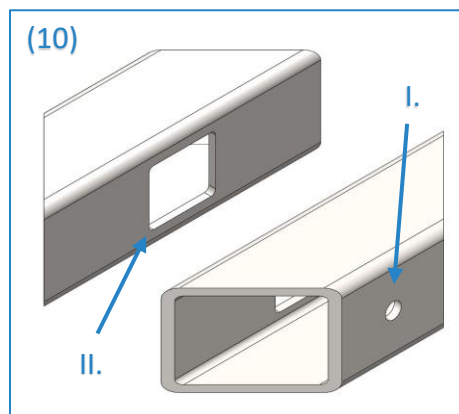
**Del 5: Lastcelleprofil (HM)**



Figur 10.15. Del 3, 4, 5 er alle bygget opp av det ovennevnte stålrøret. Det gjennomgående hullet i støtteprofil for motorarm (3) er for akselbolten. Støtteprofil 45° (4) har et 45 graders kutt på oversiden for å kobles til del 3, og et dobbelt 45 graders kutt i nedsiden for montering til tverrprofilet (2). Lastcelleprofil (HM) (5) har skruer hull på nedsiden (I.) til hengsel og hullplate. Det store hullet mot toppen (II.) er for å gi tilgang til festing/løsning av lastcellen, mens de tverrgående hullene på sidene (III.) er til boltene som holder skrueropsamleren (8).

**Del 6: Lastcelleplattform (HM)****Del 7: Akselbolt**

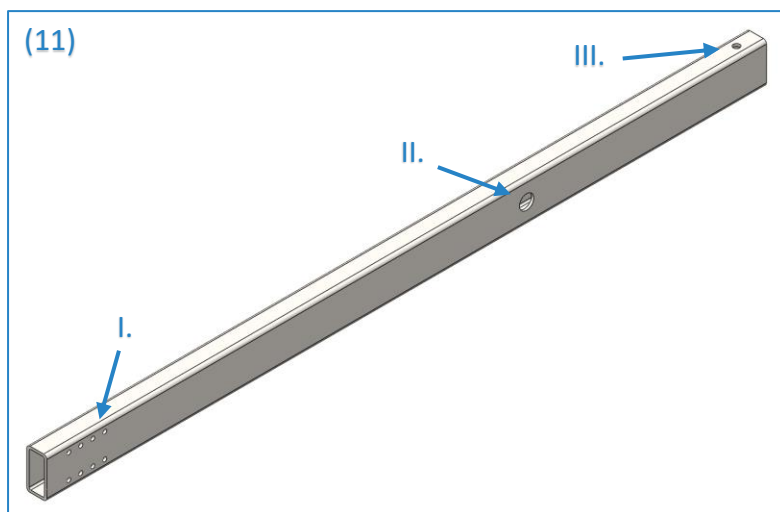
Figur 10.16. Lastcelleplattform (HM) (6) er en stålplate med hull for å feste lastcellen, og monteres på toppen av del 5. Akselbolt (7) kobler fundamentet til motorarmen og festes med mutter i enden.

**Del 8: Skru oppsamler****Del 9: Lastcelleprofil (VM)****Del 10: Lastcelleplattform (VM)**

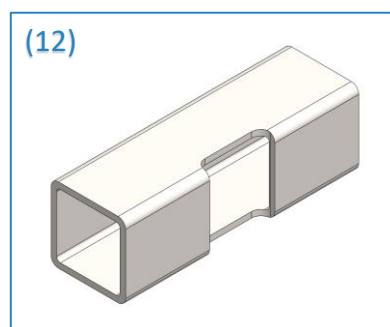
Figur 10.17. Skru oppsamler (8) monteres i del 5 like under hullet som gir tilgang for festing/løsning av lastcellen. Den har som funksjon å hindre mutter i å falle ned i profilet ved løsning av lastcellen. Lastcelleprofil (VM) (9) gjør at del 10 kan monteres med riktig avstand til del 3 slik at motorarmen står normalt på bakken ved vertikal testing. Lastcelleplattform (VM) (10) huser lastcellen ved vertikal testing. Skruhullet (I.) er for festing av lastcellen, mens hullet på motstående side (II.) gir nødvendig plass til festing/løsning av lastcellen.



## Del 11: Motorarm

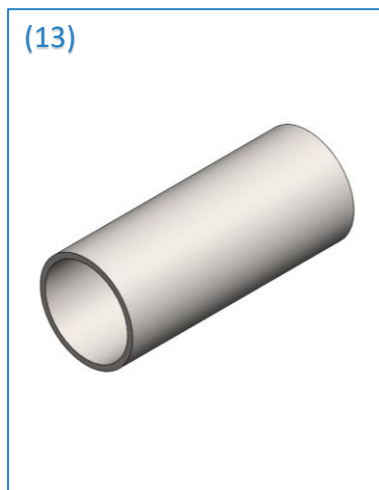


## Del 12: Rotasjonssperre

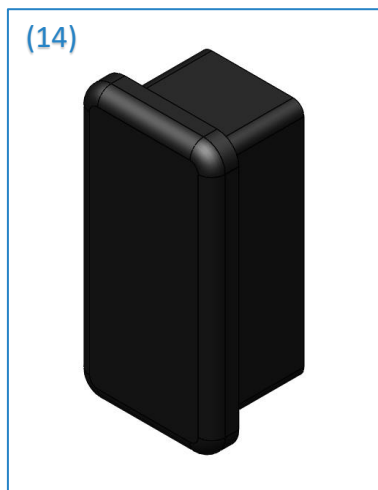


Figur 10.18. Motorarmen (11) har hull på ene enden (I.) for å montere motorfestet til armen med bolter. Senterhullet (II.) er for foringen (13) og akselbolten (7), mens hullet i andre enden (III.) er til lastcellen. Rotasjonssperren (12) monteres på tvers av del 3 for å hindre at motorarmen kan rotere feil vei ved bytting av testkonfigurasjon. Sporet på sideflaten er for å gi klaring til motorarmen i vertikal posisjon.

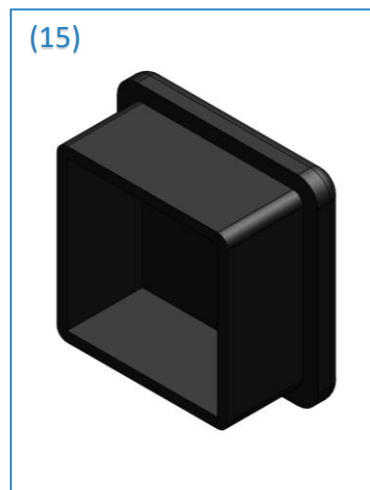
## Del 13: Akselforing



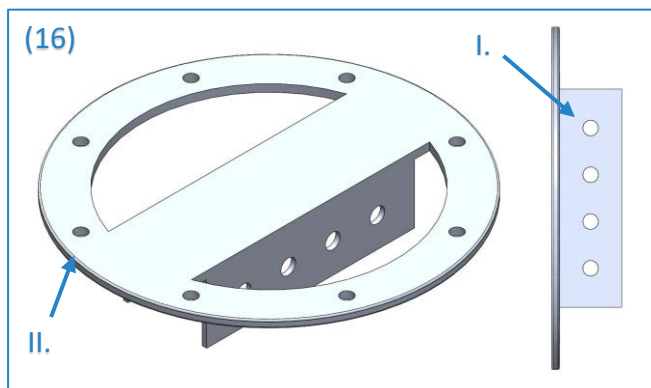
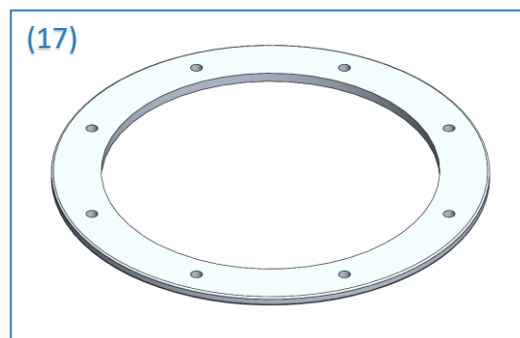
## Del 14: Profilpropp 100x50



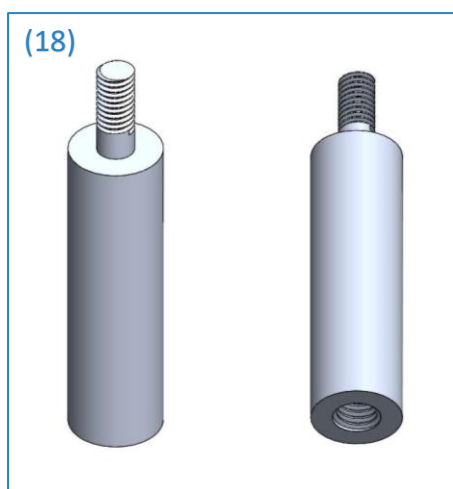
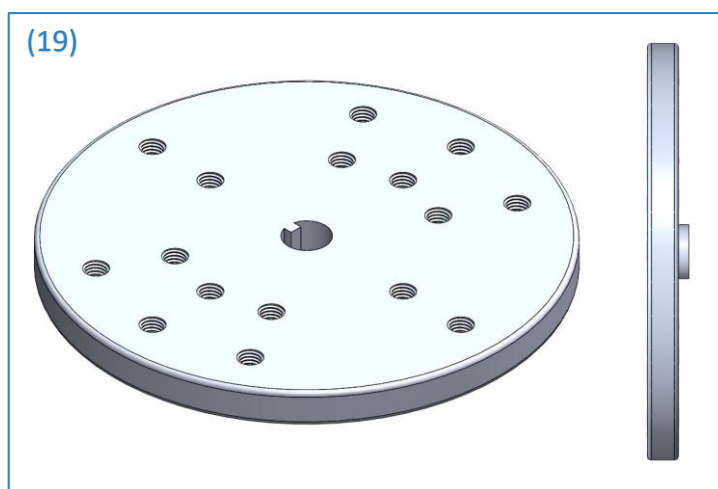
## Del 15: Profilpropp 80x80



Figur 10.19. Akselforingen (13) monteres mellom motorarmen og akselbolten for å gi en kontaktflate med lite friksjon. Profilproppene (14) og (15) monteres på enden av riggens stålprofiler for å hindre at det havner skitt og lignende inne i profilene, samt å gjøre testriggens kanter mindre farlige. Profilpropp (14) monteres kun på motorsiden og ikke på lastcellesiden, da det er nødvendig å komme til lastcellen for å kunne løsne/feste den.

**Del 16: Motorfundament****Del 17: Motorring**

Figur 10.20. Motorfundamentet (16) er delen som gjør det mulig å feste motoren til motorarmen. Den standardiserte skruerinnfestingen (I.) gjør det mulig å lage andre motorfester til ulike motortyper dersom. Skruerhullene i ringen (II.) passer overens med hullene i motorringen (17) og har som hensikt å huse del 18 for å lage klaring til motorens underside.

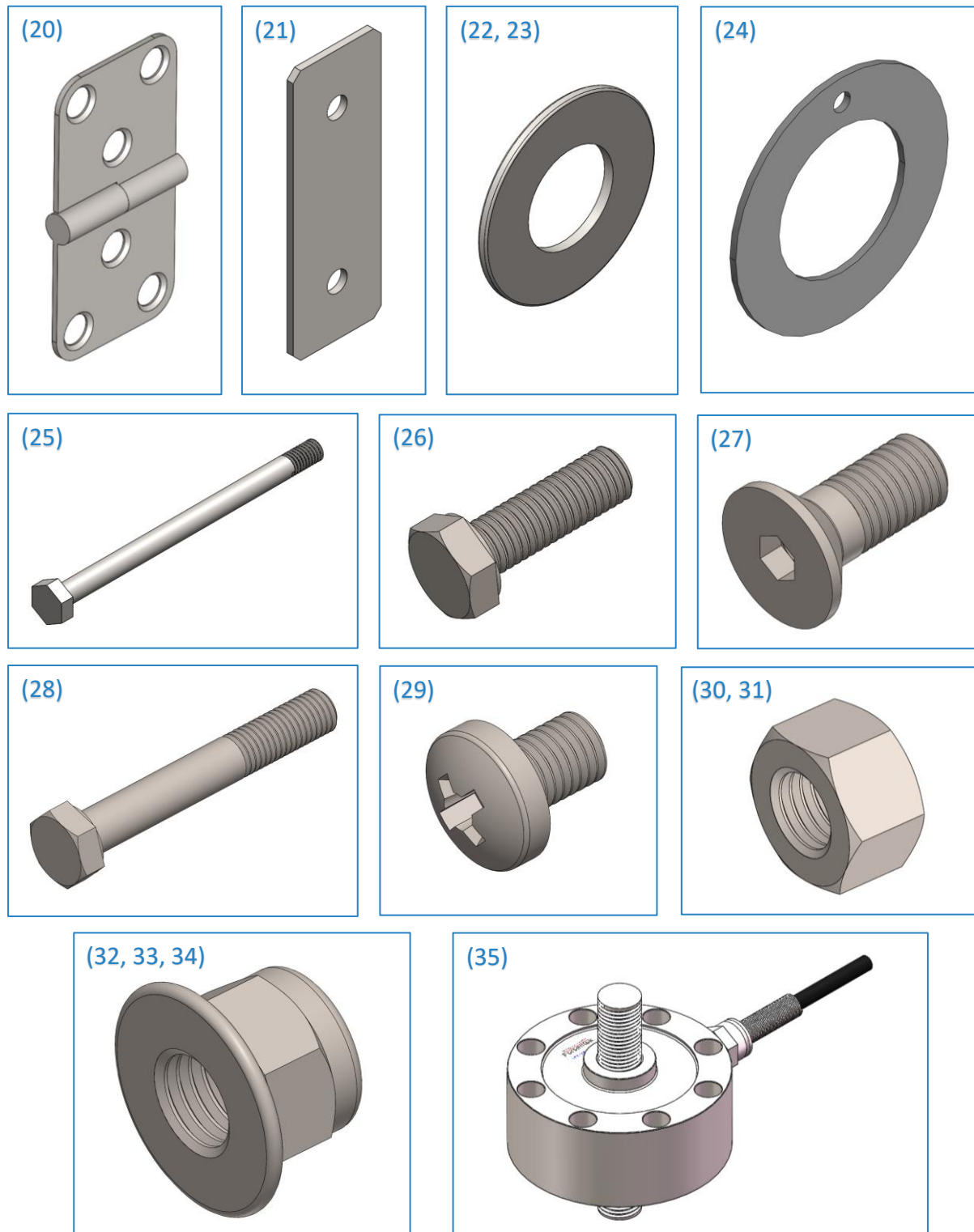
**Del 18: Motorpins****Del 19: Propellnav**

Figur 10.21. Motorpinsene (18) har som funksjon å lage klaring til motorens underside. De har skruerhull på bunnen, og er gjenget til å passe motorens montasjegjenger i toppen (M8 x 1,25). Propellnavet (19) er utformet med et spor for å passe i motorens kilespor slik at navet roterer med akselen. Uthevingen på undersiden som vist på sidevisningen til høyre er for å gi klaring på undersiden slik at ikke navet skrapet mot motorens stasjonære deler.

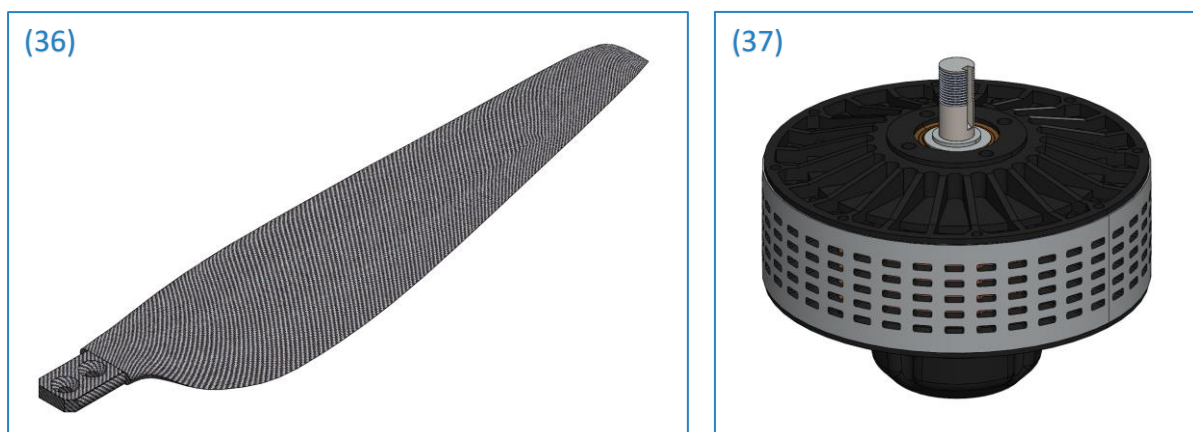
## 10.4. Standardkomponenter og modularisering

### 10.4.1. Standardkomponenter

I denne seksjonen følger en oversikt over standardkomponentene som benyttes i testtriggen.



Figur 10.22. Oversikt over standarddeler med delenummer 20-35.



Figur 10.23. Oversikt over standarddeler med delenummer 36-37.

Under følger en delliste med mer detaljer rundt standarddelene. I tillegg til standardkomponentene er majoriteten av riggen bygget opp av kommersielt tilgjengelige stålprofiler. Noen deler kan byttes ut etter hva som er tilgjengelig, og kildene markert med "\*" er forslag til deler som kan brukes. Øvrige kilder henviser til CAD-modeller hentet fra nettet. Lastcellemodellen og propellbladmodellen er modifisert for å passe prosjektet. Dimensjonene for disse delene kan derfor avvike noe fra endelig oppsett.

Tabell 10.2. Oversikt over standardkomponenter.

| Del | Komponent                                      | Del | Komponent   |
|-----|--|-----|---|
| 20  | Hengsel 114 x 50 [38]*                         | 29  | Hengsel- og hullplateskrue<br>ISO 7045 - M8 x 12 - Z - 12 - C |
| 21  | Hullplate 100 x 35 x 2,5 [39]*                 | 30  | Mutter – M6 x 1,0   |
| 22  | Skive – M8                                     | 31  | Mutter – M10 x 1,5  |
| 23  | Skive – M10                                    | 32  | Lastcellemutter – M14 x 1,5                                   |
| 24  | SKF – PCMW 325401.E [40]                       | 33  | Låsemutter til motoraksel - M18 x 1,5                         |
| 25  | Skruefangerbolt M6 x 90 [41]*                  | 34  | Mutter til akselbolt – M30 x 3,5                              |
| 26  | Motorpinkskrue<br>ISO 4017 – M8 x 25 - C       | 35  | Lastcelle [42]  |
| 27  | Propellskrue<br>ISO 10642 - M10 x 25 – 25 - C  | 36  | Propellblad [43]  |
| 28  | Motorfestebolt<br>ISO 4014 - M10 x 70 x 26 - C | 37  | Lynch LEM-200 [44]  |

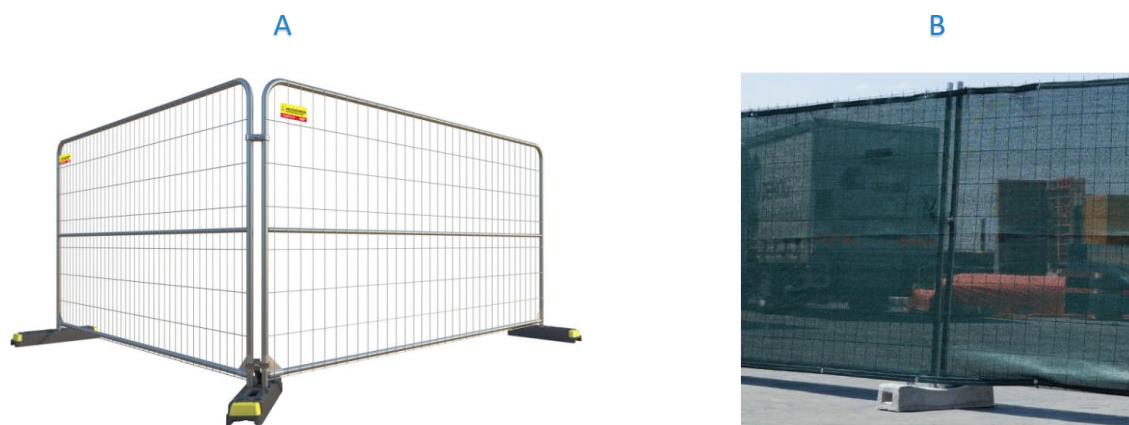
#### 10.4.2. Modularisering

Motorfestet er utformet som en utskiftbar modul. Dersom andre motorer skal testes vil det kun være nødvendig å utforme et nytt motorfeste med det samme skruemønsteret som i enden på motorarmen. Det kreves ingen andre modifikasjoner på testriggen for å teste andre motorer. Dersom utformingen på andre motorer ikke er for ulik LEM-200 motoren kan det

være nok å foreta modifikasjoner på nåværende motorfeste for å sikre kompatibilitet. Riggens åpne og ryddige konstruksjon gjør at det er enkelt å opprettholde gode kablingsystemer ved endring av komponenter.

#### 10.4.3. Forslag til sikkerhetsvegger

Sikkerhetsvegg til rigg og styringsstasjon er ikke modellert i SolidWorks. Her anses det som fordelaktig å finne ut hva NMBU har tilgjengelig før det utredes nye løsninger som potensielt fører til økte kostnader. For å hindre adgang til testriggen og for å beskytte umiddelbare omgivelser under testing anses følgende gjerdedtype som passende:



Figur 10.24. A) Byggegjerdet for å hindre tilgang til rigg under testing [53], og B) forheng med gjennomsyn for å sikre mot små fragmenter ved eventuelle feil [54].

For sikring rundt operatør anses et beskyttelsesbur av pleksiglass rundt kontrollstasjonen som det beste alternativet. Dette er rimelig, gir gjennomsyn til riggen og er helt tett. Under vises en rendert visualisering av tenkt løsning.



Figur 10.25. Visualisering av tenkt pleksiglassbur rundt operatør og kontrollstasjon.

## 11. Robusthet, optimering og sikkerhet

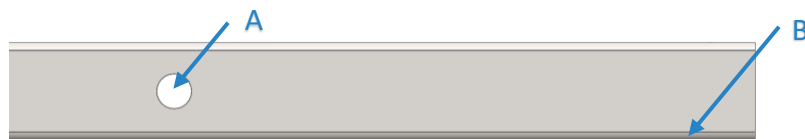
Her gjennomgås FEM-analysen som er utført på testtriggens motorarm. Det gjøres også rede for materialvalg og konstruksjonens sikkerhet.

### 11.1. FEM-analyse

For å verifisere håndberegningene og sjekke at konstruksjonen er sikker ble det foretatt en FEM-analyse på motorarmen for å se på Von Mises-spenning med senterhull i profilet og deformasjon under maks last.

#### 11.1.1. Betingelser for analysen

SolidWorks-modellen av motorarmen ble importert inn i Ansys Mechanical for å utføre de nødvendige analysene. Materialet til bjelken ble satt til S355J0. Det ble lagt inn opplagere i senterhullet til akselbolten og på undersiden ved koblingspunktet til lastcellen. For senterhullet ble det brukt et sylindrisk opplager som var festet i aksial- og radiell retning, og fritt i tangentiell retning. Koblingspunktet for lastcellen ble valgt som fast opplagret.



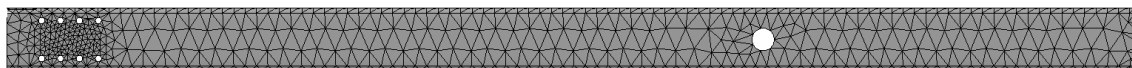
Figur 11.1. Snitt av motorarmen som viser opplagrene som ble brukt i FEM-analysen: A) sylindrisk, festet aksielt og radielt, og fritt tangentielt, og B) fast opplager på undersiden ved lastcellen.

Det ble sett på tidligere valgt maksimal last for riggen, 2055 N, som kan forekomme ved dobbelkorttesting. For å forenkle analysen ble kreftene satt ved senter av posisjonen til motorfestet på midten av bjelken. Hver av kreftene er på 1027,5 N, som er halvparten av maksimallasten.



Figur 11.2. Snitt av motorarmen som viser posisjonen til kreftene i analysen.

For meshing av motorarmen ble den automatisk genererte meshingen i ANSYS benyttet med maksimal oppløsning. Det oppstod ingen nevneverdige spenningskonsentrasjoner med denne meshen.

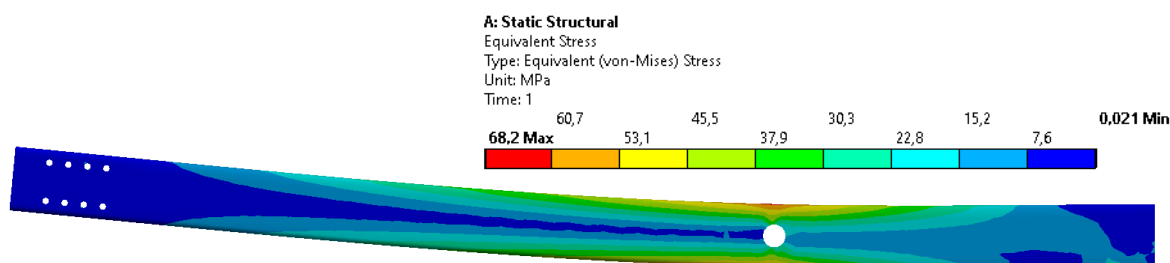


Figur 11.3. Illustrasjonen viser den genererte meshen på motorarmen.

### 11.1.2. Resultater

Under fremstilles resultatene fra FEM-analysen.

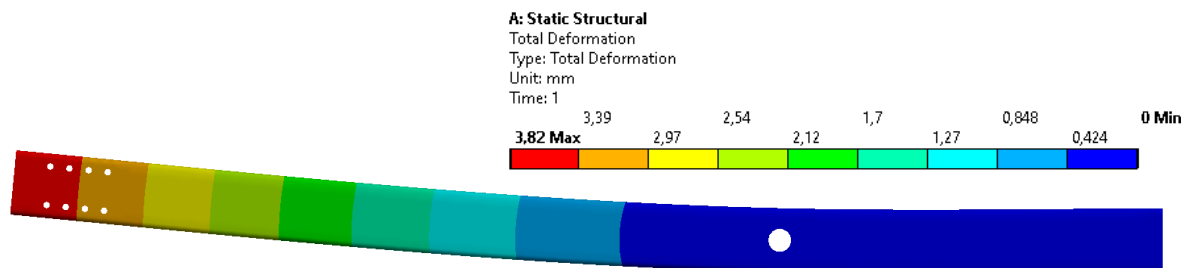
#### Von Mises - spenning:



Figur 11.4. Von Mises-spenning i motorarmen ved maksimal last. Maks verdi er 68,2 MPa på toppen av profilet ved senterhullet. Det fremkommer også at hullkantrykket ikke blir nevneverdig stort.

Jevnføringsspenningen funnet i FEM-analysen (68,2 MPa) er noe høyere enn maksimal spenning funnet ved opplager B i håndberegningene (59,3 MPa). Dette anses som et fornuftig avvik, siden FEM-analysen ble foretatt med hull i armen og regner ut Von Mises-spenningen, kontra håndberegningene som kun tok for seg bøyesspenning.

#### Deformasjon:



Figur 11.5. Figuren viser deformasjonen i motorarmen ved maksimal last. Maks nedbøyning inntreffer ytterst på bjelken og er på 3,82 mm. Dette vil gi en vinkelforandring på 0,18° for propellbladene.



## 11.2. Materialvalg

Stål brukes som hovedmateriale i riggens fundament og i motorarmen. Stål er et allsidig og kraftig materiale som også egner seg godt for sveising. Aluminium ble også vurdert, men siden lav vekt ikke anses som en viktig faktor for riggen ble stål det foretrukne materialet. Siden testriggen er utviklet med høy fleksibilitet og standarddeler i fokus ble det valgt vanlige, kommersielt tilgjengelige ståltypene som leveres i hulprofiler. De følgende to ståltypene ble ansett som mest aktuelle:

- **S235** er et mye brukt konstruksjonsstål med mange bruksområder. Det er innehar gode sveiseegenskaper, men det har ikke like gode styrkeegenskaper som S355. Tilgjengeligheten for standardiserte emner er god, med unntak av hulprofiler.
- **S355** er i likhet med S235 et mye brukt konstruksjonsstål med gode sveiseegenskaper. Styrkeegenskapene overgår S235, og tilgjengeligheten for hulprofiler er svært god. Prisen for S355 er noe høyere per kg enn for S235.

Stålene leveres i ulike handelskvaliteter, der betegnelsene betyr følgende [51]:

- "JR, J0, J2, K2" angir ulike temperaturer der slagseigheten skal være minst 27 J [52].
- "W" betyr at stålet er forhåndsrustet og dermed mindre utsatt for gjennomrusting.
- "Z" angir at stålet er forsterket normalt på overflaten.
- "C" angir at stålet er kaldformet.
- Det finnes enda flere angivelser, men for prosjektet anses stålets flytegrense og e-modul som de viktigste parameterene.

Tabell 11.1. Materialelegenskaper for S235 og S355.

| Parametere* | Enhet             | S235      | S355        |
|-------------|-------------------|-----------|-------------|
| E-Modul     | GPa               | 205-215   | 205 – 215   |
| Skjærmodul  | GPa               | 78,9-82,7 | 78,9-82,7   |
| Flytegrense | MPa               | 235-274   | 355 – 414   |
| Bruddgrense | MPa               | 360-510   | 470 – 680   |
| Sveisbarhet | -                 | Svært god | Svært god   |
| Tetthet     | Kg/m <sup>3</sup> | 7821-7890 | 7830 – 7840 |
| Pris        | NOK/kg            | 24        | 26          |

\* Materialdata hentet fra Granta EduPack, og priser er hentet fra Norsk stål sine kataloger [55].

S355J2 velges til riggens strukturelle komponenter grunnet de gode styrkeegenskapene og tilgjengeligheten til passende hulprofiler. For motorarmen ville ikke S235 vært tilstrekkelig med det valgte stålprofilets dimensjoner. S235JR velges til akselbolten siden ståltypen var tilgjengelig i solide bolter, der S355 kun ble funnet i runde hulprofiler. Akselbolten har en stor



kontaktflate mot foringen og påkjenningene blir derfor ikke så store. Diameteren på bolten blir noe større enn om det hadde blitt brukt S355 siden det brukes en lavere stålkvalitet.

Til motorfestet og propellnavet anses aluminium som den prefererte materialtypen. Her er lavere vekt ønsket siden det skal monteres ytterst på motorarmen, og propellnavet skal rotere med motoren. Under presenteres materialdata for tre aluminiumstyper: 5052, 6061-T4 og 6061-T6. Forskjellen mellom T4 og T6 variantene av 6061-legeringen er herdingsprosessene som benyttes.

Tabell 11.2. Materialelegenskaper for 5052, 6061 – T4 og 6061 – T6

| Parametere* | Enhet             | 5052      | 6061 – T4 | 6061 – T6 |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| E-Modul     | GPa               | 70-73,6   | 66,6-70   | 66,6-70   |
| Skjærmodul  | GPa               | 27-28,4   | 25,6-26,9 | 25,6-26,9 |
| Flytegrense | MPa               | 66-72,9   | 110-145   | 240-280   |
| Bruddgrense | MPa               | 172-190   | 206-240   | 290-338   |
| Sveisbarhet | -                 | God       | God       | God       |
| Tetthet     | Kg/m <sup>3</sup> | 2670-2700 | 2690-2730 | 2690-2730 |
| Pris        | NOK/kg            | 22        | 26        | 30        |

\* Materialdata og priser hentet fra Granta EduPack.

6061-T6 velges over T-4 varianten og 5052-legeringen grunnet styrkeegenskapene. Komponentene som består av aluminium veier ikke mye, og prisforskjellen blir dermed minimal ved bruk av T-6 Legeringen. 6061-T6 er et materiale med god tilgjengelighet som passer med de valgte produksjons-metodene.

Til profilproppene velges polymeren ABS. Dette materialet egner seg godt for 3D-printing og har høy strekkfasthet som gjør at det er resistent mot fysiske sammenstøt. Profilproppene vil ikke bli utsatt for store belastninger, men det er fordelaktig at de tåler støt og slag.

### 11.3. Sikkerhet og dimensjoneringsvalg

Her gjennomgås sikkerhetsfaktor på motorarmen og dimensjoneringsvalgene i riggen.

#### Sikkerhet mot flyt

Ved valget av stålprofil for motorarmen ble tillatte spenninger fra boka "tekniske tabeller" av Johannessen [35] benyttet. Det ble valgt å bruke belastningstype C, som gjelder hurtigvekslende belastninger. Dette er den strengeste sikkerhetsklassen, og vil gi sikkerhetsmargin også for dynamiske belastninger på armen. Bøyespenningen på armen var innenfor det tillatte belastningsområdet for S355J0 konstruksjonsstål.

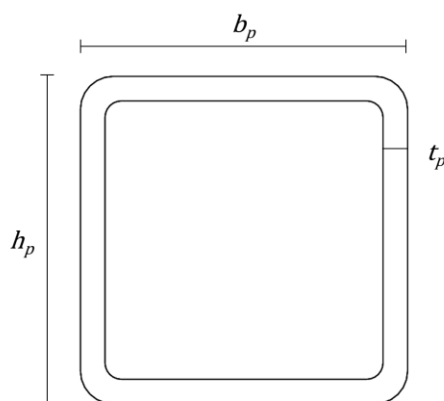
For å finne sikkerhet mot flyt i motorarmen benyttes jevnføringspenningen fra FEM-analysen. Sikkerhetsfaktor mot flyt er mer hensiktsmessig enn sikkerhetsfaktor mot brudd, siden det brukes konstruksjonsstål, som er et duktilt materiale. Sikkerhetsfaktor mot flyt i motorarmen blir:

$$\eta_{f,ma} = \frac{R_{e,S355}}{\sigma_{jf,ma}} = \frac{355}{68,2} = 5,20 \quad (9)$$

Denne sikkerhetsfaktoren anses som fornuftig, siden den også skal ta hensyn til dynamiske belastninger.

### Dimensjonering av øvrige deler

Siden det ikke er gjort beregning på riggens øvrige deler er profilene som brukes i testriggens fundament bevisst overdimensjonerte for å sikre konstruksjonssikkerhet. Fundamentet er bygget opp av følgende profiltipe, hentet fra Norsk stål sine kataloger:



Tabell 11.3. Profildata, S355J2H

| Mål         | Verdi   | Enhet           |
|-------------|---------|-----------------|
| $h_{p,2}$   | 80      | mm              |
| $b_{p,2}$   | 80      | mm              |
| $t_{p,2}$   | 6       | mm              |
| $A_{p,2}^*$ | 1735    | mm <sup>2</sup> |
| $I_{y,2}^*$ | 1566267 | mm <sup>4</sup> |

\*Data hentet fra Section Properties i Solidworks

Figur 11.6. Tverrsnittet til riggens øvrige profiler.

Med større beregningsgrunnlag vil det her kunne byttes til mindre profildimensjoner eller en rimeligere stålqualität for å senke riggens kostnader. Motorfestet og propellnavet er også overdimensjonert på grunn av manglende beregningsgrunnlag. Også her vil det være potensiale for å senke kostnader ved å benytte mindre materiale eller et rimeligere materiale dersom det foretas nødvendige analyser.

## 12. Visualisering og tekniske anvisninger

I dette kapitlet presenteres det ferdige produktet i form av renderte bilder. Det fremstilles også anvisninger for montering og bruk av produktet.

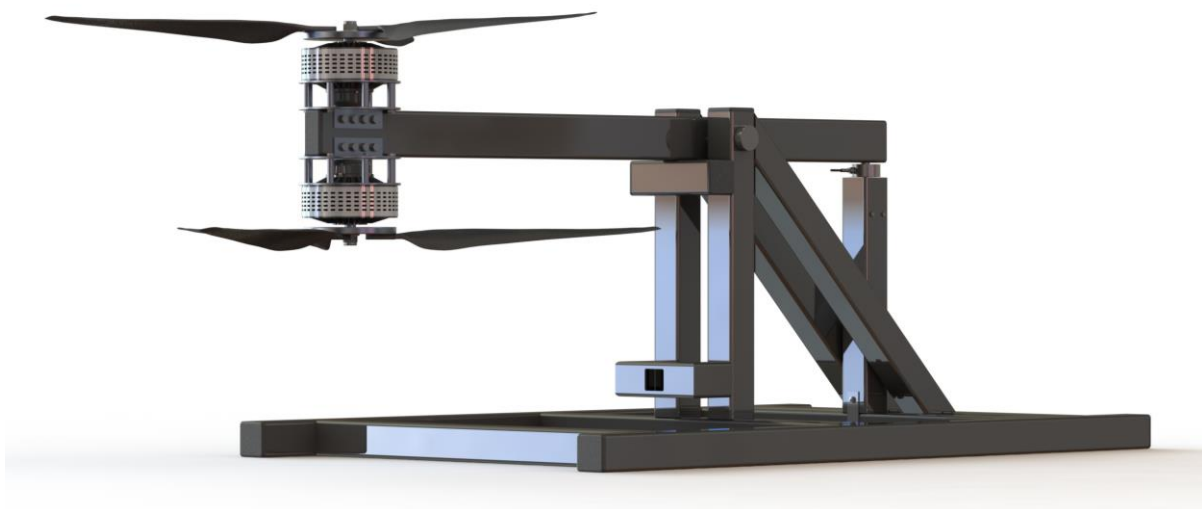
### 12.1. Renderte fremstillinger

Her presenteres renderte fremstillinger av den ferdige testtriggen for å gi et bilde av hvordan produktet vil se ut i virkeligheten.

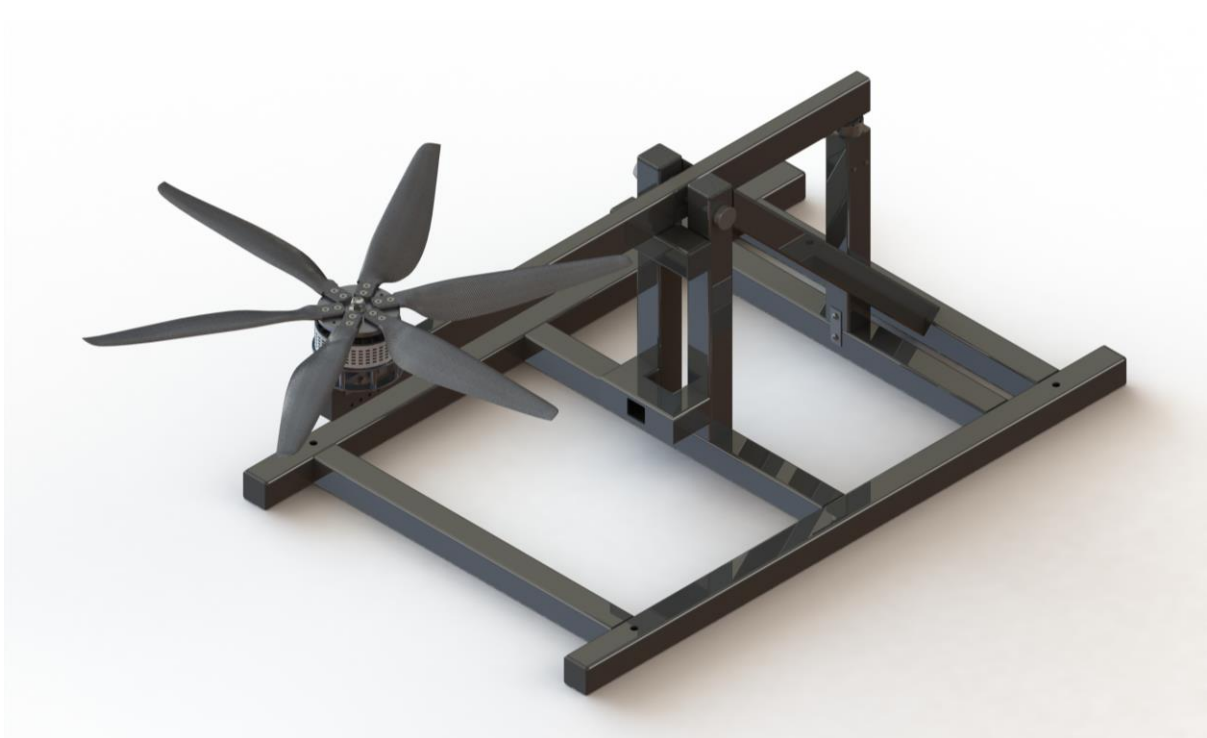
A



B



Figur 12.1. Renderte fremstillinger av riggen i horisontal testkonfigurasjon og dobbel motor fra to forskjellige vinkler: A) sidestilt bak og B) sidestilt foran.



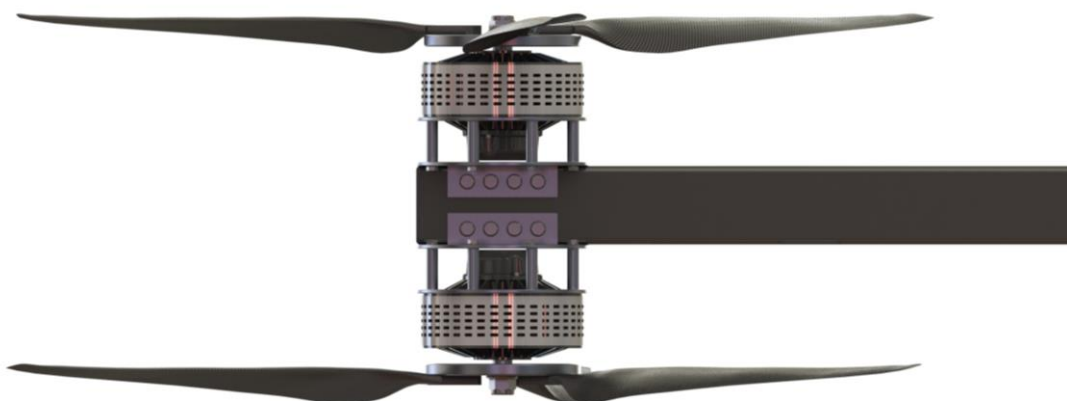
*Figur 12.2. Testrigg med enkeltmotor i trekk-konfigurasjon med seks blader.*



*Figur 12.3. Testrigg med enkeltmotor i skyve-konfigurasjon og fire propellblader.*



Figur 12.4. Rendert fremstilling av riggen i vertikal testkonfigurasjon og dobbelmotor med tre propellblader per motor.



Figur 12.5. Rendering av motorfeste og propeller på motorarmen.



Figur 12.6. Fullstendig forsøksoppsett med testtrigg i vertikal testkonfigurasjon, dobbelmotor og tre propellblader per motor. Følgende deler er hentet fra nettet: sikkerhets-gjerde [47], styringskontroll med nødstop [48], benk og monitor [49], og stol [50]. Her demonstrert uten tetting av sikkerhetsgjerdet for å gi bedre innsyn til riggen.



Figur 12.7. Visualisering av testtriggen til lagring i verkstedsomgivelser uten motor montert [56].





Figur 12.8. Visualisering av testtriggen i vertikal stilling foran fløy 4 ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.



Figur 12.9. Visualisering av testtriggen i horisontal stilling på gressletta ved Fakultetet for realfag og teknologi.

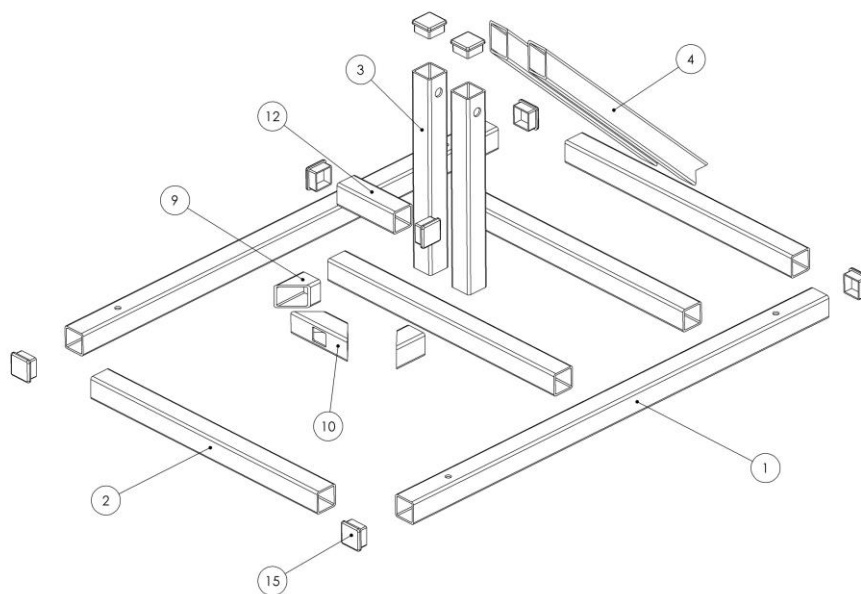
## 12.2. Tekniske anvisninger

I denne seksjonen presenteres monterings- og bruksanvisninger. Maskinforskriften krever at produktet kommer med bruksanvisning. For å gjøre monteringsanvisningen mer oversiktlig brukes hovedelementene som ble fastsatt i kapittel 10 for å systematisere prosessen.

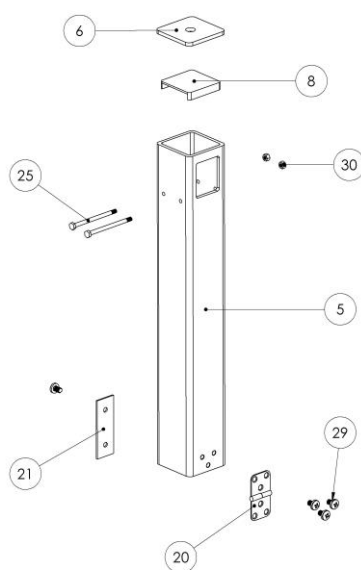
### 12.2.1. Monteringsanvisning

Montering skal foregå på en plass med god klaring og sikre omgivelser.

#### Del 1: Fundament



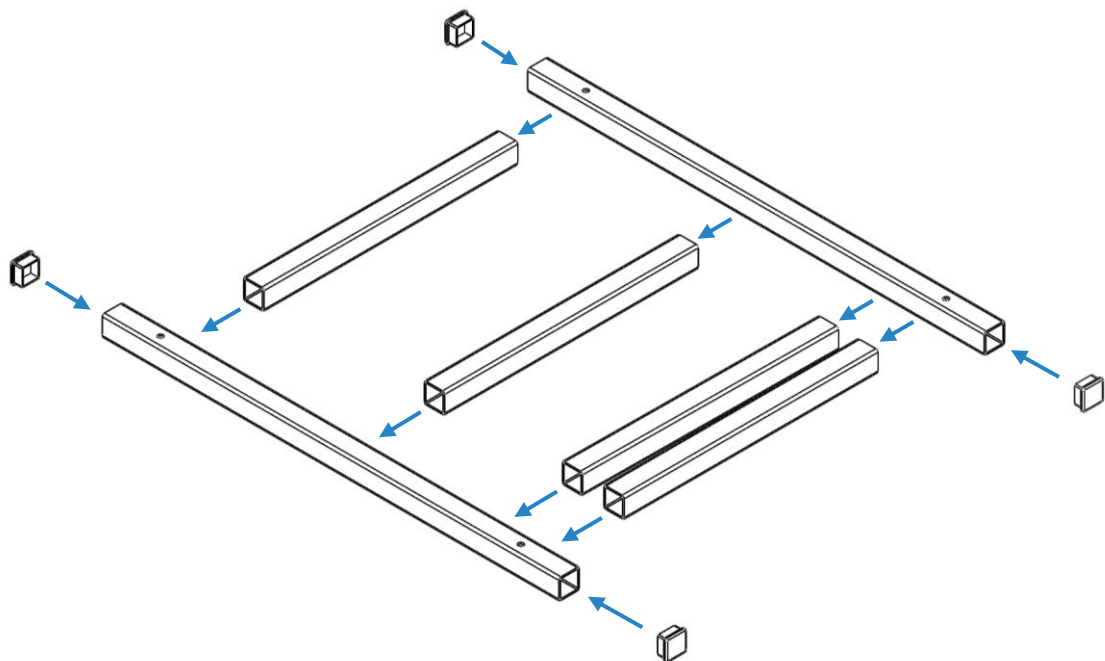
Figur 12.10. Eksplosjonsvisning med delenummer av fundament-hovedelementet uten lastcelleprofil (HM).



Figur 12.11. Eksplosjonsvisning med delenummer av lastcelleprofil (HM).

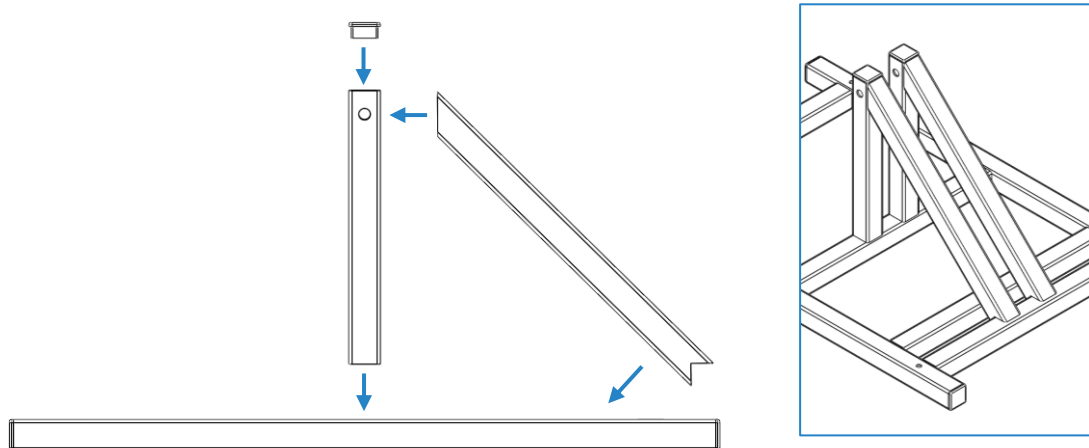


**Trinn 1: Fundament**



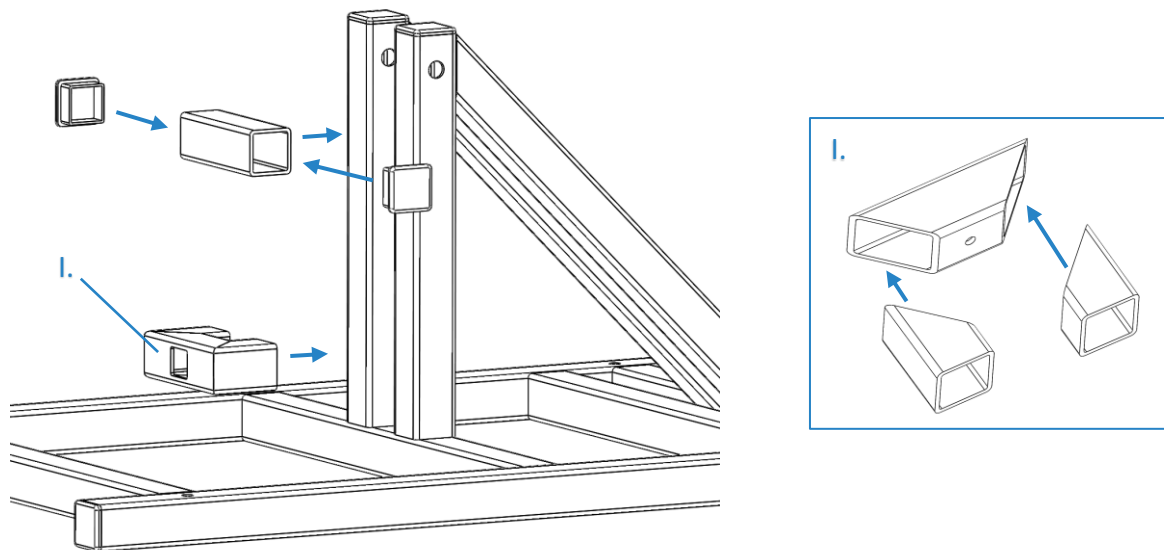
Figur 12.12. Tverrprofilene (2) plasseres på riktig plass og sveises fast i sideprofilene (1). Profilproppene (15) presses inn i de fire hjørnene.

**Trinn 2: Støtteprofiler**



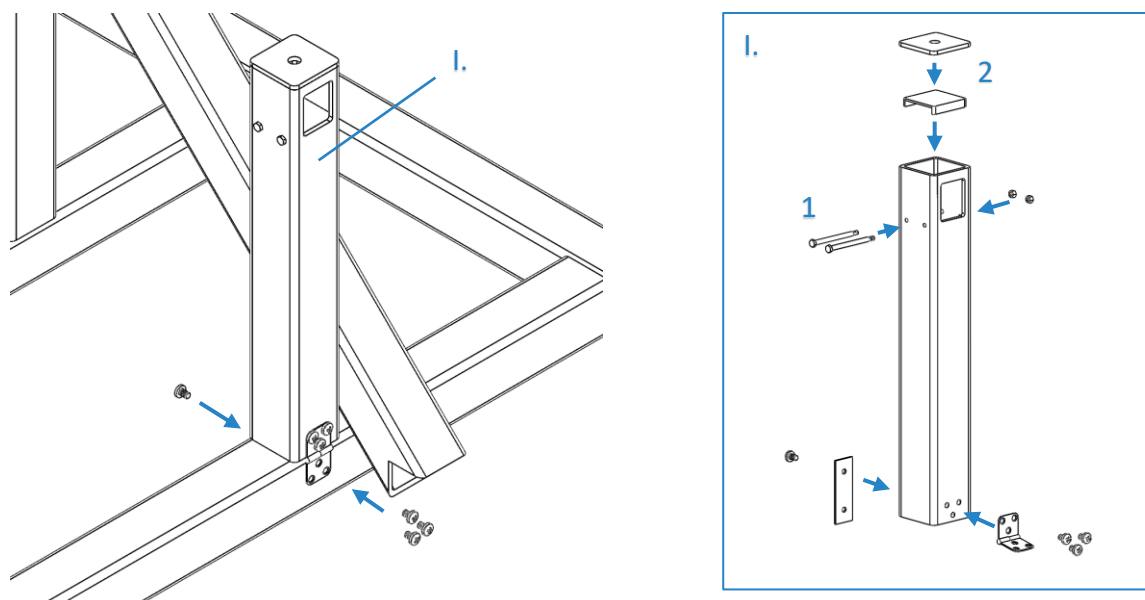
Figur 12.13. Støtteprofilene for motorarm (3) sveises i riktig posisjon til det midterste tverrprofilen. Støtteprofil 45° (4) sveises til støtteprofil (3) og det ytterste tverrprofilen (2). Profilproppene (15) presses inn på toppen av støtteprofilene (3). Det innrammede bildet viser profilene ferdig montert.

## Trinn 3: Lastcelleplattform for vertikal arm og rotasjonssperre



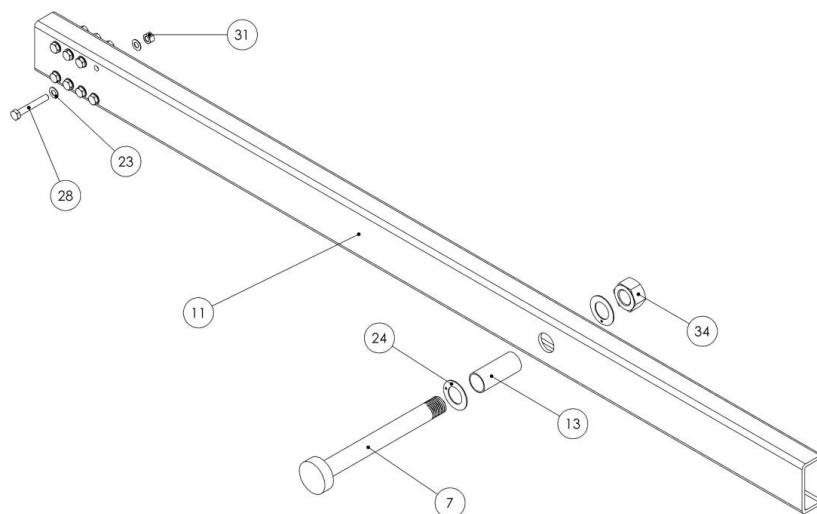
Figur 12.14. Lastcelleplattform (VM) (9, 10) sveises sammen (I.), før den videre sveises til støtteprofilene (3). Rotasjonssperren (12) sveises også til støtteprofilene, og profilproppene (15) dyttes inn på endene.

## Trinn 4: Lastcelleplattform for horisontal arm



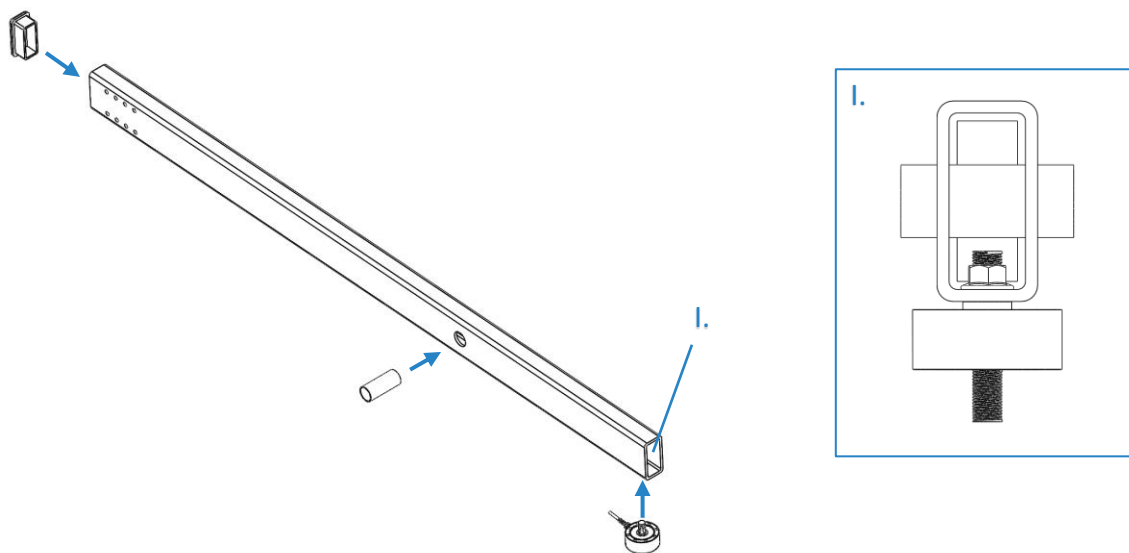
Figur 12.15. Lastcelleprofil (HM) (5) med medfølgende deler settes sammen. Skruerfangerbolten (25) må festes før skru oppsamleren (8) kan monteres. Lastcelleplattform (6) sveises på toppen av lastcelleprofilet (5). Hengsel (20) og hullplate (21) skrues inn i lastcelleprofilet og deretter inn i det tverrliggende fundamentprofilet.

Del 2: Motorarm



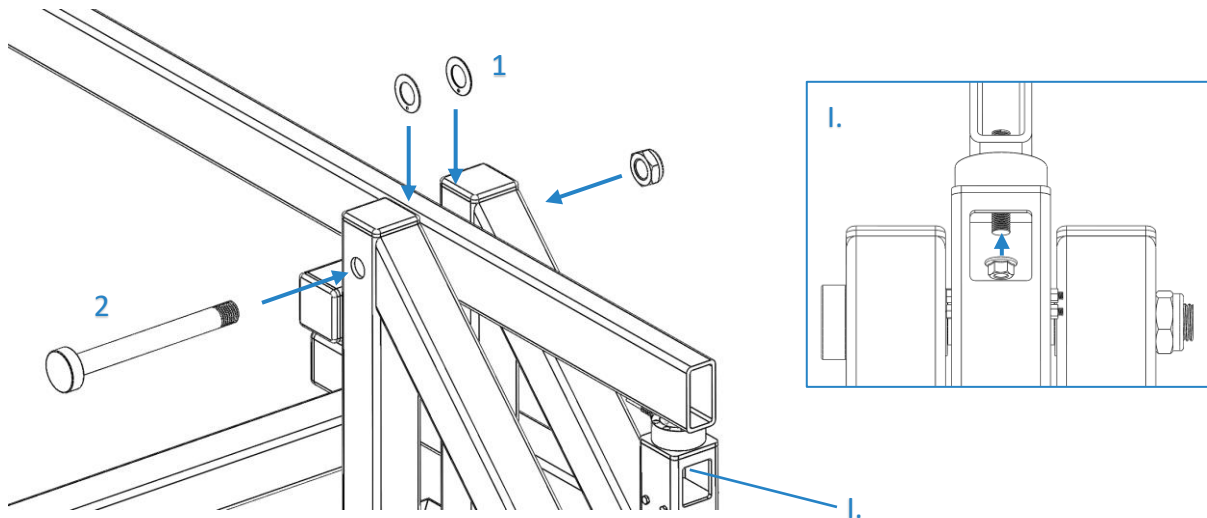
Figur 12.16. Eksplisjonsvisning med delenummer av motorarm-hovedelementet.

Trinn 1: Motorarm-komponenter



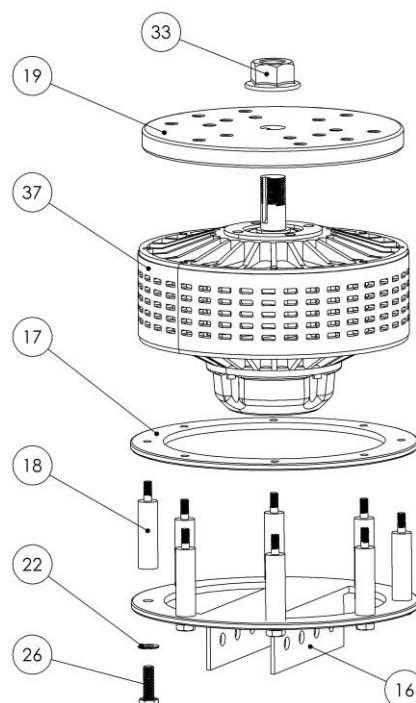
Figur 12.17. Komponentene til motorarmen monteres først. Akselvingen (13) tres inn i senterhullet i armen og sveises på i midten. Lastcellen (35) festes i hullet som er på målesiden av armen, og profilproppen (14) dyttes inn i enden på motorsiden.

**Trinn 2: Festing til fundament**



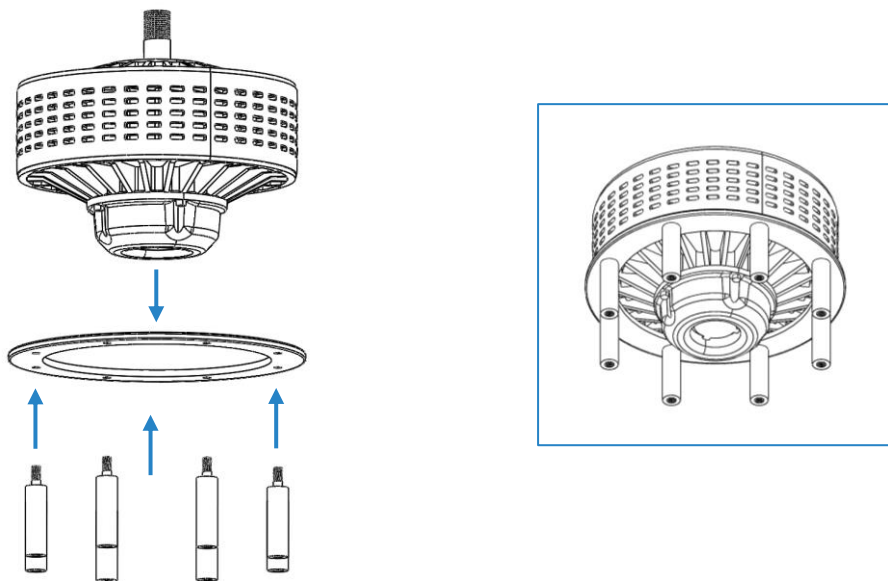
Figur 12.18. Motorarmen festes til fundamentet gjennom akselbolten (7) som tres gjennom akselforingen i motorarmen. Legg merke til rekkefølgen, aksialskivene (24) må plasseres på riktig plass før akselen kan tres gjennom. Akselbolten blir holdt på plass av mutteren (34). Før montering skal foringen og akselen smøres for å hindre unødig friksjon mellom komponentene. Lastcellen festes til lastcelleplattformen med mutteren (32) som vist i illustrasjon (I.).

**Del 3: Motorfeste**



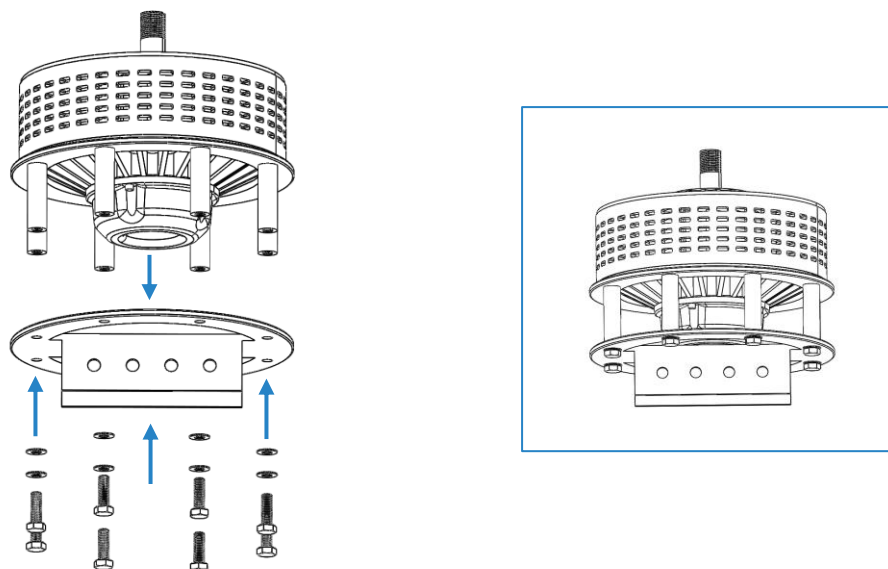
Figur 12.19. Eksplosjonsvisning med delenummer av motorfeste-hovedelementet.

## Trinn 1: Festing av motor



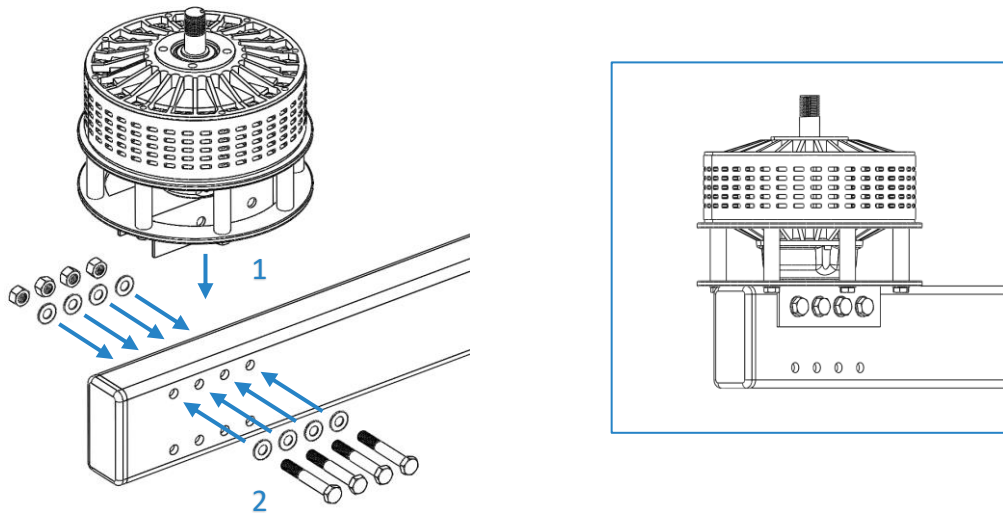
Figur 12.20. Motorpinsene (18) føres gjennom hullene i motorringen (17) og skrues inn i de gjengede hullene på LEM-200 motoren (37). Den innrammede illustrasjonen viser delene montert.

## Trinn 2: Montering av motorfundament



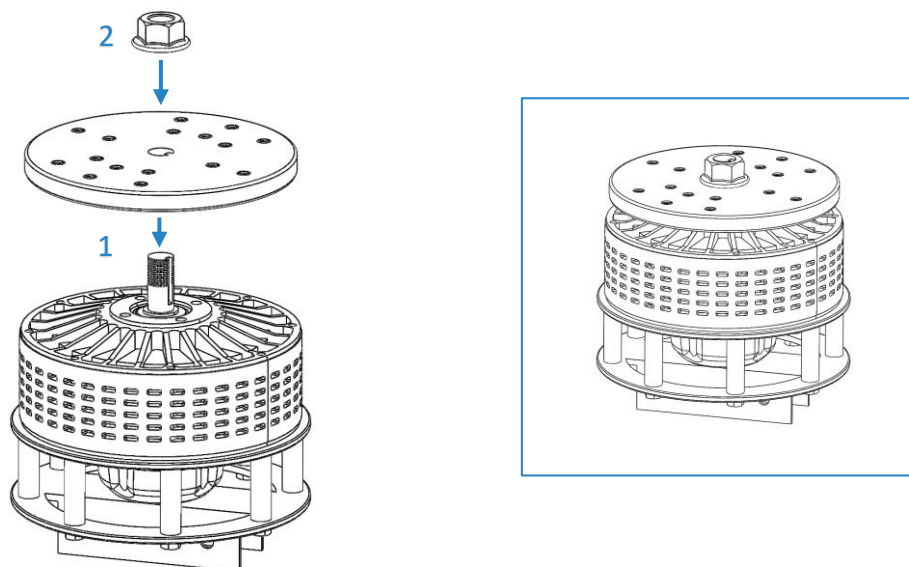
Figur 12.21. Motorfundamentet (16) festes til de øvrige motorfestekomponentene med skive (22) og motorpinkskrue (26). Den innrammede illustrasjonen viser delene montert.

**Trinn 3: Festing til motorarm**



Figur 12.22. Motorfestet legges på motorarmen slik at bolthullene i motorfundamentet (16) treffer hullene i motorarmen (11). Deretter føres motorfesteboltene (28) gjennom og festes med muttere (31). NB: Husk skiver (23) mellom motorfeste og muttere/bolter. Den innrammede illustrasjonen viser delene montert.

**Trinn 4: Festing av propellnav til motor**



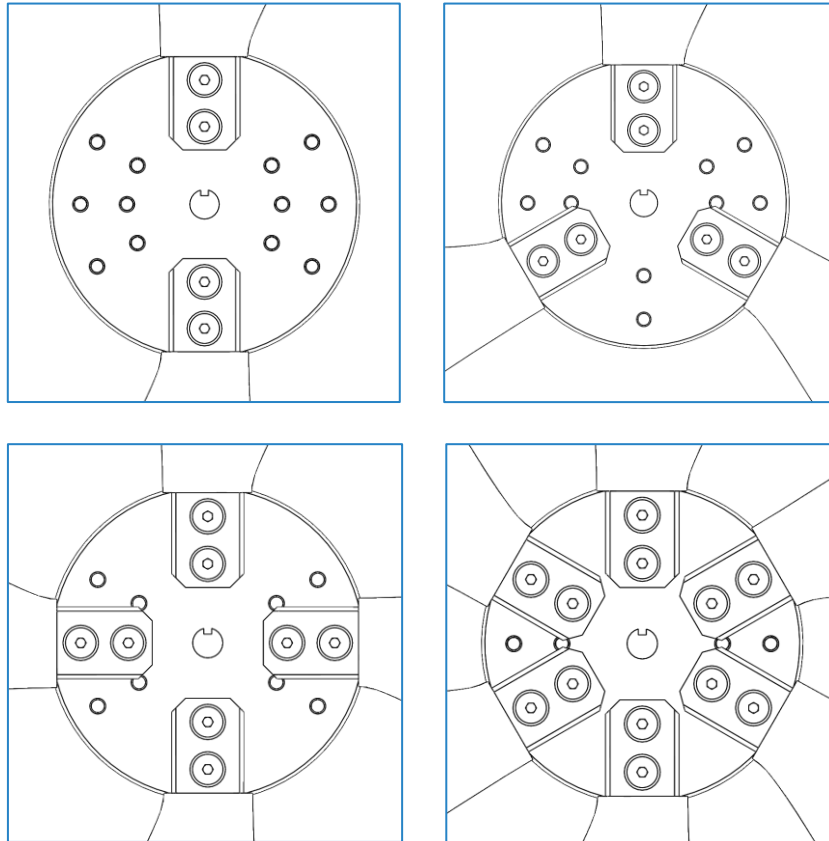
Figur 12.23. Propellnavet (19) føres på akselen slik at kilesporet og sporet i navet treffer hverandre. Deretter skrues låsemutteren på for å sikre propellnavet på plass. Den innrammede illustrasjonen viser delene montert.

## 12.2.2. Bruksanvisning tillatte forsøksoppsett

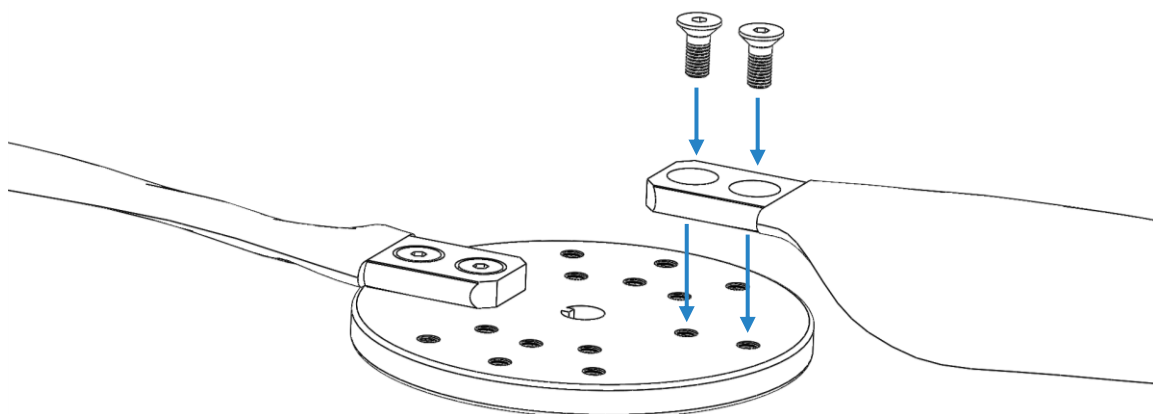
Bruker skal gjøre seg kjent med bruksanvisningen, og anvisningene skal følges nøye.

**Montering av propell:**

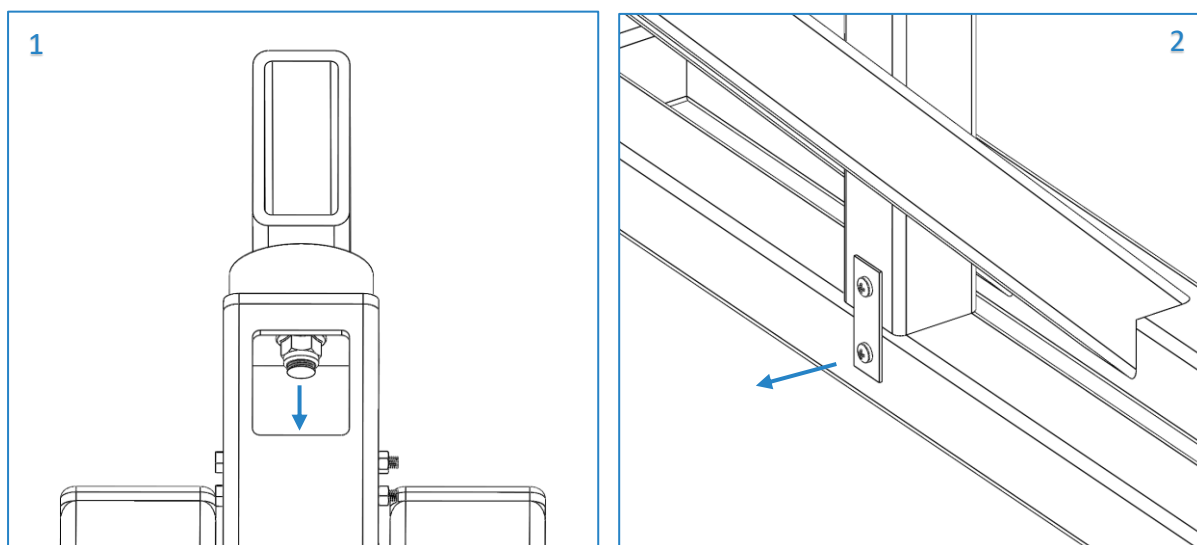
Propellnavet kan huse opptil seks propellblader. Det er utviklet for å tillate testing med følgende konfigurasjoner:



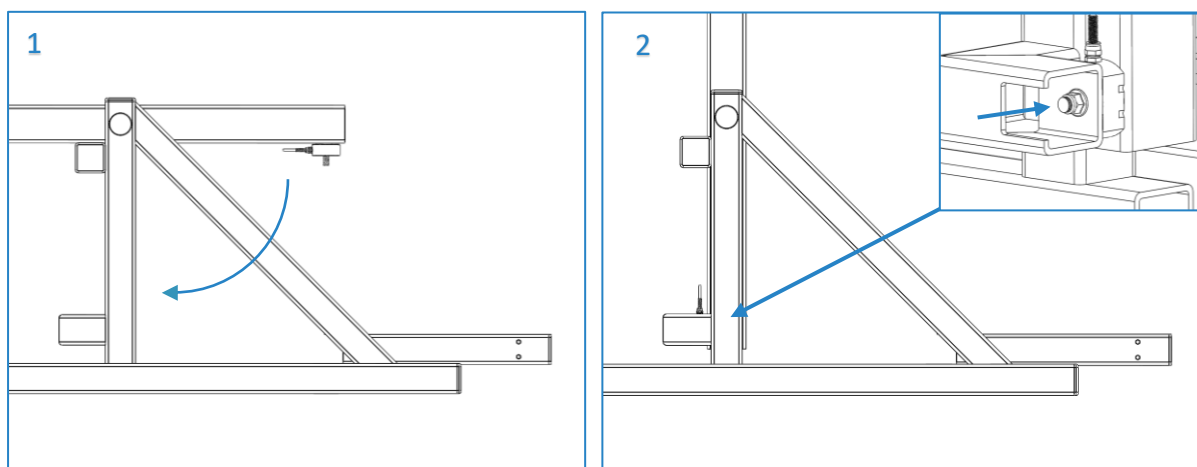
Figur 12.24. Illustrasjon av de tillatte propellkonfigurasjonene for navet.



Figur 12.25. Propellbladene (36) festes til propellnavet (19) med to propellskruer (27) per blad. NB: propellbladene skal kun monteres i konfigurasjonene som vist i figur 12.22.

**Bytte mellom horisontal og vertikal testkonfigurasjon:**

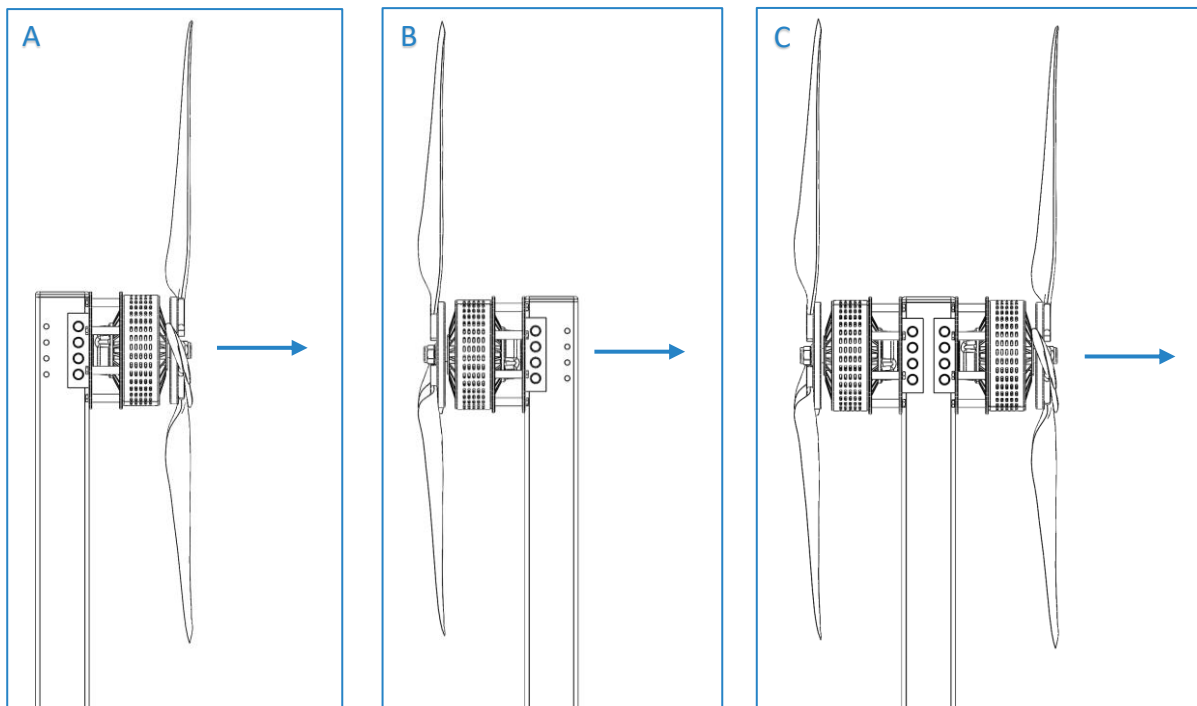
Figur 12.26. Lastcellemutteren (32) løsnes først fra lastcelleplattform (HM) (6). Deretter løsnes den nederste skruen (29) fra lastcelleprofilen (HM) (5) slik at det kan vippes ned.



Figur 12.27. Når lastcelleprofilen er vippet ned kan motorarmen roteres og festes i vertikal posisjon med lastcellemutteren (32) til lastcelleplattform (VM) (10). Testtriggen er nå klar til å kjøres. NB: Det anbefales å montere motor og propell til motorarmen før den vippes opp til vertikal testkonfigurasjon da det er vanskelig å montere disse delene når ammen står i vertikal stilling.

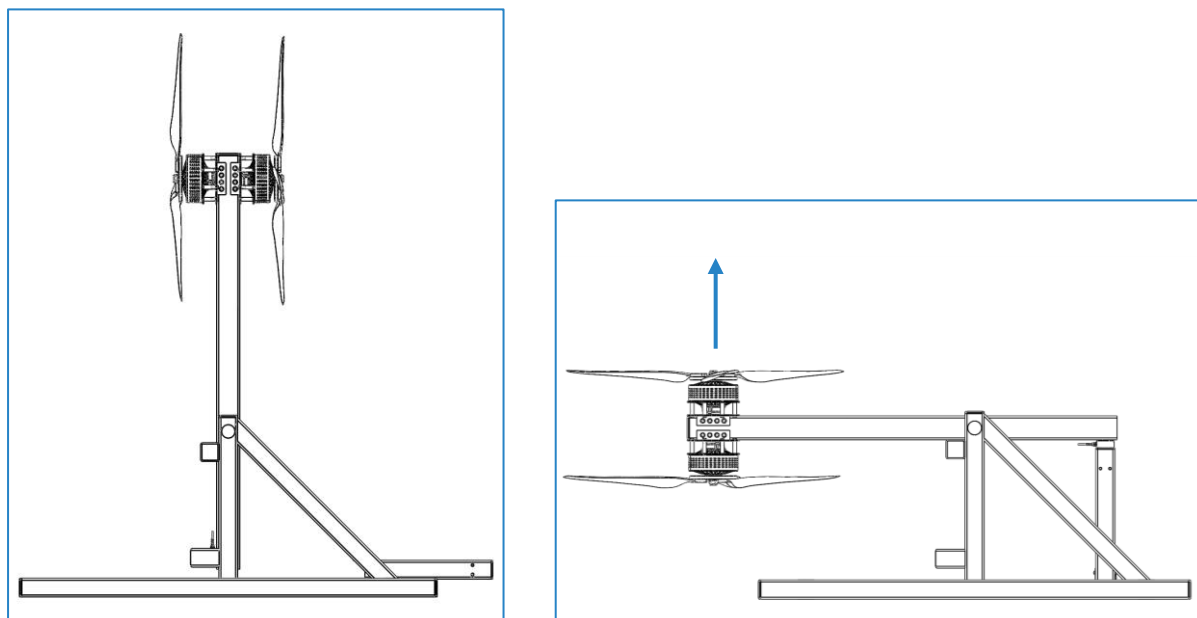


**Tillatte motoroppsett:**



Figur 12.28. Illustrasjonen viser de ulike motoroppsettene riggen kan kjøres med. A) Enkeltmotor i trekkkonfigurasjon, B) Enkeltmotor i skyvekonfigurasjon og C) Dobbeltmotoroppsett.

**Tillatt thrustretning**



Figur 12.29. Her demonstreres tillatt thrustretning for testriggen. Riggen skal kun kjøres med lastretning som vist over.

### Vedlikehold

Under følger anbefalinger for bruk og vedlikehold av testriggen:

- Konstruksjonsstål ruster lett, spesielt uten rustbeskyttelse. Derfor anbefales det å oppbevare testriggen innendørs på en tørr plass.
- Rigger kan benyttes ute, men da skal stålprofilene overflatebehandles med pulverlakk eller lignende for å forbedre korrosjonsbeskyttelsen.
- Testing burde foretas under tørre forhold for å unngå skader på elektriske komponenter.
- Jevnlig smøring av akselbolt og foring vil opprettholde en tilnærmet friksjonsfri kobling slik at måleresultatene forblir upåvirket over tid.
- Det skal foretas jevnlig visuelle inspeksjoner av riggens komponenter for å sjekke etter skader.
- Ved endring mellom vertikal og horisontal testkonfigurasjon skal det tas spesielt hensyn ved stramming av muttere. Det samme gjelder ved montering av motorfeste for å være sikker på at komponentene er tilstrekkelig festet.

### Sikkerhetshensyn

Rigger skal ikke kjøres uten sikkerhetsgjerde som hindrer adgang til riggen mens testing foregår. For ekstra sikring mot personskader ved uhell skal et sekundært sikkerhetssystem brukes i form av en pleksiglassvegg rundt styrestasjonen. Forsøksoppsettet skal også ha en nødstoppfunksjon som umiddelbart kan stoppe motorene ved uhell eller feil.

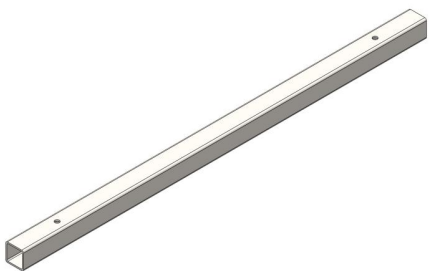
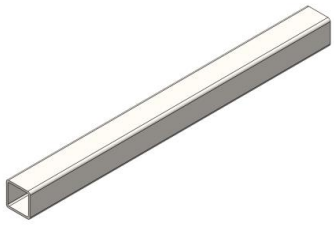
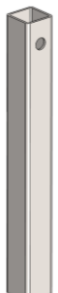
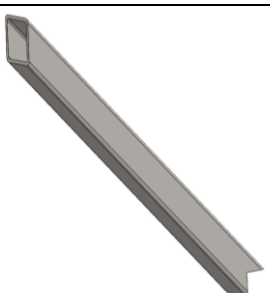
## 13. Produksjon og økonomibetraktninger

Her gjennomgås produksjonsmetoder for riggens komponenter, og det foretas en kostnadsestimering for riggen. Videre gjøres det en evaluering av konseptutviklings- og produksjonskostnadene.

### 13.1. Produksjonsmetoder

Riggens komponenter er dimensjonert og designet med kommersielt tilgjengelige materialer og produksjonsmetoder i fokus.

Tabell 13.1. Oversikt over produksjonsmetoder for riggens komponenter.

| Del nr. | Komponent   | Produksjonsinformasjon   |
|---------|---|--|
| 1       |   | Materiale: S355J2<br>Emne: Hulprofil<br>Produksjonsmetode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Hull for fastskruing borres.</li> </ul>   |
| 2       |  | Materiale: S355J2<br>Emne: Hulprofil<br>Produksjonsmetode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Profilet som ligger under lastcelleprofil (HM) må borres for hengsel og hullplate.</li> </ul> |
| 3       |  | Materiale: S355J2<br>Emne: Hulprofil<br>Produksjonsmetode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Hullet som holder akselbolten borres.</li> </ul>  |
| 4       |  | Materiale: S355J2<br>Emne: Hulprofil<br>Produksjonsmetode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde, og profilendene kappes til riktige vinkler.</li> </ul>   |


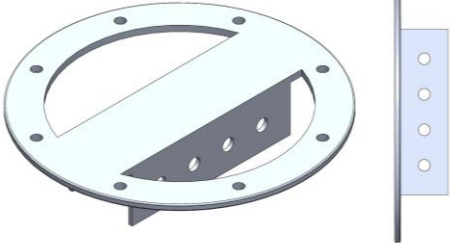
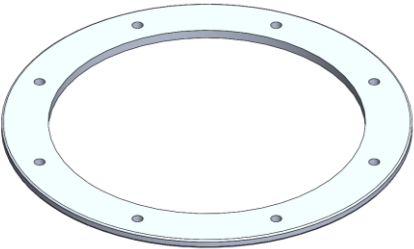
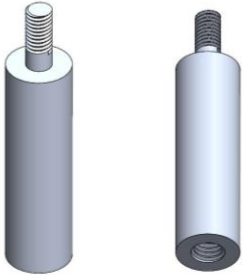
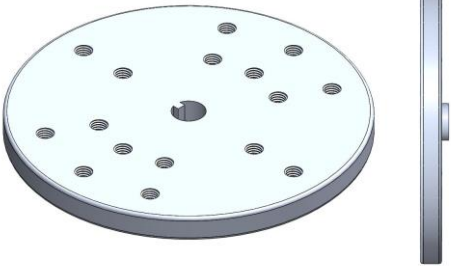
Tabell 13.1. Forts.

| Del nr. | Komponent | Produksjonsinformasjon   |
|---------|-----------|--|
| 5       |           | <p>Materiale: S355J2</p> <p>Emne: Hulprofil</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Hull til bolter borres.</li> <li>• Hull for festing/fjerning av lastcelle freses.</li> </ul>               |
| 6       |           | <p>Materiale: S355J2</p> <p>Emne: Plate</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Klippes til riktig størrelse.</li> <li>• Hjørnekanter freses.</li> <li>• Hull for lastcelle borres.</li> <li>• Skarpe kanter slipes ned.</li> </ul> |
| 7       |           | <p>Materiale: S235JR</p> <p>Emne: Bolt</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Gjenges i ene enden.</li> <li>• Bolthode sveises på.</li> </ul>   |
| 8       |           | <p>Materiale: ABS</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D – printes.</li> </ul>  |
| 9       |           | <p>Materiale: S355J2</p> <p>Emne: Hulprofil</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde, og vinkelsiden kappes til riktig vinkel.</li> </ul>   |

Tabell 13.1. Forts.

| Del nr. | Komponent | Produksjonsinformasjon   |
|---------|-----------|--|
| 10      |           | <p>Materiale: S355J2<br/>Emne: Hulprofil<br/>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde, og vinkelsidene kappes til riktig vinkel.</li> <li>• Hull for lastcelle borres</li> <li>• Hull for festing/fjerning av lastcelle freses.</li> </ul> |
| 11      |           | <p>Materiale: S355J2<br/>Emne: Hulprofil<br/>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Hull til motorfeste, akselbolt og lastcelle borres.</li> <li>• Skarpe kanter på lastcellesiden slipes ned.</li> </ul>                    |
| 12      |           | <p>Materiale: S355J2<br/>Emne: Hulprofil<br/>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Sporet på siden maskineres.</li> </ul>   |
| 13      |           | <p>Materiale: S355J2<br/>Emne: Rørprofil<br/>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> </ul>  |
| 14*     |           | <p>Materiale: ABS<br/>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D – printes.</li> </ul>   |

Tabell 13.1. Forts.

| Del nr. | Komponent   | Produksjonsinformasjon   |
|---------|---|--|
| 15*     |    | <p>Materiale: ABS</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D – printes.</li> </ul>  |
| 16      |    | <p>Materiale: 6061-T6</p> <p>Emne: Plate</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sirkelmønster maskineres.</li> <li>• Bolthull borres.</li> <li>• Sideplatene klippes og sveises på.</li> <li>• Skarpe kanter slipes ned.</li> </ul>  |
| 17      |   | <p>Materiale: 6061-T6</p> <p>Emne: Plate</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sirkelmønster maskineres.</li> <li>• Bolthull borres.</li> <li>• Skarpe kanter slipes ned.</li> </ul>  |
| 18      |  | <p>Materiale: 6061-T6</p> <p>Emne: Bolt</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Skrueenden dreies og gjenges.</li> <li>• Hullsiden borres og gjenges.</li> </ul>   |
| 19      |  | <p>Materiale: 6061 -T6</p> <p>Emne: Bolt</p> <p>Produksjonsmetode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kappes til riktig lengde.</li> <li>• Skruehull borres og gjenges.</li> <li>• Undersiden maskineres for å lage utstikkeren rundt senterhullet.</li> <li>• Senterhullet ekstruderes for å lage spor i hullet.</li> </ul> |

\* Delene som er markert kan potensielt være mulig å finne som standarddeler.

### 13.2. Kostnadskalkyle for prototype

For å estimere konseptutviklings- og produksjonskostnader settes det opp en kostnadskalkyle. Siden testriggen er en enkeltbestilling og dermed ikke er aktuell for masseproduksjon, vil det ikke gjøres rede for serieproduksjon. Materialpriser baserer seg på materialmengden brukt i riggen og tar ikke hensyn til restmateriale. Enkelte av de brukte materialene og standarddeler selges kun i større kvanta og restene er dermed ikke tatt hensyn til i kalkylen. Priser for standarddeler er hentet fra nettet, mens øvrige materialpriser er hentet fra Granta EduPack, samt Norsk Stål sine prislister [55]. Priser er rundet opp til nærmeste krone. Tidsbruken for de ulike produksjonsmetodene er basert på estimater og det regnes med en timepris på 450 NOK ved verkstedet. Propellbladene vil ikke tas med i kostnadskalkylen, da disse vil utvikles ved et senere tidspunkt og det er for mange usikkerhetsmomenter knyttet til materialer, dimensjoner og produksjonsmetoder. Det samme gjelder for sikkerhetsgjerdet rundt riggen, og sikkerhetsveggen til styringsstasjonen. Frakt for deler er ikke medregnet. Kostnadskalkylen inkluderer produksjon av to motorfester og propellnav.

Tabell 13.2. Kostnadskalkyle for prototype.

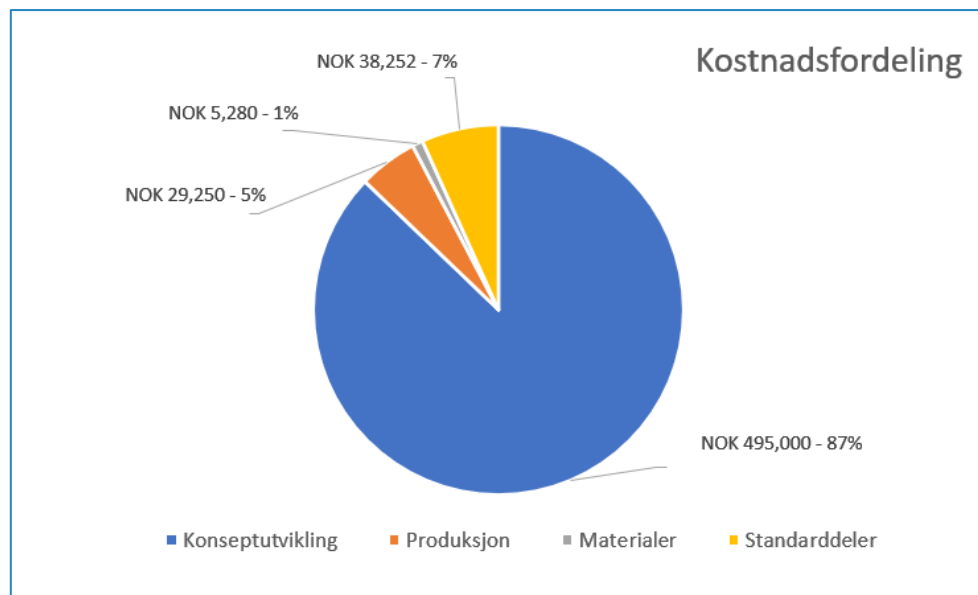
| Konseptutvikling                    |            |          |           |                |
|-------------------------------------|------------|----------|-----------|----------------|
|                                     | Timer      | Kvanta   | Pris, NOK | Sum, NOK       |
| Utredningsarbeid                    | 260        | -        | 550       | 143 000        |
| Utviklingsarbeid                    | 200        | -        | 550       | 110 000        |
| Design og 3d-modellering            | 180        | -        | 550       | 99 000         |
| Ferdigstilling                      | 50         | -        | 550       | 27 500         |
| Dokumentering                       | 210        | -        | 550       | 115 500        |
| <b>Delsum, konseptutvikling</b>     | <b>900</b> | <b>-</b> | <b>-</b>  | <b>495 000</b> |
| Produksjonskostnader                |            |          |           |                |
|                                     | Timer      | Kvanta   | Pris, NOK | Sum, NOK       |
| Konstruksjonsforberedelser          | 15         | -        | 750       | 11 250         |
| Kapping                             | 6          | -        | 450       | 2 700          |
| Boring                              | 4          | -        | 450       | 1 800          |
| Fresing                             | 2          | -        | 450       | 900            |
| Klipping                            | 1          | -        | 450       | 450            |
| Maskinering                         | 8          | -        | 450       | 3 600          |
| Dreining/gjenging                   | 5          | -        | 450       | 2 250          |
| Ekstrudering                        | 1          | -        | 450       | 450            |
| Sliping                             | 1          | -        | 450       | 450            |
| 3D – printing (Forberedende arbeid) | 2          | -        | 450       | 900            |
| Sveising og montering               | 10         | -        | 450       | 4 500          |
| <b>Delsum, produksjonskostnader</b> | <b>55</b>  | <b>-</b> | <b>-</b>  | <b>29 250</b>  |

Tabell 13.2. Forts.

| Materialkostnader                |       |        |           |                |
|----------------------------------|-------|--------|-----------|----------------|
|                                  | Timer | Kvanta | Pris, NOK | Sum, NOK       |
| S355 Profiler                    | -     | 184 kg | 26        | 4 784          |
| S355 Plate                       | -     | 1 kg   | 26        | 26             |
| S355 Rør                         | -     | 1 kg   | 26        | 26             |
| S235 Bolt                        | -     | 2 kg   | 24        | 24             |
| 6061 – T6 Bolt                   | -     | 3 kg   | 30        | 90             |
| 6061 – T6 Plate                  | -     | 1 kg   | 30        | 30             |
| ABS                              | -     | 1 kg   | 300       | 300            |
| <b>Delsum, materialkostnader</b> | -     | -      | -         | <b>5 280</b>   |
| Standarddeler                    |       |        |           |                |
|                                  | Timer | Kvanta | Pris, NOK | Sum, NOK       |
| Hengsel                          | -     | 1      | 140       | 140            |
| Hullplate                        | -     | 1      | 10        | 10             |
| M8 Skive                         | -     | 16     | 1         | 16             |
| M10 Skive                        | -     | 16     | 1         | 16             |
| SKF – PCMW 325401.E              | -     | 2      | 3         | 6              |
| M6 x 1,0 x 90 Bolt               | -     | 2      | 4         | 8              |
| ISO 4017 - M8 x 25 - C           | -     | 16     | 8         | 128            |
| ISO 10642 - M10 x 25 – 25 - C    | -     | 24     | 6         | 144            |
| ISO 4014 - M10 x 70 x 26 - C     | -     | 8      | 9         | 72             |
| ISO 7045 - M8 x 12 - Z – 12 - C  | -     | 8      | 5         | 40             |
| M6 x 1,0 Mutter                  | -     | 2      | 3         | 6              |
| M10 x 1,5 Mutter                 | -     | 8      | 8         | 64             |
| M14 x 1,5 Mutter                 | -     | 2      | 10        | 20             |
| M18 x 1,5 Låsemutter             | -     | 2      | 16        | 32             |
| M30 x 3,5 Mutter                 | -     | 1      | 50        | 50             |
| Lastcelle – 500kg                | -     | 1      | 7 500     | 7 500          |
| Lynch LEM - 200                  | -     | 2      | 15 000    | 30 000         |
| <b>Delsum, standarddeler</b>     | -     | -      | -         | <b>38 252</b>  |
| <b>Totalsum, prototype</b>       | -     | -      | -         | <b>567 782</b> |

Estimerte kostnader for testtriggen inkludert konseptutviklingskostnader blir 567 792 kr. Majoriteten av kostnadene ligger i konseptutviklingsarbeidet, som kan trekkes fra totalsummen siden dette er et studentoppdrag. Uten konseptutviklingskostnadene kommer totalsummen på 72 782 kr. På neste side vises et diagram over kostnadsfordelingene:





Figur 12.1. Diagram som viser kostnadsfordelingen med prosentandel av totalsummen for test-riggen.

Av diagrammet kommer det også frem at standarddelene står for en betydelig andel av kostnadene. Dette er i hovedsak knyttet til den høye motorkostnaden. Med fratrukket av motorkostnader og konseptutviklingskostnader, vil testriggen kunne konstrueres for 42 782 kr.

Siden testriggen er en enkeltbestilling, og derfor ikke aktuell for masseproduksjon, er potensialet for kostnadsreduksjon lav. Det er stadig rom for optimalisering i motorfestet og propellnavet slik at de blir enklere å fremstille med de tilgjengelige produksjonsmetodene ved NMBUs verksted. Ved testing av andre motorer vil det også være rom for tilpasning av eksisterende motorfeste, slik at produksjon av nytt feste ikke blir nødvendig.

## 14. Prosessevaluering og diskusjon

*I dette kapittelet gjennomgås og evalueres utviklingsprosessene og utfordringene som har oppstått underveis i prosjektet. Det blir også sett på forbedringspotensialer ved de ulike prosjektfasene.*

### 14.1. Læring og kompetanseutvikling

Her gjennomgås punkter som har gitt læring og kompetanseutvikling underveis i prosjektet. Det vil presenteres personlige erfaringer som har bidratt til økt kunnskap og læring, samt verdifulle observasjoner som vil være relevante i fremtidige prosjektarbeid.

#### **Personlige erfaringer og verdifulle observasjoner:**

- Tidlig i utredningsfasen var fremgangen langsom grunnet mye informasjonsenting og for å få en oversikt og visualisering av prosjektet.
- Prosesdiagrammet ble benyttet regelmessig og representerer fremdriften i arbeidsprosessen, samt hvordan arbeidet foregikk mellom de ulike prosjektfasene.
- Spesielt under kreative prosesser ble mye av arbeidet gjort vekk fra arbeidsplassen, da det ofte var uhensiktsmessig og lite produktivt å tvinge frem ideer ved skrivebordet. Gjennom hele semesteret har prosjektet kontinuerlig vært i tankene, og flere ideer har dermed dukket opp utenom arbeidstiden, f.eks. ved gåturer eller i senga.
- Det ble forsøkt å arbeide jevnt med oppdraget gjennom hele semesteret, men det ble til tross for dette en hektisk siste måned. Dette på grunn av de mange usikkerhetsmomentene ved de tidlige stadiene i oppgaven som måtte gjøres rede for basert på antagelser og forutsetninger, som var en tidkrevende prosess.
- Valgtakning underveis i prosjektet var krevende da det ble ansett som viktig å gjøre de riktige valgene første gangen. Det følte som et veiskille i arbeidet, der det ville vært svært kronglete å gå tilbake å gjøre endringer etter at valget var tatt. I realiteten kunne det dog vært mer hensiktsmessig å ta et valg og heller foreta nødvendige endringer senere, da mye av beslutningstakingen i prosjektet tok svært lang tid.
- Design- og konstruksjonsdelen av arbeidet falt naturlig på plass, grunnet grundige planleggingsprosesser og forberedelser. Det ble fokusert på forarbeid og planlegging for å slippe å gjøre omfattende endringer underveis, spesielt ved DAK-arbeid og konstruksjon av tekniske tegninger.
- Masterrapporten ble lengre og mer omfattende enn forventet, og fullføring av tegninger og visualiseringer i prosjektets avsluttende faser var svært tidkrevende. For å sikre et avrundet og ferdig arbeid ble derfor de siste ukene svært hektiske. Det burde derfor blitt satt av mer tid til ferdigstilling og konkludering.

## 14.2. Konseptutviklingsarbeidet, forbedringspotensialer

I denne seksjonen gjennomgås forbedringspotensialer i arbeidets ulike faser. Hvert underkapittel tar for seg hver av prosjektets faser med tilhørende prosessstrinn i henhold til prosessdiagrammet.

### Utredningsfasen

- Prosessen med å formulere og ferdigstille oppdragsbeskrivelsen var mer tidkrevende enn forventet. Det var viktig at denne var komplett og gjennomtenkt før arbeidet startet, og det var mye bakgrunnsstoff som måtte gjennomgås før oppdraget kunne påbegynnes. Stoff knyttet til Dolphin Sky burde derfor vært undersøkt på forhånd for å spare tid i denne fasen.
- Ved fremstilling av bakgrunn og eksisterende løsninger var mange faktorer ved prosjektets senere faser ukjent. Det ville vært hensiktsmessig å gå tilbake og gjøre en revisjon for å gjøre stoffet mer tilspisset og relevant.
- Arbeidsplanen ga en god oversikt over hva som skulle gjøres, men den var i enkelte prosjektfaser vanskelig å følge tidsmessig. Det ble gjort enkelte modifikasjoner underveis etter hvert som prosjektet utfoldet seg og tidsbehovet for hvert kapittel ble tydeligere. En mer gjennomtenkt og realistisk plan kunne forbedret disponeringen av tiden gjennom prosjektet.
- Ved kartlegging av metoder og teoretisk grunnlag var det vanskelig å forutse nøyaktig hva som ville bli relevant og det ble brukt mye tid på å undersøke dette. Bedre planlegging og forberedelsesarbeid ville vært gunstig for å effektivisere denne delen av prosjektet.

### Utviklingsfasen

- Spesifiseringsprosessen var utfordrende når det gjaldt estimering av dimensjoner. Her hadde det vært fordelaktig å bruke eksperthjelp ved et tidligere tidspunkt for å lage bedre estimater.
- En mer detaljert funksjonsanalyse kunne forenklet DAK-arbeidet. I funksjonsanalysen ble kun de viktigste funksjonene inkludert, mens elementer som ble ansett som mindre viktige ble utelatt grunnet tidsbegrensinger. Disse elementene måtte derfor isteden utredes og konstrueres på sparket under 3D-modelleringen.
- Konseptgenereringen var en mer tidkrevende prosess enn forventet til tross for at passiv planlegging og idegenerering ble påbegynt tidlig i arbeidet. Det burde derfor vært avsatt mer tid til denne arbeidsfasen.
- Konseptvalget ble i en periode satt på vent i frykt for å velge suboptimale løsninger, og prosessen tok derfor lengre tid enn planlagt. Siden valgtakingen baserer seg på

objektive seleksjonsprosesser forankret i fastsatte vektete egenskaper var det ingen grunn til å være usikker og nølende i dette stadiet.

- Den første eksperttestingen ble foretatt ved konseptvalget etter fullført konseptgenerering. Under dette møtet kom Holmberg med et løsningsalternativ for riggens motorvinkling, men ved dette tidspunktet var det ikke tid til å gjøre store endringer og implementere denne ideen i seleksjonsprosessen. Testingen burde ha foregått tidligere for å få innspill og assistanse under konseptgenereringen. Det samme gjelder for innspill knyttet til produksjonsmetoder, ved dialog tidligere i prosjektet kunne konstruksjonen blitt tilpasset ytterligere for de tilgjengelige produksjonsmetodene ved universitetet.
- DAK-arbeid ble avvært til alt av forarbeid var på plass i frykt for at det skulle oppstå betydelige konseptendringer som ville vært omfattende og tidkrevende å fikse. Det kunne dog vært fordelaktig å konstruere en 3D-skisse i Solidworks for å få et inntrykk av størrelser og en visuell representasjon av riggen tidligere i prosjektet.
- Manglende klaring mellom rotasjonssperren og motorarm i vertikal stilling ble oppdaget sent i 3D-modelleringsprosessen. Løsningen ble å lage et spor i sperren for å lage nødvendig klaring, noe som ikke anses som ideelt siden kuttet svekker emnet. Bedre forarbeid kunne blitt gjort for å unngå at dette problemet oppstod underveis.

### Analyse- og ferdigstillingsfasen

- Grunnlagsberegningene ble foretatt på motorarmen, som ble ansett som det mest utsatte og kritiske området på riggen. Grunnet tidsbegrensninger ble det ikke foretatt håndberegninger på andre punkter, men dette burde blitt gjort for å verifisere at dimensjoneringen og materialvalget er tilstrekkelig.
- Materialvalgene ble tatt på bakgrunn av styrkeparametere og tilgjengelighet, mens pris ikke ble ansett som en utslagsgivende faktor. Andre rimeligere materialalternativer kunne blitt funnet dersom det ble gjort nøyere og mer kostnadsfokuserende undersøkelser.
- FEM-analysen ble kun foretatt på motorarmen for å verifisere håndberegningene og for å se på deformasjon med endelig materialvalg. Her burde det blitt foretatt analyser på andre kritiske deler, som akselbolt, støtteprofiler og motorfeste for å sjekke strukturell integritet.
- Komponenter og passende produksjonsmetoder ble gjennomgått i grove trekk med Holmberg, og ble ansett som fornuftige. Likevel er noen deler vanskelige å produsere og burde vært tilrettelagt for produksjon ved NMBUs verksted på en bedre måte.
- Grunnet informasjonsmangel ble ikke en nøyaktig analyse knyttet til produksjon- og materialkostnader fremstilt. En nærmere dialog med universitetets verksted ville hjulpet med å skape mer nøyaktige kostnadsanslag enn estimatene som er presentert i arbeidet. Denne fasen ble påvirket som følger av pandemiens konsekvenser.

### 14.3. Designrevisjon, produksjon og kostnadsreduksjon

Her gjennomgås områder ved testtriggen som kan forbedres i forhold til design, produksjon og kostnad. Det legges frem potensielle designendringer som kan forbedre produktet, samt løsninger som kan forenkle produksjon og senke kostnader.

#### Designrevisjon

- Siden det er usikkerhet knyttet til nøyaktig valg av dimensjoner på lastcellen kan hullene i lastcelleplattformene og lengden på lastcelleprofilene måtte modifiseres når endelig valg av lastcelle er kjent.
- Rotasjonssperredelen som er laget av et stålprofil måtte modifiseres med et spor for å tillate motorarmen å kunne stå i vertikal posisjon. Her vil det kunne være hensiktsmessig å revidere designet for å unngå unødvendige kutt og svekkelser i emnet. Delen kan f.eks. endres til å benytte samme system som lastcelleplattformen for vertikal testing, med profilstykker som står på sidene og gir nødvendig klaring til motorarmen.
- Det er uavklarte usikkerhetsmomenter knyttet til motoren som gjør at det kan bli nødvendig å gjøre endringer på propellnavets utforming. Navet er utformet med en utstikker på bunn ved akselhullet for å gi resten av navet klaring for stasjonære motordeler. Denne utstikkeren fungerer kun dersom motoren leveres med en utstikkende krage på akselen. Dersom dette ikke er tilfelle, vil det være hensiktsmessig å benytte et radielt rullelager mellom nav og motor for å unngå skraping.
- LEM-200 motoren kan bestilles med modifisert akselutforming. Nåværende løsning med kilespor i akselen og tilhørende spor i propellnavet er utviklet på bakgrunn av standard aksel. Denne løsningen gjør produksjon av propellnavet vanskelig for verkstedet ved NMBU. Her burde derfor muligheten for spesialbestilling av motor med modifisert aksling som tillater enklere produksjon av propellnavet ses nærmere på.
- Propellbladene i masterarbeidet fungerer som plassholdere og er ikke en eksakt modell av den endelige løsningen. Størrelse på skruehull og navets tykkelse kan derfor bli aktuelt å endre når endelig propelløsning er utredet.
- Motorpinsene som brukes til å gi klaring for undersiden av LEM-200 motoren kan modifiseres til å bruke gjennomgående bolter istedenfor at pinen selv er gjenget. Dette vil forenkle produksjon og senke kompleksiteten til motorpinsene.

#### Produksjon- og kostnadsreduksjon

- Siden det ikke er gjort analyser og beregninger på propellnav og motorfeste er det noen usikkerhetsmomenter knyttet til materialvalg. Med mer data kan det hende resultatene tilsier at det kan brukes rimeligere materialer for disse delene, eller at størrelser kan dimensjoneres ned for å minke materialbruk.

- Dersom det foretas FEM-analyser på akselbolten kan det vise seg å være en mulighet å gå ned i dimensjon, eller benytte et standardisert rundt hulprofil istedenfor en solid bolt.
- De spisse kantene på innsiden av motorfundamentet burde rundes av for å forenkle produksjon ved maskinering.

## 15. Konklusjon

Gjennom dette mastergradsprosjektet er det utredet, utviklet og designet en testtrigg for laboratorietesting av løfteevnen til aktuelle motor- og propellkonfigurasjoner for Dolphin Sky. Konseptet kan stilles opp i ulike testoppsett, og benytter seg av en momentarm mellom motor og lastcelle for måling av løfteevne. Utredning- og utviklingsarbeid er nøye dokumentert og det er redegjort for metodegrunnlag og teori. Tekniske anvisninger for montering og konstruksjon er dokumentert i rapporten, og konstruksjonskompleksiteten er holdt lav for å sikre mulighet for produksjon og forsøk ved NMBU.

Testtriggen er 3D-modellert i Solidworks med alle aktuelle komponenter som er nødvendig for produksjon. Det er foretatt grundig spesifisering og konseptvalg basert på ønskede egenskaper, som gjør at testtriggen har kapasitet til å teste ulike aktuelle konfigurasjoner for motor og propelltyper. Styrkeberegninger er foretatt i form av håndberegninger og gjennom FEM-analyse i Ansys for å verifisere at konstruksjonssikkerheten er tilfredsstillende. Løsningen er kvalitetssikret ved eksperttesting av konstruksjonselementer, produksjonsmetoder og styrkeberegninger. Brukssikkerhet er ivaretatt gjennom en lite kompleks konstruksjon som er enkel å sette opp og bruke, samt gjennom redegjøring av sikkerhetssystemer som må implementeres før bruk. Det er redegjort for de aktuelle produksjonsmetodene, og det er laget kostnadsestimater for å gi et bilde av prosjektkostnader og testtriggenes pris.

Elementer som fundamenteringsmuligheter, endelig valg av sikkerhetsgjerd og styrings-systemer er enda usikre og må gjøres rede for i videre arbeid når nødvendig informasjon er tilgjengelig.

### 15.1. Resultater og anbefalinger

Her legges det frem tekniske og bruksmessige resultater knyttet til riggens funksjoner, dimensjoner og egenskaper, samt anbefalinger for bruk av produktet og teknisk oppfølging.

#### **Tekniske og bruksmessige resultater fra arbeidet:**

- I horisontal testkonfigurasjon er riggens ytterdimensjoner uten propell:  
2120 x 1160 x 961 mm.
- I vertikal testkonfigurasjon er riggens ytterdimensjoner uten propell:  
2062 x 1160 x 1930 mm.
- Testtriggenes vekt uten motor og propell er: 192,2 kg.
- Riggens forsøksoppsett tillater testing og simulering av aktuelle konfigurasjoner for Dolphin Sky:

- Med og uten bakkeeffekt ved å rotere motorarmen mellom horisontal og vertikal stilling.
- Dobbelmotorkonfigurasjon.
- Enkeltmotor i skyve- og trekkekonfigurasjon.
- Opptil seks propellblader per motor.
- Bytte av testkomponenter og endring av motorvinkling kan gjøres raskt ved bruk av standardiserte verktøy, og riggen har en åpen konstruksjon med god fremkommelighet for reparasjoner og vedlikehold.
- Riggens konstruksjon er fleksibel, og tillater påbygg og designmodifikasjoner dersom dette blir nødvendig.
- Testtriggens lave kompleksitet gjør at det er vanskelig for bruker å gjøre feil ved bytte mellom ulike testoppsett.
- Motorfestet er avtagbart og utviklet som en modul for å tillate testing av ulike motortyper.
- Konstruksjonen er tilpasset for å tillate implementering av anbefalt sikkerhetsutstyr.
- Produktet er utviklet med standarddeler og enkel produksjon i fokus, og kan derfor produseres og monteres ved NMBUs verksted. Konstruksjonen består av 37 unike deler inkludert motor og propell, der 18 er standardkomponenter.
- Testtriggens hovedkomponenter er bygget opp av standardiserte stålprofiler av typen S355J2, mens akselbolten er laget av et S235JR boltemne. Motorfestet og propellnavet er laget av aluminiumslegeringen 6061-T6 og profilproppene er laget av polymeren ABS.
- Ved maks estimert motorlast på 2055 N vil jevnførende spenning i motorarmen være 68,2 MPa og største deformasjon 3,82 mm ytterst på armen ved motoren. Sikkerhetsfaktoren mot flyt i motorarmen er 5,20.
- De totale kostnadene for en ferdig konstruert testtrigg inkludert konseptutviklingskostnader er estimert til 567 782 kr. Dersom konseptutviklingskostnadene trekkes fra blir totalkostnadene for riggen 72 782 kr inklusive motorer, og 42 782 kr uten motorer.

### Anbefalinger for produktet:

- Produktet er enkelt og intuitivt å sette opp og bruke, men maskinoperatør skal vise varsomhet og hensyn siden produktet kan være farlig ved uaktsomhet.
- Testtriggen krever minimalt med vedlikehold, men det anbefales å smøre akselbolten med jevne intervaller for å minimere friksjon mellom bolt og foring. Friksjon i dette punktet vil kunne påvirke måleresultatene.
- Før testing med vertikal arm burde valgt motor- og propellkonfigurasjon være montert mens armen stadig er i horisontal stilling. Det vil være vanskelig å foreta montering mens armen står vertikalt og motorfestet dermed står høyere over bakken.



- Riggeren skal være fastskrudd i egnet fundament før testing. Dersom det benyttes balastvekter for fundamentering skal det gjøres beregninger på nødvendig vekt med sikkerhetsfaktorer før testing.
- Riggeren skal ikke kjøres uten sikkerhetsgjerde som har klaring til riggeren for å hindre tilgang til roterende deler. Det skal også benyttes en gjennomsliktig sikkerhetsvegg rundt operatør som gir innsyn til riggeren, samt ekstra sikkerhet mot personskafer.
- Før bruk må det implementeres et nødstoppsystem som umiddelbart stanser motorene dersom det oppstår feil. Dette er et krav i maskinforskriften.
- Dersom testriggeren skal benyttes utendørs bør den overflatebehandles med pulverlakkering eller lignende for å gi økt korrosjonsbeskyttelse.

### 15.2. Videre arbeid

Gjennom prosjektet har det oppstått nye problemstillinger og elementer som det ikke er blitt gjort rede for grunnet arbeidets begrensede tidsomfang. Under presenteres punkter for videre arbeid som kan forbedre konseptløsningen og gi et bedre grunnlag for realisering. Punktene er organisert etter kompleksitet og kostnadsomfang.

- Gjøre beregninger på, og dimensjonere sveiseforbindelser.
- Tilpasse dimensjoner i motorfeste og propellnav når endelige mål er tilgjengelige. Her bør også spesialbestilling av alternativ akselutforming vurderes for å minke kompleksiteten rundt produksjon av propellnav.
- Gjøre endelig valg av sikkerhetsgjerde som skal brukes rundt riggeren og utforme pleksiglassveggen for beskyttelse av operatør.
- Foreta undersøkelser rundt mulighetene for fundamentering ved fastskruing, og dimensjonere aktuelle skruer og skruefeste. Dersom fastskruing ikke er mulig med fastskruing må det redegjøres for hvilke balastvekter som er tilgjengelige for bruk ved universitetet.
- Undersøke dynamiske belastninger og foreta utmattingsberegninger på motorarmen.
- Foreta FEM-analyser på motorfestet og propellnavet for å sikre at dimensjoneringen er tilstrekkelig.
- Implementere en nødstoppsfunksjon, som er et krav i maskinforskriften.
- Utrede og utvikle et system slik at motor ikke kan kjøres uten at beskyttelsesgjerde er på plass/lukket.
- Utvikle aktuelle propellblader som er kompatible med riggerens navløsning.
- Bygge et trallesystem slik at riggeren kan transporteres enklere.

## 16. Referanser

### 16.1. Skriftlige kilder

12. Rummelhoff Kristoffer Ødegaard, "Dolphin Sky, Del A: Utvikling av integrert design- og helhetskonsept for sveveløsning", Realtek, NMBU, 2016, 129 s.
13. Thømt, Anders Christian, "Utredning, dimensjonering og utvikling av testoppsett for thrusterfunksjon til persondrone", Realtek, NMBU, 2017, 89 s.
14. El-Gewely, Tarek, "Dolphin Sky: Utredning og utvikling av sammenfoldbart propell- og thrustersystem", Realtek, NMBU, 2018, 137 s.
15. Falstad, Henrik, "Videreutvikling av sammenfoldbare oppheng for propell- og thrustersystem" Realtek, NMBU, 2019, 140 s.
16. Andersen, E. S., Grude, K. V., Haug, T., "Målrettet prosjektstyring", NKI-forlag, Norge, 2015, 285 s.
17. Eversheim, W., "Innovation Management for Technical Products: Systematic and Integrated Product Development and Production Planning (RWTH-Edition) 1<sup>st</sup> edition", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Tyskland, 2009, 444 s.
19. Pugh, S., "Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering", Pearson Education, Essex, United Kingdom, 1991, 296 s.
20. Dieter, G. E., Schmidt, L., "Engineering design, Fifth Edition, McGraw-Hill International Edition", New York, USA, 2013, 825s. + vedlegg.
22. Michalko, M., "Thinkertoys: A Handbook of Creative-Thinking Techniques 2<sup>nd</sup> Edition", Ten Speed Press, Berkley, USA, 2006, 416 s.
23. Baxter, M., "Product Design (Design Toolkits), 2<sup>nd</sup> Reprint", CRC Press, (1995)/Nelson Thorne Ltd, Cheltenham, Storbritannia, 2001, 308 s.
24. Anderson, J. D., "Fundamentals of aerodynamics, Sixth Edition", McGraw Hill Education, New York, USA, 2017, 1130 s.
27. Terjesen, G., "Spenningsanalyse (rev. 2)", Komentarieavsnitt, Realtek, NMBU, 2020, 50 s.
28. Deters, R. W., "Static Testing of Micro Propellers", University of Illinois, Urbana, Illinois, USA, 2008, 40 s.

33. Hitchens, F. E., "Propeller Aerodynamics: The History, Aerodynamics & Operation of Aircraft Propellers", Andrews UK Limited, Luton, Storbritannia, 2015, 224 s.
35. Johannessen, J., "Tekniske tabeller", J. W. Cappelens Forlag A/S, Oslo, Norge, 2002, 158 s.
36. Norsk Standard, "NS-EN ISO 9001: Systemer for kvalitetsstyring, Norges standardiseringsforbund, Oslo, Norge, 200, 42 s.
37. Arbeidstilsynet, "Forskrift om maskiner", Tiden Forlag, Oslo, Norge, 2009, 65 s.

### 16.2. Personlig meddelelse

34. Henrik Folke Holmberg, Senioringeniør, konstruksjon og design, 21.04.2021
45. Egil Stemsrud, Senioringeniør, statikk og beregninger, 19.05.2021
46. Øyvind Hansen, Overingeniør/Verksmester, produksjon og verksted, 19.05.2021

### 16.3. Nettbaserte kilder

1. Traffic: Why It's Getting Worse, What Government Can Do, Brookings, sitert 22.01.2021.  
<https://www.brookings.edu/research/traffic-why-its-getting-worse-what-government-can-do/>
2. 2018 Revision of World Urbanization Prospects, FN, sitert 28.01.2021.  
<https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
3. Illustrasjon av trafikk, Travel and Leisure, sitert 03.02.2021.  
<https://www.travelandleisure.com/travel-tips/ground-transportation/traffic-jams-bad-for-your-health>
4. Norge forsterker klimamålet for 2030 til minst 50 prosent og opp mot 55 prosent, Regjeringen, sitert 28.01.2021.  
<https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-forsterker-klimamalet-for-2030-til-minst-50-prosent-og-opp-mot-55-prosent/id2689679/>
5. Nybilsalget 1. halvår: Merkbar nedgang -elbilene selger mest, Opplysningsrådet for veitrafikken, sitert 28.01.2021.  
<https://ofv.no/aktuelt/2020/nybilsalget-1-halv%C3%A5r-merkbar-nedgang-elbilene-selger-mest>

6. Cities and Pollution, FN, sitert 29.01.2021.  
<https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>
7. First European rules for air taxis introduced, Aerospace Testing International, sitert 29.01.2021.  
<https://www.aerospacetestinginternational.com/news/electric-hybrid/european-regulations-introduces-air-taxi-rules-as-number-of-development-projects-increase.html>
8. Explore PAL-V, PAL-V. sitert 03.02.2021.  
<https://www.pal-v.com/en/explore-pal-v>
9. CityAirbus, Airbus, sitert 03.02.2021.  
<https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/cityairbus.html#advantages>
10. Porsche and Boeing to Partner on Premium Urban Air Mobility Market, Newsroom Porsche, sitert 04.02.2021.  
<https://newsroom.porsche.com/en/2019/company/porsche-boeing-collaboration-premium-urban-air-mobility-18880.html>
11. Joby Aviation Welcomes New \$75M Investment from Uber as it Acquires Uber Elevate and Expands Partnership, Joby Aviation, sitert 04.02.2021.  
[https://www.jobyaviation.com/news/joby-aviation-welcomes-new-75m-investment-from-uber-as-it-acquires-uber-elevate-and-expands-partnership/?uclid\\_id=c0e6da93-6bf6-4027-ad03-ad7d69b87421](https://www.jobyaviation.com/news/joby-aviation-welcomes-new-75m-investment-from-uber-as-it-acquires-uber-elevate-and-expands-partnership/?uclid_id=c0e6da93-6bf6-4027-ad03-ad7d69b87421)
18. The Principles of Integrated Product Development, NPD Solutions, sitert 01.02.2021.  
<https://www.npd-solutions.com/principles.html>
21. Customer-Focused Development with QFD, NPD Solutions, sitert 02.02.2021.  
<https://www.npd-solutions.com/qfd.html>
25. Motors LEM-200, Lynch Electric Motors, sitert. 01.03.2021  
<https://www.lynchmotors.co.uk/pdfs/LEM-Vehicles/LEM200.pdf>
26. Bøyemoment og skjærkraft, Meccanica, sitert 19.02.2021  
<http://meccanica.uit.no/statikk/t08-2.html>
29. Are more propeller blades better?, Hartzell Propeller, sitert 12.03.2021  
<https://hartzellprop.com/are-more-propeller-blades-better/>
30. The many types of EV motors, Engineering, sitert 24.03.2021  
<https://www.engineering.com/story/the-many-types-of-ev-motors>

31. SS3G S-Type Load Cell, Variohm Eurosensor, sitert 29. 03.2021  
<https://www.variohm.com/products/load-cells-weighing-and-force-sensors/s-type-load-cells/ss3g-s-type-load-cell>
32. What Are The Types of Load Cells & What Are They Used For, Millennium Mechatronics, sitert. 29.03.2021  
<https://www.meltrons.com/pages/types-of-load-cells>
38. Bladhengsel, Jernia, sitert 04.05.2021  
<https://www.jernia.no/oppussing-og-vedlikehold/verkt%C3%B8y/beslag%2C-hengsler-og-montering/hengsler/pn-beslag-bladhengsel-1706-gz-114x50mm/p/28500759>
39. Hullplate LP1, Biltema, sitert 04.05.2021  
<https://www.biltema.no/bygg/byggbeslag/hullplater/hullplate-2000032679>
40. PCMW Thrust Washer, SKF, sitert 07.05.2021  
<https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/thrust-washers/productid-PCMW%20325401.5%20E>
41. Bright Zinc Plated Steel Hex Bolt, RS Components, sitert 27.04.2021  
[https://no.rs-online.com/web/p/hex-bolts/9173122/?cm\\_mmc=NO-PLA-DS3A- -google- -CSS NO NO Fasteners %26 Fixings Whoop- -\(NO:Whoop!\)+Hex+Bolts- -9173122&matchtype=&pla-380035853683&gclid=Cj0KCQjwytOEBhD5ARIsANnRjVhuUbH7k23vWZwfxvuGvtynYmnyx-i0stEbMK37a\\_VJRE6V9xHpQZsaAtPuEALw\\_wcB&gclsrc=aw.ds](https://no.rs-online.com/web/p/hex-bolts/9173122/?cm_mmc=NO-PLA-DS3A- -google- -CSS NO NO Fasteners %26 Fixings Whoop- -(NO:Whoop!)+Hex+Bolts- -9173122&matchtype=&pla-380035853683&gclid=Cj0KCQjwytOEBhD5ARIsANnRjVhuUbH7k23vWZwfxvuGvtynYmnyx-i0stEbMK37a_VJRE6V9xHpQZsaAtPuEALw_wcB&gclsrc=aw.ds)
42. Universal Load Cell, GrabCad, sitert 01.05.2021  
<https://grabcad.com/library/m16-threaded-hole-universal-pancake-load-cell-tension-compression-sensor-1>
43. T Motor Propeller, GrabCad, sitert 22.04.2021  
<https://grabcad.com/library/t-motor-28x9-2-propeller-1>
44. Lynch LEM-200, GrabCad, sitert 22.04.2021  
[https://grabcad.com/library/lynch-lem-200-1/details?folder\\_id=9416650](https://grabcad.com/library/lynch-lem-200-1/details?folder_id=9416650)
47. Construction Fence, GrabCad, sitert 23.05.2021  
<https://grabcad.com/library/construction-fence-1>
48. Control Pendant, GrabCad, sitert 23.05.2021  
<https://grabcad.com/library/control-pendant-1>

49. Desk PC, GrabCad, sitert 23.05.2021  
<https://grabcad.com/library/desk-pc-concept-with-monitor-atx-motherboard-only-1>
50. Office Chair, GrabCad, sitert 23.05.2021  
<https://grabcad.com/library/cadeira-escritorio-1>
51. Structural Steel, ACO Materials, sitter 25.05.2021  
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>
52. Ulegerte og legerte stål, Frey, sitert 25.05.2021  
<http://frey.no/wp-content/uploads/2014/01/9-Ulegerte-og-legerte-st%C3%A5l.pdf>
53. Garda Byggejerde, Anleggssikring, sitert 26.05.2021  
<https://anleggssikring.no/produkt/byggejerde-f3-smartpanel/>
54. Dekkduk til byggejerde, Pervaco, sitert 26.05.2021  
<https://www.pervaco.no/varsling-sperring-sikring/byggejerder/dekkduk-til-byggejerde-tennisnett-176-cm-x-50-meter?isgm=y&gclid=CjwKCAjw47eFBhA9EiwAy8kzNMgRZ61IGCBej7cyDVeSy9tjKLB3kfMSArqgPIKE0Bu8bUESK0V0HxoC4YAQAvD BwE>
55. Prisliste, Norsk stål, sitert 15.05.2021  
<https://pub.webbook.no/norskstaal/prisliste/files/assets/common/downloads/publication.pdf?uni=23991e697f16800de03b267059857752>
56. Workshop image, mpmpastica.com, sitter 25.05.2021  
<https://www.mpmpastica.com/wp-content/uploads/2019/05/officina-interna6-1-1030x688.jpg>

## 17. Vedlegg

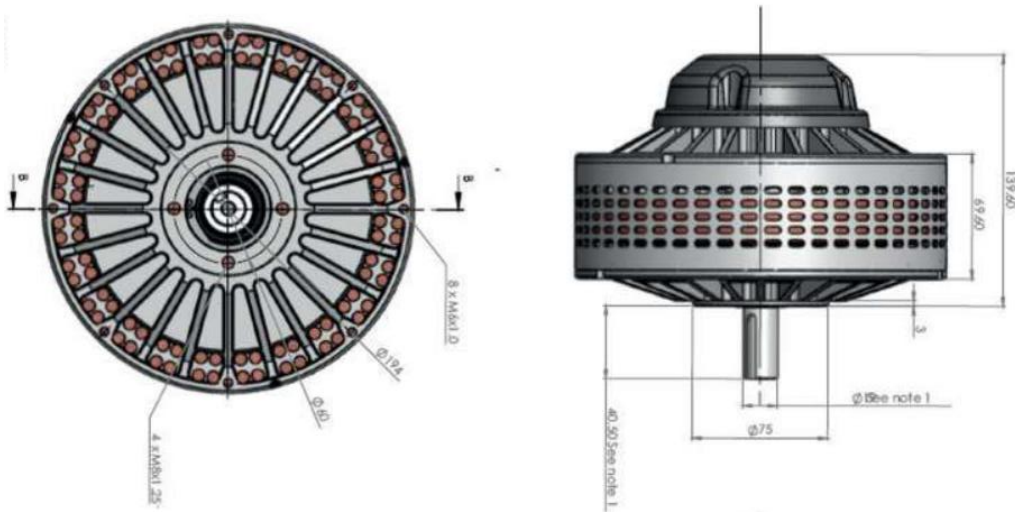
Tabell 17.1. Vedleggsoversikt

| Vedlegg nr. | Beskrivelse   | Side       |
|-------------|---|------------|
| I.          | Lynch LEM – 200 datablad [25]   | 131        |
| I.          | SS3G S – Lastcelle datablad [31]  | 132        |
| II.         | Sikkerhetsklasser ved beregning (Etter Johannessen) [35]  | 133        |
| III.        | Måltegning, NS/EN/ISO128  |            |
|             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Horisontal motorarm</li><li>• Vertikal motorarm</li></ul> | 134<br>135 |
| IV.         | Eksplasjonstegning, NS/EN/ISO128  |            |
|             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Base</li></ul>  | 136        |
|             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Lastcelleprofil</li></ul>                                 | 137        |
|             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Motorarm</li></ul>  | 138        |
|             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Motorfeste</li></ul>                                      | 139        |

Vedlegg I.

Technical Data

| Motor     | No load Current | Torque Constant | Speed Constant | Armature Resistance DC | Armature Inductance @ 15kHz | Armature Inertia | Peak Power | Peak Efficiency | Peak Current | Rated Power | Rated Speed | Rated Voltage | Rated Current | Rated Torque |
|-----------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------|-----------------------------|------------------|------------|-----------------|--------------|-------------|-------------|---------------|---------------|--------------|
|           | A               | Nm/A            | Rpm/V          | mΩ                     | μH                          | kgm <sup>2</sup> | KW         | %               | A            | kW          | Rpm         | V             | A             | Nm           |
| 95        | 6               | 0.113           | 81             | 21.5                   | 22                          | 0.0238           | 18         | 92              | 400          | 10          | 3888        | 48            | 220           | 28           |
| 126       | 10              | 0.0737          | 120            | 175                    | 6                           | 0.0234           | 7.59       | 83              | 400          | 5           | 2880        | 24            | 170           | 19.2         |
| 127       | 5               | 0.15            | 60             | 22.5                   | 23                          | 0.0236           | 16.08      | 89              | 400          | 8           | 2880        | 48            | 200           | 31.5         |
| D95B      | 6               | 0.14            | 76             | 20.5                   | 11                          | 0.0238           | 28.50      | 92              | 400          | 15.00       | 5472        | 72            | 210           | 30           |
| D126      | 5               | 0.0748          | 104            | 138                    | 5                           | 0.0234           | 11.14      | 81              | 400          | 6           | 3744        | 36            | 250           | 18.3         |
| D127      | 4               | 0.17            | 52             | 17.5                   | 13                          | 0.0236           | 25.38      | 92              | 400          | 13          | 3600        | 72            | 200           | 33.3         |
| D135      | 3.5             | 0.185           | 45             | 16.75                  | 16                          | 0.0236           | 29.04      | 93              | 400          | 14          | 3780        | 84            | 200           | 36.4         |
| D135 RAG  | 7.36            | 0.207           | 42             | 16.95                  | 16                          | 0.0238           | 34.32      | 93              | 400          | 16          | 4032        | 96            | 200           | 39.9         |
| D135 RAGS | 7.45            | 0.21            | 40             | 16.95                  | 16                          | 0.0238           | 36.00      | 93              | 400          | 18.00       | 4400        | 110           | 200           | 42.0         |





Vedlegg II.

# Load Cell - SS3 Series



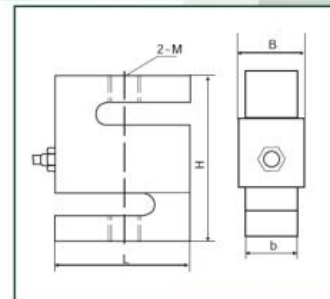
- S-type tension & compression load cell
- 50 kg - 10 t
- Stainless steel construction
- Robust design to industrial standards
- IP67 protection



| Specification                              |                     |                     |
|--|---------------------|---------------------|
| Output sensitivity ( = FS )                | mV/V                | 3.0 ± 0.008         |
| Maximum capacity ( E <sub>max</sub> )      | kg                  | 0.50 kg-10 t        |
| Combined Error                             | %FS                 | < ± 0.020           |
| Typical life cycle                         |                     | 10 Mio              |
| Minimum dead load                          | kg                  | 0                   |
| Safe overload                              | of E <sub>max</sub> | 150%                |
| Ultimate overload                          | of E <sub>max</sub> | 300%                |
| Zero balance                               | of FS               | <± 1.0 %            |
| Excitation, recommended voltage            | V                   | 5 - 12              |
| Excitation maximum                         | V                   | 18                  |
| Terminal resistance, input                 | Ω                   | 430 ± 60            |
| Terminal resistance, output                | Ω                   | 351 ± 2             |
| Insulation impedance                       | MΩ                  | ≥ 5000 ( at 50VDC ) |
| Temperature range, compensated             | °C                  | -10...+40           |
| Temperature range, operating               | °C                  | -30...+65           |
| Element material                           |                     | Stainless Steel     |
| Ingress Protection (according to EN 60529) |                     | IP67                |

### Outline dimensions in mm

| Dimension      | L      | H     | b     | B     | M       |
|----------------|--------|-------|-------|-------|---------|
| Capacity in mm |        |       |       |       |         |
| 50 kg          | 50.8   | 60.96 | 11.68 | 15.06 | M8      |
| 100 kg         | 50.8   | 60.96 | 11.68 | 15.06 | M8      |
| 250 kg         | 50.8   | 60.96 | 18.03 | 21.41 | M12     |
| 500 kg         | 50.8   | 60.96 | 18.03 | 21.41 | M12     |
| 1 t            | 50.8   | 60.96 | 24.38 | 27.76 | M12     |
| 2.5 t          | 76.2   | 99.06 | 24.38 | 27.76 | M20x1.5 |
| 5 t            | 74.68  | 99.06 | 30.74 | 34.12 | M20x1.5 |
| 7.5 t          | 87.38  | 139.7 | 37.08 | 40.46 | M24x2   |
| 10 t           | 112.78 | 177.8 | 42.93 | 46.31 | M30x2   |



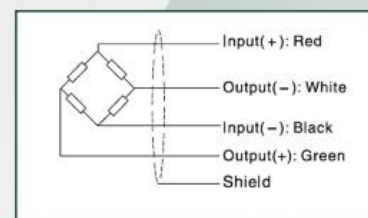
### Ordering information

Sample Code: **SS3G - xxkg - C3**

| Type                   | Range                               | Accuracy                             |
|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| SS3G - Stainless steel | 50 kg<br>100 kg<br>250 kg<br>500 kg | 1 t<br>2.5 t<br>5 t<br>7.5 t<br>10 t |

C3 ± 0.020%FS

### Wiring



- Shielded 4 Conductor cable 5mm OD
- Standard cable length 6m
- Cable type and cable length for customers own application are available on request
- Shield not connected to element



Variohm EuroSensor - Williams' Barn - Tiffeld Road - Towcester - Northants - NN12 6HP - UK  
 sales@variohm.com • www.variohm.com • +44 (0) 1327 351004

Subject to change without notice

SS3G - English - 06/12

## Vedlegg III.

### Tillatte belastninger

Tillatte belastninger for stålkonstruksjoner i  $N/mm^2$ 

| Materiale                                      | Belastningstype | Strekk<br>$\sigma_s$ | Trykk<br>$\sigma_t$ | Bøying<br>$\sigma_b$ | Vridning/<br>skjæring<br>$\tau$ |
|--|-----------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| NS-EN10025<br>S235JRG2                         | A I             | 100–150              | 100–150             | 110–160              | 65– 95                          |
|  | B II            | 65– 95               | 65– 95              | 70–105               | 40– 60                          |
|  | C III           | 45– 70               | 45– 70              | 50– 75               | 30– 45                          |
| NS-EN10025<br>S355J0                           | A I             | 140–205              | 140–205             | 150–215              | 80–125                          |
|  | B II            | 90–130               | 90–130              | 100–150              | 55– 85                          |
|  | C III           | 65– 95               | 65–95               | 70–105               | 40– 60                          |
| NS-EN10025<br>E360                             | A I             | 205–300              | 205–300             | 225–340              | 125–190                         |
|  | B II            | 130–200              | 130–200             | 150–215              | 80–125                          |
|  | C III           | 90–140               | 90–140              | 105–125              | 60– 90                          |
| NS-EN10083-1/-2<br>Seigherdingsstål<br>42Cr4Mo | A I             | 345–590              | 345–590             | 380–650              | 205–350                         |
|  | B II            | 220–380              | 220–380             | 240–410              | 160–240                         |
|  | C III           | 160–260              | 160–260             | 170–235              | 100–190                         |
| NS-11645<br>Sst 450                            | A I             | 80–120               | 105–160             | 90–130               | 50– 70                          |
|  | B II            | 50– 80               | 60– 90              | 55– 85               | 30– 50                          |
|  | C III           | 30– 50               | 30– 50              | 40– 60               | 20– 35                          |
| NS-11650<br>Sst 520                            | A I             | 90–130               | 120–180             | 100–140              | 45– 70                          |
|  | B II            | 60– 90               | 70–110              | 70–110               | 35– 50                          |
|  | C III           | 35– 60               | 35– 60              | 50– 75               | 25– 40                          |
| NS-11100*<br>SjG 200                           | A I             | 20– 40               | -110                | 45– 70               | 30– 45                          |
|  | B II            | 10– 20               | 30– 60              | 30– 45               | 20– 30                          |
|  | C III           | 5– 15                | 5– 15               | 20– 30               | 15– 20                          |

Tabellen har begrenset gyldighet og kan benyttes der det ikke blir gjort nøyaktige beregninger etter bruddhypotesen. Verdiene må reduseres hvis overflatene ikke er glattpolerte, og hvis det er muligheter for kjervirkning.

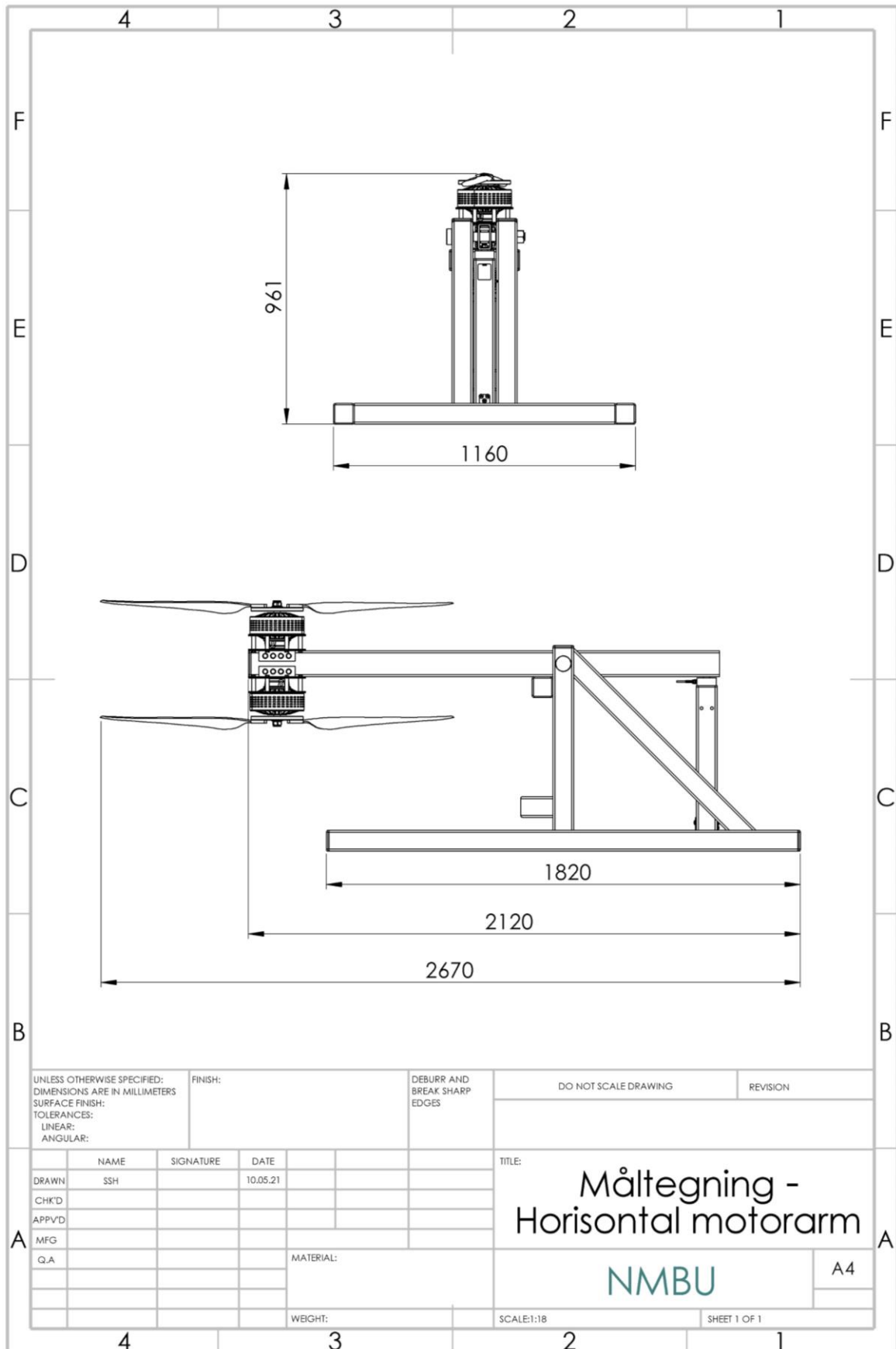
Belastningstype A gjelder for statiske belastninger.

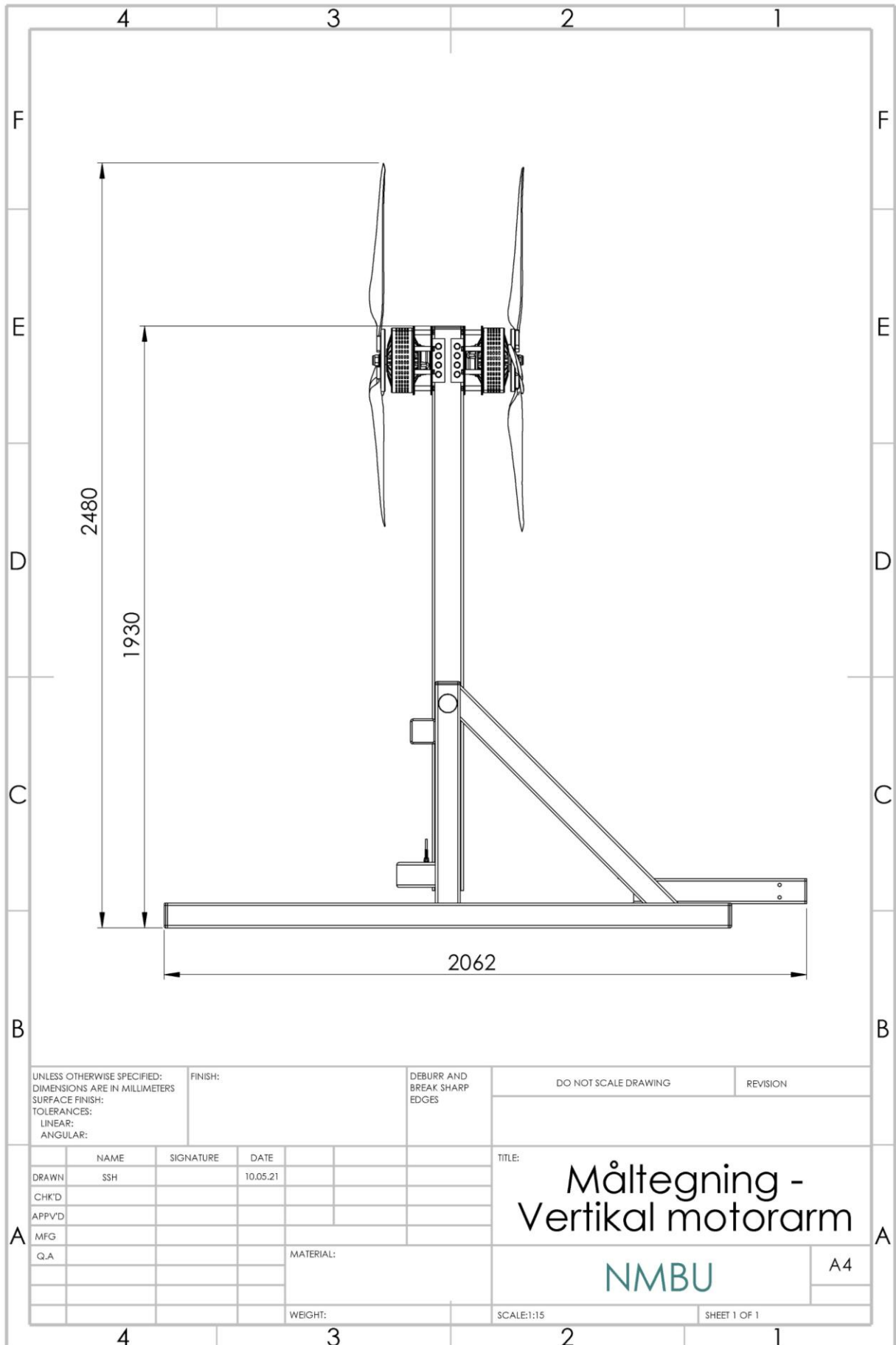
Belastningstype B gjelder for hurtig utsvingende belastninger.

Belastningstype C gjelder for hurtig vekslende belastninger.

\*) Verdiene for bøying, vridning og skjæring gjelder sirkelformede tverrsnitt. Ved bøying må verdiene reduseres med 20 % for rektangulære tverrsnitt og med 40 % for I-formet tverrsnitt. Ved vridning og skjæring reduseres verdiene for kvadratisk tverrsnitt med 40 % og for rektangulære tverrsnitt med 40–60 %.

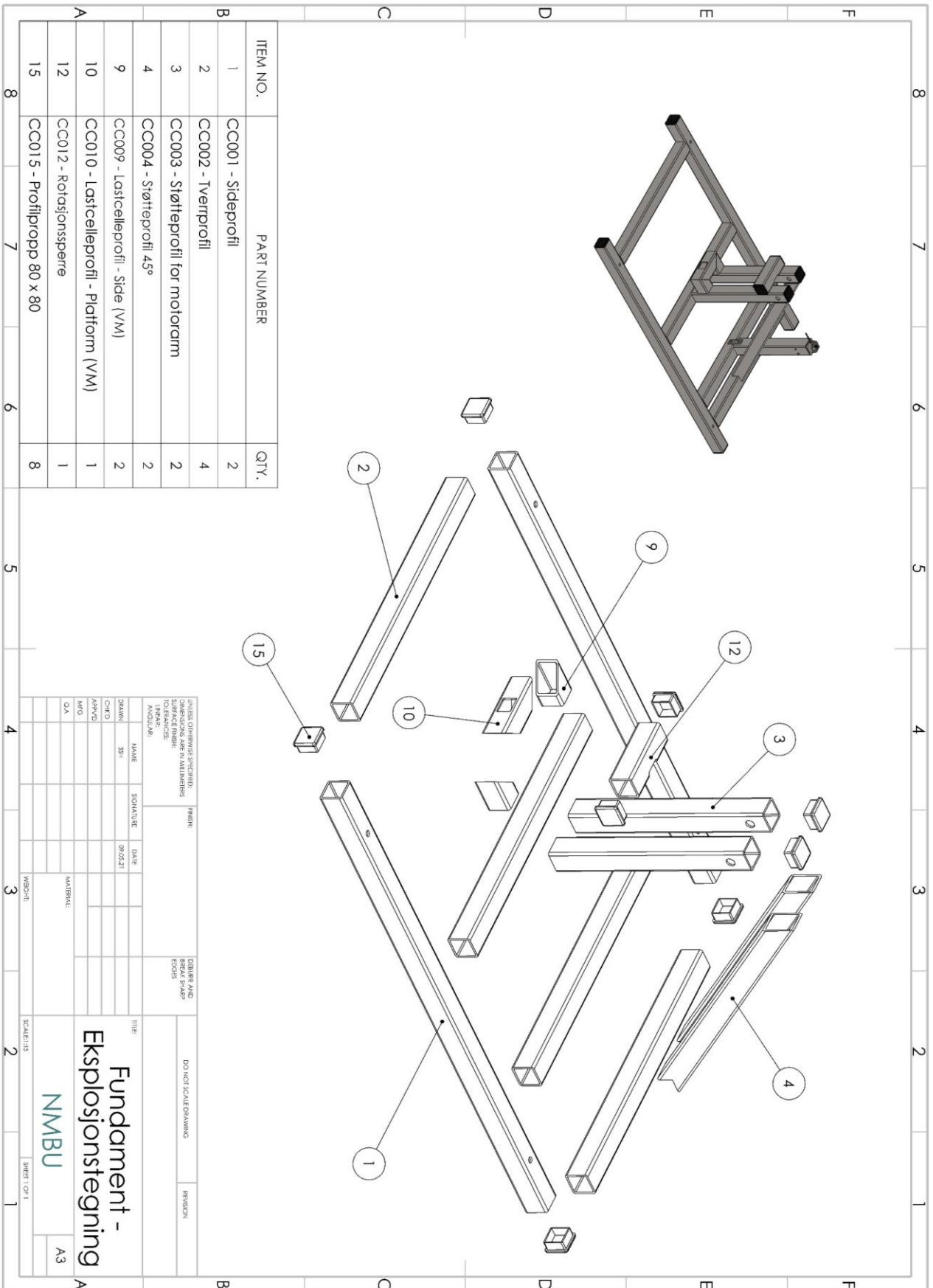
Vedlegg IV.





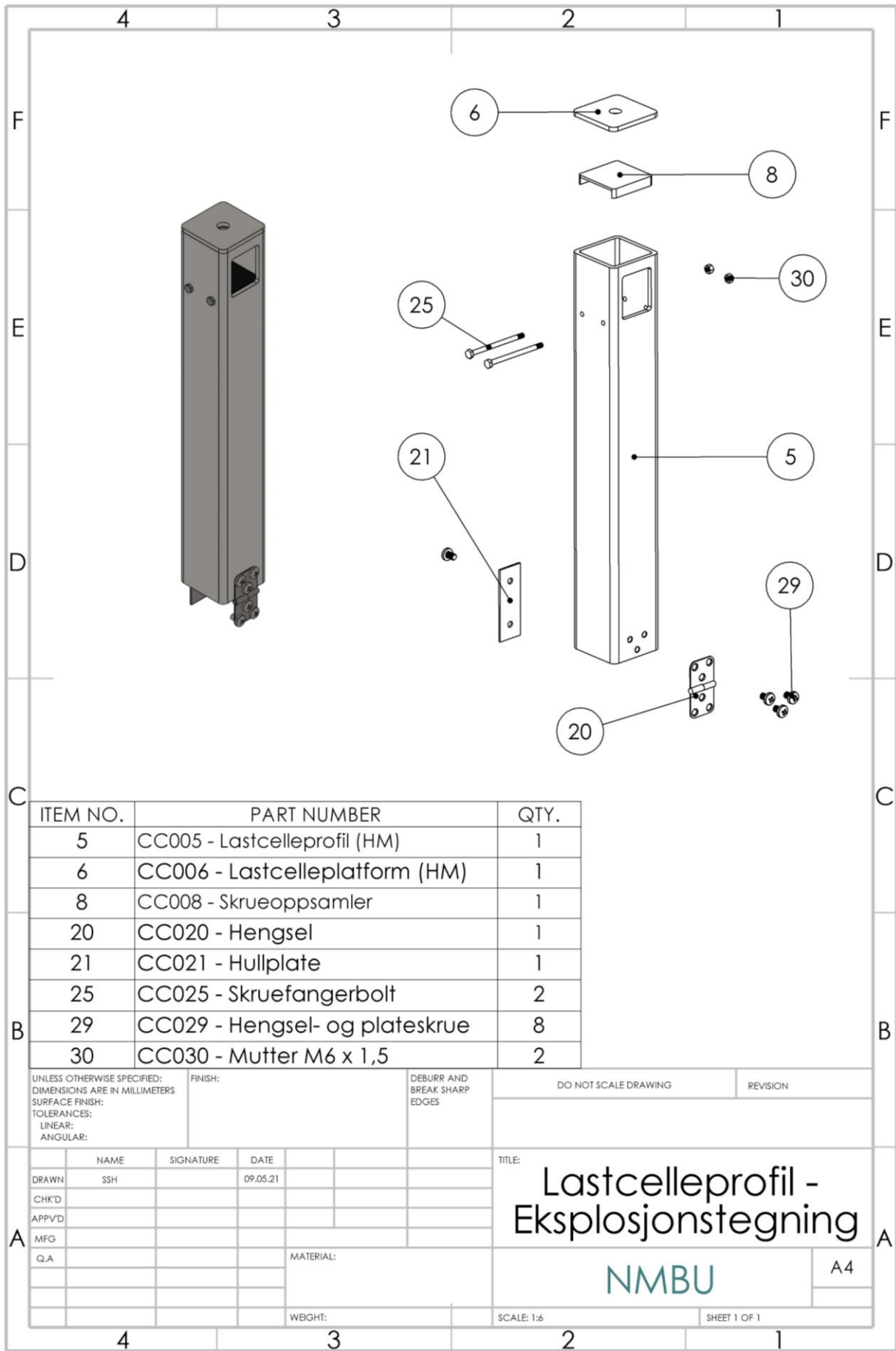
# Dolphin Sky

## Vedlegg V.



|                            |      |           |              |                     |  |
|----------------------------|------|-----------|--------------|---------------------|--|
| UNISIS OCH HVAER SÆKKEDEL: |      | FINNISH   |              | EGBURE AND          |  |
| SISTEMET ER EN KOMBINERT   |      |           |              | ENDEL               |  |
| TILBÆRINGER:               |      |           |              |                     |  |
| LINKER:                    |      |           |              |                     |  |
| ANSVARE:                   |      |           |              |                     |  |
| DRAGNING                   | NAME | SIGNATURE | DATE         | TITLE               |  |
| CC-03                      | SSI  |           | 09/05/21     | Fundament -         |  |
| APP/VD                     |      |           |              | Eksplisjons-tegning |  |
| MKG                        |      |           |              | NMBU                |  |
| GAZ                        |      |           |              | A3                  |  |
| MATERIAL:                  |      |           | SCALE: 1:15  |                     |  |
|                            |      |           | SHEET 1 OF 1 |                     |  |
|                            |      |           | REVISION:    |                     |  |



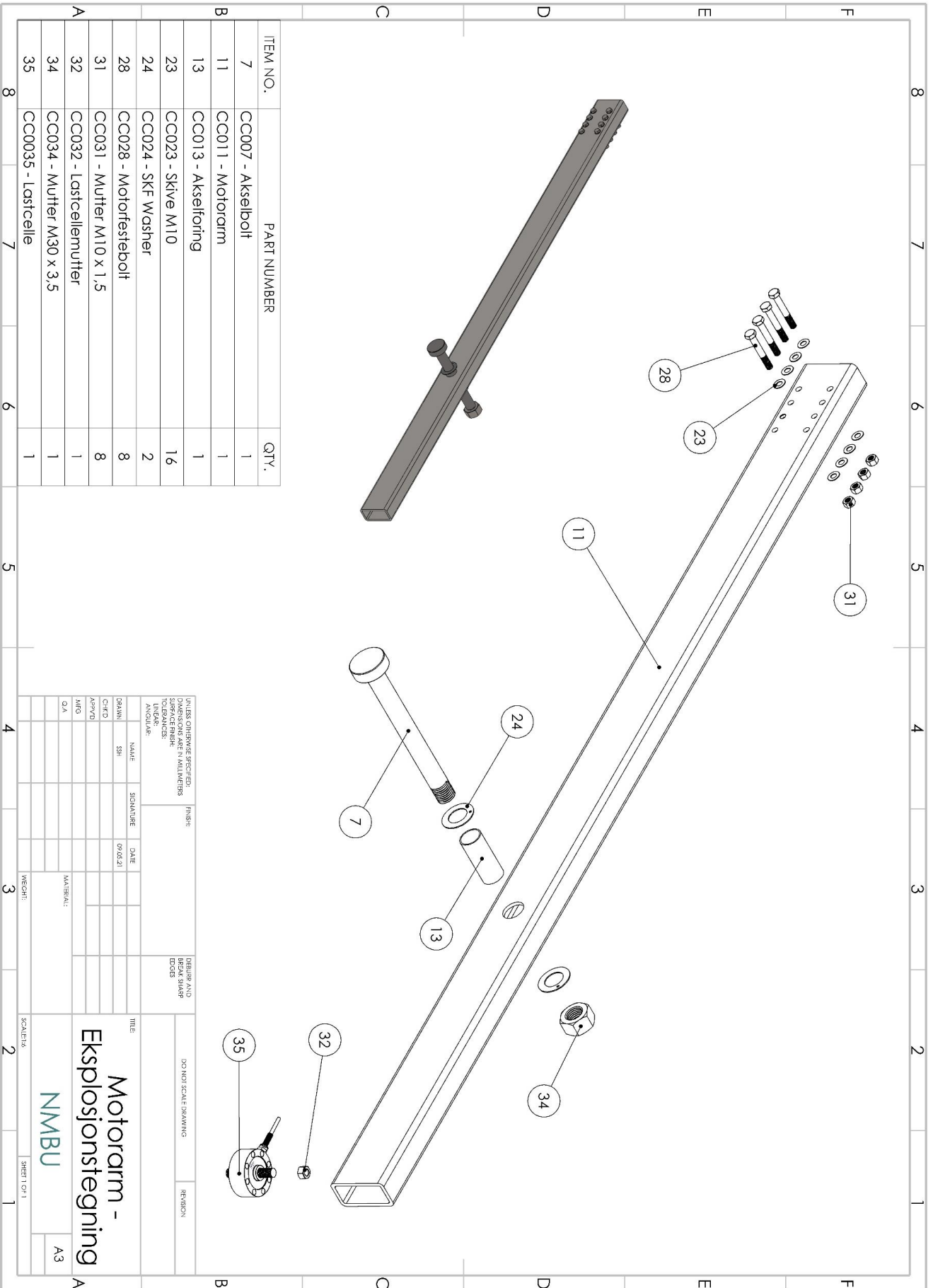


| ITEM NO. | PART NUMBER                     | QTY. |
|----------|---------------------------------|------|
| 5        | CC005 - Lastcelleprofil (HM)    | 1    |
| 6        | CC006 - Lastcelleplattform (HM) | 1    |
| 8        | CC008 - Skruedopsamler          | 1    |
| 20       | CC020 - Hengsel                 | 1    |
| 21       | CC021 - Hullplate               | 1    |
| 25       | CC025 - Skruerfangerbolt        | 2    |
| 29       | CC029 - Hengsel- og plateskrue  | 8    |
| 30       | CC030 - Mutter M6 x 1,5         | 2    |

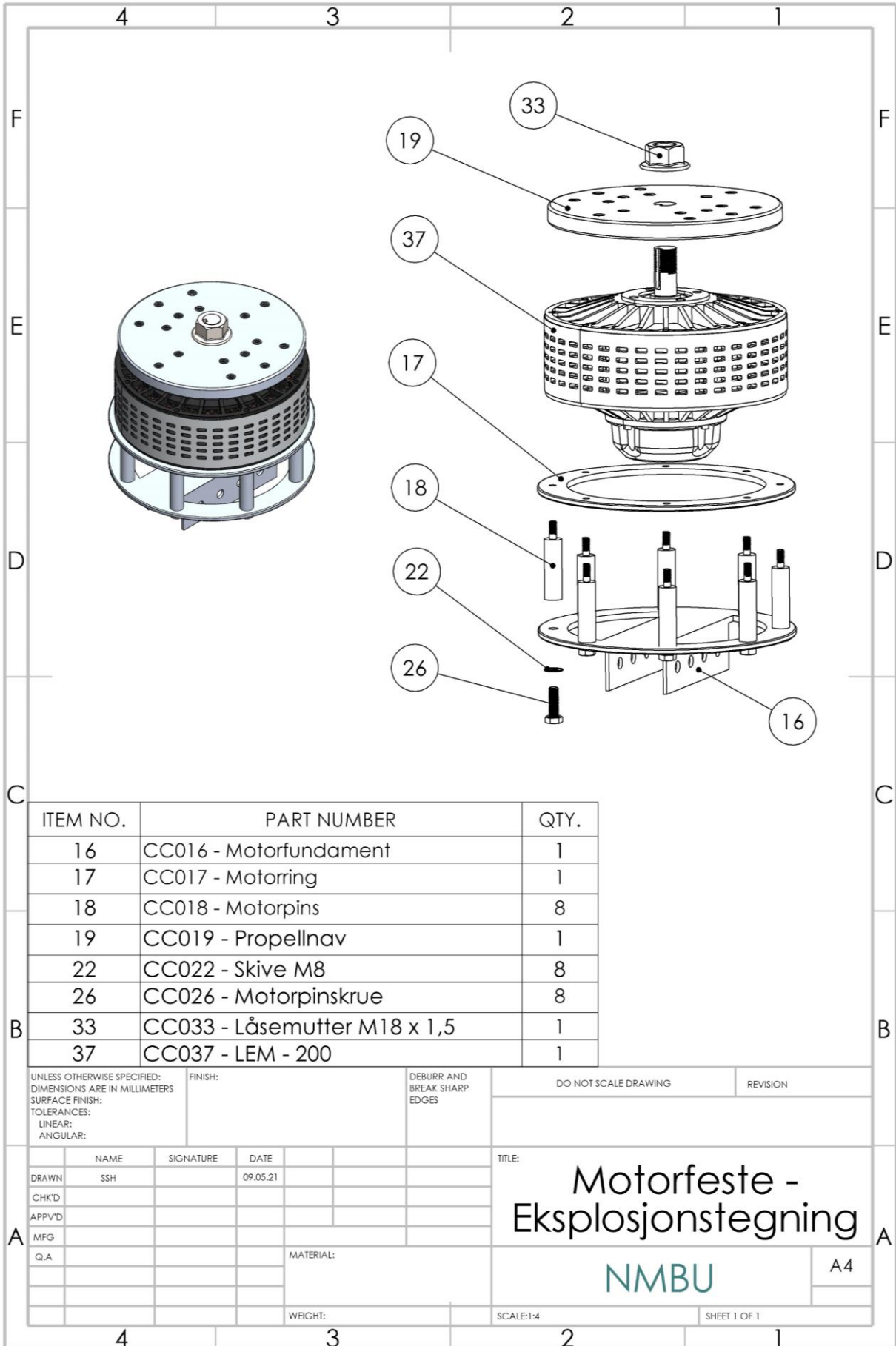
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:  
 FINISH:  
 DEBURR AND BREAK SHARP EDGES  
 DO NOT SCALE DRAWING  
 REVISION

|           |           |          |  |
|-----------|-----------|----------|--|
| NAME      | SIGNATURE | DATE     | TITLE:                                   |
| SSH       |           | 09.05.21 | Lastcelleprofil -<br>Eksplisjonsstegning |
| CHK'D     |           |          | NMBU                                     |
| APP'VD    |           |          |  |
| MFG       |           |          |  |
| Q.A       |           |          |  |
| MATERIAL: |           |          | A4                                       |
| WEIGHT:   |           |          | SCALE: 1:6                               |
|           |           |          | SHEET 1 OF 1                             |

# Dolphin Sky



|   |                              |   |                                  |
|---|------------------------------|---|----------------------------------|
| JUNIBS OVERHVERVET REVISJON:<br>DIMENSJONER I MILLIMETER<br>TOLLEANSER<br>LINDKAP<br>ANSOULAP |                              | FINISH:<br>BRUKER AND<br>BRUKER SIKKER<br>LØSLO                   | DO NOT SCALE DRAWING<br>REVISION |
| DRAWN: SH<br>CHECKD:<br>APPR'D:<br>ENG:<br>Q.A.   | SIGNATURE:<br>DATE: 09.05.21 | TITLE:<br><b>Motorarm -<br/>Eksplosjonstegning</b><br><b>NMBU</b> | SCALE: 1:1<br>SHEET 1 OF 1<br>A3 |







**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway