



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp
Fakultetet for realfag og teknologi

Modulsammenkøpling og helhetskonsept for Dolphin Sky

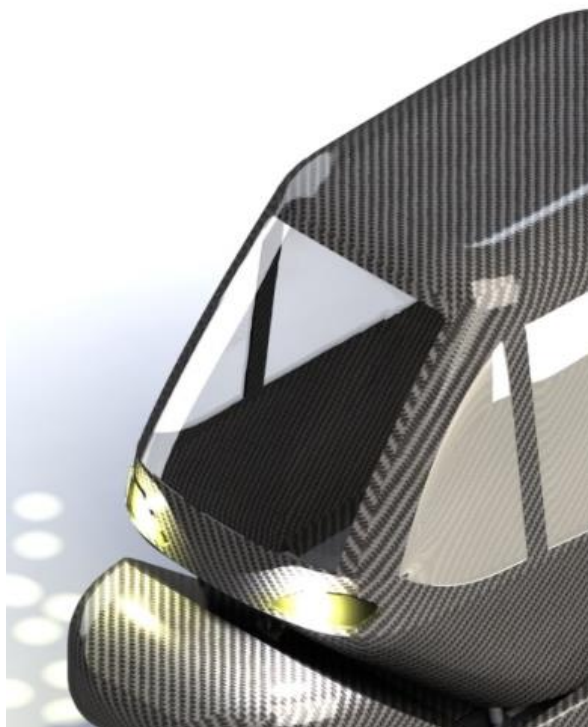
Interconnection and overall concept
of Dolphin Sky

Oda Veflen Olsen

Maskin-, prosess- og produktutvikling

Modulsammenkopling og helhetskonsept for Dolphin Sky

**av
Oda Veflen Olsen**



Masteroppgave i maskin, prosess og produktutvikling

Fakultet for realfag og teknologi, NMBU

Høsten 2021

FORORD

Denne rapporten er mitt avsluttende arbeid på et studieløp ved Norges miljø og biovitenskaplige universitet. Oppgaven oppsummerer det jeg har lært gjennom de siste årene i sivilingeniørstudiet mitt ved Fakultet for realfag og teknologi, og utgjør et arbeidsomfang på 30 studiepoeng over hele høstsemesteret i 2021.

Fra jeg var liten har jeg vært nysgjerrig på hvordan gjenstander fungerer, og jeg har alltid vært det man kaller klåfingret. Jeg syns det er spennende med ulike estetiske former og hvordan design kan benyttes for å uttrykke ens personlighet. Maskiningeniørstudiet har gitt meg mestringsfølelse og et sug etter å lære mer.

Oppgaven er en del av et internt prosjekt på RealTek ved NMBU, der målet er å utvikle et miljøvennlig, lettvekts kjøretøy. Med de globale klimautfordringene verden står ovenfor, var dette et prosjekt som fanget interessen min. Jeg er opptatt av en bærekraftig fremtid, og har et ønske om å kunne bidra til denne utviklingen. I tillegg var det spennende å jobbe for å realisere flyvende biler. Noe som har vært svært futuristisk, kan nå bli virkelig.

Utviklingsprosessen har vært svært lærerik, men også utfordrende. Jeg har tilegnet meg erfaring ved å selvstendig gjennomføre et større prosjekt, en kompetanse det er godt å ha med videre i livet for fremtidige prosjektutviklingsoppdrag.

Først og fremst vil jeg takke førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for god oppfølging, veiledning og motiverende samtaler gjennom hele prosjektet. Jeg vil også takke senioringeniør Henrik Holmberg og overingeniør Øyvind Hansen ved Realteks verksted for gode innspill og deltagelse i eksperttestingen.

Jeg har hatt mange gode støttespillere gjennom masterprosjektet og disse ønsker jeg å gi en stor takk. Jeg vil takke søsteren min, Maja Veflen Olsen, og samboeren min, Aleksander Verwegen, for motivasjon og støtte gjennom hele prosjektarbeidet. Til slutt vil jeg takke foreldrene mine for at de har motivert meg til å gå min egen vei. De har alltid fortalt meg at jeg kan få til de målene jeg setter meg dersom jeg jobber hardt.

Moss, den 14 desember 2021



Oda Veflen Olsen

SAMMENDRAG

Verden står ovenfor en irreversibel klimakrise, og CO₂ utslipp må reduseres. Transportsektoren står for en stor del av utslippet, og det er derfor behov for å utvikle nye, klimavennlige kjøretøy. En mulighet er å utvikle nye små, elektriske kjøretøy med tre eller fire hjul. Ved å redusere størrelsen til elektriske biler vil de ta opp mindre plass i trafikken, vekten vil reduseres, og kjøremotstanden og energiforbruket vil bli lavere.

På RealTek ved NMBU har det siden 2010 blitt utredet og utviklet et trehjuls-småbilskonsept, med navnet Dolphin. I 2016 startet utviklingen av Dolphin Sky, et modulbasert kjøretøy som med hjelp av en dronemodul skal kunne fly. Visjonen bak Dolphin er å utvikle en helelektrisk, lettvekts-småbil som kan kjøre på veien, i tillegg til å utføre korte flyvninger. Den skal være liten og lett for å minimere miljøpåvirkningen, og i førsteomgang kun romme en person. Dolphin skal bestå av tre moduler; dronemodul, kupémodul og understellsmodul, og modulene skal kunne koples inn og ut av hverandre slik at understellet kan stå igjen på bakken når man skal fly.

I tidligere gradsoppgaver har det blitt utført mye utviklingsarbeid rundt alle tre modulene, og dronemodulen anses som ferdig. Det var behov for videre arbeid på understellsmodulen og kupéen, spesielt rundt sammenkoplingen av modulene, og dette ble hovedfokuset i gjeldende masteroppgave. Hovedmålsettingen er å utrede og utvikle et helhetskonsept av Dolphin Sky med revisjon av tidligere løsningsforslag. En løsning på sammenkopling av kupé og understellmodul skal prioriteres, samt helhetsløsning for underchassis og styring.

Hoved- og delmål har blitt definert, med underaktiviteter slik at de kunne følges opp med milepeler. For å kunne oppnå hovedmålet ble det utarbeidet en tids- og arbeidsplan for å fordele ressursbruken på ulike aktiviteter og bestemme tidsbruken på hver aktivitet. Tidlige begrensninger for prosjektet ble satt for å holde fokuset på de viktigste aspektene for resultatet. Relevant metodikk ble gjennomgått, og de mest sentrale for oppgaven er integrert produktutvikling (IPD) som et overordnet verktøy gjennom prosjektarbeidet, likeledes Pughs metodikk og SCAMPER. Det ble også kartlagt hvilke programvarer og hjelpemidler som skulle benyttes gjennom prosjektet og hvordan arbeidet skulle kvalitetssikres. En prosjektplan med fire hovedfaser og deltrinn ble utarbeidet, for å systematisere arbeidsprosessen fremover. De fire fasene er utredningsfasen, utviklingsfasen, konstruksjon og designfasen og analyse- og ferdigstillingsfasen.

Det har blitt utført en teori- og teknologiutredning for å danne et grunnlag for relevante beregninger og teknologiske løsninger til videreutviklingen.

Basert på utredet informasjon i utredningsfasen, ble en mål- og produktspesifisering utarbeidet. Der ble det formulert målsetninger for produktet og de viktigste egenskapene. Det ble definert en metrisk grensespesifisering med variasjonsbredden til de ulike modulenes dimensjoner. Som et grunnlag for det videre utviklingsarbeidet, ble metriske grovspefiseringer satt for de dimensjonerende modulene og komponentene i sammenstillingen.

For å sikre at alle nødvendige funksjoner ble inkludert i utviklingsarbeidet, ble det utført en funksjonsanalyse. Funksjonsanalysen dannet grunnlaget for videre utvikling ved å generere

løsningsforslag for hver av de nødvendige funksjonene i helhetskonseptet. Alternativene ble skissert og forklart, vurderte og vektet gjennom Pughs seleksjonsmatrise, og valgt på bakgrunn av dette. Form- og estetikkalternativ ble utredet for karosseriet og andre designelementer, en vurdering av brukspåkjenninger ble utført, i tillegg til en tidlig materialdrøfting. Det var viktig å kartlegge hvilke belastninger Dolphin ville utsettes for, for videreutviklingen og dimensjonering. Det var derfor også nødvendig å grovt bestemme materialer og viktige egenskaper for de ulike delene.

Det har blitt utført to eksperttester for å kvalitetssikre konseptvalget. Dette ble utført gjennom en åpen diskusjon, og resulterte i mange gode forslag for å forbedre konseptet, og fornuftige produksjonsmetoder. De foretrukne løsningene ble detaljiskissert og grundigere beskrevet som et helhetskonsept.

Elementberegninger har blitt utført på hovedkomponentene og la grunnlaget for valg av rør i understellsrammen, nødvendig dimensjon på forhjulsgaffelen og i låsesystemet. Konseptet med alle dets underkomponenter ble 3D-modellert i Solidworks og på bakgrunn av CAD modellen ble det utredet for robusthet, vedlikehold og sikkerhet.

Ulike materialer ble vurdert, og valget landet på aluminiumslegeringen EN AW 6082 i det meste av konstruksjonen. Dette er et lett materiale som tåler store belastninger og er korrosjonsbestandig, og standardrør blir produsert i dette materialet. For de ekstra utsatte komponentene slik som forhjulsgaffelen og de små delene i låsesystemet ble det valgt å benytte rustfritt stål av kvaliteten AISI 431 da det ikke korroderer, og har en høy flytegrense. Karosseriet skal utvikles i karbonfiber.

Sikkerhetsfaktorer for konstruksjonen ble kartlagt og det ble sett på hvor store spenninger som tillates rammen til understellsmodulen. Det kan maksimalt oppstå en bøyepening på 100 MPa. For å undersøke spenningskonsentrasjonen i rammen ble FEM-analyser utført i Solidworks. Den største spenningskonsentrasjonen var på 113 MPa, og dermed litt for høy.

Produksjonsmetoder for alle komponentene har blitt kartlagt og det ble utført en kostnads-kalkyle for produksjon av en prototype, i tillegg til en sammenlikning til serieproduksjon. Til slutt ble en markedspresentasjon lagt frem, med renderte bilder av helhetskonseptet. Ulike farger på karosseriet, samt hvordan Dolphin ser ut i reelle omgivelser, ble presentert.

Resultatet fra prosjektet ble et konseptforslag av kupé- og understellsmodulen med fungerende sammenkopling og låsing, samt styringssystem, sammenkopling av styring og oppbyggingen av understellsmodulen med ramme og hjuloppheng. Understellet er bygget opp av en tolags aluminiumsramme. De ytre dimensjonene for sammenstillingen er: 1890x1684x3000 mm, og totalt veier den 232 kg, uten hjul, motor, batterier, isolering og resterende instrumentering slik som innhold i kupeen.

Det er behov for videre arbeid for å ferdigstille et komplett og fungerende system. Det må gjennomføres videre utvikling av mekanismene i låsesystemet slik at sammenslåingen skjer automatisk og samkjører alle låsene. FEM-analyser av knutepunktene må utføres, og en 3D-modell utvikles.

ABSTRACT

The world is facing an irreversible climate crisis, and CO₂ emissions must be reduced. The transport sector accounts for a large part of the emissions, and there is therefore a need to develop new, climate-friendly vehicles. One possibility is to develop new small electric vehicles with three or four wheels. By reducing the size of electric cars, they will take up less space in traffic, weight will be reduced, and driving resistance and energy consumption will be lower.

At RealTek at NMBU, a three-wheeled small car concept, called Dolphin, has been studied and developed since 2010. In 2016, the development of Dolphin Sky began, a module-based vehicle that will be able to fly with the help of a drone module. The vision behind Dolphin is to develop a fully electric, lightweight small car that can drive on the road, in addition to performing short flights. To minimize the environmental impact, the vehicle should be small and light and initially only accommodate one person. Dolphin should consist of three modules; drone module, passenger compartment module and chassis module, and the modules must be able to be connected and disconnected from each other so that the chassis can remain on the ground when flying.

In previous Master theses, a lot of development work has been done around all three modules, and the drone module is considered complete. There was a need for further work on the chassis module and the passenger compartment, especially around the interconnection of the modules, and this became the focus in the current master thesis. The main objectives are to study and develop a holistic concept of Dolphin Sky with revision of previous solution proposals. A solution for connecting the passenger compartment and chassis module will be prioritized, as well as a complete solution for the underchassis and steering.

Main and sub-goals with sub-activities were defined so that they could be followed up with milestones. In order to achieve the main goal, a time and work plan was prepared to distribute the use of resources to different activities and determine the use of time for each activity. Early restrictions for the project were set to keep the focus on the most important aspects of the result. Relevant methodologies were reviewed, and the most central ones to this thesis are; integrated product development (IPD) as an overarching tool through project work, as well as Pugh's methodology and SCAMPER. It was also mapped which software and aids were to be used throughout the project and how the work was to be quality assured. A project plan with four main phases and sub-steps was prepared, in order to systematize the work process going forward. The four phases are the assessment phase, the development phase, construction and design phase and the analysis and completion phase.

A theory and technology study was carried out to form a basis for relevant calculations and technological solutions for further development.

Based on assessed information in the assessment phase, a target and product specification was prepared. Objectives were formulated for the product and the most important product properties. A metric boundary specification was defined with the width of variation of the dimensions of the various modules. As a basis for the further development work, metric rough specifications were set for the dimensioning modules and components in the assembly.

To ensure that all necessary functions were included in the development work, a function analysis was performed. The function analysis formed the basis for further development by generating solution proposals for each of the necessary functions in the overall concept. The alternatives were outlined and explained, assessed and weighted through Pugh's selection matrix, and selected on this basis. Form and aesthetics alternatives were studied for the body and other design elements, an assessment of use stresses was performed, in addition to an early material discussion. For further development and dimensioning, it was important to map out what loads Dolphin would be exposed to. It was therefore also necessary to roughly determine materials and important properties for the various parts.

Two expert tests were performed to ensure the quality of the concept selection. This was done through an open discussion, and resulted in many good suggestions to improve the concept, and sensible production methods. The preferred solutions were outlined in more detail and described in more detail as a holistic concept.

Element calculations were performed on the main components and laid the foundation for the selection of pipes in the chassis frame, necessary dimensions on the front wheel fork and in the locking system. The concept with all its sub-components was modeled in 3D in Solidworks and studied for robustness, maintenance and safety, on the CAD model.

Various materials were considered, and the choice landed on the aluminum alloy EN AW 6082 in most of the construction. This is a light material that withstands heavy loads and is corrosion resistant, and standard pipes are produced in this material. The particularly exposed components, such as the front wheel fork and the small parts in the locking system, were chosen to use stainless steel of the quality AISI 431 as it does not corrode and has a high yield strength. The body will be developed in carbon fiber.

Safety factors for the construction, as well as how large allowable stress can occur in the frame of the chassis module, were mapped out. A maximum bending stress of 100 MPa can occur. To examine the stress concentration in the framework, FEM analyzes were performed in Solidworks. The largest performance voltage was 113 MPa, and thus a little too high.

Production methods for all components were mapped and a cost calculation was performed for the production of a prototype, in addition to a comparison to series production. Finally, a market presentation was held, with rendered images of the overall concept. Different colors of the body, and illustrations of what Dolphin looks like in real surroundings, were presented.

The result of the project was a concept proposal for the passenger compartment and chassis module with functional coupling and locking, as well as a steering system, coupling of steering and the construction of the chassis module with frame and wheel suspension. The chassis is made up of a two-layer aluminum frame. The external dimensions of the assembly are: 1890x1684x3000 mm, and in total it weighs 232 kg, without engine, batteries, insulation and remaining instrumentation such as contents of the passenger compartment.

Further work is needed to complete a functioning system. Further development of the mechanisms in the locking system should be carried out so that the merging takes place

automatically and coordinates all the locks. FEM analyzes of the nodes must be performed, and a 3D model developed.

INNHALDSFORTEGNELSE

	SIDE:
FORORD.....	III
SAMMENDRAG.....	IV
INNHALDSFORTEGNELSE	IX
1 INNLEDNING.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Teknologiske trender og småbiler	4
1.3 Dolphin-prosjektet	6
1.4 Tidlige oppgaver tilknyttet Dolphin Sky	9
1.4.1 Helheltskonsept	9
1.4.2 Dronemodul.....	10
1.4.3 Kupémodul	10
1.4.4 Understellsmodul	12
1.5 Grov analyse av tidligere arbeider	13
1.6 Veien videre i prosjektet.....	15
1.7 Oppdragsbeskrivelse.....	16
1.7.1 Tidlige problemstillinger og fokuspunkter.....	16
1.7.2 Teknologiske flaskehalsener og utfordringer.....	16
2 PROSJEKTPLAN	18
2.1 Prosjekt målsettinger	18
2.1.1 Hovedmål	18
2.1.2 Delmål	18
2.2 Tids- og arbeidsplan med milepeler	19
2.3 Tidlige begrensninger for arbeidet	20
3 TERMINOLOGI OG METODEBESKRIVELSE	22
3.1 Terminologi, symboler og formler	22
3.1.1 Koordinatsystem.....	22
3.1.2 Terminologi og begreper	22
3.1.3 Symboler	23
3.1.4 Formler	26
3.2 Metodebruk.....	27
3.2.1 Integrert Produktutvikling (IPD) og prosessutvikling (IPPD)	27
3.2.2 Pughs metodikk.....	30
3.2.3 House of Quality (QFD).....	30

3.2.4	SCAMPER	31
3.2.5	Modularisering	32
3.2.6	Analysemetodikk.....	33
3.3	Løsningsverktøy	33
3.4	Kvalitetssikring.....	34
3.5	Prosesstrinn.....	36
4	TEORI- OG TEKNOLOGIUTREDNING.....	38
4.1	Teoriutredning	38
4.1.1	Kjøretøystatikk og dynamikk	38
4.1.2	Luftmotstand og form.....	45
4.1.3	Ergonomi	49
4.2	Teknologiutredning	49
4.2.1	Rammedesign	50
4.2.2	Eksisterende koplingsmekanismer	53
4.2.3	Eksisterende styringssystemer.....	55
5	SPESIFISERING	58
5.1	Produktmålsetting.....	58
5.2	Rangering av viktige produktegenskaper	58
5.3	Metriske grensespesifikasjoner.....	60
5.4	Metriske grovspesifikasjoner.....	61
6	KONSEPTUTVIKLING	65
6.1	Funksjonsanalyse.....	65
6.2	Funksjonsalternativer med skisser.....	67
6.2.1	Understellsramme og -geometri	67
6.2.2	Koplingsplattform	68
6.2.3	Sentreringssystem.....	69
6.2.4	Låsemekanikk.....	70
6.2.5	Styringskopling	71
6.2.6	Styringssystem	72
6.2.7	El-kopling.....	73
6.3	Form- og estetikkalternativer.....	74
6.3.1	Kupéform	77
6.3.2	Understellsform.....	77
6.3.3	Sete	78
6.3.4	Lykter	78
6.3.5	Fargealternativ.....	79
6.4	Tidlig vurdering av brukspåkjenninger	80

6.4.1	Felles forutsetninger for beregningene.....	81
6.4.2	Vertikale påkjenninger	82
6.4.3	Horisontale påkjenninger	84
6.5	Tidlig materialdrøfting	88
7	EGENSCREENING OG KONSEPTVALG	91
7.1	Seleksjonsmatrise og egen konseptscreening	91
7.2	Foretrukne løsningsalternativer	95
7.2.1	Koplingsplattform og sentreringsystem.....	95
7.2.2	Understellsramme.....	96
7.2.3	Førerkabin	97
7.2.4	Låsedelene	98
7.2.5	Styringssystem og kopling	98
7.2.6	Elektriske koplinger	99
8	EKSTERN KONSEPTTESTING	100
8.1	Testmålsetting.....	100
8.1.1	Hovedmål	100
8.1.2	Delmål	100
8.2	Ekspertgruppe	100
8.3	Kommunikasjonsform	100
8.4	Resultat og resultattolkning	101
8.4.1	Resultater.....	101
8.4.2	Resultattolkning	103
9	ELEMENTBEREGNINGER OG OPTIMERING.....	104
9.1	Målsettinger for profil- og elementberegninger	104
9.2	Dimensjoner og krefter på hovedramme	104
9.3	Dimensjoner og krefter på forhjulsgaffel	109
9.4	Dimensjoner og krefter på koplingsramme	112
9.5	Dimensjoner og krefter på låsene	113
9.6	Dimensjoner og utveksling på styringen	117
10	PRODUKTARKITEKTUR OG KONSEPTDESIGN	119
10.1	Sammenstilling	119
10.2	Design av hovedelementer	124
10.2.1	Understellsramme (A).....	124
10.2.2	Forhjulsgaffel (B).....	126
10.2.3	Bakhjulsoppheng (C).....	127
10.2.4	Styringssystem (D).....	129
10.2.5	Låsesystem (E)	130

10.2.6	Kupé (F)	131
10.3	Design av komponenter	132
10.4	Standard komponenter	139
11	ROBUSTHET, VEDLIKEHOLD OG SIKKERHET	141
11.1	Konstruksjonssikkerhet.....	141
11.1.1	Materialegenskaper og materialvalg	141
11.1.2	Sikkerhetsfaktor og tillatte spenninger.....	144
11.1.3	Overflatebehandling og vedlikehold	145
11.1.4	FEM-analyse av hovedelementer	146
11.1.5	FEM-analyse av knutepunkt og låseelementer.....	148
11.2	Brukssikkerhet	149
11.2.1	Styringssystem	149
11.2.2	Instrumentpanel og sikkerhetsrutiner	150
12	FRAMSTILLING OG PRODUKSJONSKOSTNADER	151
12.1	Produksjonsmetoder.....	151
12.2	Kostnadskalkyle for prototype	154
12.3	Kostnadsanalyse for serieproduksjon.....	157
13	MARKEDSPRESENTASJON.....	160
13.1	Renderte framstillinger	160
13.1.1	Logo og varemerke.....	164
13.2	Tekniske beskrivelser.....	164
13.2.1	Monteringsanvisning	164
13.2.2	Bruksanvisning.....	166
14	PROSESSEVALUERING OG DISKUSJON.....	169
14.1	Læring og kompetanseutvikling.....	169
14.2	Utredningsfasen	169
14.3	Utviklingsfasen	170
14.4	Konstruksjon og designfasen	170
14.5	Analyse- og ferdigstillingsfasen	171
14.6	Designrevisjon	172
15	KONKLUSJON	174
15.1	Resultater og anbefalinger	174
15.2	Videre arbeid.....	175
16	REFERANSER	177
16.1	Skriftlige kilder	177
16.2	Personlig meddelelse	178

16.3	Nettkilder	178
17	VEDLEGG	183

1 INNLEDNING

Denne delen av rapporten gir en innføring i rammene omkring gradsarbeidet for å gi en innsikt i hvorfor prosjektet er relevant for dagens samfunn, og likeledes hvorfor prosjektet prioriteres på NMBU ved at det bygger videre på universitetets miljøbilkonsept Dolphin.

1.1 Bakgrunn

Transportsektoren står foran store utfordringer gjennom de kommende årene både til lands, til havs og i luften på grunn av klimaendringer, skjerpede utslippskrav og et økt fokus på mulighetene for «nullutslippsløsninger». Den 9 august 2021 publiserte FNs klimapanel den 6. hovedrapporten, en «kode rød» for menneskeheten [1]. Hvis ikke endringer gjøres nå, er det for sent. Den globale gjennomsnittstemperaturen har allerede økt med 1,1 grader celsius siden før industriell tid, og oppvarmingen skyldes menneskeskapt klimagassutslipp.

Dette er en voldsom endring med tanke på Parisavtalens mål om å begrense den globale oppvarmingen til maksimalt 2 grader celsius [2]. Klimaendringene medfører mer ekstremvær verden over, polarisen krymper og havet blir varmere, surere og stiger. Disse endringene er irreversible på hundrevis av år [2].

Et av de viktigste punktene i FNs rapport er å stabilisere den globale oppvarmingen. For å oppnå dette må menneskeheten sørge for å fjerne like mye CO₂ fra atmosfæren som vi slipper ut. Det vi si at utslippene må reduseres til netto null eller negativ verdi [1].

For å klare å oppnå målene til FNs klimapanel må det gjøres store endringer verden over, spesielt innenfor transportsektoren. I 2017 sto transportsektoren for nesten 30 prosent av CO₂-utslippet i Norge og det var veitransporten som stod for klart mest [3]. Sektoren sto for over halvparten av utslippene og dette utgjør 17 prosent av de totale klimagassutslippene i Norge [4].



Figur 1.1: Trafikk-kork på vei inn til Oslo (t.v) [5] og inn og ut av Los Angeles (t.h) [6].

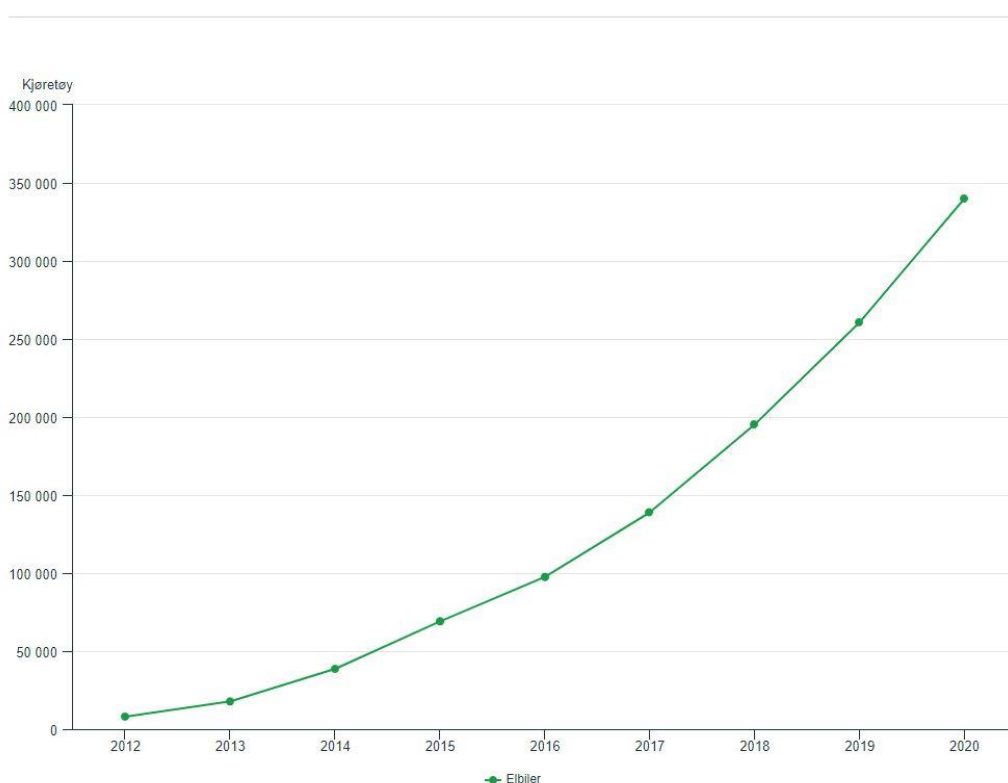
En sentral del av trafikkens klimapåvirkning er at verden blir stadig mer urbanisert. Folk trekker seg mot byene og i dag bor over halvparten av verdens befolkning, 4,4 milliarder mennesker, i byer [7]. Figur 1.1 viser tett kødannelse på grunn av mye trafikk på vei inn og ut av storbyene, Oslo og Los Angeles, og dette er bare to av svært mange byer hvor trafikk er et problem. Det er spesielt i byområder og innfartsårer i tettbebyggelse at kødannelser, støy og dårlig luftkvalitet

er et problem. I Norge er det derfor innført tiltak for å redusere mengden klimagasser i utsatte områder, som for eksempel piggdekkforbud.

Et annet tiltak som er innført i Norge er å gi fordeler til de som kjører elbil for å motivere befolkningen til å kjøre utslippsfrie biler. De får derfor blant annet kjøre i kollektivfeltet, parkere gratis på offentligparkering, ingen moms på bilkjøpet og de slipper bompenger flere steder [8]. I storbyene er de fleste parkeringsplasser i dag utstyrt med ladestasjoner og i byene kjører man sjelden langt og det er dermed gunstig å kjøre elektrisk. Med disse fordelene har det oppstått en tydelig teknologisk trend.

Elektriskdrevet kjøretøy har gått fra å være et lite populært valg, til å bli noen av de mest populære kjøretøyene en får kjøpt. Transportmidler drevet av fossilt brennstoff er derimot fremdeles klart ledende på markedet der det ble registrert 2 810 475 personbiler i Norge i 2020, og i underkant av 350 000 av disse var elbiler [9]. Om man sammenlikner dagens antall solgte elbiler, med antallet som ble solgt i 2012, er det tydelig at det har skjedd en stor endring og at fler og fler kommer til å kjøpe elektrisk i årene fremover.

Figur 1.2 viser en graf hentet fra SSB, som illustrerer endringen i salg av elbiler fra 2012 til 2020, og den eksponentielle kurven illustrerer godt at salg av elbiler kommer til å fortsette å øke. Både internasjonale aktører innen kjøretøy- og transportindustri, så vel som innovasjonsbedrifter i inn- og utland leter etter nye løsninger med elektrisk drift, både for autonom kortdistanse lufttransport av mennesker og varer, men også helt nye hybrid- og bakketransportløsninger.



Figur 1.2: Graf fra SSB over antall elektriske biler over tid [9].

For å redusere eksos- og CO₂-utslipp i byene er dette en svært viktig trend. Likevel blir en stor del av trafikkproblemet stående. Det venstre bildet i figur 1.1 viser en trafikkork på vei inn til

Oslo. Flere av bilene i køen er elbiler. Selv om elbiler ikke slipper ut eksos, så har de også en stor negativ påvirkning på miljøet.

Det blir ikke noe mindre trafikk og mindre svevestøv i byene om folk kjører alene i en personbil som rommer 4-5 seter. Et av hovedproblemene med elbiler er vekten og den energien de krever for å drive fremover. Den minste Tesla modellen, Model 3, veier 1 844 kg [10], nesten 2 tonn. Til sammenlikning veier en Mercedes Sprinter varebil 2 087 kg, en 5,3 meter lang bil.

Innen alle typer transport er fleksibilitet, god volumutnyttelse, og spesielt vekt og framdriftshastighet kritiske faktorer for å kunne redusere energiforbruk og emisjoner, også for å kunne oppnå god transporteffektivitet og økonomi.

Bilens vekt er direkte knyttet til effekten drivhjulene krever under kjøring, da den påvirker kjøremotstanden. Økt vekt gir økt kjøremotstand, og avgjør hvor mye energi som kreves av bilen under kjøring, spesielt i kupert landskap, slik det er i store deler av Norge.

Fysikkens lover viser at nødvendig effekt til drivhjulene er lik den totale kjøremotstanden multiplisert med kjørehastigheten. Dette kalles transportlikningen. Det vil si, desto raskere en kjører, desto høyere effekt kreves. Dermed er både bilens vekt og hastigheten den kjører i, to avgjørende faktorer for effektbehovet. For produsenter er målet å utvikle et kjøretøy som utsettes for så lav kjøremotstanden som mulig, en sum av luft-, rulle-, stignings- og akselerasjonsmotstand [11].

Luftmotstanden blir spesielt påvirket av kjøretøyets areal, der stort areal og høy kjørehastighet resulterer i større motstand. Når kjøretøyet øker hastigheten, øker også luftmotstanden, men hvor mye den øker avhenger av utformingen. Firkantede former og skarpe kanter vil gi en høyere luftmotstand enn avrundede former på grunn av større «drag-effekt». Dette vil utdypes i kapittel 3.1.2.

Kjøretøyets vekt er avgjørende for motstanden som oppstår ved rulling, kjøring i stigning og under akselerasjon eller retardasjon. Ved kjøring i oppoverbakke må dermed drivkraften fremover være større enn stigningsmotstanden, ellers ruller man bakover. Dette krever mye av tunge kjøretøy og store lastebiler kjører derfor saktere opp bakker enn personbiler. Kjøretøyets tyngde er en avgjørende faktor for hvor stor motstanden blir, og dermed hvor mye effekt det trenger for å komme fremover.

Elementer i kjøremotstanden, spesielt stigningsmotstand, er grunnen til at tunge kjøretøy er ugunstige. Det som gjør elektriske biler så tunge er det store batteriet deres. Det er konkurranse blant elbilprodusentene om å produsere den bilen som har den lengste kjørerekkevidden per ladning. I et land som Norge med mange fjell, daler og bygder, er det nødvendig å kunne kjøre fra A til B uten å lete etter en ladestasjon på veien. Det som da skjer, er at for å få plass til større batterier, blir bilene større og mer firkantede i utformingen, som totalt resulterer i en økt vekt, og da trengs igjen et større batteri for å motvirke kjøremotstanden som vekten og størrelsen medfører. Men i stedet for å fortsette å forstørre, hva med å heller tenke motsatt, å forminske? Ved å utvikle mindre og lettere kjøretøy som klarer seg med et mindre batteri.

1.2 Teknologiske trender og småbiler

Småbiler med tre eller fire hjul har vært på markedet i mange år og er godt utbredt i store deler av verden, men i Norge og vesten er de nesten ikke til å se. Trehjuls-kjøretøyet, Tuctuc, er svært populært i store deler av Asia og Sør-Amerika der det er et vanlig fremkomstmiddel som både brukes privat og offentlig som taxi eller transport i turistnæringen. I tettbefolkede byer, der gatene er trange, er også bilene mindre. I Italia er små biler som Fiat og Vespa-moped å se overalt. Dette er på grunn av plassmangel i gatene og italienerne har derfor utviklet kjøretøy som passer deres behov.



Figur 1.3: En av mange varianter av små trehjulsbiler. Denne en elektrisk og rommer tre stykker [12].

I Norge har derimot trenden gått mot større og tyngre elbiler, som nevnt i kapittel 1.1, der behovet for lang rekkevidde per ladning fører til at bilene blir større og tyngre og dermed bruker mer råmateriale under produksjon av batteriene, i tillegg til at bilene blir mindre effektive under bruk. Denne trenden virker imot arbeidet for å bremse klimaendringene. Dette i tillegg til befolkningsveksten i byene, plassmangel og dårlig infrastruktur, fører til et behov for nye løsninger, vi trenger blant annet nye transportmidler [13].

Små, lette, elektriske kjøretøy (SEV) har potensiale til å bidra med en positiv miljøeffekt ved effektiv veiutnyttelse og reduksjon av luftforurensing. Med lavere vekt blir energiforbruk og råmaterialforbruk mindre. Bilene tar opp mindre plass i trafikken og krever smalere og kortere parkeringsplasser. En vanlig parkeringsplass på 5x2.5 m vil kunne benyttes av tre SEVer. Å dele opp parkeringsplassene vil sannsynligvis senke parkeringskostnaden i tillegg til en bedre arealutnyttelse.

Definisjonen på en SEV varierer for hvert land, men etter generelle europeiske forskrifter, er maksimum dimensjonene for L-underekategoriene: bredde ≤ 2 m, høyde ≤ 2.5 m og lengden varierer mellom 3.7-4 m. Maksimums hastighet varierer mellom 45 km/h, 90 km/h og opp til intet maksimum hastighet. Trehjulskjøretøy følger L2e kategorien og kan minimum veie 270 kg. Den maksimale effekten som kan benyttes varierer mellom 4 og 15 kW.

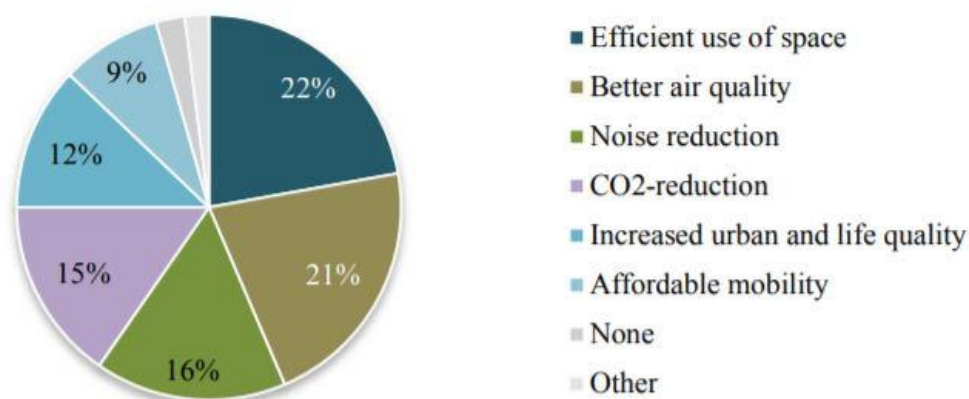
Det er utviklet og produsert flere norske småbiler. De mest kjente er Think som ble produsert mellom 1999-2007, og postbilen som har kjørt elektrisk på gatene i alle år. Think ble ikke populær for privatsektoren. Men flere nye norskprodusert SEV variant kommer snart til å finnes på markedet. Podbike Frikas e-bike [14] er et eksempel på dette. En elektrisk firehjuls-sykkel utformet som en liten bil, med glasstak som kan tas av ved ønske. Den rommer et voksent menneske, er bare 0,84 meter bred, 1,19 meter høy og 2,36 meter lang. Den kan kjøre opp til 25 km/t med kun el-assistanse og går dermed



Figur 1.4: Bilde av Podbike [14].

ikke fort og veier relativt mye sammenliknet med tradisjonelle el-sykler, da den veier 90 kg uten passasjer. Den krever lite plass og er sannsynligvis starten på en ny teknologisk trend.

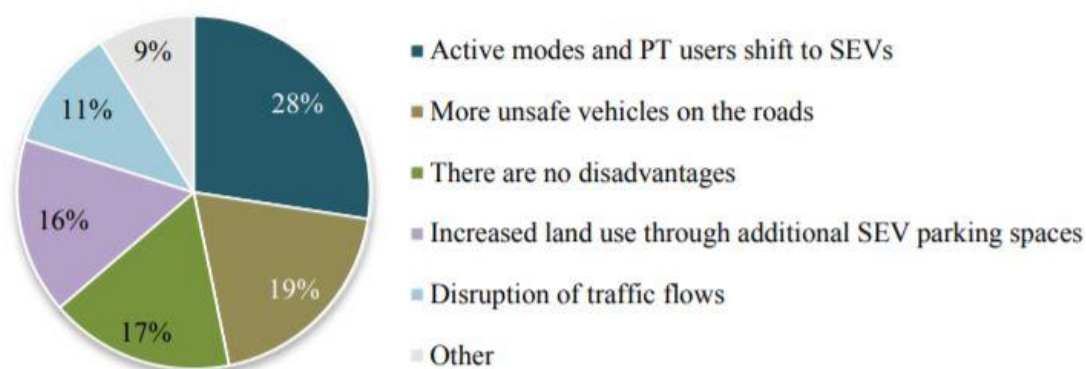
I boken «Small Electric Vehicles» fra 2021 er det utført en grundig studie rundt flere aspekter omkring SEV'er. Det ble utført en undersøkelse for å kartlegge hovedfordelene og utfordringene med å ha SEV i byene. Resultatet vises i figur 1.4 og 1.5.



Number of selections 248 (n=84, multiple choice max. 3 ticks)

Figur 1.5: Diagram av fordelene med små, elektriske kjøretøy i byene. Diagrammet er hentet fra boken *Small Electric Vehicles* [13].

Det kommer tydelig frem fra kakediagrammet i figur 1.5 at de fire mest sentrale fordelene er bedre plassutnyttelse og luftkvalitet, støyreduksjon og reduksjon av CO₂ utslipp. Det er noen få (ca. 2 %) som mener at det ikke er noen fordeler med SEV. De aller fleste av deltagerne i undersøkelsen mener at elektriske småbiler har en eller flere fordeler.



Number of selections 124 (n=84, multiple choice max. 3 ticks)

Figur 1.6: Utfordringer med SEV i byene. Prosentvis fordeling i et kakediagram der de med høyest prosentandel er de mest sentrale utfordringene [13].

Fra kakediagrammet i figur 1.6 kommer det frem at de mest sentrale utfordringene er frykt for at folk bytter ut offentlig transport med en privat SEV og at det blir flere utrygge kjøretøy på veiene. Det tredje største punktet på utfordringer, med hele 17 prosent, er at det ikke er noen

utfordringer. Dette viser at fordelene veier tyngre enn utfordringene. Det er likevel viktig å ta utfordringene og bekymringene seriøst, spesielt sikkerhetsspørsmålet.

Det finnes i dag en rekke ulike småbiler på markedet, både med tre og fire hjul. Noen er elektriske, noen er hybridrevne og noe går kun på fossilt drivstoff. I de nyeste modellene har det blitt implementert flere funksjoner og ved utforming av småbilene har det blitt lekt med ulike former som ikke er å se i tradisjonelle biler, da kjøretøyforskriftene for biler ikke gjelder for småbiler.

Noen eksempler på disse er Nissan Pivo 2 og 3[15][16]. I 2007 ble en prototype fremstilt av Nissan Pivo 2, og viste frem en ny type småbil med flere funksjoner. Dette er en elektrisk konseptbil med roterende kabin. Det vil si at kabinen kan dreies 360 grader og hjulene kan dreie 90 grader. Det er en funksjonalitet som ikke har blitt sett tidligere i kjøretøy. I tillegg har den et helt rundt utseende og kan minne om en krabbe eller blekksprut.



Figur 1.7: Bildet viser Nissan PIVO 2 [15].

Denne småbilen har blitt videreutviklet til Nissan Pivo 3. I den nyeste modellen har rotasjonsmuligheten blitt fjernet, og denne modellen likner mer på en vanlig bil, bare en mindre variant. Det som gjør denne modellen unik, er at den rommer tre seter, til tross for sin lille størrelse. Ett sete er i midten foran og to bak.



Figur 1.8: Rendrert bilde av Nissan PIVO 3 [16].

Småbilen Aptera [17] er et annet eksempel på en småbil med unikt utseende. Dette er en amerikansk SEV med tre hjul som ble lansert i 2006, både med heleelektrisk- og hybriddrift. Den er utstyrt med to seter, i tillegg til at det er plass til et tredje barnesete i midten. Det som gjør denne bilen så unik er dens ytre utforming og at det ble reklamert med å være bilen med lavest drag-koeffisient noen gang produsert.

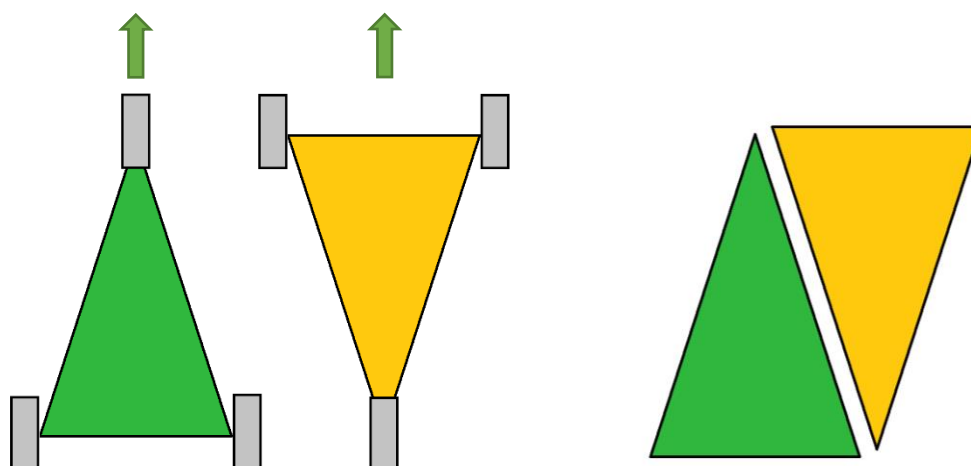


Figur 1.9: Bilde av Aptera [17].

Innenfor utviklingen av småbiler er det mye større fleksibilitet og frihet enn det er for vanlige biler. Småbiler trenger ikke følge de samme forskriftene og kravene som passasjerbiler må. Dermed er dette et område hvor mye spennende teknologi kan utvikles. Dette er grunnlaget for Dolphin-prosjektet.

1.3 Dolphin-prosjektet

Ved Fakultetet for realfag og teknologi på NMBU har det blitt arbeidet med lettvekts- og miljøsmåbilkonseptet Dolphin siden 2010, gjennom flere påfølgende mastergradsprosjekter. Foreløpig er det konsept- og teknologiutredet i to bakkegående hovedvarianter med tre hjul, en «Delta»- og en «Tadpole-versjon» med hybriddrift og en totalvekt godt under et halvt tonn.



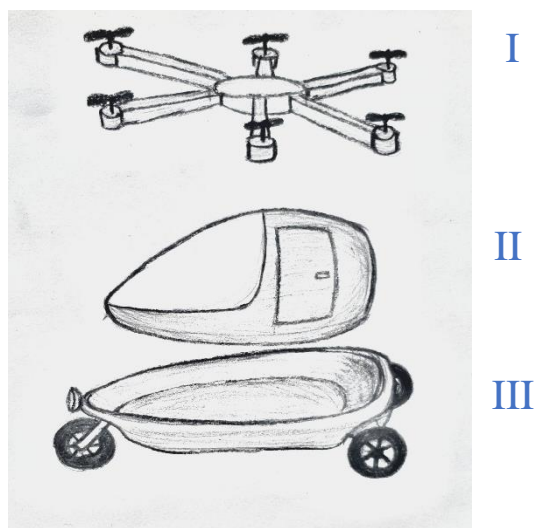
Figur 1.10: Illustrasjonen til venstre viser Dolphin-prosjektets to hovedvarianter, "Delta-variant" t.v og "Tadpole" t.h.. Til høyre er Delta og Tadpole satt sammen og får da en grunnflate omtrent like stor som en liten personbil.

Delta-versjonen har et hjul foran og to bak, mens Tadpole har to foran og ett bak. Satt sammen, slik figur 1.10 illustrerer, skal de totalt utgjøre et mindre grunnflateareal enn en liten personbil. Hensikten med Dolphin er å konstruere et mer kompakt og miljøvennlig kjøretøy, egnet for persontransport. Den skal være 1/3 av arealet til en vanlig personbil og 1/3 av vekten, som tilsvarer 1/4 av vekten til en Tesla. Som transportlikningen viser vil man få en økt energi-effektivitet ved å redusere volumet og vekten, og dette resulterer i bedre fremkommelighet og mindre effektsvinn. Dolphin drives av en hybrid- eller elektriskmotor, og tar hensyn til miljøet og kravet om lavt til ingen CO₂ utslipp.



Figur 1.11: Figur av konseptforslag på Dolphin fra tidligere masteroppgave utført i 2010, 2012 og 2015.

Siste trinnet i utviklingsprosessen startet i 2016 og omfatter utredning av en mulig sveve-versjon til kjøretøykonseptet for begrensede transportavstander, med betegnelsen "Dolphin Sky". I denne fasen legges det opp til fullelektriske drift, felles understells- og kupémodul, samt en svevløsningsmodul som eventuelt også kan benyttes autonomt til varetransport. Dolphin Sky er et modulbasert kjøretøy der samme kjøretøy skal kunne veksle mellom Delta- og Tadpole-varianten.



Figur 1.12: Skisse av tanken bak modulkonseptet Dolphin Sky. I) Dronemodul, II) Kupémodul og III) Understellmodul.

Kjøretøyet består av tre hovedmoduler; dronemodul, kupémodul og understellmodul. De tre komponentene skal enkelt kunne koples til og fra hverandre og dronemodulen skal kunne legges sammen/ komprimeres ved kjøring på bakken for å begrense plassen kjøretøyet trenger. Tanken bak Dolphin Sky er at det skal være mulig å kople fra understellmodulen når dronemodulen benyttes, for å begrense vekten under flyvning. Det skal da være mulig å enten lande på en annen understellmodul et annet sted, eller å lande som et helikopter på kun kupémodulen.

Det finnes ingen liknende konsepter på markedet, men det er to relevante konkurrenter. Den første er modulkonseptet Pop.Up av Italdesign og Airbus [18]. Pop.Up ble for første gang vist frem på det 87. Geneva International Motor show og er et helelektrisk, nullutslipps-konsept kjøretøy utviklet for å redusere trafikk i storbyene. Det er et modulkonsept som muliggjør transport både i lufta og på bakken, slik Dolphin også skal. Pop.Up er for øyeblikket lagt på is, og er kun et konsept, ikke i produksjon.



Figur 1.13: Illustrasjon av modulkonseptet Pop-Up [18].

Den andre konkurrenten er Carver, et Nederlandsk gyrokopter utviklet av PAL-V Europe NV [19]. Carver har både småbiler og gyrokopter og er en veletablert bedrift. PAL-V veier bare 664 kg uten passasjerer og rommer to seter. Med mulighet til å folde sammen propellene er det kun 2 meter bredt i kjøremodus, som gjør at det kan kjøre på veier uten problemer. Hovedutfordringen med gyrokoptere er prisen, som i 2020 lå på \$399 000. Det er dermed et veldig snevert marked siden de færreste har råd til gyrokopteret.



Figur 1.14: Bilde av gyrokopteret, Carver [19].

Med så få liknende kjøretøy har dermed Dolphin-prosjektet et stor potensiale. Det er ingen liknende norskproduserte produkter, og Dolphin blir derfor helt unikt. Siden Dolphin-prosjektet startet i 2010 har det blitt utført mye arbeid gjennom tidligere mastergradsprojekter og i kapittel 1.4, under, blir dette sett nærmere på.

1.4 Tidlige oppgaver tilknyttet Dolphin Sky

Gjennom perioden fra 2016 til 2021 har det blitt utarbeidet 8 mastergradsarbeider som omfatter utvikling av en sammenleggbar elektrisk drevet dronemodul, deler av understellsrammen og elektrisk drivlinje, samt utkast til en forenklet knekkstyring for framhjul. Det er også blitt gjennomført tidlige grovberegninger, designstudier og designforslag knyttet til førerplass og førerkupé, samt tidlig utvikling av testtrigg for viktige elementer i svevmodulen.

De mest relevante arbeidene for dette prosjektet er kort oppsummert nedenfor, i underkapitler basert på hvilken modul gradsoppgaven fokuserte på.

1.4.1 Helheltskonsept

I 2016 ble det først konseptet av Dolphin Sky utviklet av Kristoffer Rummelhoff og prosjektet fikk tittelen «Dolphin Sky, Del A: Utvikling av integrert design- og helhetskonsept for sveveløsning» [20].



Figur 1.15: Renderinger av Dolphin-konseptet til Rummelhoff fra 2016 [20].

Prosjektets hovedmål var å lage en helhetsløsning som kombinerer kjøring og flyvning, og er ikke et modulbasert konsept. Designet er preget av behovet for god sikt ved flyvning og kjøring

og inspirert av moderne biler. Kjøretøyet har tre thrustere og tre hul, der to er plassert foran/på siden, og ett bak. Dette er et originalt tidlig design og et enkelt konsept, men han kom frem til at det går på bekostning av stabilitet i luften. Målet var å utvikle et lite og miljøvennlig kjøretøy, men fordi det ikke ble utviklet en løsning for lift under flyvning annet enn thrusterne, ville drivstofforbruket bli høyt.

1.4.2 Dronemodul

Dronemodulen til Dolphin Sky har blitt arbeidet med i tre oppgaver, første i 2017 av Anders Thømt, og har tittelen «Utredning, dimensjonering og utvikling av testoppsett for thrusterfunksjon til persondrone.» [21]. Deretter i 2018 av Tarek El-Gewely med tittelen «Dolphin Sky: Utredning og utvikling av sammenfoldbart propell- og thrustersystem» [22].



Figur 1.16: Renderte tegninger av konseptet til Falstad av svevmodulen til Dolphin Sky konseptet [23].

I 2019 jobbet Henrik Falstad videre med svevmodulen til Dolphin Sky og gjennom funnene gjort i de tidligere prosjektene, skrev han oppgaven med tittelen; «Videreutvikling av sammenfoldbare oppheng for propell- og thrustersystem med sikkerhetsfunksjoner» [23]. I oppgaven ble det utviklet en komplett løsning for svevmodulen.

Svevmodulen han kom frem til er sammenfoldbar, har seks opphengsarmene og thrustere og en ytre dimensjon i flymodus på 5287 x 5897 x 351 mm. I kjøremodus er de ytre dimensjonene 3514 x 1119 x 351 mm. Alle opphengsarmene er identiske og består av fire stegprofiler som teleskoperes og roteres ved sammenfolding. Opphengsarmene har en hexa X konfigurasjon i flymodus med 60° mellom hverandre. Én opphengsarm utsettes for en vertikalkraft på 736 N. Dronemodulen veier totalt 125,6 kg uten motor, propeller og fallskjermsystem. Majoriteten av komponentene produseres med aluminiums-legeringene EN AW 6082 T6 og EN AW 6082 T651, men knutepunktskomponenter og standardkomponenter er produsert i rustfritt stål. Dekslere og skjermer produseres i plast. Mye grundig arbeid er utført på svevmodulen og den regnes som tilnærmet ferdig.

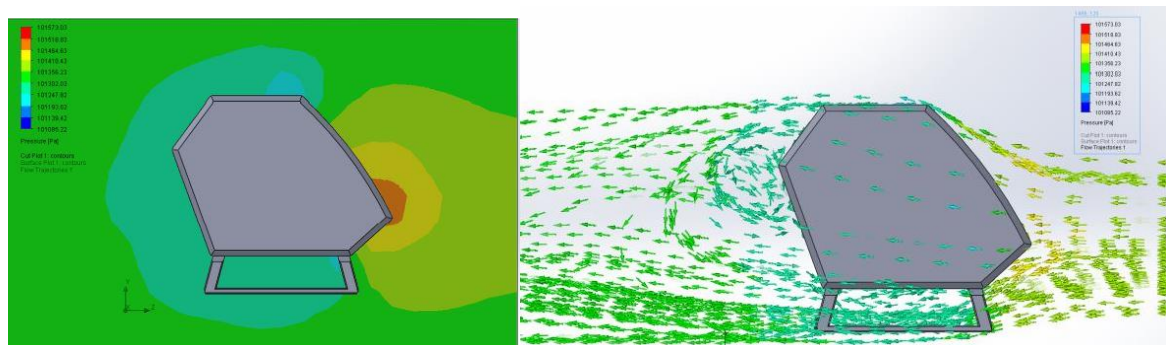
1.4.3 Kupémodul

Kupémodulen har blitt arbeidet med i to oppgaver. I 2018 skrev Ingrid Svartstad Birkelund oppgaven, «Utforming av førerkupe og fører plass for Dolphinkonseptet» [24]. I prosjektet ble et forslag på førersetet, ratt, instrumentpanel og sidepanel fremstilt. Det ble gjort en grundig ergonomistudie under utforming av alle komponenter for å sikre komfort for sjåføren.



Figur 1.17: Illustrasjoner av Birkelunds konsept for interiøret i Dolphin Sky. Det er skissert og 3D-modellert løsninger for fører sete, ratt, instrument- og sidepanel [24].

I 2020 jobbet Steffen Aronsen videre med utforming av førerkupéen og skrev oppgaven, «Utvikling av førerkupé og førerplass for Dolphin Sky» [25]. I oppgaven legges det frem et løsningsforslag på fører sete der ryggputene er delt i to for å kunne tilpasses ulike individer. Designet er inspirert av Lamborghini, med uorganiske linjer og et moderne preg. Fartøyets utforming er valgt for å enkelt koples til svevemodulen og til bakkemodulen, både i Delta og Tadpole variant. Den skarpe linjeføringen resulterer i mye turbulens. Ut ifra en grov luftmotstand analysen utført i prosjektet ble det beregnet en motstandskraft på ca. 125 N ved 60 km/t. Dette er kun et tilnærmet resultat, men en god veileder til videre arbeid.



Figur 1.18: Illustrasjoner fra spennings- og strømningsanalyser i Solidworks. I analysene har kjøretøyet en hastighet på 60 km/t [25].

De ytre dimensjonene til Dolphin Sky er 1900 x 1400 (1730 med ben) x 1000 mm og de ytre dimensjonene for stolen er: 700 x 600 x 1345 mm. Materialene som er valgt er for det meste karbonfiber, men noen deler vil bli produsert i ABS-plast, aluminium, Polyester, PU (formstøpt polyuretanskum) og lær.

Inne i kupéen ble det valgt et rattdesign tilsvarende det som benyttes i kommersielle fly. Det er designet med tanke på best mulig sikt i tillegg til ergonomiske krav til størrelse for håndtakene til rattet er fulgt.



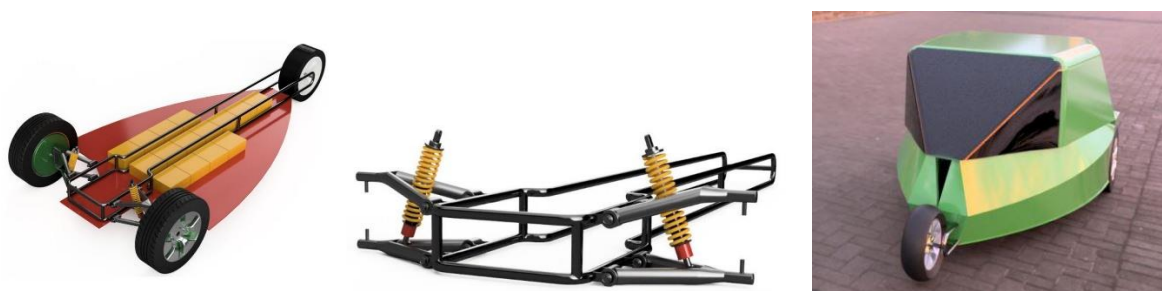
Figur 1.19: Renderinger av kupé og førersete Aronsen kom frem til i sin gradsoppgave i 2020.

Det er behov for videre arbeid på kupémodulen for å forbedre luftstrømningen rundt den, for å redusere vekten og å tilpasse den til sammenkopling til understellsmodulen.

1.4.4 Understellsmodul

Einar Gisholt jobbet i 2019 med prosjektet, «Utvikling av elektrisk drivlinje for Dolphin» [26]. I prosjektet kom han frem til en løsning for understellet til småbilen med anbefalinger til motor, batterier, batterikasse og hjuloppeng. Motoranbefalingen er en Elaphe S400, to navmonterte el-motorer uten behov for giroverføring og med innebygget bremsesystem. Hver av motorene leverer 29 kW kontinuerlig effekt, 400 Nm er det maksimale dreiemomentet, maksimal omdreiningshastighet er 1560 rpm og en vekt på 17,6 kg. Tilhørende batteri er et Fenix ARBL18 High-Capacity 18650 Battery. Samlet vekt for motorer og batterier er ca. 110 kg. I løsningsforslaget er batteriet fordelt over 15 enkeltmoduler med 100 batterier i hver.

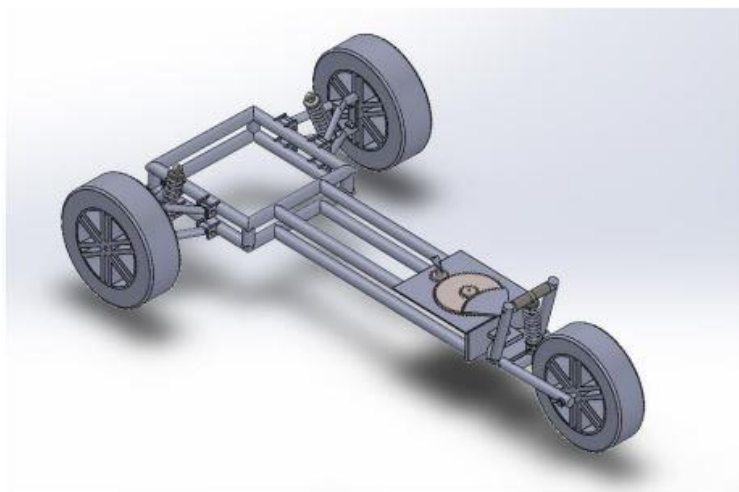
Det er utredet et konseptuelt forslag til bakhjuloppeng for Dolphin, der konseptet er basert på prinsippet om doble bærearmer. Anbefalt materiale er aluminium 6061 T6, som gir en total vekt på 5,3 kg for fire bærearmer. Størst opptredende spenning er 192 MPa etter beregninger, men noe høyere ut ifra FEM-analysene.



Figur 1.20: Illustrasjoner av konseptet til Gisholt [26].

Våren 2021 ble det nyeste arbeidet av Dolphin prosjektet utført. Jon Ole Botnevik jobbet med prosjektet «Dolphin Sky: Videreutvikling av understell og styring for bakkemodul» [27]. Han utviklet et styringssystem basert på leddet knekkstyring med en snekkeinspirert tannhjulskasse for å svinge. Tre tannhjul er koplet sammen i kassen for at Dolphin-småbilen skal bevege seg i

samme retning som rattet vris og kassens tannhjulsutveksling er 1:20 og er konstruert i stål av kvalitet S235. Snekkeløsningen vil føre til at tyngdepunktet for kjøretøyet flyttes utover senterlinjen under svingning og dermed svekkes veltestabiliteten til kjøretøyet.



Figur 1.21: Illustrasjon av 3D-modellen til Botnvik av styringssystemet til Dolphin sin bakkemodul [27].

Rammen for understellet er satt sammen av rundstål og utgjør et skjelett bestående av fire sentrerte bjelker fremover og en kvadratstruktur bak, med plass til en turbinmotor. Løsningen har en total vekt på 225 kg uten hjul, er 2,56 m lang og 1,56 m bred. For å få ned vekten og optimalisere styringssystemet er det ønskelig å videreutvikle understellsmoduleen.

1.5 Grov analyse av tidligere arbeider

For å kartlegge hvor det hovedsakelig er behov for videre arbeid, er det på bakgrunn av vurderinger skrevet i resultat, konklusjonen og videre arbeid i de ulike grads-oppgavene, utført en grov analyse av det tidligere arbeidet. Prosjektens styrker og svakheter er listet opp i tabell 1.1.

Tabell 1.1: Grov analyse av tidligere arbeid. Prosjektens styrker og svakheter er listet opp.

Oppgave:	Styrker:	Svakheter:
Helhetsdesign:		
Rummelhof (2016): «Dolphin Sky, Del A: Utvikling av integrert design- og helhetskonsept for sveveløsning»	<ul style="list-style-type: none"> • God sikt fra kupé. • Originalt tidligdesign. • Introduserer stilelementer. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dårlig stabilitet i luften. • Ingen løsning for lift under flyvning. • Designet er ikke aerodynamisk. • Høyt drivstoff forbruk.

Tabell 1.1: Forts.

Oppgave:	Styrker:	Svakheter:
Dronemodul:		
Falstad (2019): «Videreutvikling av sammenfoldbare oppheng for propell- og thrustersystem med sikkerhetsfunksjoner»	<ul style="list-style-type: none"> • Har utviklet en nesten ferdig løsning med dimensjonering. • Sikkerhetslementer er inkludert, som koplingsindikator og fallskjerm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Få svakheter, kan tas videre. • Kan muligens gjøres enda lettere ved å kombinere med karbonfiber.
Kupémodul:		
Birkelund (2018): «Utforming av førerkupe og fører plass for Dolphinkonseptet».	<ul style="list-style-type: none"> • Ergonomisk og moderne design. • Introduserer stilelementer. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dårlig sikt på grunn av plasskrevende instrumentpanel og ratt. • Det er ikke utviklet en løsning for å tilpasse setets utforming etter sjåfør høyde og størrelse.
Aronsen (2020): «Utvikling av førerkupé og førerplass for Dolphin Sky»	<ul style="list-style-type: none"> • Førersetet har en todelt rygg og puter kan justeres etter enkeltindivider. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utformingen av kupéen er lite aerodynamisk, og det oppstår dermed problemer med turbulens på grunn av de skarpe kantene. Dette kommer frem i flowanalyser utført i prosjektet. • Det er behov for å utvikle en kopplingsløsning mellom modulene. • Kupéen vekt må reduseres.
Understellsmodul:		
Gisholt (2019): «Utvikling av elektrisk drivlinje for Dolphin»	<ul style="list-style-type: none"> • God rørløsning med plass til batterier, fjæring og hjuloppheng. • Lett og enkel konstruksjon. • Foreslår en industriell el- Motorløsning. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mangler styring av framhjul og evt. bakhjul.
Botnevik (2021): «Dolphin Sky: Videreutvikling av understell og styring for bakkemodul»	<ul style="list-style-type: none"> • Viderefører kraft- og konstruksjon-beregninger. • Gir litt mer konseptuelt underlag. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plasskrevende styresystem. • Visse deler bør omkonstrueres av hensyn til styregeometri, stabilitet og plassbehov for fjæring mv. • Kingbolttoppheng må endres, mv.

Ved å analysere mastergradsoppgavens styrker og svakheter, er det valgt ut noen trekk å ta med til videre raffinering. Det er behov for videre arbeid på understellet for å komme frem til en lett og elegant konstruksjon med et styringssystem av hjulene. Rørkonstruksjonen til Gisholt er et godt konsept å bygge videre på med lett vekt og enkle rørkonstruksjon. Svevemodulen vil det ikke bli utført noe videre arbeid på da den anses som komplett.

Det er utført mye fint arbeid på utforming av kupéen, men det er fremdeles behov for en noe mer aerodynamisk utforming med rundere former, som også er lett i vekten. Interiøret i kupéen har behov for noe videre arbeid for å redusere førersetets vekt, men samtidig ta inspirasjon av designet i begge de tidligere prosjektene og fleksibiliteten med muligheten til å justere putene i setet. Det er mye originalt design i de tidligere prosjektene å ta inspirasjon av, i tillegg til gode ergonomistudier og konstruksjonsberegninger.

1.6 Veien videre i prosjektet

I dette prosjektet skal et helhetskonsept for Dolphin Sky utvikles. Det beste fra de tidligere prosjektene skal settes sammen og enkeltkomponenter skal videreutvikles. I tillegg skal en koplingsmekanikk utvikles mellom understellsmoduleen og kupéen.

Hovedfokuset vil være å utvikle en koplingsmekanikk mellom understell og kupé i tillegg til å utvikle et godt styringssystem. Svevemodulen vil ikke være fokus i dette prosjektet, da løsningen til Falstad er svært komplett.



Figur 1.22: Tankekart av de tidligere prosjektene og komponenter som enten skal tas med i prosjektarbeidet eller som skal inspirere til en ny løsning. Hver boble representerer et problemområde fra de tidligere gradsprosjektene.

Hver av boblene i figur 1.22 representerer et problemområde fra de tidligere gradsoppgavene og områder der det er behov for forbedring. Alle boblene kombinert vil danne et helhetlig konsept av Dolphin Sky, og de peker mot spørsmålstegnet, som er løsningen dette prosjektet skal konkludere med. Dette er bakgrunnen for oppdragsbeskrivelsen.

1.7 Oppdragsbeskrivelse

I dette gradsprosjektet skal viktige trekk fra de beste løsningsforslagene i de tidligere gradsarbeidene samles og integreres, og bringe modulkonseptet for Dolphin Sky nærmere en integrert løsning, med langt større grad av helhetlig moduldesign.

Dette mastergradsarbeidet skal så ledes bygge på løsningsforslag, elementer og erfaringer fra de forutgående gradsarbeidene, men samtidig videreutvikle og forbedre viktige elementer fra disse der man har sett og ser slike behov. Prosjektarbeidet skal primært fokusere på videreutvikling av løsningsalternativer og helhetsdesign for den bakkegående modulløsningen til Dolphin-konseptet. Et lett og sterkt understell skal videreutvikles og tilpasses med et forbedret styringssystem, i tillegg til et funksjonelt og sikkert koblingssystem mellom kupémodul og understellmodul, med best mulig integrasjon av konstruksjon, design og kontaktflate mellom førerplassmodul og understellmodul.

Delta-versjon velges som utgangspunkt for arbeidet, men med et designmessig siktemål å kunne benytte samme førerkupédesign og understellmodul for både Delta- og Tadpole-variantene med små tilpasninger.

1.7.1 Tidlige problemstillinger og fokuspunkter

Tidlige problemstillinger og fokuspunkter i dette gradsarbeidet er følgende:

- a) Hvilke hovedtrekk ser man i tilknytning til forskning og utvikling knyttet til bakke og luftgående person- og varetransport, spesielt for små kjøretøyer og farkoster i ly av et stadig sterkere fokus på miljøeffekter?
- b) Hvilke nye utviklingstrender bør vektlegges og hvilke design-, konstruksjons og løsningselementer for kupéløsning, understell og styring bør tas videre fra tidligere gradsarbeider, hvilke bør revideres og hvordan bør dette helst gjøres?
- c) Hvordan oppnå lavest mulig totalvekt på understell og kupéløsning, samtidig som statiske og dynamiske styrkeegenskaper bevares, luftmotstanden rundt kupéen holdes nede og sikt, kjøre- og flyve-komfort optimeres?
- d) Hvilke løsninger for konstruksjon, elementsammenføyning, modulsammenkopling og sikring, styring, vektfordeling, tyngdepunkt og førerplassutforming vil være mest optimal, og kunne gi en best mulig konstruktiv og bruksmessig sikkerhet?

1.7.2 Teknologiske flaskehalsar og utfordringer

Det er flere utfordringer i prosjektet og det vil derfor bli behov for å hente inn kompetanse fra eksperter. Følgende punkter vil være de største utfordringene:

- Begrense prosjektet på de rette feltene for å sikre prosjektets kvalitet og samtidig unngå mangler i helhetskonseptet.
- Oppnå en lav vekt, redusert volum og samtidig få inn alle nødvendige funksjoner.
- Å finne gode og brukervennlige koplings- og låsemetoder mellom kupé og understell. Det skal være lett å kople sammen modulene, men samtidig skal de være minimalt med klaring.
- Å kople sammen styringssystemet til forhjulet mellom bakke- og kupemodul.
- Å kartlegge best produksjonsmetode for de ulike komponenten.

2 PROSJEKTPLAN

For å sikre en strukturert prosess gjennom gradsprosjektet og sikre at tidsfrister kan overholdes må det utarbeides en god prosjektplan. Planen som legges frem skal klargjøre prosjektets hoved- og delmål og tids- og arbeidsplan med tilhørende milepeler og hvilke begrensinger som settes for prosjektarbeidet.

2.1 Prosjekt målsettinger

For å sikre ønsket oppnåelse og fremdrift i prosjektarbeidet, er tydelige og avgrensede målsettinger viktig. Målene er delt inn i et overordnet hovedmål som gjenspeiler ønsket resultat ved prosjektets slutt, og flere delmål som skal sikre progresjon i prosjektet og at hovedmålet nås.

2.1.1 Hovedmål

Hovedmålet for gradsoppgaven er formulert slik:

”Å utrede og utvikle et helhetskonsept av Dolphin Sky med revisjon av tidligere løsningsforslag. En løsning på sammenkopling av kupé og understellmodul, samt helhetsløsning for underchassis og styring skal prioriteres og legges frem. Videre skal det fokuseres på lav vekt, funksjonell og konstruktiv sikkerhet. Alle trinn i utviklingsarbeidet skal dokumenteres med løsningsvalg og tekniske anbefalinger.

2.1.2 Delmål

Prosjektets delmål danner de kritiske punktene for å gjennomføre prosjektet. Målene er satt opp i rekkefølgen de skal utføres og er følgende:

1. Utrede bakgrunn for oppgaven, planlegge prosjektet og utdype metode og terminologi som tas i bruk gjennom prosjektet.
2. Gå dypere i grunnlagsteori og eksisterende teknologiske løsninger og konseptuelle utviklingstrekk, teknisk og designmessig spesifisering.
3. Utredning og utvikling av funksjonsanalysegrunnlag med utkast av tidlige løsningsforslag for elementer og helhets konseptet.
4. Velge et konsept å gå videre med, basert på systematisk rangering av alternativene, og gjennomføre eksperttesting av konseptet.
5. Utføre nødvendige beregninger, utvikle basiskonseptet i CAD og gjennomføre og vurdere FEM-analyser.
6. Fremstille produksjonstekniske metoder og økonomiske sluttvurderinger.
7. Ferdigstille rendering, konklusjon og evaluere prosessen. Til slutt finpusse rapporten.

2.2 Tids- og arbeidsplan med milepeler

Tabell 2.1 viser prosjektets tids- og arbeidsplan. De blåmerkede feltene viser når de ulike delmålene i prosjektet skal utføres. Når de er oppnådd markeres de med symbolet: ✓.

Tabell 2.1: Tids- og arbeidsplan med hovedaktiviteter i prosjektarbeidet.

Delmål	Aktiviteter	2021															
		August			September			Oktober			November			Desember			
1	Bakgrunn																
	Dolphin-prosjektet																
	Analyse av tidligere arbeid																
	Prosjektplan og begrensinger																
	Terminologi og metodebruk																
2	Redegjøre for teori																
	Vurdere relevant teknologi																
	Produktegenskaper og mål																
3	Funksjonsanalyse																
	Funksjonsalternativ																
	Form- og estetikkalternativ																
	Materialvurdering og bruks-påkjenninger																
4	Egenscreening																
	Eksterntesting																
5	Elementberegninger																
	CAD modellering																
	FEM analyser																
	Tekniske tegninger																
6	Produksjonsmetode																
	Økonomisk vurdering																
7	Fotorendringer																
	Evaluering og konklusjon																
	Skrive og levere rapport																

Viktige datoer i prosjektet er **15.12.21** som er leveringsfristen for rapporten. I tidsrommet omkring **20.01.22** skal prosjektet presenteres.

Tabell 2.2: Oversikt over planlagte milepeler med dato for når man ønsker at disse skal være oppnådd.

Milepeler:	Dato:
M1: Bakgrunnen er redegjort for, prosjektplanlegging gjennomført og det er redegjort for terminologi og metodebruk.	12.09.21
M2: Det er redegjort for grunnlagsteori og eksisterende teknologiske løsninger er utredet og vurdert.	10.10.21
M3: En kravspesifikasjon er utarbeidet, funksjonsanalyse er gjennomført og et konseptforslag lagt frem.	25.10.21
M4: Konseptet er modellert ved hjelp av CAD og tekniske tegninger et fremstilt. Nødvendige beregninger og FEM-analyser er utført.	15.11.21
M5: Produksjonsmetoder et valgt og en kostnadsanalyse er utført.	30.11.21
M6: Fotorenderinger er fremstilt og en sammenstillingsanvisning er lagt frem.	07.12.21
M7: Prosjektet er evaluert og en konklusjon er skrevet med resultater og anbefalinger for videre arbeid.	11.12.21
M8: Rapporten er levert.	15.12.21
Presentasjon av masterarbeidet	Ca. 20.01.22

2.3 Tidlige begrensninger for arbeidet

Prosjektarbeidet utføres over en begrenset periode, estimert til 900 timer fra 15. august til 15. desember. Det er derfor behov for begrensninger i oppgaven, som kan gi et mest mulig helhetlig resultat etter satte problemstillinger. Følgende begrensninger er satt for prosjektet:

- Det vil ikke bli utført omfattende og detaljerte ergonomistudier.
- Beregninger eller endringer på dronemodulen som er utviklet av Falstad, vil ikke bli utført.
- Det elektriske styrings- og kopleingssystemet skal ikke arbeides med i dette prosjektet.
- Det vil ikke bli utviklet et bremsesystem eller kopleingssystem for bremsene.
- Foring og smørepunkter vil ikke inkluderes i utviklingsarbeidet eller det ferdige designet.
- Det vil ikke gjennomføres elementberegninger på alle komponenter, kun de som anses som de viktigste.
- Det vil ikke gjennomføres beregninger på sveis eller demping.
- Det vil ikke gjennomføres utmattingsberegninger. Dette tas høyde for gjennom en estimert sikkerhetsfaktor.

- Det vil kun utføres en begrenset materialutredning.
- Det vil ikke bli utført FEM-analyser på knutepunkt eller mindre deler i konstruksjonen.
- Det vil ikke bli utviklet et styringssystem i kupeen, kun i understellmodulen.
- Det vil ikke bli utviklet en konseptløsning for interiøret i kupeen, slik som instrumentpanel og fører sete.
- Det vil ikke bli utført CFD analyser.
- Kostnadskalkylen for produksjon vil måtte baseres på forholdsvis grove estimater.
- Det vil ikke lages en detaljert monteringsanvisning.
- Det vil ikke bli utført en miljø- eller livstidsanalyse av konseptet.

3 TERMINOLOGI OG METODEBESKRIVELSE

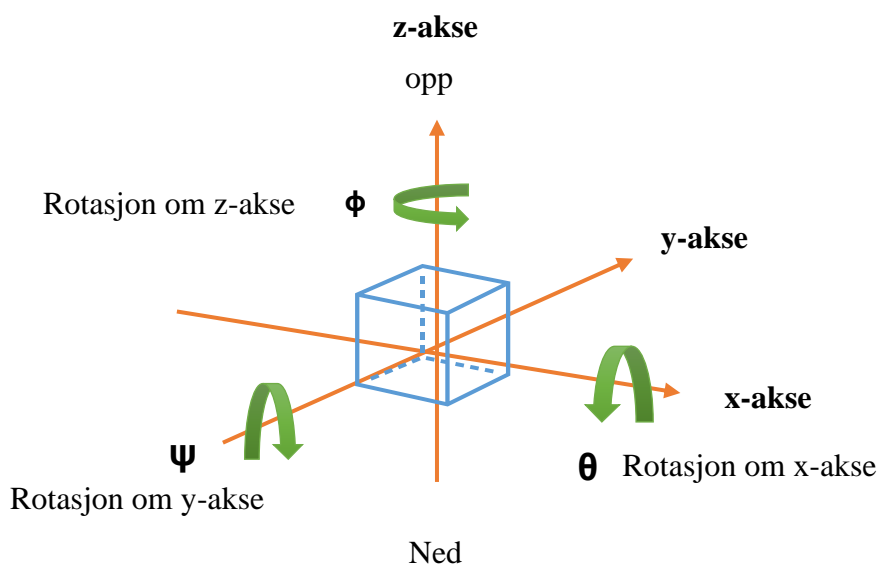
Gjennom prosjektet vil ulike metodikk bli benyttet. I dette kapittelet kartlegges og forklares relevant terminologi, metodebruk, verktøy og hjelpemidler som vil danne grunnlag for utviklingsarbeidet og analyser som gjennomføres.

3.1 Terminologi, symboler og formler

For å beskrive det tredimensjonale rommet konseptet blir utviklet i, er det innledningsvis definert et globalt koordinatsystem for Dolphin Sky. Følgende legges det frem en oversikt over terminologi og begreper, bokstav- og grafiske symboler, og formler som benyttes i rapporten.

3.1.1 Koordinatsystem

Figur 3.1 viser koordinatsystemet som benyttes for å beskrive metriske verdier knyttet til modulkonseptet og ved beregninger. For å beskrive rommets retninger er koordinataksene x, y og z valgt. I tillegg brukes høyrehåndsregelen for å definere positiv dreie- og rotasjonsretning på de tre aksene.



Figur 3.1: Illustrasjon av koordinatsystemet som vil bli brukt i prosjektet. For x-, y-, og z-aksen vil rotasjon med urviseren, sett fra origo, regnes som positiv.

3.1.2 Terminologi og begreper

Tabell 3.1 viser en oversikt over begreper og terminologi som benyttes i rapporten. De generelle begrepene er definert av eksterne kilder, mens de spesifikke begrepene er definert internt i dette prosjektet for å forklare komponenter, bevegelser og liknende, og bidra til terminologien i rapporten.

Tabell 3.1: Beskrivelse av spesifikke og generelle begreper som brukes i oppgaven.

Prosjektspesifikke begreper:	Beskrivelse:
Sveve og bakkeversjon	Sveveversjonen er den flyvende Dolphin-varianten, når understellet er koplet fra. Bakkeversjonene er småbil varianten av Dolphin, og dronemodulen er koplet fra.
Drone/svevemodul	Dette er den øverste modulen i Dolphin-konseptet. Modulen består av alle komponenter som trengs for å få Dolphin til å fly.
Kupémodul	Modulen i Dolphin-konseptet der passasjeren sitter og styrer bilen/dronen.
Understellmodul	Nederste modulen i Dolphin-konseptet. Modulene består av hjul, hjuloppheng, batterier osv.
Delta-variant	En variant av Dolphin-konseptet som er en småbil med ett forhjul og to bakhjul.
Tadpole-variant	En variant av Dolphin-konseptet som er en småbil med to forhjul og ett bakhjul.
Generelle begreper:	
SEV	«Small Electric Vehicles»
CAD	«Computer Aided Design»
Rendering	Bilde av en 3D modell.
FEM	«Finite Element Methode»
CFD	«Computational Fluid Dynamics»
RP	«Rapid Prototyping»
Drone	En drone er et ubemannet luftfartøy som kan fly autonomt eller fjernstyres.
Thruster	Et objekt som skaper skyvekraft.
SI-enheter	«International System og Units»
IPD	Integrert produktutvikling
IPPD	Integrert produkt og prosessutvikling.
QFD	«Quality function deployment»
Chassis	Rammeverket/ understellet.
Karosseri	Skallet/overstellet

3.1.3 Symboler

For å få en oversikt over symboler tatt i bruk i oppgaven, spesielt i formlene, er de ført inn i tabell 3.2 og tabell 3.3. I tabell 3.2 fremkommer først generelle symboler definert av eksterne kilder. Deretter er det egenspesifiserte symboler for denne oppgaven. Til slutt er de grafiske symbolene tatt i bruk, definert i tabell 3.3 og disse symbolene er også egendefinerte for å forklare ulike bevegelser og mer.






Tabell 3.2: Generelle og egenspesifiserte symboler som brukes senere i prosjektet.

Generelle symboler:	Beskrivelse:	SI-enhet:
F	Kraft	N
a	Akselerasjon	m/s^2
m	Masse	kg
h	Høyde	mm
L	Lengde	mm
r	Retardasjon	m/s^2
P	Effekt	J
v	Hastighet	m/s
A	Areal	mm^2
C_D	Luftmotstandskoeffisienten, drag-koeffisienten	-
ρ	Massetetthet	kg/m^3
g	Tyngdens akselerasjon	m/s^2
f	Rullefriksjonskoeffisient	-
G	Gravitasjonskraft	N
α	Vinkel	deg
R	Radius	mm
q	Jevnt fordelt last	N/mm
M	Moment	Nmm
σ	Spenning	MPa
σ_b	Bøyespenning	MPa
M_b	Bøyemoment	Nmm
W_b	Motstandsmoment	mm^3
η	Sikkerhetsfaktor	-
μ	Friksjonskoeffisient	-
η	Sikkerhetsfaktor	-
I	Treghetsmoment	mm^4
D	Ytre diameter	mm
d	Indre diameter	mm
π	Pi	-
E	E-modul	MPa
k	Fjærkonstant	N/m
τ	Skjærspenning	MPa
i	Utvekslingsforhold	-
Spesifikke symboler:		
ΔG	Endringen av gravitasjonskrefter på for og bakaksel i dynamiske scenarier.	N
G_F	Gravitasjonskraften på forhjulsakselen til et kjøretøy.	N

Tabell 3.2: Forts.

Spesifikke symboler:	Beskrivelse:	SI-enhet:
G_B	Gravitasjonskraften på bakhjulsakselen til et kjøretøy.	N
F_{total}	Den totale kjøremotstanden	N
F_L	Luftmotstand	N
F_R	Rullemotstand	N
F_S	Stigningsmotstand	N
F_C	Sentrifugalkraft	N
B	Bremsekraft	N
σ_{till}	Tillatt spenning	MPa
F_E	Knekk-kraft	N
L_K	Knekkklengde	mm
x	Fjærvandring	mm
F_{spring}	Fjærkraft	N
V	Skjærkraft	N
n_1	Omdreining til drivende tannhjul	deg
n_1	Omdreining til drevende tannhjul	deg
z_1	Tanntall til drivende tannhjul	deg
z_2	Tanntall til drevende tannhjul	deg
m_{tot}	Total vekt uten passasjer	kg
m_u	Vekt understell	kg
m_k	Vekt kupe	kg
m_d	Vekt dronemodul (uten motorer, propeller og fallskjermssystem)	kg
l_k	Lengde kupe	mm
b_k	Bredde kupe	mm
h_k	Høyde kupe	mm
l_u	Lengde understell	mm
b_u	Bredde understell	mm
h_u	Høyde understell	mm
l_a	Akselavstand (Gisholt)	mm
l_{ds}	Lengde drone sammenfoldet	mm
l_{du}	Lengde drone utstrakt	mm
b_{ds}	Bredde drone sammenfoldet	mm
b_{du}	Bredde drone utstrakt	mm
h_d	Høyde drone	mm
v_{maks}	Maksimal kjørehastighet	m/s

Tabell 3.3: Oversikt og definisjon av de grafiske symbolene brukt i rapporten.

Symbol:	Figur:	Beskrivelse:
Grønn pil		Viser positiv bevegelsesretning, kjøreretning eller riktig vei for montering og bruksretning.
Oransje pil		Akseretning
Grønt kryss		Markerer at en tabellarm skal fortsette på neste side.
Blå pil		Viser positiv retning for krefter
Blå sirkel med kryss		Markerer massesenteret til et objekt

3.1.4 Formler

I tabell 3.4 er hovedformlene som tas i bruk under beregningene i prosjektet listet opp. Ved beregninger utledes formelene videre for å finne ønskede verdier, men tilhørende indeks for formelen som er brukt.

Tabell 3.4: Oversikt over hovedformler som er brukt i prosjektet, men tilhørende indeks og beskrivelse.

Beskrivelse:	Formel:	Indeks:
Newtons andre lov	$F = m * a$	4.1
Tyngdepunkts endring	$\Delta G = \frac{m * r * h}{L}$	4.2
Total kjøremotstand	$F_{tot} = F_L + F_R + F_S + F_A$	4.3
Effekt	$P = F * v$	4.4
Luftmotstand	$F_L = 0,5 * C_D * A * \rho * v^2$	4.5
Rullemotstand	$F_R = f * G$	4.6
Stigningsmotstand	$F_S = G * \sin \alpha$	4.7
Sentrifugalkraft	$F_c = \frac{m * v^2}{R}$	4.8
Bremsekraft	$B = m * r$	4.9
Jevnt fordelt last	$q = \frac{F}{L}$	6.1
Moment	$M = F * L$	6.2
Tverrsnittsareal	$A = b * h$	6.3
Bøyespenning	$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$	9.1
Tillatt spenning	$\sigma_{till} = \frac{R_e}{\eta}$	9.2
Motstandsmoment til sirkulære rør	$W_b = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32 * D}$	9.3
Tregghetsmomentet til sirkulære rør	$I_z = I_y = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$	9.4

Tabell 3.4: Forts.

Beskrivelse:	Formel:	Indeks:
Motstandsmoment til et rektangulært rør	$W_b = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$	9.5
Treghtsmomentet til rektangulært rør	$I_z = I_y = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$	9.6
Eulers formel	$F_E = \frac{\pi^2 EI_{min}}{L_K^2}$	9.7
Fjærkraft	$F_{Spring} = k * x$	9.8
Skjærspenning	$\tau = \frac{V}{A}$	9.9
Utvekslingsforhold	$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$	9.10

3.2 Metodebruk

For å sikre en effektivt og vellykket arbeidsprosess, i tillegg til kvaliteten i arbeidet utført, benyttes et utvalg utviklingsmetoder. Metodene bidrar til kvalitetssikring underveis i prosessen. Ved å se på ulike aspekter rundt produktet og prosessen blir sluttresultat bedre. Nedenfor blir de utvalgte metodene og hvordan de blir benyttet i prosjektet presentert og forklart.

3.2.1 Integrert Produktutvikling (IPD) og prosessutvikling (IPPD)

IPD er en metodikk for å gjennomføre et prosjekt i en systematisk og god rekkefølge slik at ingenting blir uteglemt [28]. Dette oppnås ved at IPD retter fokus mot å ivareta flere hensyn knyttet til utviklingsprosessen og produktet. Målet med IPD er å oppnå en effektiv arbeidsprosess, ressursbruk og å lære av erfaringer. Metoden bygger på å skape større tverrfaglighet og samspill i utviklings- og designarbeidet, det vil si at det er et kontinuerlig samspill mellom de ulike avdelingene gjennom hele prosessen.

Det er også et sentralt fokus på økonomi og ressursbruken i de enkelte utviklingsoppgavene. For å sikre at sluttproduktet har en konkurransedyktig pris, i tillegg til at miljø- og bærekrafts hensyn ivaretas, er det optimalt om utvikling-, produksjon-, HMS- og økonomiavdelingen fortløpende deler erfaringer og mottar tilbakemeldinger fra kunder og markedet. For å få til dette er det viktig med integrering av datahjelpemidler og datakommunikasjon i alle trinn. Dette sikrer en effektiv kommunikasjon mellom de ulike leddene og vil resultere i økt produktivitet og redusert gjennomføringstid.

Det siste fokusområdet i IPD er læring og kontinuerlige forbedringsprosesser i alle ledd. Det er utviklet en «kjørerute» for de viktigste elementene man bør ta med seg i organisering av de fleste typene av produktutviklings- og produktrealiseringsprosjekter. I tabell 3.5 listes disse prinsippene og hvordan de skal anvendes i dette prosjektet [29].

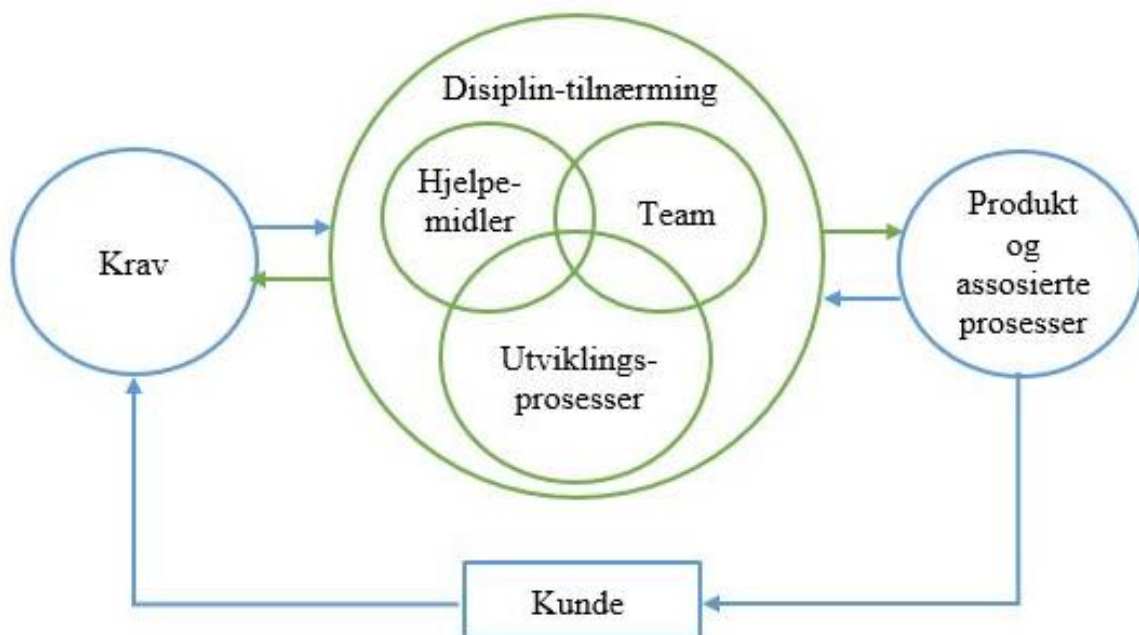
Tabell 3.5: Prinsippene i IPD metodikken og hvordan de anvendes i prosjektet.

Steg:	Prinsipp:	Anvendelse:	Område:
1	Kartlegging av kundens behov og markedskrav.	Det skal utredes for behov i samfunnet, eksisterende løsninger og fordeler og ulemper ved dem.	Kap. 1
2	Planlegging og styring av produktutviklingsprosessen.	En prosjektplan skal lages tidlig i prosessen, men hoved- og delmål i tillegg til en tidsplan og begrensninger.	Kap. 2
3	Bruk av produktutviklingsgrupper og teamarbeid.	Gjennom prosjektet skal det benyttes veiledning og eksperttesting, i tillegg til faglitteratur og nettsøk.	Alle
4	Integrasjon av prosessdesign.	Under utformingen av produktdesignet skal det tas hensyn til ulike faktorer spesielt med tanke på produksjonsmetoder, materialvalg og livssyklus kostnaden og miljøpåvirkningen for produktet. I tillegg skal det designes gode arbeidsvaner.	Alle
5	Styring av prosjektkostnadene fra starten.	Fra starten og gjennom hele prosjektet skal det være et fokus på økonomiske faktorer og livstids kostnaden. I tillegg skal egen tidsstyring gjennom prosjektet distribueres etter behov i de ulike fasene.	Alle
6	Involvering av leverandører og underleverandører tidlig i prosessen.	Der det lar seg gjøre, skal standardmoduler benyttes for å redusere kostnader ved produksjon.	Alle
7	Utvikling av robust design.	Det skal utføres grunnberegninger og dimensjonering av utvalgte, relevante komponenter med gitte sikkerhetsfaktorer. Det skal være fokus på at konseptet har en lang levetid og brukspålitelighet.	Kap.6 og 9
8	Involvering av CAE, CAD, CAM og relevante dataverktøy i utviklingsprosessene.	Konseptet skal 3D modelleres i CAD og modellene skal brukes til å utvikle tekniske tegninger.	Kap. 10
9	Datasimulering av produktets egenskaper og framstillingsprosessen.	FEM analyser skal utføres på utsatte elementer.	Kap. 11

Tabell 3.5: Forts.

Steg:	Prinsipp:	Anvendelse:	Område:
10	Generering av en mest mulig effektiv tilnærming til utviklingsarbeidet.	Et stort fokus blir langt på bakgrunn, tidligere arbeid og eksisterende løsninger, i tillegg til produkttegenskaper og kravspesifikasjon.	Kap. 1, 4 og 5
11	Kontinuerlig forbedring av utviklingsprosessen.	Fra starten skal det settes begrensninger for prosjektet for å holde fokus på det mest relevante. Et prosessdiagram skal utvikles der piler er forbedringspiler. Til slutt skal alle trinnene drøftes.	Alle

Integrert produkt- og prosessutvikling, IPPD, vil også bli tatt i bruk i gradsarbeidet, en videreutvikling av IPD [30]. Hovedforskjellen er at IPPD legger noe mer vekt på «produktassosierte prosesser», og det er et vesentlig økt fokus på marked og kunder, i tillegg til kartlegging og forbedring av utviklingsmetodiske, organisatorisk, administrativ og økonomisk prosessen. IPPD er spesielt viktig i større organisasjoner, men vil i dette prosjektet tas i bruk i forbindelse med Quality Function Deployment (QFD), prosessdiagram og prosessdrøfting.



Figur 3.2: Illustrasjon over IPD prosessen i grønn og IPPD i blå. Som figuren viser, bygger IPPD på IPD som en videreutvikling [30].

Figur 3.2 illustrerer de ulike hovedområdene i IPD og IPPD. De grønne sirklene representerer IPD og de blå IPPD.

3.2.2 Pughs metodikk

Pughs metodikk er en metode for systematisering av problemstillinger og teknologiske utviklingstrinn, i tillegg til enkle fremgangsmåter for på best mulig måte å ta en avgjørelse med hensyn til idé og konseptvalg tidlig i en slik prosess [31] [32]. Metodikken består av tre hovedtrinn:

a) Designkjernen

Designkjernen innebærer alle utviklingstrinn fra og med kundens behov. Det starter med en innledende markedsbetraktning for å kartlegge kundens behov (Customer's needs), deretter utvikling av spesifikasjoner for produktet, konseptutvikling og konseptdesign, detaljdesign, og til slutt produksjon og salg. Hovedprinsippet er at all produktutvikling og produktdesign starter i et behov, og hvis det kan møtes, vil passe inn i et eksisterende marked eller skape et marked.

b) Spesifisering

Spesifiseringer tar utgangspunkt i beskrivelsen av markeds- og kundebehovet og det formuleres derfra spesifikasjoner for det produktet som skal utvikles og designes. Spesifikasjonene benyttes som en «ramme» som omslutter alle etterfølgende stadier i «Designkjernen», og tar for seg kravsetting og spesifisering av grove metriske, ytre og indre toleransegrenser.

c) Styrkt konvergens

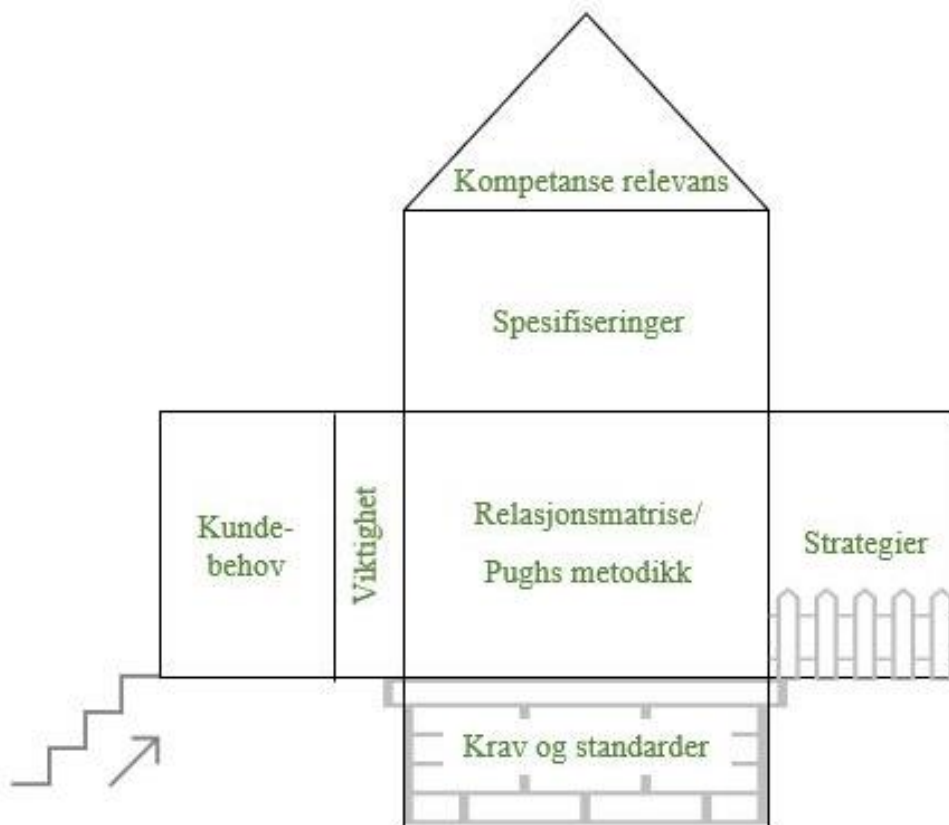
Styrkt konvergens er en matematisk fremgangsmåte for å velge den beste løsningen ut ifra ulike alternativer. For å finne den beste løsningen er det på forhånd definert kriterier som er viktige for den aktuelle løsningen, og disse kriteriene er vektet etter hvor viktige de anses å være. Seleksjonsmatrise settes opp med de ulike løsningene og tilhørende poengsum for hvert kriterium. Det er dermed mulig å gjøre en kvantitativ utvelgelse av kvalitative egenskaper. De løsningene som får totalt høyest poengsum er de det er logisk å gå videre med.

3.2.3 House of Quality (QFD)

QFD (Quality function deployment) betraktes som en strukturert måte å definere kundebehov eller kundekrav [33]. De overføres til kvalitetsplanlegging og interne kvalitetssikringssystemer for utvikling og deretter framstilling av produkter som skal kunne møte disse behovene på best mulig måte, og samtidig minimere risiko.

Målet med metodikken er på en systematisk måte å kartlegge kundens eksisterende og kommende behov samt å best mulig predikere hvordan kunden vil bedømme verdien til et produkt eller et nytt produktdesign. Metodikken benyttes for å oversette kundens krav til konkrete tekniske målsetninger for ulike deler av produktet. Målet er å sørge for kundetilfredshet gjennom god informasjon, service og oppfølging ved videreutvikling.

House of Quality («Kvalittshuset») er et hovedverktøy for å kunne bruk QFD og på en praktisk måte systematiserer QFD-tankegangen gjennom et husformet blokkdiagram med ulike kombinasjonsmuligheter [34].



Figur 3.3: Forenklet blokkdiagram av kvalitetshuset som skal benyttes i dette gradsarbeidet.

I figur 3.3 illustreres kvalitetshuset som skal brukes i dette prosjektarbeidet. Det starter i gangen med «kundebehov». Deretter går man inn i mellomgangen til «viktighet». I stua er «Pughs relasjonsmatrise», i kjelleren er «krav og standarder» og på verandaen er «strategier». I husets 2. etasje er «spesifiseringer» og til slutt, på loftet er «kompetanse relevans».

3.2.4 SCAMPER

SCAMPER er et akronym som beskriver syv kreative trinn for å utfordre en eksisterende konseptutviklingstankegang [35]. Metodikken benyttes for å skape et optimalt design eller kan tas i bruk ved designutfordringer, og sørger for at man utforsker mange ulike alternativ og scenarier man intuitivt ikke anser som hensiktsmessige. SCAMPER skal følges i rekkefølgen bokstavene står i, men brukes ofte ubevist.

- **Substitute (Erstatte)** – Bytte ut prinsipper, elementer eller komponenter for å utføre samme handling eller få samme resultat.
- **Combine (Kombinere)** – Kombinere elementer på en ny måte, få komponenter til å utføre flere handlinger og så sammen deler for å senke antall komponenter som utfører handlingen.
- **Adapt (Tilpasse)** – Tilpasse et produkt til å utføre en annen handling enn det opprinnelig hadde som hensikt å utføre.
- **Magnify/Minify (Forstørre/Forminske)** – Forandre størrelsen på komponenter.
- **Purpose (Hensikt)** – Endre intensjonen for produktet.

- **Eliminate (Eliminere)** – Fjerne elementer eller komponenter for å forenkle produktet og sette igjen med kjernefunksjonen.
- **Elaborate (Utdyp)** – Legge til funksjoner.
- **Rearrange (Omorganisere)** – Endre plasseringen på elementer eller moduler i produktet.
- **Revers (Reversere)** – Snu og vrenge på retningen til elementer.

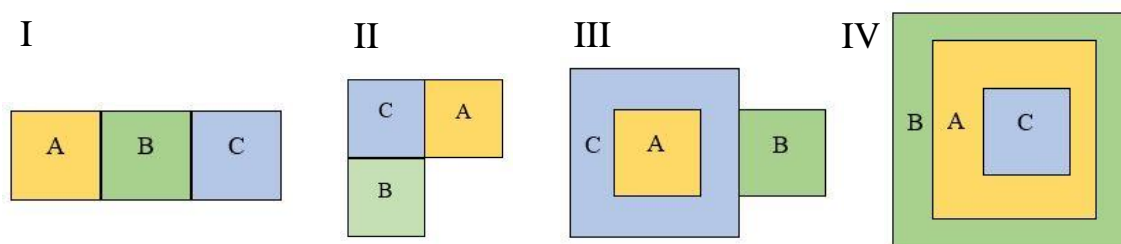
3.2.5 Modularisering

Modularisering er en teknikk som benyttes for å se hvordan et produkt kan organiseres [36]. Dette utføres ved å systematisk undersøke ulike elementer og deler som vil måtte inngå. Symmetri og standardmoduler benyttes slik at ulike elementer og deler kan settes sammen på ulike måter, og dette er sentralt i modularisering.

Dolphin-prosjektet er et modulbasert prosjekt der kupémodulen skal kunne feste seg til understellmodulen i både Delta- og Tadpole-varianten. I tillegg skal dronemodulen kunne tas av kupéen og benyttes til varetransport. Derfor er modularisering en svært sentral metodikk i prosjektet.

Fordelene med modularisering er at produksjonen blir sterkt forenklet, men samtidig har mange variasjonsmuligheter. Ved å benytte standardiserte enheter og dimensjoner får man en større grad av fleksibilitet ved videreutvikling og anvendelse i ulike produktvarianter. Det er lettere å bytte ut deler og elementer og det er dermed mye lettere å vedlikeholde. Det er i tillegg lettere å lagre og transportere moduler, da hvert element kan tettpakkes fremfor et ferdig sammensatt produkt.

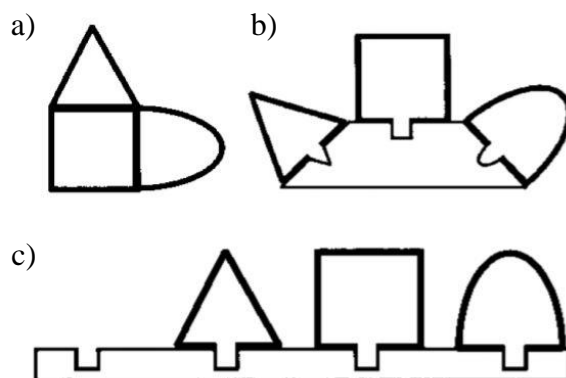
Grunnprinsipp ved modularisering og modulbygging er at deler og større elementer kan arrangeres og settes sammen på ulike beslektede måter. Det er fire hovedmåter å sette sammen modulene, lineær, vinkelrett, delvis integrert og integrert sammenstilling, slik figur 3.4 illustrerer.



Figur 3.4: Modulbyggingens grunnprinsipp [36]. I) viser lineær sammenstilling, II) vinkelrett sammensetning, III) delvis integrert sammenstilling og IV) Integrert sammenstilling.

Seksjons- og skinnemonterte moduler finnes i mange ulike former og figur 3.5 viser tre varianter. Figur a) illustrerer en enkel type seksjonssystem. En kvadratisk sentermodul har like kontaktflater som profilene festet til den. Det er da mulig å ha flere og større sentermoduler montert inntil hverandre. Illustrasjon b) er et trekantet slissesystem. Der er det kun en type modul som passer i hver retning av sentralskinnen. Nederst er illustrasjon c) som viser et

«Bussystem», der flere ulike moduler kan kombineres ved siden av hverandre på en skinne. Bussplata kan ha spor på begge sider, eller være kvadratisk.



Figur 3.5: Illustrasjon av skinnemodul prinsippet [36].

Løsningsforslag på moduler og utforming vil følges opp i kapittel 6, under løsningsutredningen.

3.2.6 Analysemetodikk

FEM [37]

For å sørge for at konseptet er tilstrekkelig dimensjonert og utformet, vil analyser bli utført. Det vil bli utført FEM analyser av de mest utsatt komponentene for å se hvordan spenningene er fordelt og om det er noen avgjørende spenningskonsentrasjoner og at det eventuelt må gjøres endringer. FEM er en forkortelse for finite element analyses og er en numerisk beregningsmetode som fungerer ved at konstruksjonen brytes opp i mange små elementer, basert på definert «mesh» størrelse. Elementene settes deretter inn i en stivhetsmatrise. Å gjøre dette med håndberegninger krever svært mye tid, og det blir derfor brukt dataverktøy for å utføre analysen. Stivhetsmatrisen løses ut ifra satte laster og betingelser og løsningen vil da gi bevegelse i elementene. Denne bevegelsen er grunnlaget for utredelse av spenning og deformasjon.

CFD [38]

Den andre analyseformen som vil bli utført er CFD, Computational Fluid Dynamics. Metoden benyttes for å analysere strømmingen til væsker og gasser gjennom en numerisk beregningsmetode. Det vil bli utført CFD analyser for å undersøke luftstrømmingen rundt kupé og understellmodulen, og hvor det danner seg turbulens i luftstrømmen. Komplekse CFD beregningsprogram transformerer partiell differanse likninger fra fluidmekanisms fysiske lover til algebraiske likninger og klarer å rast å numerisk løse likningene.

3.3 Løsningsverktøy

Det blir brukt flere ulike programvarer og hjelpemidler gjennom prosjektarbeidet. Tabell 3.6 viser en oversikt over de hjelpemidlene som blir benyttet.

Tabell 3.6: Oversikt over programvare og andre hjelpemidler som benyttes i prosessen.

Verktøy:	Anvendelse:	Område:
Microsoft Word 2020	Programmet benyttes for rapportskrivningen, i tillegg til å lage tabeller og figurer.	Hele
Paint	Brukt til å lage noen figurer og til å redigere figurer.	Kap. 1, 5, 6, 7, 8, 9, 11 og 13
Tegnesaker (blyant, penn og linjal)	Håndtegnede skisser av løsningsforslag og noen figurer.	
Document Scanner	Brukes for å gjøre håndskissen om til jpeg filer.	
SOLIDWORKS 2020	Programmet benyttes til CAD modellering, og fotorendringer, tekniske tegninger og FEM analyser.	Kapittel 10, 11 og 13
Granta Edupack	Programmet benyttes for å samle materialdata og sammenlikne materialer.	Kapittel 11 og 12

Litteraturstudie danner grunnlaget for tilegnet kunnskap og inspirasjon i utviklingsprosessen. For å finne tekstmateriell eller figurer i ulike deler av oppgaven har det blitt benyttet litteratur fra ulike kilder. Tabell 3. viser en oversikt over søkehistorikken til de mest sentrale områdene i prosjektet for litteratursøk.

Tabell 3.7: Oversikt over områder det er gjennomført en litteraturstudie og hvilke søkeord som er benyttet.

Område:	Søkersted:	Baseuttrykk:
1.1 Bakgrunn	Google.com	Trafikk, Miljøpåvirkning, Utslipp, Urbanisering
1.2 Teknologiske trender og småbiler	Google.com	SEV, Tuctuc
4.1 Teoriutredning	Google.com amazon.co.uk	Passasjerdrone
4.2 Teknologeutredning	Google.com	Chassis frame, koplingsmetoder, steering systems.
6.3 Form- og estetikkalternativ	Google.com	Barokk stil, Rokokko stil, Funkis hus, Peel chair, Qubism Furniture.
10.4 Standardkomponenter	Amazon.co.uk Google.com	Hex bolt, hex nut, 120x70 wheel, roller bearing.

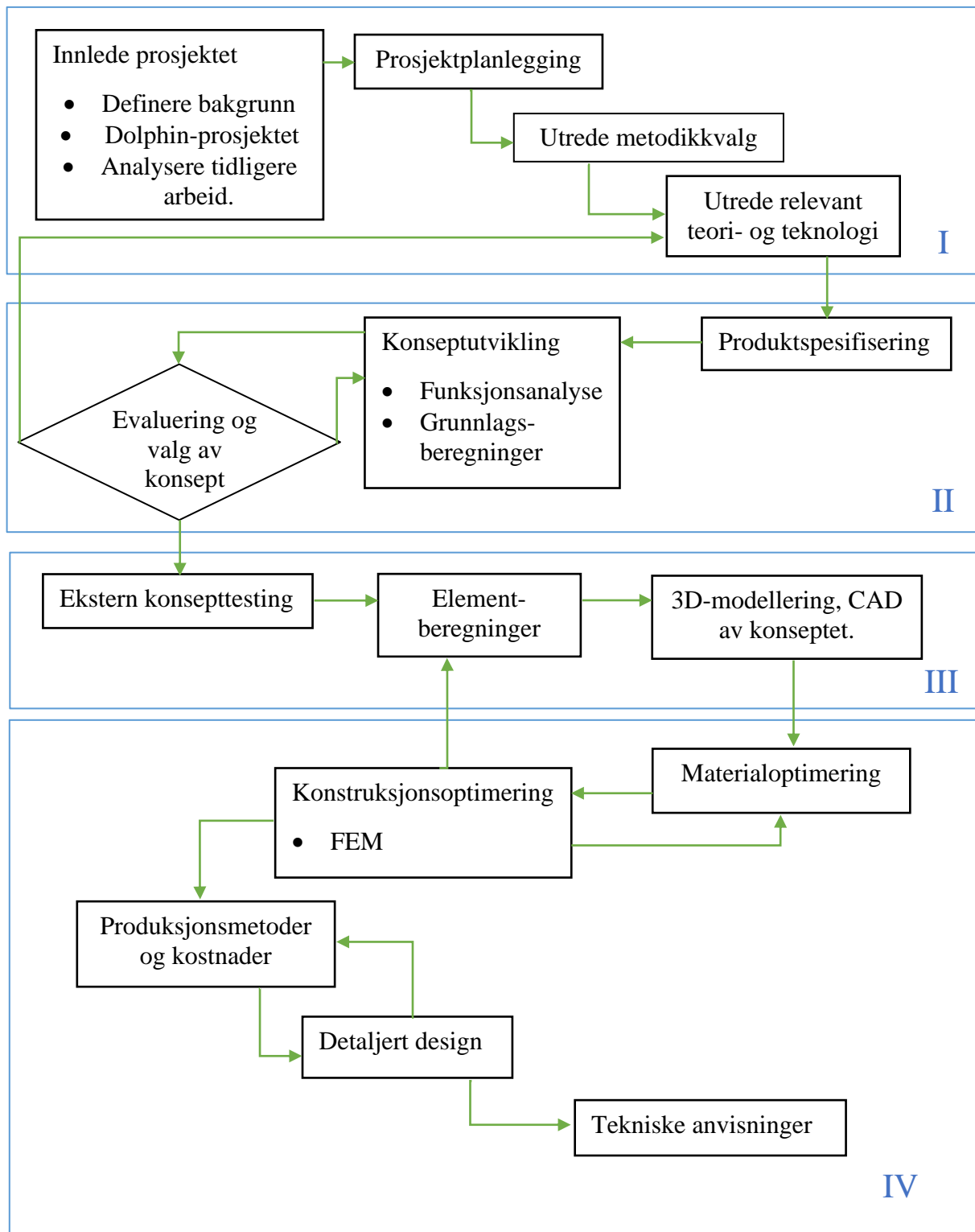
3.4 Kvalitetssikring

Ulike hjelpemidler benyttes for å kvalitetssikre at alle prosesstrinn i prosjektet utføres på en effektiv, fornuftig og riktig måte. Følgende hjelpemidler benyttes:

- ISO-9000 – Overordnet standard for kvalitetssikring. Grunntrekk og terminologi.
- ISO-9001 – Standard for kvalitetsstyring, kvalitetssikring av krav. [39]
- ISO 128 – Standard for tekniske tegninger. [40]
- De fleste formler hentes fra formelboken «Formler og tabeller» [41]. Andre formler blir hentet fra annen anerkjent litteratur som har vært pensum i ulike kurs på NMBU.
- Alle beregninger skal utføres i henhold til kjente metoder som blir undervist ved NMBU [74].
- Kilder skal primært være fagbøker utgitt av anerkjente forlag og vitenskapelige artikler. Nettkilder skal være fra anerkjente nettsider og de skal etterkontrolleres.
- Produksjonsmetoder skal kvalitetssikres med eksperttesting [75].

3.5 Prosesstrinn

Prosjektets utviklingsprosess er illustrert i figur 3.6. Hensikten med å kartlegge prosjektets prosesstrinn er å hele tiden kunne gå tilbake til tidligere faser og aktiviteter ved utfordringer og uforutsette variabler, og gjøre nødvendige endringer. Dette utføres i henhold til ISO-9001-tankegangen.



Figur 3.6: Skjematisk oversikt over prosessstrinnene i utviklingsarbeidet. De inntegnede grønne pilene indikerer overganger mellom ulike aktiviteter. Når en pil peker tilbake til en tidligere aktivitet etableres en forbedringssløyfe. De rektangulære boksene er aktiviteter og den diamantformede boksen illustrere en beslutning.

I. Utredningsfase: Her defineres bakgrunnen for prosjektarbeidet, en prosjektplan legges og metodikkvalk, teori og relevant teknologi utredes.

II. Utviklingsfasen: Her defineres viktige produktegenskaper før konseptgenereringen begynner. Det vil være en egen forbedringssløyfe ved å fortløpende vurdere ulike konsepter.

III. Konstruksjon og designfasen: Her blir det valgte konseptet testes for eksperter som muligens kommer med innspill som endrer tidligere arbeid i fasen før. Elementberegninger utføres og et konseptforslag legges frem. Det gjøres 3D CAD modelleringer og beregninger om hverandre.

IV. Analyse og ferdigstillingsfasen: Her bestemmes materiale og FEM analyser utføres. Alle produksjonsmetoder og kostnadsestimater klargjøres og det lages tekniske tegninger og anvisninger.

4 TEORI- OG TEKNOLOGIUTREDNING

I teori- og teknologiutredningen legges rammene for teorien og teknologien som vil bli lagt til grunn for det videre arbeidet i gradprosjektet. Kjøretøysdynamikken, aerodynamikk og ergonomi vil bli utredet, i tillegg til eksisterende, relevante teknologiske løsninger.

4.1 Teoriutredning

I teoriutredningen kartlegges relevant teori, beregningsmetoder og sammenhenger i kjøretøysdynamikk, aerodynamikk og ergonomi. Dette er for å danne en god forståelse for nødvendige hensyn å ta for å oppnå et best mulig resultat, basert på oppdragsbeskrivelsen.

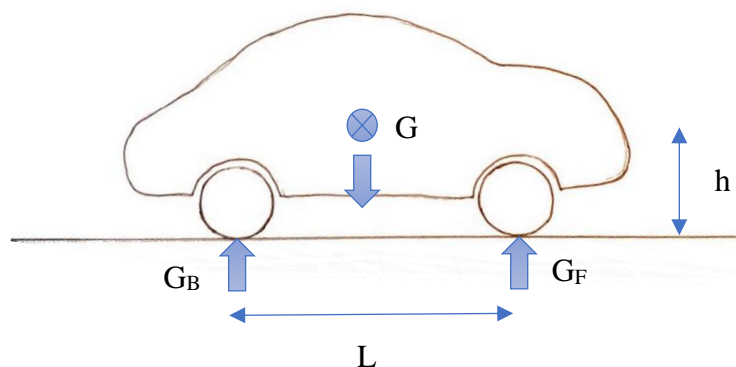
4.1.1 Kjøretøystatikk og dynamikk

For å skaffe en god innsikt i teorien bak Dolphin, er det nødvendig å undersøke kjøretøysstatikken- og dynamikken. Innenfor kjøretøysdynamikk er det viktig å kunne bruke bevegelseslikningene fra fysikken for å simulere kjøretøyets bevegelse. Det er dermed mulig å forstå kreften som virker ned i bakken, kjøremotstanden som oppstår, hvor massesenteret ligger, bremsebestemmelser, kreftene som oppstår under svingning og årsakene til trafikkulykker.

Vertikal påkjennelse

Det vil oppstå vertikale, statiske krefter på grunn av kjøretøyets vekt. Denne kraften, G , virker i massesenteret til bilen, med retning ned mot bakken, og er produktet av massen til kjøretøyet og tyngdekraften. Det kommer av newtons andre lov, at $F = m \cdot a$, der a er byttet ut med den tilnærmet konstante tyngdeakselerasjonen, g , på 9.81 m/s^2 .

Kraften G resultere i motstandskrefter under kjøretøyets hjul. Hvordan kraften fordeler seg på de ulike hjulene avhenger av hvor massesenteret ligger. Ligger det midt mellom for- og bakhjulsakselen, vil alle hjul belastes med samme kraft, når kjøretøyet har to eller fire hjul. I Dolphin, som har et hjul på den ene akselen og to på den andre, vil kraften som virker på forhjulet som står alene, være dobbelt så stor som den som virer på hvert av de to bakhjulene.



Figur 4.1: Illustrasjon av gravitasjonskraften som virker i massesentret til en bil og reaksjonskreftene på for- og bakaksel.

Når massesentret ikke ligger midt mellom akslene, kan en enkel momentlikning benyttes til å finne normalkreftene under forhjuls- og bakhjulsakselen, G_F og G_B .

Ved bremsing vil massesenteret skyves fremover i bilen, og dermed vil belastningen på forhjulet bli større.

$$\Delta G = \frac{m * r * h}{L}$$

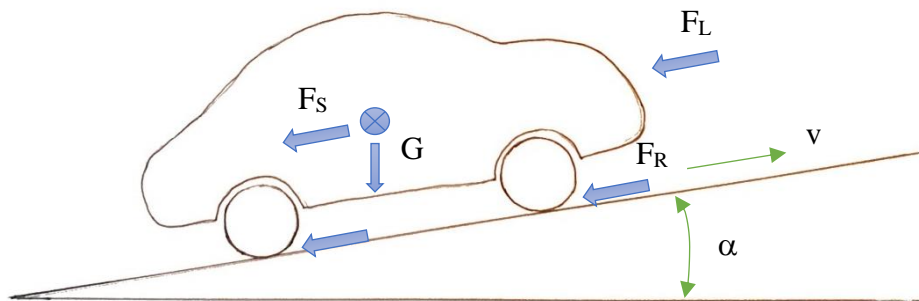
Den dynamiske for- og bakakseltynghen blir da:

$$G_{FD} = G_F + \Delta G$$

$$G_{BD} = G_B - \Delta G$$

Kjøremotstand

Det er mange krefter som påvirker et kjøretøy, både statiske og dynamiske. Som nevnt i kapittel én, er kjøremotstanden en viktig faktor når det gjelder kjøretøydynamikken. Kjøremotstanden virker i negativ retning på kjøretøyet og resulterer i at for å oppnå ønsket kjørehastighet eller akselerasjon, må denne motstanden først utliknes og deretter må ekstra krefter legges til, og energiforbruket øker.



Figur 4.2: Illustrasjon av hvor de ulike kreftene i den totale kjøremotstanden virker.

Den totale kjøremotstanden er [11]:

$$F_{total} = F_R + F_S + F_A + F_L$$

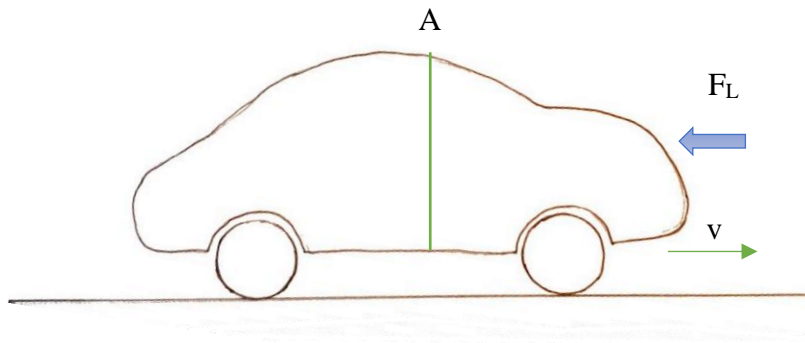
Nødvendig effekt fra motoren og til drivhjulene, for å motvirke kjøremotstanden blir:

$$P_{total} = F_{total} * v$$

For å forstå hva som skaper motstanden, skal tre av de fire komponentene som fører til F_{total} analyseres og hvilke faktorer som spiller inn for å skape motstanden. Akselerasjonsmotstanden vil ikke bli utredet i dette prosjektet, da akselerasjon ikke er et fokusområde i prosjektet.

Luftmotstand [11]

Luftmotstand er en motstandskraft som virker på et emne, i denne oppgaven, på et kjøretøy. Fartsvind treffer og stryker langs Dolphin sitt karosseri, både over, under og langs sidene, og dette skaper friksjon. Det er forårsaket av ulike trykkforhold fra fartsvinden mot karosseriet, og resultantkraften, F_L , av trykk-kreftene viker motsatt av kjøreretningen.



Figur 4.3: Illustrasjon av hvordan luftmotstanden virker på en bil der F_L er luftmotstanden.

Luftmotstanden bergenes ulikt for mot eller medvind, men den generelle formelen er:

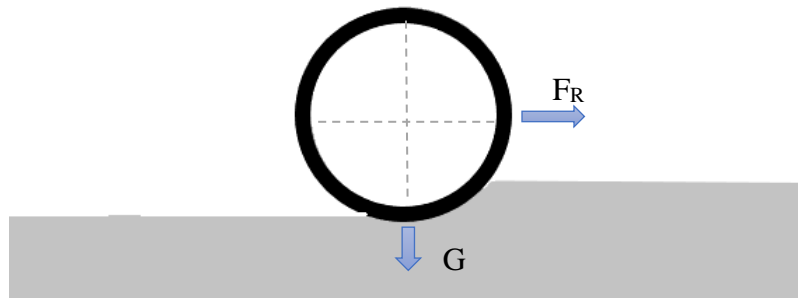
$$F_L = 0,5 * C_D * A * \rho_L * v^2$$

- C_D er luftmotstandskoeffisienten, drag-koeffisienten
- A er bilens tverrsnittsareal i fronten
- ρ_L er luftens tetthet. Det vil variere med lufttrykk, temperatur og høyden over vannet.
- v er kjørehastigheten.

Fra formelen er det tydelig at det som virker på luftmotstanden er kjøretøyets hastighet og utforming. Motstanden stiger eksponentielt med kjørehastigheten. Et estimat på luftmotstandskoeffisienten kan beregnes, men av bilprodusenter beregnes den i et vindtunnel og vil variere for hvert kjøretøy, basert på utformingen til karosseriet. Tverrsnittsarealet på fronten påvirker også motstanden og mer utdypende teori rundt dette er i kapittel 4.1.2.

Rullemotstand [11]

Rullemotstanden oppstår ved at kjøretøyets hjul gir etter for tyngden av kjøretøyet og synker ned i underlaget. Dette vil alltid forekomme under kjøring, og energien som går med til dette tas fra bilens bevegelses energi. Det er dermed en motstandskraft og bestemmes i stor grad av underlaget som kjøres på, og dekkenes materiale. Rullemotstanden avhenger også av kjøretøyets vekt, desto høyere vekt, desto større blir motstanden. Den blir også større ved lite lufttrykk i dekkene og ved mindre rulleradius og når sidekrefter virker på hjulet.



Figur 4.4: Figur av hvordan rulle­motstanden virker på et hjul og hvordan kreftene fordeles.

Rulle­motstanden kan enkelt beregnes, men en er nødt til å vite hva rulle­motstandskoeffisienten er og kjøretøyets vekt. Formelen er:

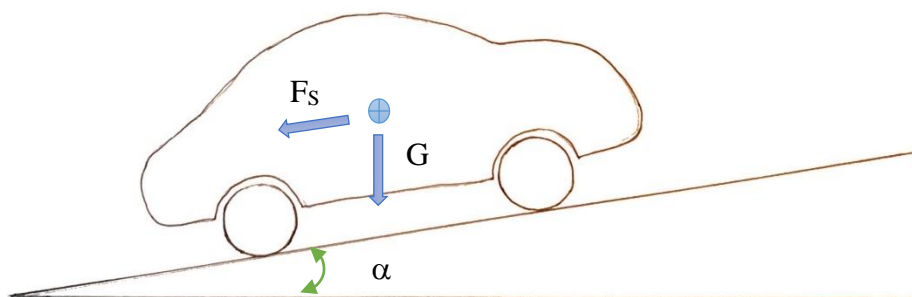
$$F_R = f * G$$

- f er rulle­motstandskoeffisienten og varierer for hver sammensetting av dekkmateriale og underlag.
- G er tyngden på hjulet.

Det er teoretisk mulig å beregne rulle­motstandskoeffisienten, men det er ikke så lett i praksis. Da brukes i stedet en fjær som drar kjøretøyet og kraften som trengs til å utføre dette leses av. Deretter regner man bakover og finner koeffisienten. Endel rulle­motstandskoeffisienter er allerede beregnet og den mest relevante i dette prosjektet er koeffisienten når gummidekk kjører på asfalt, som er $f = 0,010-0,015$. Hastigheten til kjøretøyet har liten betydning på resultatet og blir derfor neglisjert.

Stignings­motstand [11]

Ved kjøring i stigning vil det oppstå en motstand på grunn av tyngdens komponent. Tyngdekraften vil jobbe for å holde igjen kjøretøyet på bunn av bakken, og dermed oppstår en resultantkraft langs stigningen som kalles stignings­motstanden. Ved kjøring i nedoverbakke vil tyngdens komponent virke som et positivt bidrag i kjøreretningen.



Figur 4.5: Illustrasjon av hvordan stignings­motstanden virker på en bil og hvor motstandskraften virker i bilens tyngdepunkt når den kjører opp en bakke.

Stigningsmotstanden kan både beregnes med en stigning i grader eller prosent. Formelen for stigning i grader er:

$$F_s = G * \sin \alpha$$

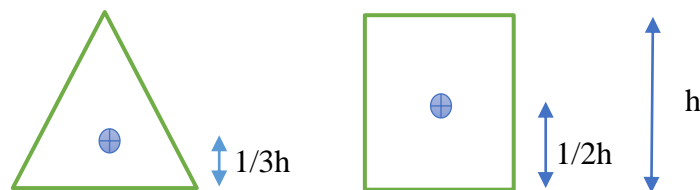
Dersom stigninger er oppgitt i prosent kan den beregnes ved:

$$\text{Stigning i \%} = 100 * \tan \alpha$$

Det er lett å beregne stigningsmotstanden, og den er veldig viktig å ha med. I et så kupert land som Norge, påvirkes kjøretøys effektbehov i stor grad av stigningsmotstanden.

Stabilitet og tyngdepunkt

En avgjørende faktor for kjøretøyets stabilitet på veien, er hvor dets tyngdepunkt og massesenter ligger. Et lavt massesenter gir den beste stabiliteten, og mindre risiko for velt. Dette kan vises i enkel geometri. I firkantede former ligger massesenteret helt i midten, altså $\frac{1}{2}$ av høyden fra bunn, mens i trekanter som figur 4.6 viser, ligger massesenteret $\frac{1}{3}$ av høyden fra bunn [39]. Dermed blir massesenteret i en slik trekant lavere enn til en firkant, og trekanten ligger mer stabilt på bakken.



Figur 4.6: Illustrasjon av hvor massesenteret ligger i en trekant, t.v, og en firkant, t.h.

I ett kjøretøy er det ikke bare geometrien som avgjør hvor massesenteret ligger, men også tyngden på komponentene inni bilen. Hvis de tyngste komponentene plasseres på toppen, vil massesenteret med en gang bli høyere.

Forholdet mellom høyde og bredde er også avgjørende for stabiliteten. Høye, tynne objekter velter mye lettere enn de som er korte og brede. Dette er på grunn av momentarmen som oppstår. Momentet blir høyere om det er lang avstand fra opplageret og til der en kraft treffer.

Rotasjon og sentrifugalkraft

Et kjøretøy vil ikke alltid kjøre rett frem [39]. Det er nødt til å svinge, og når den kjører i en bue, oppstår sentrifugalkrefter som virker mot buens senter. Disse kreftene drar i kjøretøyet kan beregnes gjennom formelen:

$$F_c = \frac{m * v^2}{R}$$

- m er bilens masse.
- v er kjøretøyets hastighet.
- R er radius.

Er sentrifugalkreftene for høye på kjøretøyet, kan det resultere i skrens av hjulene eller at kjøretøyet tipper overende. Dette kan for eksempel skje ved å kjøre i for høy hastighet i en sving.

Bremsekraft [42]

Det er en rekke krav til bremsesystemer på motorkjøretøy som kjører på veier i Norge. I denne oppgaven er ikke bremsesystemet i fokus, men det er nødvendig å kunne beregne bremsekraften som oppstår. Formelen for bremsekraft er:

$$B = m * r$$

- m er kjøretøyets masse
- r er bremseretardasjonen

Dersom hjulene blokkeres på kjøretøyet, kan bremsekraften beregnes gjennom:

$$B_{blokk} = \mu * m * g = r * m$$

- μ er friksjonskoeffisienten

Ved bremsing forskyves massesenteret fremover og brå bremsing kan derfor belaste utsatte komponenter i sammenstillingen.

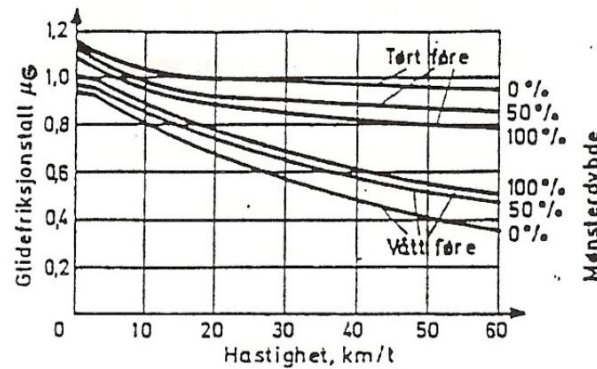
Friksjon [42]

En annen faktor som er viktig for å vurdere kjøreegenskaper er kjøretøyets veigrep. Det bestemmes av egenskapene til valgte dekk og veiens beskaffenhet. Dersom hjulet skal kunne overføre driv og bremsekrefter til veibanen er det nødt til å virke friksjonskrefter mellom hjul og underlag. Friksjonskraften bestemmes av friksjonskoeffisienten og normalkraften, tyngden som virker på hjulet.

$$\text{Friksjonskraft} = \text{Friksjonskoeffisient} * \text{Normalkraft}$$

Friksjonskoeffisienten varierer med dekkets egenskaper og underlaget, og er en sammensetting av de fire komponentene; adhesjon, hysteres, kohesjon og fortanning. Totalt utgjør disse fire komponentene den totale friksjonskoeffisienten.

Det er tre ulike friksjonskoeffisienter basert på bevegelsesmåten. Den første er glidekoeffisient for overføring av både side og bremsekrefter med blokkjusterte hjul, μ_G . I praksis regnes den ofte som konstant, men i virkeligheten endrer seg i noe grad med kjøretøyets hastighet og bakkens fuktighetsgrad, slik figur 4.7 viser nedenfor.



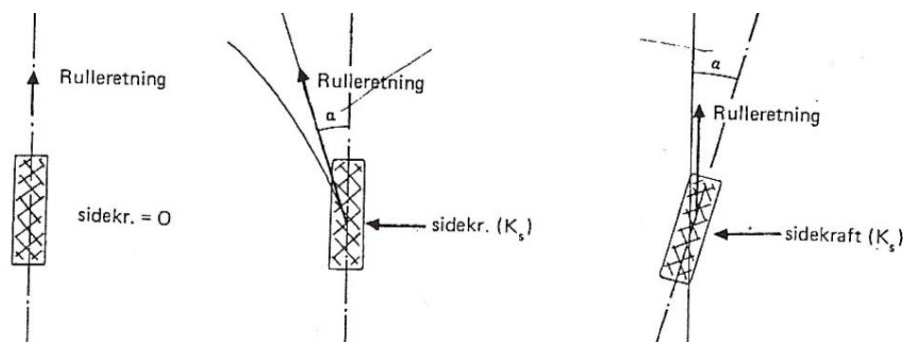
Figur 4.7: Figur av hvordan glidefriksjonskoeffisienten varierer med føre og kjørehastighet [42].

Den neste er rullefriksjonskoeffisient for overføring av krefter i hjulets lengderetning, μ_R . Det som ligger til grunn for dette er at et rullende bilhjul alltid må ha en relativ bevegelse mellom gummiene i kontaktflaten og veien for å kunne overføre krefter. Det vil si at ved fremdrift på en fast vei i moderat hastighet, vil drivhjulene kjøre noe lenger i omkrets, enn det kjøretøyet drives frem. Dette kalles slipp, λ , og defineres som at hjulet har større hastighet enn kjøretøyet og kan beregnes gjennom formelen under, der v_{hjul} er hjulets hastighet og v_{kjt} er kjøretøyets hastighet:

$$\lambda(\%) = \frac{(v_{hjul} - v_{kjt}) * 100}{v_{hjul}}$$

Ved bremsing blir hjulets hastighet lavere enn kjøretøyets og dermed bytter v_{hjul} ut med v_{kjt} i formelen, og motsatt. Ved blokkering av hjul i en fremover bevegelse vil slipp være på 100%. Men om hjulet ruller fritt er slipp på 0%. Bilhjul kan ikke overføre krefter til veibanen uten slipp og derfor er dette viktig å ha med. Ved samme krafttilførsel er slippet større på en fuktig vei enn på en tørr. Det samme gjelder for en ujevn vei sammenliknet med en jevn vei. Rullefriksjonstallet endrer seg med slippet og avhenger av forskjellige føreforhold. Rullefriksjonstallet øker når slippet endrer seg fra 10-20% og det er da hjulet kan overføre maksimale driv- og bremsekrefter.

Den tredje og siste av friksjonskoeffisientene er rullefriksjonskoeffisient for overføring av sideveiskrefter, μ_{RS} . Et hjul kan bare overføre sidekrefter når det ruller på skrå i forhold til bevegelsesretningen. Det vil si at hvis dekket ruller i den retningen det peker, så overføres ingen sidekrefter. Dette illustrere i figur 4.8 nedenfor.



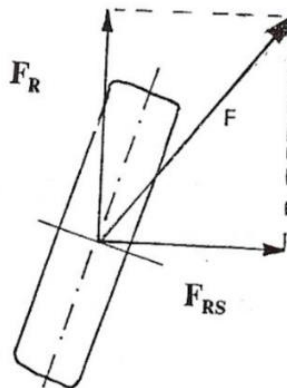
Figur 4.8: Illustrasjon av hvordan sidekrefter virker på et bilhjul [42].

Illustrasjon a) i Figur 4.8 viser et dekk som ikke blir usatt for sidekrefter og dermed ruller den retningen det peker. I illustrasjon b) blir dekket utsatt for sidekrefter og ruller derfor ikke lenger den retningen det peker, men i en vinkel i denne retningen. Illustrasjon c) viser hvordan dekket må rettes for å rulle i samme retning som i a) når det blir påført sidekrefter. Det får da en vinkel, α , mellom dekket og bevegelsesretning og pekeretning. Denne vinkelen kalles skråløpsvinkelen, en vinkel som er svært viktig for å klare å holde kursen i en sving.

Når en kjører i en kurve vil sentrifugalkrefter som angriper kjøretøyets tyngdepunkt, utsette alle hjulene for sidekrefter. Dermed er det behov for en skråløpsvinkel for å klare å holde kursen gjennom kurven. Når skråløpsvinkelen øker, øker også rullefriksjonstallet i sideretning. Dette gjør at muligheten for å overføre sidekrefter også øker. Rullefriksjonskoeffisienten for overføring av sidekrefter defineres som:

$$\mu_{RS} = f = \frac{F_{RS}}{G}$$

F_{RS} er sidekraften drivhjulet blir utsatt for under kjøring i kurve. I tillegg oppstår en drivkraft eller bremsekraft, F_R . Når både sidekraften og drivkraften virker på hjulet, må hjulet overføre en kraft som er større enn hver av komponentene, F . Kraftenes virkeretning er illustrert i figur 4.9.



Figur 4.9: Skisse av resultantkraften på et hjul når både bremsekraft F_R og sidekraft F_{RS} , virker på det [42].

Ved å benytte Pytagoras sin læresetning, kan F beregnes ved $F^2 = F_R^2 + F_{RS}^2$. Siden normalkreftene er de samme i alle ledd, kan dette forenkles til $\mu_{RR}^2 = \mu_R^2 + \mu_{RS}^2$.

4.1.2 Luftmotstand og form

Luftmotstand og aerodynamisk utforminger har blitt utredet i flere av de tidligere gradsoppgavene, men er et så sentralt område for utforming av kupéen, at det er hensiktsmessig å oppsummere det her.

Det viktigste for dette prosjektet er å kartlegge luftmotstanden som oppstår og hvilken geometri som gir lavest motstand. Denne motstanden heter «drag» kraften, men er også kjent som luftmotstand, og viser til hvordan luft flyter over og rundt emner i fast form, eksterne strømming.

Når en snakker om flyt er det to hovedkategorier, laminærflyt og turbulent, der laminære strømminger består av rette linjer som flyter i samme retning over et emne, mens de turbulente strømmingene går om hverandre i kaos og uorden. Det ønskelige er å få laminære strømminger rundt kjøretøyet [43].

Det er ofte for avansert å beregne den eksterne flyten for hånd, og det er derfor behov for avanserte dataprogram for å kjøre en analyse og få et estimat på riktig verdi. For å få nøyaktige verdier blir det kjørt tester i vindtunneler der drag og lift blir målt, men estimer for grunngeometrien kan bli enkelt utføres.

Drag

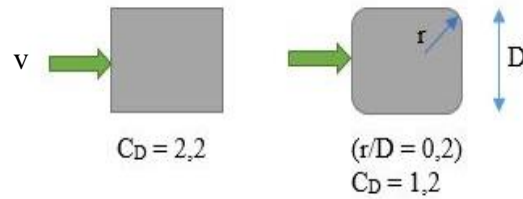
Det er almen kunnskap at det oppstår motstand når et objekt beveges gjennom et fluid, spesielt en væske. Fra man er barn har man gått i vann og merket at det er mye tyngre enn å gå i luft. Etter kraftig vind er det normalt å se veltede trær. Disse fenomenene er på grunn av drag-kraft. Drag-kraften er kraften et strømmende fluid utøver på et emne i flyt-retningen. Drag er ofte uønsket, slik som friksjon, og det er derfor ønskelig å minimere den så langt det lar seg gjøre. For kjøretøy er drag-kraften assosiert med drivstofforbruket og redusert drag fører til redusert forbruk.

På stasjonære objekter er drag-kreftene alltid kun normal trykkraft, men for objekter i bevegelse, slik som kjøretøy, oppstår også en tangentiell skjærkraft på overflaten på grunn av no-slip tilstand som forårsakes av viskositet.

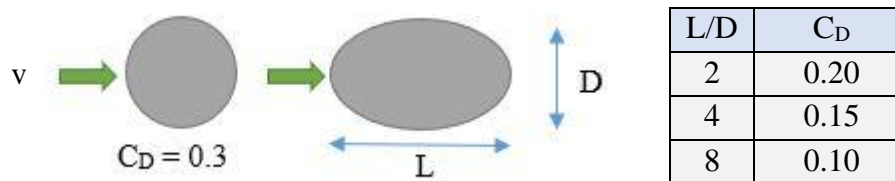
Drag-kraften avhenger av komponenter som massetettheten til fluidet, ρ , upstream hastigheten, V , og størrelsen, formen og plasseringen til emnet, i tillegg til flere faktorer, men det er ikke fornuftig å ramse opp disse kreftene for alle de ulike scenarioene. Det er da lettere å benytte dimensjonsfrie tall som representerer drag på emnets kropp. Dette tallene er drag-koeffisient C_D og defineres slik:

$$C_D = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho_L v^2 A}$$

Det er ønskelig med en så lav drag-koeffisient som mulig, for det viser til at fluider lett kan strømme over og rundt objektet og at motstandskraften er lav. I formelen over er «A» frontarealet til emnet. Drag-koeffisienten er primært en funksjon av formen til emnet og geometrien er derfor svært sentral ved beregning av drag-kraften [43]. For å få et innblikk i hvor stor drag-koeffisienten er for ulike geometriske former, er noen grunnformer illustrert under i figur 4.10 og 4.11.



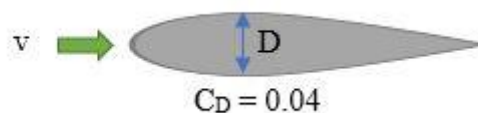
Figur 4.10: Figuren illustrerer hvilken drag-koeffisient som oppstår når emnene blir truffet av en horisontal strøm. Til venstre vises et kvadrat med skarpe hjørner. Til høyre er hjørnene avrundet med radius, r .



Figur 4.11: Figuren illustrerer drag-koeffisienten som oppstår når runde objektet utsettes for en horisontal strøm. En rundt kule, t.v., har betydelig mye høyere drag enn en ellipse t.h., som er kortere, D , enn den er lang, L .

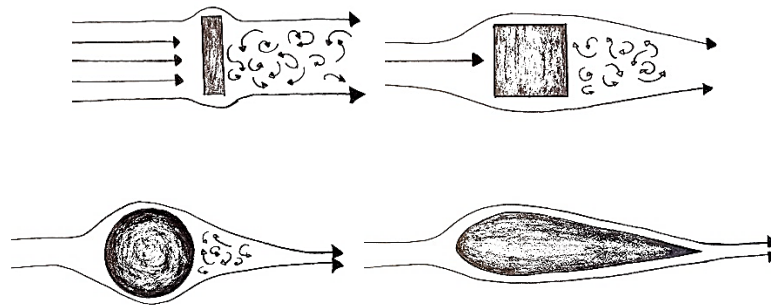
Fra figurene over kommer det frem at de avrundede formene som ellipser, har lavere drag-koeffisient enn de med harde kanter, slik som firkanter. Et kvadrat med spisse hjørner har nesten dobbelt så høy drag som et kvadrat med avrundede hjørner, avhengig av radiusen på hjørnene.

Den optimale formen for å minimere drag-koeffisienten er en strømlinjet form. Den skal ha et tverrsnittsareal $A = \pi D^2/4$, og se ut som figur 4.12 under.



Figur 4.12: Figuren viser et strømlinjet objekt som blir utsatt for en horisontal kraft. Drag-koeffisienten for en slik form er svært lav.

Grunnen til at strømlinjede former får så mye lavere drag-koeffisient og da også mye lavere luftmotstand, er på grunn av måten fluider beveger seg rundt den. I figur 4.13 under er ulike geometriske former omringet av en luftstrøm, satt ved siden av hverandre for å sammenlikne hvordan fluider strømmet rundt dem.



Figur 4.13: Figuren illustrerer hvordan et fluid, som for eksempel luft, strømmer rundt fire ulike formen. Luften strømmer fra venstre til høyre. Oppe til venstre er en flat plate, oppe til høyre er en boks, nede til venstre er en kule og nede til høyre er et strømlinjet objekt. Bak platen blir luftstrømmen svært turbulent, mens bak det strømlinjede objektet er det nesten ikke turbulent i det hele tatt.

Det er lett å se at for disk og flate emner, oppstår det en svært turbulent strøm på baksiden av emnet, mens for strømlinjede emner flyter fluiden mye lettere rundt, og turbulens unngås.

For kjøretøy er det normalt at drag-koeffisienten varierer mellom 1.0 for store semitrailers, til 0.4 for minivaner og 0.3 for passasjerbiler. Den ideelle formen på kjøretøy er dråpeform, som har en drag-koeffisient bra bare 0.1 under turbulent luftstrøm, men det er ikke realistisk å utvikle en slik bil. Formen må modifiseres for å få inn nødvendige komponenter slik som hjul, sidespeil og akslinger. I tillegg må kjøretøyet ha en viss høyde for at det skal være behagelig for brukeren, ha en klaring fra veien, og den må passe i parkeringslommer. Kjøretøyet kan derfor ikke være for langt. Resultatet er at de fleste biler likner mer på bokser enn på dråper. I racerbiler er drag-koeffisienten nede på omtrentlig 0.2, og dette kommer av at passasjerens velvære er et sekundærbehov, siden hovedbehovet for slike biler er å kjøre så fort som mulig.

Passasjerdroner

I ulike transportmiddel, spesielt for fly, helikopter og droner, kan man tydelig se at designet av kupéen er tilnærmet dråpeformet, og har en fasong slik at de får lav drag-koeffisient. I Volocopter 2X [44] ser man at kupeen har et dråpeformet design. Den er litt høy og spissere foran enn bak, noe som ikke er optimalt for aerodynamikken, men mer enn godt nok.



Figur 4.14: Prototype av Volocopter 2 [44].

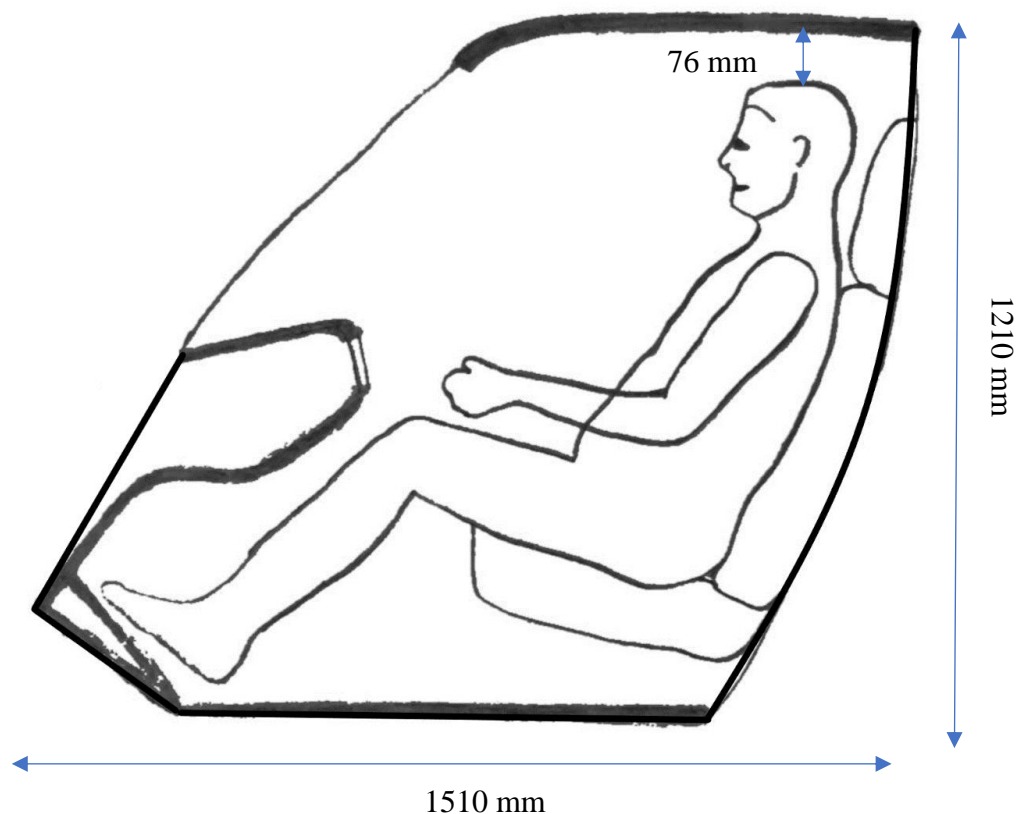
Til sammenlikning har Ehang en fin linjeføring over kupeen, som gjør at luften strømmen fint langs den [45]. Den er ganske butt bak, noe som vil forhindre optimal luftstrøm. Men det er lett å se at det har vært et fokusområde å få en lav luftmotstand da kupeen ble designet.



Figur 4.15: Rendert bilde av Ehang [45].

4.1.3 Ergonomi

En ergonomisk utforming i kupéen er viktig for å skape en god brukeropplevelse. Det skal være behagelig å kjøre Dolphin og det skal være god sikt for sjåføren. I flere tidligere gradsprosjekter har det vært stort fokus på ergonomi, og det er derfor ikke nødvendig å utføre en grundig ergonomistudie siden innsiden av kupéen ikke er i fokuset i prosjektet. Det er nødvendig å kartlegge hvor stor kupéen må være for at det skal være behagelig for både kvinner og menn å sitte i den. Figur 4.16 nedenfor viser de viktigste målene for å kunne dimensjonere en tilstrekkelig kupé [46].



Figur 4.16: Ytterdimensjonene som er ergonomisk anbefalt for kabiner, slik at 99-prosentil-mannen sitter komfortabelt [46].

Kupestørrelsen er dimensjonert slik at en 99-prosentil-mann skal kunne sitte godt i den. Kvinner er normalt mindre enn menn, så en kupé med behagelig størrelse for en mann, vil også være komfortabel for en kvinne.

4.2 Teknologitredning

Det eksisterer en enorm mengde ulike teknologi per dags dato. Det er ikke noe poeng å oppfinne hjulet på nytt, og det samme gjelder for flere aktuelle komponenter. Derfor blir ulike teknologiske løsninger rundt rammedesign, koplingsmekanismer og styringssystemer utredet.

4.2.1 Rammedesign

God kontroll under styring av bilen krever en tilfredsstillende stivhet i chassiset [47]. Det vil si at rammestruktur eller kroppen, må være robust og stiv nok til å motstå og motvirke bøyning og rotasjon. Dette gjelder både for rammen til understellet og for rammen til kupéen. For å oppnå dette kreves noen få grunnleggende designelementer.

For å oppnå lett vekt i tillegg til et stabilt chassis er det vanlig å benytte rør eller profiler. Rørene kan sammenstilles på mange ulike måter, med ulik geometri som vil gi ulike egenskaper. Den grunnleggende geometrien for å oppnå stive konstruksjoner, er trekanten. Dens form og dimensjoner endrer seg i liten grad, med mindre ett av bena knekker. I motsetning, vil en firkantet ramme gi dårlig stivhet. Den vil bøye seg diagonalt ved lave laster. For å stive av firkanter kan et stag settes inn i diagonalen. Da dannes to trekanten inne i rektangelet, slik figur 4.17 viser.



Figur 4.17: Figuren viser de grunnleggende geometriene som er å finne i rammedesign. Til venstre er en trekantramme, i midten en firkant og til høyre er en firkant med et stag i midten som stiver av strukturen.

Et av prosjektmålene er at kjøretøyet skal være lett og det er derfor fornuftig å undersøke ulike lette rammer. Rørkonstruksjoner er det enkelt å få sterke og samtidig lette. Figur 4.18 viser en Trike sin rørramme [48]. Den består kun av noen få stag, med støttestag mellom for å stive av. Rammens utforming og geometri er svært enkel med tydelige firkanter og trekantformer, og dette er et eksempel på en enkel, lett og samtidig god rørramme. Et annet eksempel på en enkel, men god rammen, er rammen til en go-cart [49]. Rammen trenger ikke være kompleks for å gi et tilfredsstillende resultat. Denne rammen består kun av noe få rør som er bøyd. Den er noe spissere i front enn bak for å få inn noen av trekantens egenskaper i en firkantet ramme.



Figur 4.18: Rørrammen til en Trike [48].

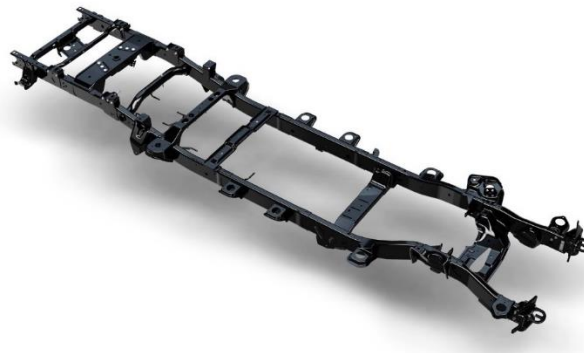


Figur 4.19: Rammen til en go-cart [49].

Understell:

Det finnes forskjellige rammevarianter som tilfredsstillende ulike behov. En understellsramme kan bestå av rør, profiler og eller plater, og hver variant har sine fordeler og utfordringer.

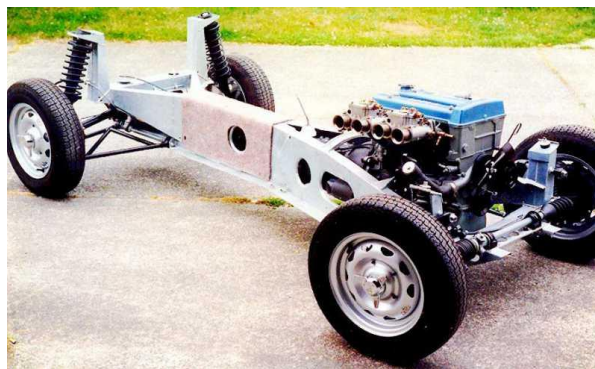
Innenfor bildesign er det grovt sett fire typer rammevarianter. Det er Ladder Frame, Backbone frame, Monocoque og Plattform [47]. Den enkleste varianten er «Ladder frame», stigeramme, som består av to rammeskiner, «frame rails», som koples sammen av to tverrbjelker. Rammestrukturen blir brukt i mange biler fordi den er lett å bygge i tillegg til at rammene har god bjelkestivhet. Ulempen er dårlig torsjonsstivhet, som fører til lyder og vibrasjon fra rammen.



Figur 4.20: Eksempel på en «ladder frame» [50].

For å forbedre en «ladder frame» og gjøre den stivere, kan en «roller cage» legges til, en rammekonstruksjon som går rundt og over kupéen. Det er ikke alltid det hjelper, men ved riktig plassering av stagene, kan det ha en stor virkning på torsjonsstivheten. Det er mange ulike metoder for å bygge roller cage, og den mest sentrale blir gjort rede for litt lenger nede, under «Kupé».

En annen rammevariant er «Backbone Frame». Dette er en rammevariant som er utviklet for å stive av rammen, og blir brukt i de originale Volkswagen bilene. Denne rammen egner seg i to til firepassasjers biler. I rammen er en lang tunell i midten som gjør den svært stiv samtidig som den er lett. En slik ramme har omtrent en sjettedel av deformasjonen som kan oppstå i en «Ladder frame». Rammen er ikke egnet for alle type biler, siden tunellen i midten krever plass og det påvirker seteoppsettet i kupeen.



Figur 4.21: Eksempel på et backbone chassis [51].

Monocoque rammer ble originalt brukt i skip og fly. På fransk betyr Monocoque «enkelt skjell» og det kommer godt frem i rammens utforming. Den virker som et skall for hele bilen med et chassis som går tangs taket og bunnen, i en enkelt konstruksjon, slik figur 4.22 viser. Konstruksjonen er tryggere enn de to rammene nevnt over, siden den har effekten til et bur. Den er lett å utføre reparasjoner på og har svært god torsjonsstivhet. Til gjengjeld er konstruksjonen tung.



Figur 4.22: Eksempel på en monocoque ramme [52].

Den siste rammestrukturen som skal nevnes er «plattform». Denne strukturen har blitt mer vanlig med elbilenes markedsvekst, for å få plass til det store batteriet. Rammen er bygget opp av en flat bunnplate med full bredde og som oftest festes mellom hjulene, slik figur 4.23 viser.



Figur 4.23: Eksempel på en plattform ramme [53].

Kupé

I tradisjonelle biler er ofte rammedesignet til kupéen det som kalles «roller cage», og sitter fast i understellets chassis. Det er mulig å benytte flere av prinsippene nevnt ovenfor, i rammekonstruksjonen av kupéen. Siden monocoque strukturen først ble tatt i bruk i fly, kan dette være en mulighet også i kupéen. Det som er viktig er at kupéen er avstivet slik at den er trygg å sitte i og tåler lasten av dronemodulen på toppen, kjøremotstanden, og sin egen tyngde med passasjerer. Den er nødt til å være lett i vekt.

Racerbiler har ofte en rørkonstruksjon langs taket og sidene. Dette er for å beskytte passasjerer om bilen skulle rulle rundt. Det kan være fornuftig å undersøke liknende løsninger for Dolphin sin kupe.



Figur 4.24: Et eksempel på rammekonstruksjoner i racerbiler. Her er flere trekkanter satt sammen for at danne et «bur» over førersetet og beskytte sjåføren [54].

4.2.2 Eksisterende koplingsmekanismer

Et viktig fokus i prosjektet er å kople sammen modulene på en trygg og fornuftig måte. Hovedhensikten med koplinger er å feste sammen to komponenter, overføre torsjonsmoment, fange opp støtbelastninger, kompensere for elastisk deformasjon og kunne kople moduler inn og ut [11]. For å feste modulene er det viktigste å holde komponentene sammen, og det finnes mange ulike koplingsmetoder, og for å finne den som egner seg best for Dolphin er ulike koplingsmekanismer utredet. Generelle krav til koplinger er at de skal være lette å montere/demontere, utstikkende deler skal unngås, størrelsen og vekten skal være lav og koplinger som kan koples inn og ut, må være lette å betjene og ikke kreve stor betjeningskraft. Det er tre hovedtyper av koplinger:

- Løsbare koplinger
- Faste koplinger
- Fleksible koplinger

Av disse er det kun de løsbare som er relevante for dette prosjektet, siden modulene skal ha fleksibiliteten til å ofte koples sammen og fra hverandre. Det er tre typer løsbare koplinger:

- Mekanisk løsbare koplinger
- Hydraulisk løsbare koplinger
- Elektromagnetisk løsbare koplinger

I kjøretøy er det til krav om at det skal være mekaniske koplinger.

Klokoping

En av de vanligste mekanisk løsbare koplignene er Klokopling. I Pop.Up benyttes klokopling både mellom understellmodulen og kupéen og mellom kupéen og dronemodulen. Den har totalt

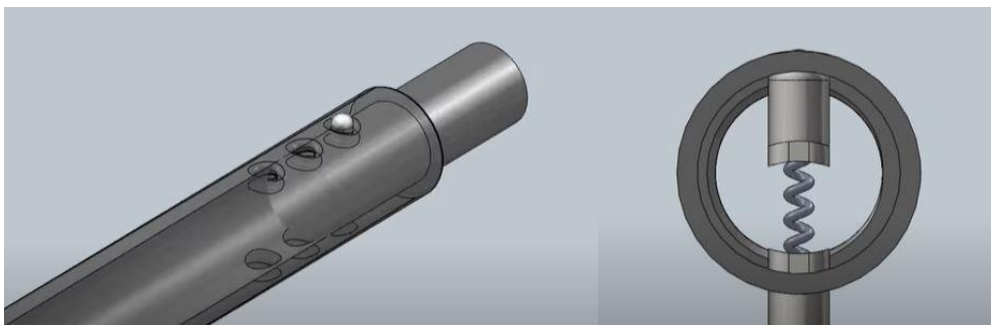
tre klokplinger mellom hver modul, og når dronen senkes ned på kupéen, hektes hver klo inn i hverandre, den ene roterer og slik låses de.



Figur 4.25: Et eksempel på en klokplinger, i dette tilfellet er det koplingen mellom dronemodulen og kupéen til Pop.Up [55].

Indre klemme

En annen metode å kople rammen to komponenter på er gjennom en indre klemme mekanisme. Dette er en vanlig mekanikk i krykker og paraplyer for å låse en posisjon.



Figur 4.26: Et eksempel på en lås med indre klemme [56].

Eksempelet i figur 4.26 viser en sammenlåsing av to rør ved bruk av to tapper og en fjær imellom. Den nederste tappen sitter fast, mens den øverste kan klemmes inn og gjør det da mulig å justere posisjonen til et av rørene.

Bonnet låsemekanisme

Dette er en låsemekanisme det er vanlig å bruke i bildører [57]. Når et objekt presser seg inn i sporet, vil platene bevege seg og fjærene gå i spenn. Når platene har åpnet seg opp så mye at objektet kommer ned i hullet, vil ikke lenger fjærene være i spenn, og de vil da få platene til å sprette opp til utgangsposisjonen og låse objektet inne.



Figur 4.27: Eksempel på bonnet lås som benyttes i bildører BMW 1, 3 og 5 seriene [57]. Til venstre vises den ovenfra og til høyre vises den underfra med to bevegelige plater som er låst inn i hverandre, og to fjærer for å holde på plass platene.

4.2.3 Eksisterende styringssystemer

Det er ikke bare relevant å undersøke koplingsmekanismer, men også hvordan småbilen kan styres. Hvilke styringssystemer er allerede å finne i kjøretøy som småbiler og andre fremkomstmidler.

Gaffelstyring

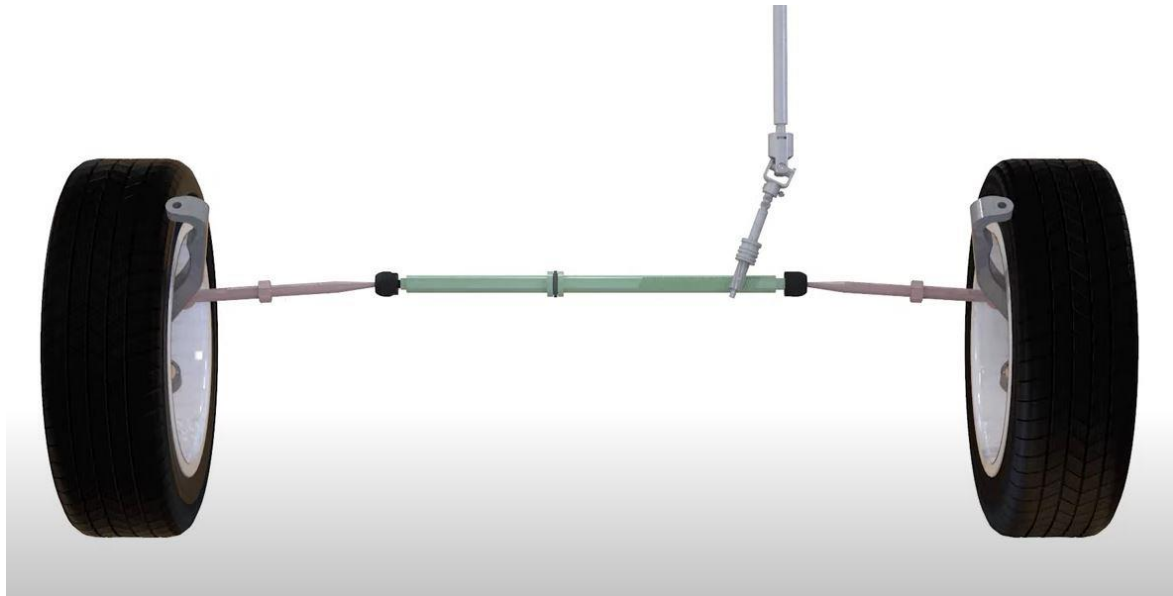
Det enkleste styringssystemet er gjennom direkte overføring av rotasjon, som med en enkel gaffelstyring som er å finne i både sykler og mopeder/motorsykler. Styret er koplet til hjulet gjennom en hylse som tillater rotasjon om z-aksen, og er deretter festet til hjulet med en «gaffel».



Figur 4.28: Illustrasjon av en sykkel med gaffelstyring. Hylsen er lilla, og gaffelen er sort over og under. [Eget foto av egen sykkel].

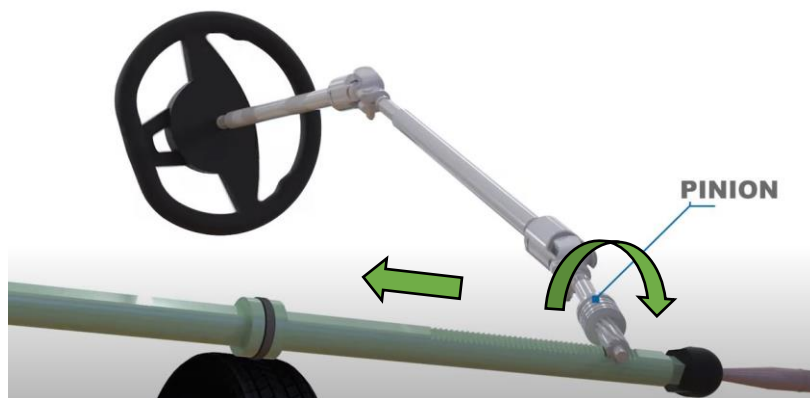
«Rack and Pinion»

Et annet eksempel på et vanlig styringssystem for biler kalles «Rack and pinion» styring [58].



Figur 4.29: Illustrasjon av rack and pinion styring, der «raketten» er farget i grønn og «pinionen» som er festet til rattet, er farget i grå [58].

Når rattet dreies, vil «pinionen» rotere samme retning. Den vil da bevege seg langs racken. Pinionen har kun mulighet til å rotere, og det er dermed racken som flytter seg i det horisontale planet, slik figur 4.30 viser.



Figur 4.30: Illustrasjon av hvordan pinionen og racken beveger seg med hverandre. Når pinionen roterer med klokka, vil racken bevege seg mot venstre [58].

Racken er festet til begge hjulene gjennom ledd, og når den flytter på seg, vil hjulene dreies og da få en vinkel, slik figur 4.31 viser. Da vil bilen svinge i ønsket retning.



Figur 4.31: Illustrasjon med piler som viser at når racken dras mot venstre, dras nedre del av hjulet samme vei, som resulterer i at hjulet dreies utover. Det motsatte vil skje med hjulet som står på andre siden av racken [58].

Det er mange flere kjøretøysrammer, koplingsmekanismer og styringssystem som finnes, men dette er de som er valgt ut som de mest relevante for dette prosjektet og vil danne grunnlaget for konseptalternativene som utvikles i kapittel 6.

5 SPESIFISERING

I produktspesifiseringen skal rammene for produktets viktigste egenskaper kartlegges for å sikre riktige prioriteringer under senere utvikling, med tanke på produksjon og framtidige kundebehov. En metrisk grense- og grovspefisering for Dolphins dimensjoner skal defineres og legge grunnlaget for konseptutviklingen.

5.1 Produktmålsetting

Produktmålsettingene deles inn i to hovedkategorier, hovedmål og delmål. Hovedmålet beskriver det overordnede målet for produktet, mens delmålene er delt inn i de fem kategoriene som er av størst betydning under utviklingen av Dolphin.

Hovedmål:

Dolphin Sky skal tilfredsstillere behovet til produktets to kunder, Realtek og brukeren. Kjøretøyet skal gjøres til et modulprodukt som er lett å bygge, med fungerende sammenkoplinger og gode kjøreegenskaper både på bakken og i luften. Den skal ha en lav vekt for å begrense miljøpåvirkningen, og være trygg å bruke. Den skal utstyres med et styringssystem som er lett å produsere, sammenstille og manøvrere. Det utvendige designet skal være aerodynamisk, og kupeen skal ha en ergonomisk utforming.

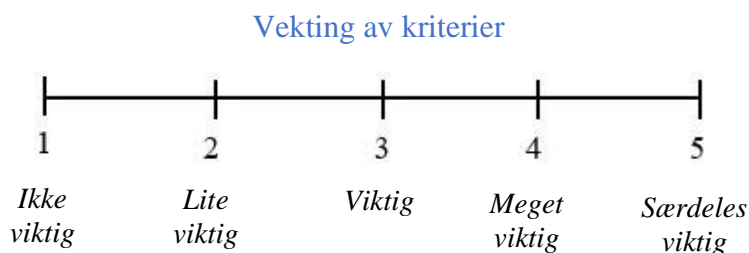
Delmål:

- **Teknisk:** Produktet må ha en teknisk god oppbygging med et lett understell og en god styringsmekanisme. Det skal være lett å kople sammen modulene, og likeledes å kople de fra hverandre.
- **Bruk:** Alle funksjoner på dronemodulen må være brukervennlige. Kjøretøyet skal være lett å kjøre og manøvrere, og ha intuitive funksjoner.
- **Økonomi:** For å redusere utviklings- og produksjonskostnader skal det utvikles et produkt av lav kompleksitet. Det er da en fordel med symmetriske deler og bruk av standardiserte komponenter.
- **Sikkerhet:** Det skal være trygt å bruke Dolphin både i luften og på bakken, og alle relevante komponenter skal være tilstrekkelig dimensjonert med fornuftig sikkerhetsfaktor.
- **Design:** Dolphin sitt design skal ha en aerodynamisk utforming for å oppnå en lav dragkoeffisient og unødvendig energiforbruk. Den skal ha et estetisk appellerende design og god ergonomisk utforming.

5.2 Rangering av viktige produktegenskaper

For å velge de viktigste produktegenskapene, benyttes delmålene definert ovenfor, og det defineres egenskaper som anses å være de viktigste for å oppnå målene. Kriteriene har ulik

viktighet og vektlegges dermed etter Pughs metodikk, etter en skala fra 1-5, der 5 er særdeles viktig og 1 er ikke viktig.



Figur 5.1: Skala for hvor viktig kriteriene anses å være.

Tabell 5.1 legger frem en oversikt over de mest sentrale kriteriene med tilhørende vekt og begrunnelse.

Tabell 5.1: Rangering og vekting av produktkriterienes viktighet. Vektingen er fra 1-5 og ved siden av er en tilhørende begrunnelse.

Delmål:	Kriterium:	Vekt:	Begrunnelse:
Teknisk	Vekt	4	For å sikre lavt energiforbruk og minimal miljøpåvirkningen, er det nødvendig at Dolphin sin vekt er lav.
	Styring	5	Et godt styringssystem påvirker hvor lett kjøretøyet manøvreres. Dette påvirker brukeropplevelsen, i tillegg til at styringssystemets kompleksitet påvirker produksjonskostnadene.
	Kopling av moduler	4	For å skape et fleksibelt kjøretøy er det en stor fordel at det er modulbasert. Modulene må enkelt kunne koples sammen og fra hverandre for å ha en hensikt.
Bruk	Kjøre-egenskaper	5	Det må være lett for forbrukeren å kjøre Dolphin for å skape en god brukeropplevelse, trygg ferdsel og god flyt på veien.
	Passasjerplass	2	For at flest mulig skal kunne bruke småbilen er det behov for mer enn et sete, men dette er ikke hovedfokuset.
	Størrelse	4	Siden Dolphin-konseptet dreier seg om å lage en småbil som er under halvparten av en vanlig bil er dette viktig for å ivareta hensikten med prosjektet.
Økonomi	Kompleksitet	3	Et enkelt produkt med få komponenter vil gi en billigere produksjon og det vil være lettere å utføre reparasjonen.
	Symmetri	2	Symmetriske deler er en fordel for en mer effektiv produksjon og lavere kostnader, men det er ikke avgjørende for et godt resultat.
Sikkerhet	Stabilitet	5	Dolphin må ha en utforming som gjør den stabil i veibanen. Det skal ikke være noen fare for at Dolphin tipper. Dette er for passasjerenes sikkerhet og for sikkerheten til trafikanter rundt.

Tabell 5.1: Forts.

Delmål:	Kriterium:	Vekt:	Begrunnelse:
Sikkerhet	Sikker sammenkøpling	5	Når modulene koples sammen er de nødt til å sitte godt slik at ingenting løsner i bevegelse eller skaper bekymring for passasjerene.
Design	Aerodynamikk	4	For å sikre en lav luftmotstand og unødvendig energiforbruk er det viktig at Dolphin har en aerodynamisk utforming.
	Ergonomi	4	For at brukeren skal sitte komfortabelt under ferdsel og ha god sikt og kontroll over veien eller luftrommet, er det viktig at kupeen har en ergonomisk utforming.
	Estetikk	3	Et estetisk appellerende produkt vil ha et større marked og flere kunder. Derfor er dette et viktig kriterium.

5.3 Metriske grensespesifikasjoner

De metriske grensespesifikasjonene danner en ramme for ekstremaldimensjonene til Dolphin Sky. Dermed etableres et avgrenset designrom, basert på realistiske mål kartlagt basert på krav til småbiler, jevnfør seksjon 1.2, ergonomistudie og målsettinger fra tidligere gradsoppgavene og vurderingen av eksisterende løsninger. De metriske grensespesifikasjonene inkluderer vekt og variasjonsbredde.

Forutsetning for grensespesifikasjonene er:

- Fra oppdragsbeskrivelsen, skal Dolphin Sky totalt veie 1/3-1/2 av vekten til en vanlig passasjerbil. Dette tilsvarer en vekt for de tre modulene inkludert hjul, batterier, motor og liknende, på omtrent 750 kg.
- Understellmodulen burde være noe lengre og bredere enn kupémodulen, for at kupéen skal få plass oppå den.
- Dronemodulen til Falstad skal festes på taket til kupéen. Diameteren til flaten som skal festes fast er 1119 mm. Kupéens tak må derfor være bredere enn dette.
- Dronemodulen til Falstad veier 125,6 kg, uten motor, propeller og fallskjermssystem.
- Hjulene trenger ikke være større enn mopedhjul, som varierer mellom 110/ - 130/70-70 hjul [59].
- Den minste tillatte vekten for kupé- og understellmodulen når kun de to er satt sammen, er 270 kg.
- Basert på oppgaven til Gisholt [26] er den totale vekten til motorer og batterier 110 kg.

Tabell 5.2: Oversikt over grensespesifikasjonene for kupémodulen.

Spesifikasjon:	Min:	Maks:	Foretrukket:	Enhet:
Lengde	1510	2700	-	mm
Høyde	1210	2500	-	mm
Bredde	900	1800	-	mm
Lengde fotstøtte [Aronsen]	380	500	-	mm
Høyde for nødutgang på fly [Aronsen]	790	-	815	mm
Bredde for nødutgang på fly [Aronsen]	560	-	610	mm

Tabell 5.3: Oversikt over grensespesifikasjonene for bakkemodulen.

Spesifikasjon:	Min:	Maks:	Gjennomsnitt:	Enhet:
Lengde	2510	3700	2928	mm
Høyde	500	2500	1142	mm
Bredde	1000	2000	1500	mm
Svingeradius	-	45°	-	-
Hjulbredde front	110	130	120	mm
Felgstørrelse front	12''	17''	14,5''	-
Hjulbredde bak	110	130	120	mm
Felgstørrelse bak	12''	17''	14,5''	-

5.4 Metriske grovspesifikasjoner

De metriske grovspesifikasjonene er en tidlig bestemmelse av dimensjonene til Dolphin Sky. Dette er en tidlig bestemmelse for å danne et inntrykk av hvilke dimensjoner som er aktuelle og hvordan de ulike komponentene forholder seg til hverandre. Grovspesifikasjonene vil gjøre det lettere å utvikle et konseptforslag og 3D-modeller, når hovedmålene er satt.

Grovspesifikasjonene er satt basert på grensespesifiseringen. Siden det ikke skal utføres videre arbeid på dronemodulen, vil konseptet til Falstad være det som implementeres i helhetskonseptet, og dimensjonene og vekten til konseptet er de som blir satt for dronemodulen.

Tabell 5.4: Oversikt over de satte metriske grovspesifikasjonene.

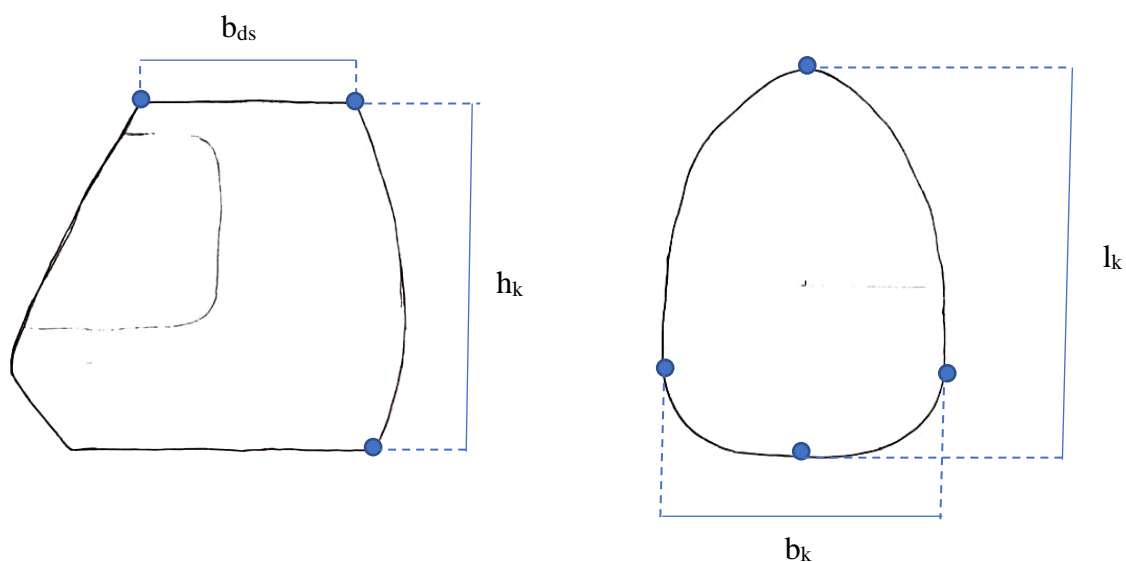
Indeks:	Spesifikasjon:	Dimensjon:	Enhet:
m_{tot}	Total vekt uten passasjer*	750	kg
m_u	Vekt understell	225	kg
m_k	Vekt kupé	200	kg
m_d	Vekt dronemodul (uten motorer, propeller og fallskjermssystem)	126	kg
l_k	Lengde kupé	1800	mm
b_k	Bredde kupé	1300	mm

Tabell 5.4: Forts.

Indeks:	Spesifikasjon:	Dimensjon:	Enhet:
h_k	Høyde kupé	1600	mm
l_u	Lengde understell	3000	mm
b_u	Bredde understell	1400	mm
h_u	Høyde understell	500	mm
	Hjuldimensjon front	120/70-12	
	Hjuldimensjon bak	120/70-12	
l_a	Akselavstand (Gisholt)	200	mm
l_{ds}	Lengde drone sammenfoldet	3514	mm
l_{du}	Lengde drone utstrakt	5287	mm
b_{ds}	Bredde drone sammenfoldet	1119	mm
b_{du}	Bredde drone utstrakt	5287	mm
h_d	Høyde drone	351	mm

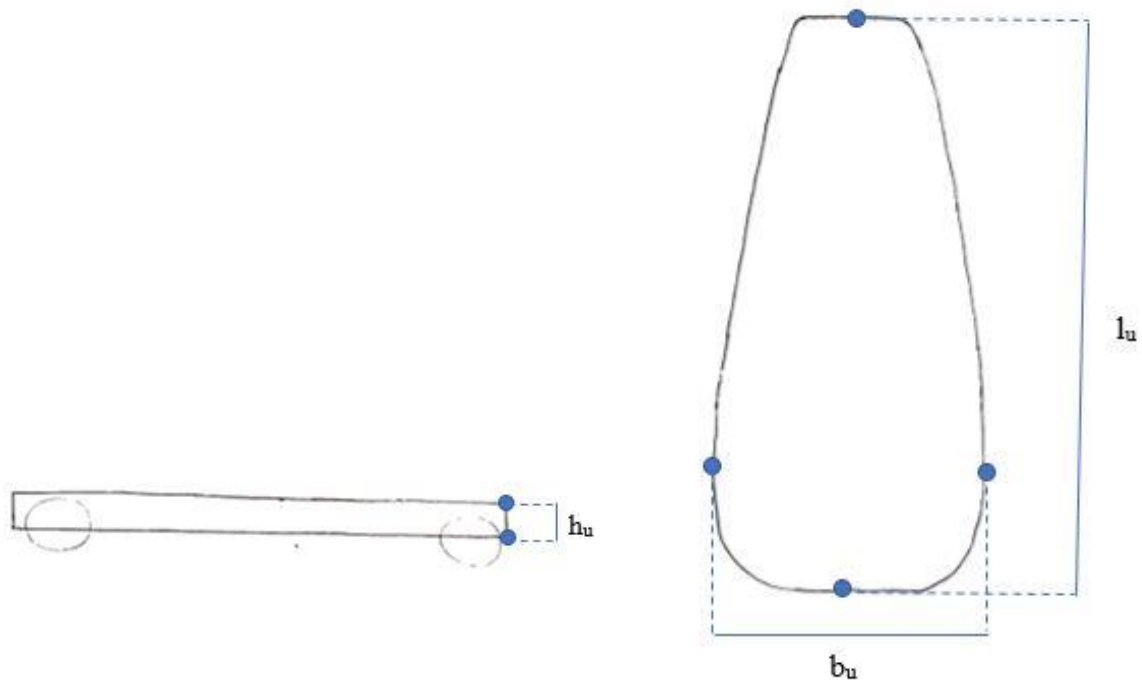
* På grunn av variasjon i tidligere arbeider benyttes en generell totalvekt der alle nødvendige komponenter er inkludert.

Kupémodulens grove mål:



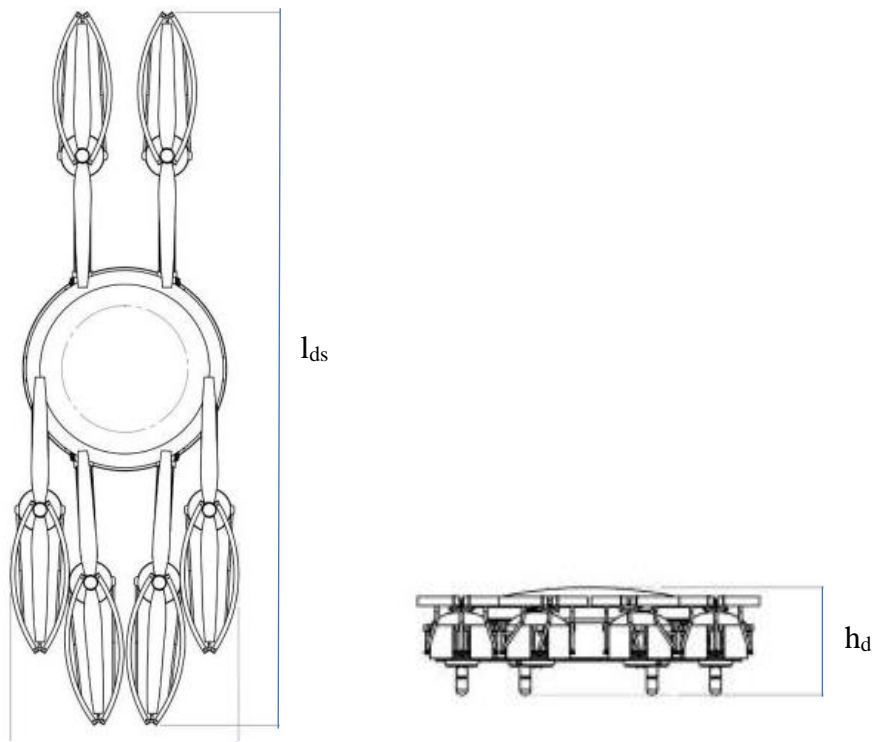
Figur 5.2: Målsatte figurer med symboler for kupémodulen fra siden til venstre og ovenfra til høyre.

Understellmodulens grove mål:

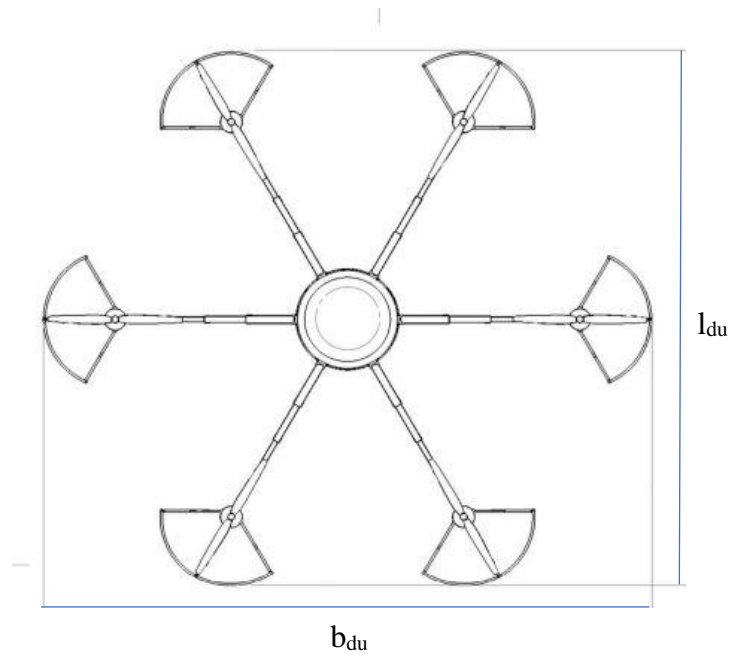


Figur 5.3: Målsatte figurer med symboler for understellmodulen fra siden til venstra og ovenfra til høyre.

Dronemodulens mål fra gradsprosjektet til Falstad:



Figur 5.4: Målsatte figurer med symboler for dronemodulen i bakkemodus. Til venstre sett ovenfra og til høyre sett fra siden [25].



Figur 5.5: Målsatte figur med symboler for dronemodulen til Falstad, sett ovenfra i svevemodus [25].

6 KONSEPTUTVIKLING

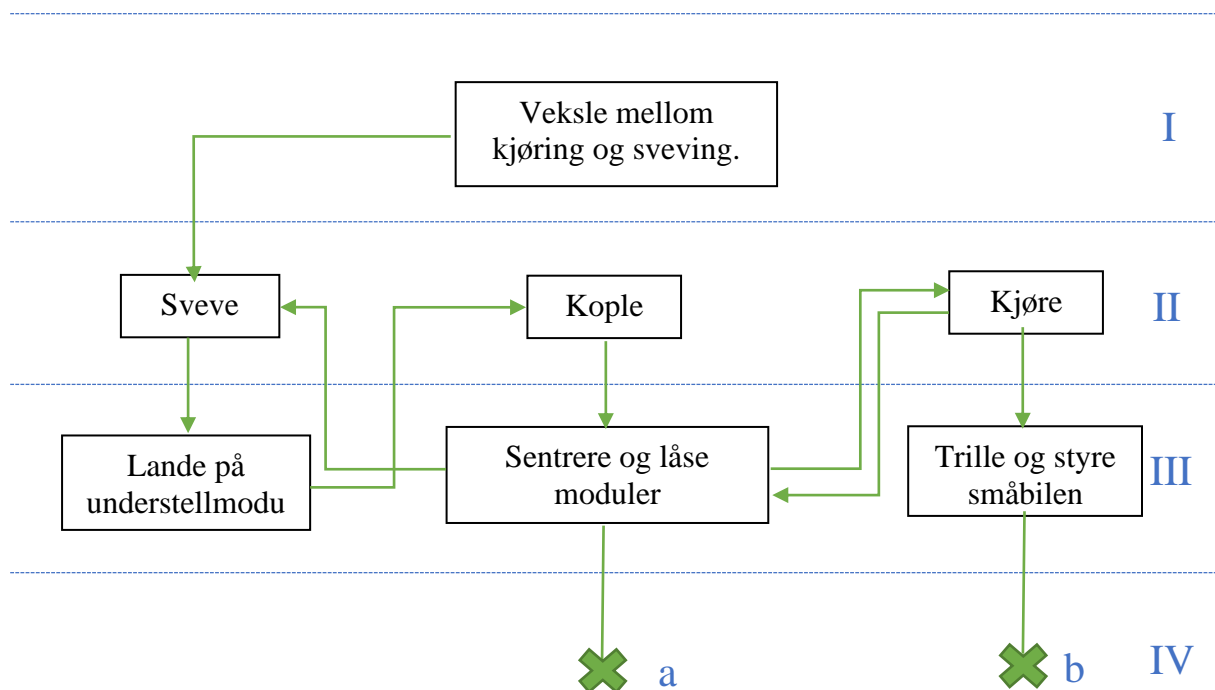
I konseptgenerering legges rammene til konseptet gjennom å analysere og vurdere ulike funksjonsalternativer. For å kunne oppnå produktmålsettingene, skal det utføres en funksjonsanalyse av de viktigste funksjonene på kjøre-, og koplingsystemet. Ideer rundt de ulike funksjonene skisseres og grunnberegninger utføres.

6.1 Funksjonsanalyse

Funksjonsanalysen tar utgangspunkt i produktets hovedmål og fremstiller en skjematisk oversikt over de nødvendige fokusområdene for å utvikle et tilfredsstillende helhetskonsept.

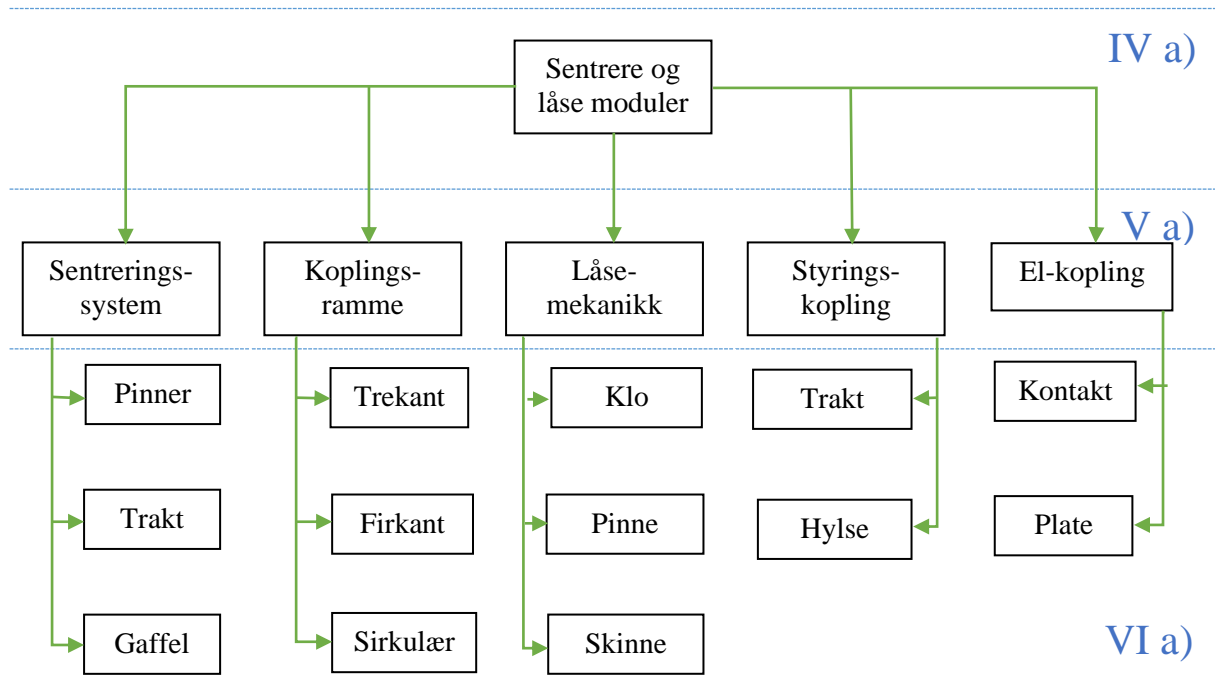
Funksjonsmålet til Dolphin Sky er:

Gjøre Dolphin Sky til et helhetlig modulprodukt som kan veksle mellom kjøring og sveiving.

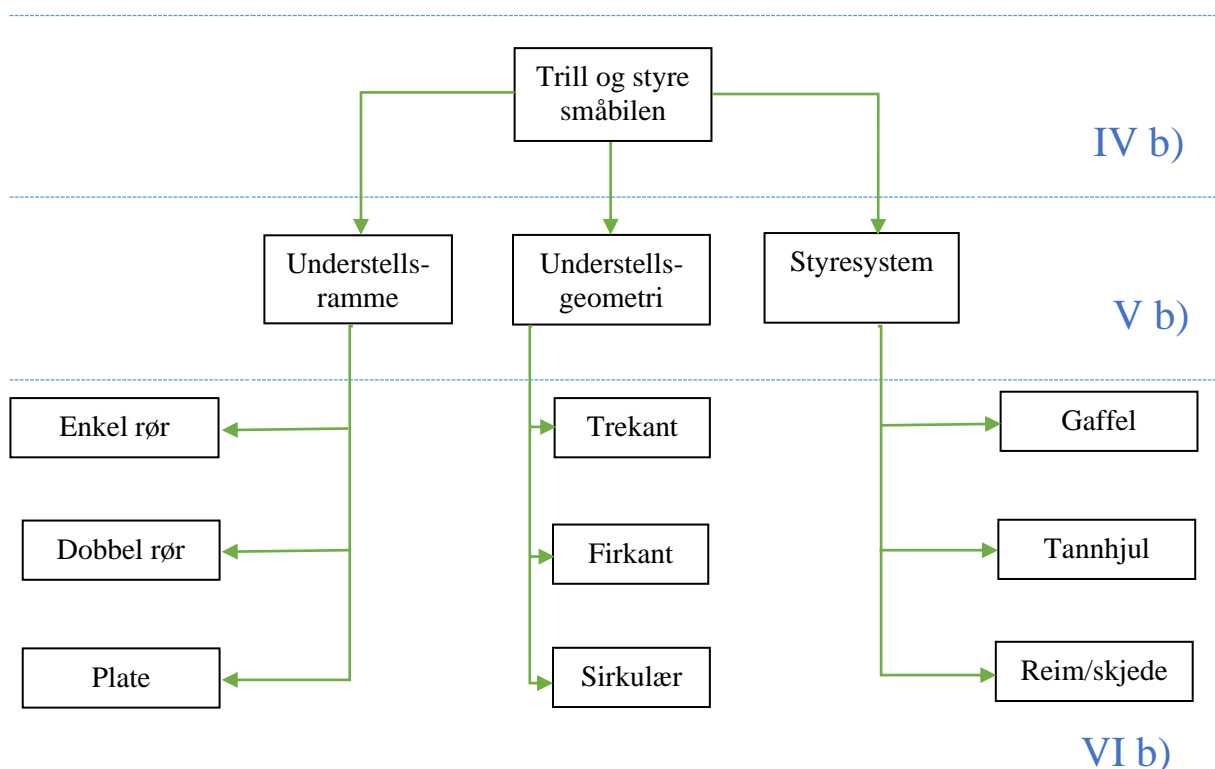


Figur 6.1: Funksjonsanalysen tar utgangspunkt i funksjonsmålet for produktet som skal utvikles, og definerer i nivå I primærfunksjonen til Dolphin Sky. I nivå II deles dette inn i tre sekundærfunksjoner for hvordan primærfunksjonen skal oppnås. Det nederste og III nivået er tertiærfunksjonene og er grunnlaget for videre funksjonsalternativer. De grønne x-ene viser at tabellen fortsetter, i nivå IV. Her blir funksjonsalternativ lagt frem, men det utføres i egne tabeller under, der elementene blir dekomponert.

På grunn av mange funksjonsalternativ, er funksjonsanalysen kappet av etter tertiærfunksjonene, og alternativene fortsetter på neste side i to tabeller, en for gren a) og en for gren b) i figur 6.1.



Figur 6.2: Figuren bygger videre på figur 6.1 og legger frem ulike funksjonsalternativ for å sentrere og låse moduler i Dolphin Sky. V a) viser de fem funksjonskomponentene som muliggjør IV a), og VI a) viser de mest sentrale alternativene på hver funksjonskomponent.



Figur 6.3: Figuren viser funksjonsalternativ for det som trengs for at Dolphin sky skal kunne trille og styres under kjøring. Dette er en videreføring av IV b) grenen. V b) viser de tre funksjonskomponentene som trengs og VI b) viser tre ulike alternativ for hver funksjonskomponent.

Figur 6.2 og 6.3 viser at det er mange funksjoner å velge mellom og mange muligheter for produktet. Alle funksjonene tas med videre til kapittel 6.2.


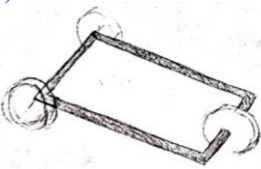
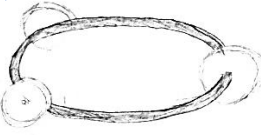
6.2 Funksjonsalternativer med skisser

Funksjonsanalysen over dannet grunnlaget for en idémyldring der mange ulike ideer for hver av funksjonene ble generert. Det var kun de mest sentrale funksjonene for dette gradsprosjektet som ble valgt og disse presenteres kategorisk i tabellene nedenfor, med forklarende skisser og en tilhørende beskrivelse.

6.2.1 Understellramme og -geometri

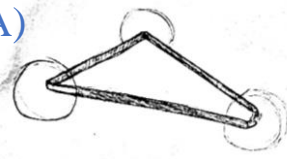
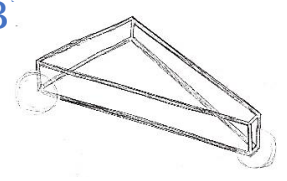
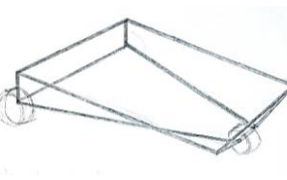

Understellet til Dolphin kan ha mange ulike former, og det hele bygger på den grunnleggende geometrien til rammen. I tabell 6.1 presenteres tre ulike forslag til rammens grunngeometri med tilhørende beskrivelse, fordeler og ulemper med geometrien.

Tabell 6.1: Under følger skisser for ulike geometri til understellets ramme, med beskrivelse, fordeler og ulemper.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
A) 	En trekantet understellramme der skråstag går frem til forhjulet.	<ul style="list-style-type: none"> • Enkel å sammenstille. • Tar opp krefter i x- og y-retning. • Lite torsjonsmoment 	<ul style="list-style-type: none"> • Mindre areal til nødvendig instrumentering. • Komplisert å bytte mellom Delta og Tadpole.
B) 	En rektangulær ramme for å utnytte plassen best mulig. Bakhjulene er plassert utenfor rammen, mens forhjulet står midt i rammen foran.	<ul style="list-style-type: none"> • Stort grunnflateareal kan gi mer plass til nødvendige funksjoner. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kan bli ustabil. • Det kan oppstå mye spenninger i hjørnene i front. • Tar ikke opp torsjonskrefter.
C) 	Oval ramme for understellet der forhjul er plassert i ramma, og bakhjulene er plassert utenfor.	<ul style="list-style-type: none"> • Lett å veksle mellom Delta og Tadpole. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mer komplisert produksjon. • Vil lettere deformeres og knekke når den allerede er buet.

Det er ikke bare hvilken geometri rammen har som er viktig, men også hvordan rammen bygges opp og hvilken struktur den har. I tabell 6.2 presenteres fire konseptalternativ for understellets rammestruktur med tilhørende beskrivelse, fordeler og ulemper med rammene.

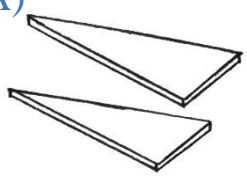
Tabell 6.2: Under følger skisser for rammestrukturer til understellet, med fordeler og ulemper.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
A) 	Enkel ramme, med kun ett lag med rør.	<ul style="list-style-type: none"> • Lett vekt. • Enkel produksjon 	<ul style="list-style-type: none"> • Utsatt for torsjon
B) 	En dobbel rørramme med lik geometri oppe og nede for å stive av rammen og forhindre torsjon.	<ul style="list-style-type: none"> • Konstruksjon som tar opp krefter i flere retninger. • Stiver av mot torsjon. 	<ul style="list-style-type: none"> • Høyere vekt. • Mer komplisert produksjon
C) 	En dobbeltramme med ulik geometri oppe og nede. Her med en trekant under og en firkant over.	<ul style="list-style-type: none"> • Stor fleksibilitet for å passe kapeens form. • Stiver av mot torsjon. • Kan ta opp krefter i flere retninger 	<ul style="list-style-type: none"> • Høyere vekt. • Komplisert produksjon.
D) 	En plateramme som plasseres mellom bakhjulene og over forhjulet.	<ul style="list-style-type: none"> • Enkelt å produsere. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utsatt for deformasjon. • Kan bli tungt.

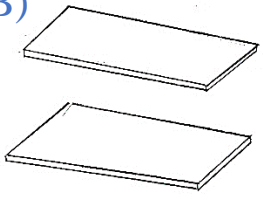
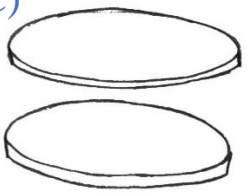
6.2.2 Koplingsplattform

For at modulene skal kunne koples sammen er de nødt til å ha koplingsplater mellom de to flatene som skal festes sammen. Det må være en plate på understellmodulens overside og på kapeens underside, og for at modulene skal sitte best mulig sammen burde koplingsplatene ha samme geometri. Tre løsningsforslag på geometrien er presentert i tabell 6.3 under.

Tabell 6.3: Under følger skisser av koplingsplater med ulik geometri med beskrivelse, fordeler og ulemper.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
A) 	En trekantet koplingsplattform. Den øverste er til bunnen av kapeen og den på bakken er til toppen av understellet.	<ul style="list-style-type: none"> • Lett å produsere. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utfordrende å få til Delta og Tadpole.

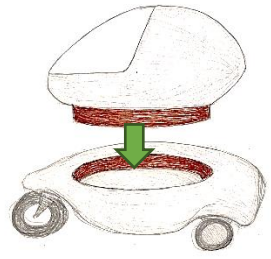
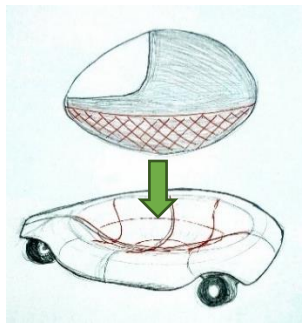
Tabell 6.3: Forts.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
B) 	En firkantet koplingsplate. Den øverste er til bunnen av kupeen og den på bakken er til toppen av understellet.	<ul style="list-style-type: none"> • Lett å produsere. • Lett å få til tadpole og deltavariant. • Mye plass til låsing. 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever mer plass. • Kan bli utfordrende å skape en dråpeform.
C) 	En oval koplingsplate. Den øverste er til bunnen av kupeen og den på bakken er til toppen av understellet.	<ul style="list-style-type: none"> • Lett å få til tadpole og deltavariant. 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever mer finesse under produksjon for å få like.

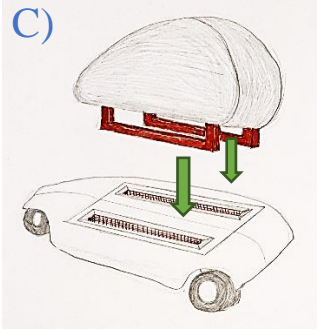
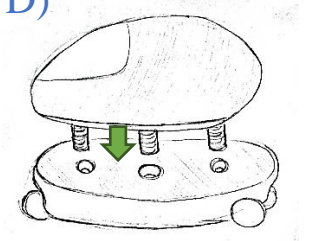
6.2.3 Sentreringssystem

For å kunne kople sammen kupémodulen og understellmodulen, er det behov for å sentrere kupéen i understellet. I tabell 6.4 undersøkes ulike funksjoner og utforminger for sentrering for å gjøre sammenkoplingen enklest mulig. De rødfargede områdene i skissene representerer koplingsflatene mellom kupe- og bakkemodulen.

Tabell 6.4: Forslag til koplingsfunksjoner mellom kupé- og understellmodul.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
A) 	Kupéen sentreres ved en oval trakt. På bunn av kupéen er det en ramme som stikker ned. Understellmodulen har en nedgående trakt av samme geometri, som kupéenes ramme passer ned i.	<ul style="list-style-type: none"> • Enkel løsning. • Mange muligheter for ulike låsemekanismer. 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever ekstra materiale på kupeen. • Kupéene vil få mer drag.
B) 	Kupémodulen senkes ned i en «vugge» på bunnmodulen. Tyngdekraften står for sentreringen. Når kupéen treffer bunn, er den sentrert på grunn av geometrien.	<ul style="list-style-type: none"> • Få komponenter • Stor frihet for form og design. • Lett å skape et aerodynamisk design på kupéen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fare for at kupéen lander skjeft. • Kupéen kan ikke lande på bakken uten understellmodulen.

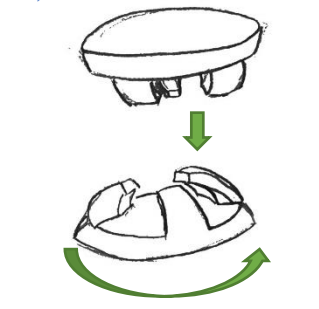
Tabell 6.4: Forts.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
C) 	På undersiden av kupéen er det «ben». På bakke-modulen er det hull/skinner som bena senkes ned i og blir låst fast. Når kupéen låses fast, står den sentrert der den skal.	<ul style="list-style-type: none"> • Beina under kupéen kan også benyttes til å lande under flyvning. • Enkel å låse fast. 	<ul style="list-style-type: none"> • Må klare å treffe hullene til beina i bakkemodulen for å oppnå sammenkopling. • Krever flere komponenter.
D) 	Pinner stikker ut under kupéene og ved sammenkopling går de ned i hull på bakkemoduler, der de låses fast. Når pinnene står rett over hullene, er kupéen sentrert.	<ul style="list-style-type: none"> • Enkelt å låse fast. 	<ul style="list-style-type: none"> • Risiko for at pinnene knekker eller deformeres. • Krevende å treffe hullene.

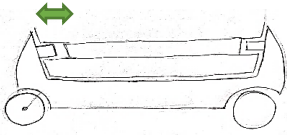
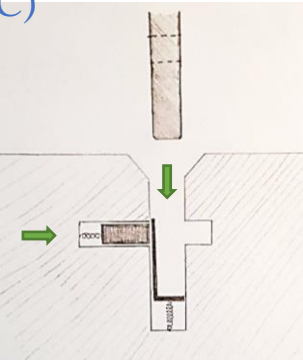
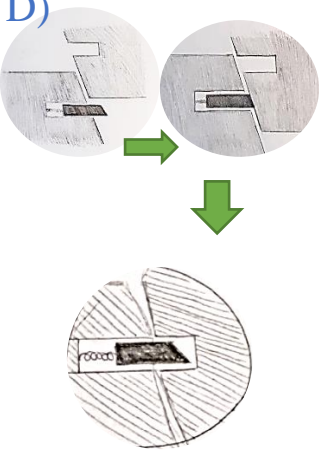
6.2.4 Låsemekanikk

Det er helt essensielt at modulene låses sammen. Det skal ikke være noen fare for at kupémodulen uønsket løsner fra bakkemodulen hverken stillestående eller i fart. Tabell 6.5 viser ulike forslag til låsemekanismer som er aktuelle for sammenkoplingen.

Tabell 6.5: Løsningsforslag til låsemekanikken mellom kupé- og understellmodul, med illustrasjon, beskrivelse og forklaring av fordeler og ulemper.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
A) 	Klokopling kan benyttes for å kople og låse sammen modulene. Den ene kloen roteres for å låse dem sammen.	<ul style="list-style-type: none"> • Brukervennlig • Etablert koplingsmetode. 	<ul style="list-style-type: none"> • Må få inn rotasjon for å oppnå låsing, som fører til økt kompleksitet.

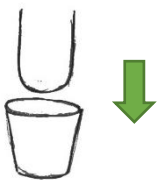
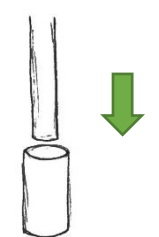
Tabell 6.5: Forts

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
<p>B)</p> 	<p>Kupéen har et spor inn på siden. Når den senkes ned i understellmodulen, kommer to skinner ut, en fra hver side, og går inn i kupeens spor og låser sammen modulene. Skinnene styres elektronisk.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Brukervennlig løsning. • Lett å kople til en sensor som varsler når modulene er låst sammen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever plass. • Kupéen er nødt til å formes slik at den går ned i understellmodulen.
<p>C)</p> 	<p>Modulene kan låses sammen ved at en pinne eller plate fra kupéen, stikkes ned i et spor på understellmodulen. Der nede er det en fjæret tapp. Når pinnen kommer nederst i sporet, går tappen ut og låser sammen modulene.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Veldig brukervennlig. • Enkelt å kople sammen modulene. • Lett å kople til en sensor som varsler når modulene er låst sammen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever presisjon å treffe hullene. • Fare for at pinnene knekker. • Krever flere komponenter.
<p>D)</p> 	<p>Tapper er festet langs kanten til understellmodulen. De dyttes inn når kupéen passerer, og hopper ut når kupéen er langt nok nede. Det er et spor i kupéen som de fester seg i og som låser sammen modulene.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Brukervennlig. • Enkel sammenkopling • Lett å få inn en sensor som melder fra om sammenkopling. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tappene kan knekke. • Kupeen er nødt til å formes slik at den går ned i bakke-modulen.

6.2.5 Styringskopling

Siden Dolphin er delt opp i moduler, må det være mulig å kople styringen sammen og fra hverandre, mellom kupé- og understellmodulen. Tabell 6.6 presenterer to konseptforslag til hvordan koplingen kan utføres med skisse av hvert forslag, beskrivelse, fordeler og ulemper.

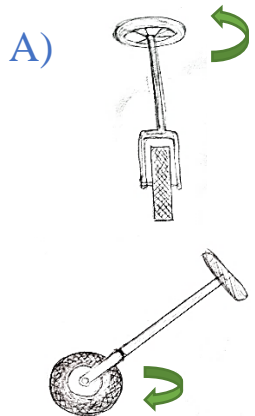
Tabell 6.6: Løsningsforslag til hvordan styringen kan overføres fra understellmodul til kupémodul, med illustrasjon, beskrivelse og forklaring av fordeler og ulemper.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
A) 	Styringsakselen koples til understellmodulen ved at den senkes ned i en trakt, og ned i understellets styringssystem.	<ul style="list-style-type: none"> • Lett å treffe åpningen i en trakt. • Brukervennlig. • Enkel løsning. 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever overflateareal i understellmodulen.
B) 	Styringsakselen koples til understellmodulen ved at den senkes ned i en hylse, og ned i understellets styringssystem.	<ul style="list-style-type: none"> • Krever lite overflateareal i understellmodulen. • Enkel løsning. • Lett å få inn spor på innsiden av hylsen som akselen festes i. 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever svært presis sentrering av kupéen på bakkemodulen, for at akselen skal treffe hylsen.

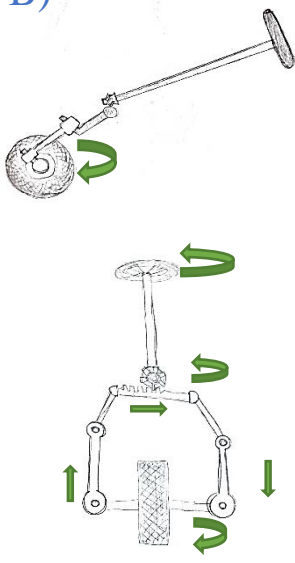
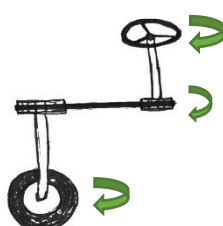
6.2.6 Styringssystem

For å kunne kjøre Dolphin, må den ha et fungerende styringssystem. I dette prosjektet er hovedfokuset å oppnå styring på fremre hjul. Tabell 6.7 viser ulike forslag til styring av forhjul.

Tabell 6.7: Løsningsforslag til styringssystem, med illustrasjon, beskrivelse og forklaring av fordeler og ulemper.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
A) 	Fronthjulet styres som en sykkel med manuell gaffelstyring. Når rattet roterer mot høyre, vil hjulet rotere til høyre også. Det er en enkel konstruksjon bestående av få komponenter, med en intuitiv funksjon.	<ul style="list-style-type: none"> • Enkelt konsept med intuitiv funksjon. • Få komponenter. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tungt å styre. • Styringen blir plassert langt fremme, som vil skape utfordringer i et småbilkonsept.

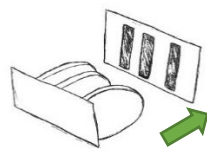
Tabell 6.7: Forts.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
<p>B)</p> 	<p>Rack and pinion styring, men nå er begge endene av racken festet til det samme hjulet, bare på hver sin side.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tannhjulet gir en utveksling mellom ratt og hjul. • Akselen mellom ratt og tannhjulet kan ha ulike vinkler og likevel få en rotasjon om z-aksen. • Et nesten helt likt system kan benyttes mellom bakhjulene for å styre dem også. 	<ul style="list-style-type: none"> • En kompleks løsning bestående av mange komponenter.
<p>C)</p> 	<p>En reim benyttes for å overføre rotasjon fra rattet og til fronthjulet. Reimen er mellom to tannhjul og går fra et lite til et stort for å få utveksling, samtidig som hjulet roterer samme vei som rattet.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Brukervennlig • Utveksling mellom tannhjulene gjør det lettere å svinge. 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever flere komponenter.

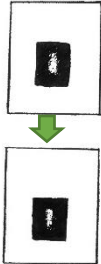
6.2.7 El-kopling

For at alle modulene skal kunne « snakke » sammen er det behov for å koble sammen elektronikken. El-koplinger kommer i ulike varianter og former og dermed er to grunnleggende konseptalternativ presentert i tabell 6.8, under, med illustrasjon, beskrivelse og fordeler og ulemper.

Tabell 6.8: Løsningsforslag på el-kopling mellom kupé- og understellemodul, med illustrasjon, beskrivelse og forklaring av fordeler og ulemper.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
<p>A)</p> 	<p>Kontaktkopling. Den ene modulen har « hann »-delen, og den andre har « hunn »-delen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tradisjonell måte. • En sikker og pålitelig kopling 	<ul style="list-style-type: none"> • Krever presisjon ved sammenkopling • Utstikkerne kan bli deformert.

Tabell 6.8: Forts.

Figur:	Beskrivelse:	Fordeler:	Ulemper:
B) 	To plater kan brukes for å overføre strøm. Når platene er inntil hverandre overføres strøm mellom dem.	<ul style="list-style-type: none"> • Enkel løsning. • Bruker-vennlig. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ikke like pålitelig.

De ulike funksjonsalternativene vil bli scoret etter Pughs seleksjonsmatrise i kapittel 7 og de mest egnede funksjonene for konseptet vil blir valgt ut til videre utvikling.

6.3 Form- og estetikkalternativer

I produktspesifikasjonen ble det kartlagt at et ergonomisk og estetisk appellerende design er viktig under utformingen av Dolphin, for at kjøretøyet skal appellere til brukeren, for å sikre behag under kjøring og for å minimere luftmotstand. Både Birkelund og Aronsen gjorde et grundig arbeid for å sikre kundetilfredshet når det gjaldt designet, men begge hadde områder for videre arbeid og det er disse områdene det er ønske om å forbedre i gradsprosjektet.

Det er to mulige retninger innen valg av former, organiske og uorganiske (mineralske) former. De organiske formene er de som er å finne i naturen, spesielt i celle-strukturer. De er typisk runde eller ovale, slynger seg og kan være i uorden og asymmetriske. Organiske former har myke kanter og benyttes ofte for å oppnå en ergonomisk utforming.

De organiske formene utpreger seg spesielt i enkelte stilretninger, som for eksempel barokk og rokokko stil, der det er mye utsmykninger, runde kanter og mange detaljer med inspirasjon fra naturen.



Figur 6.4: Figuren viser en stol i rokokko stil t.v. [60] og en pyntegenstand i barokk stil t.h. [61].

Disse stilretningene anses som maksimalistiske, men det er også mulig å finne organiske former i moderne design. Et eksempel er stolen Peel, designet av Olav Eldøy, som tydelig ble inspirert av formen til appelsinskall da han laget denne stolen. Den er enkel og ren i designet, men den organiske formen og asymmetrien gjør den likevel spennende.



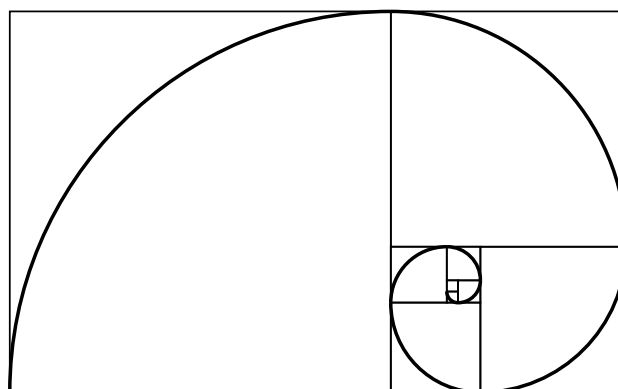
Figur 6.5: Bildet viser stolen Peel [62].

De uorganiske (mineralske) formene har sitt opphav fra krystallstrukturer. Formene er tydelig menneskeskapt med perfekte firkanter, trekkanter og sirkler, og, med unntak av krystallriket, er de ikke å finne i naturen. Uorganiske former er stilrene og tidløse og er lette å kjenne igjen fra en rekke ulike design. De utpreger seg spesielt i enkelte stilretninger, som for eksempel funksjonalisme, kubisme og minimalisme, der det er få, rette linjer og designet er tydelig inspirert av geometriske former.



Figur 6.6: Eksempler på uorganiske former i design og arkitektur. Til venstre er et bord i kubistisk stil [63] som kun består av firkanter. Til høyre er et hus i moderne funksjonalistisk stil [64].

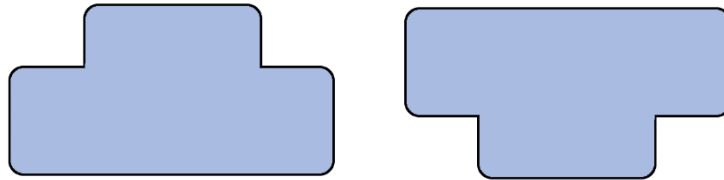
Estetisk design avhenger av kundens preferanser, og det er ingen fasit for hva ulike mennesker synes er pent eller stilig. Det er likevel noen designtrekk som de fleste finner behagelig å se på. Et eksempel er det gyldne snitt som er et størrelsesforhold på 1,618. Et A4 ark følger dette prinsippet og det har sitt opphav i Fibonacci spiralene, som er illustrert i figuren under.



Figur 6.7: Illustrasjon av Fibonacci-spiralen [65].

Symmetri er et annet designtrekk som er tilfredsstillende å se på for menneskeøyet, men det kan også bli litt kjedelig. Med asymmetri er det lettere å skape mer spennende og originale former. Innenfor design av kjøretøy er symmetri det mest fornuftige valget, for å få symmetrisk

luftmotstand og jevn veltbelastning på begge sider. I kapittel 4.1 ble det gjort rede for hvordan ulik geometri kan føre til stabilitet eller ustabilitet. Om målet er å utvikle et stabilt produkt, burde tyngdepunktet ligge lavt, noe som kan oppnås med en vid og bred bunn, og smal/mindre topp. Dette vil også signalisere sikkerhet til brukeren.



Figur 6.8: Figuren illustrerer hvordan produktets form kan uttrykke stabilitet eller ustabilitet. Figuren til venstre har mest masse på bunn, en form som både er og assosieres med stabilitet. I figuren til høyre er mesteparten av massen plassert oppå en mindre bit. Dermed ser den mindre stabil ut, noe den også er.

Det er flere faktorer som påvirker utseendet til et produkt. Et viktig prinsipp er «Form follows function» som blir forkortet til FFF. Det vil si at formen skapes ut ifra hvilke funksjoner som skal utføres, slik at designet ikke kommer i veien. Andre viktige faktorer er trender, preferanser og produktsemantikk, hva produktet uttrykker. Som vi allerede har sett på kan dette for eksempel være sikkerhet, men det kan også være faktorer som prestisje.



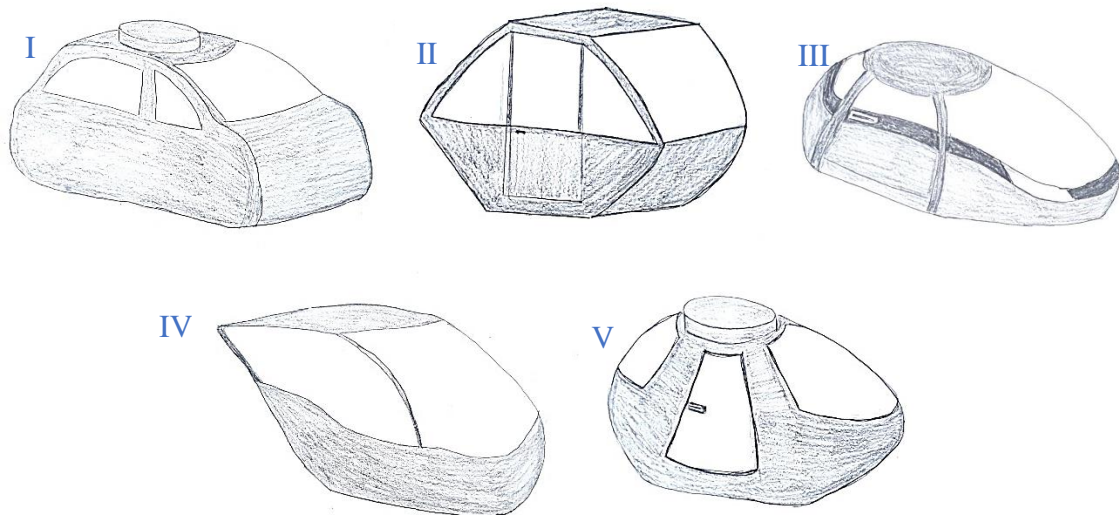
Figur 6.9: Bildet til venstre viser en Volkswagen e-golf [66] og bildet til høyre viser en Ford-Mustang Mach-E electric SUV [67]

Til venstre i figur 6.9 er det bilde av en e-golf, en svært vanlig og rimelig familiebil. Bilens design er preget av runde kanter og minimalt med detaljer. Det er bilens funksjon som er i senter. Bilen til høyre i figuren er en elektrisk Ford-mustang, en svært eksklusiv bil. Dens design er preget av spissere kanter og flere detaljer, som strekene over panseret. De spisse linjene får den til å se raskere og mer eksklusiv ut. Sidevinduene har nesten strømlinjet form, og selv om dette er en stor SUV, gjør disse linjene at den ser raskere ut enn golfen.

I Dolphin er det mange designvalg som må tas, og i de følgende underkapitlene blir det derfor utarbeidet ulike alternativ for kupéform, understellform, sete og lykter, samt at fargealternativ drøftes.

6.3.1 Kupéform

Ved utformingen av kupéen er det viktig å følge prinsippet, «Form follows function, FFF.» Kupéen skal ha plass til dronemodulen på toppen, i tillegg til å passe på toppen av understellmodulen. I produktspesifikasjonen ble størrelsen til kupéen grovt bestemt. Dronemodulen er allerede tilnærmet ferdig utviklet og dens koplingsoverflate må passe på toppen av kupéen. Det er dermed fornuftig med et flatt område på taket til kupéen. I tillegg skal kupéformen ha en lavest mulig drag-koeffisient for å minimere luftmotstanden. Ut fra dette er følgende formalternativ skissert:



Figur 6.10: Figuren viser skisser av fem ulike formforslag til kupéen. De tre øverste er preget av mer uorganiske former, mens de to nede har et mer organisk design. Designalternativene er nummerert fra I til V.

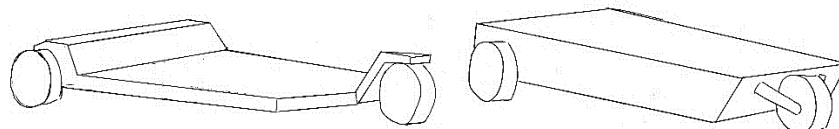
Det skal være behagelig å sitte i bilen, og samtidig skal den være så liten så mulig. Det vil derfor bli utfordrende å få til et dråpeformet design. Basert på de metriske grovspesifiseringene vil trolig designet bli mest likt alternativ II eller V i figur 6.10.

6.3.2 Understellform

For understellet gjelder også FFF-prinsippet, der formen avhenger av understellrammen, styringssystemet og plassbehovet til batterier og liknende. Slik som for kupéen, skal også understellet ha en lavest mulig drag-koeffisient, noe som oppnås med runde linjer og et smalt design. Ut ifra dette er følgende formalternativer skissert:



Figur 6.11: Figuren viser tre formforslag for karosseriet til understellmodulen. Alle tre er preget av organiske former.

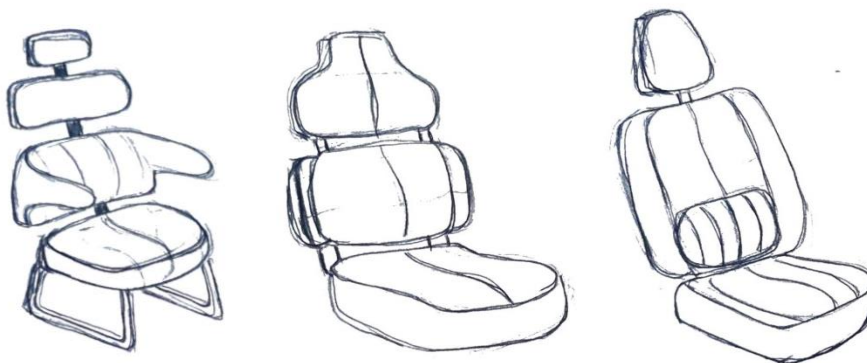


Figur 6.12: Figuren viser skisser av to andre formforslag til understelsmodulens karosseri. Disse er preget av uorganiske former og er skarpe i kantene.

Det er ønskelig med runde former på karosseriet, for å oppnå en lav drag-koeffisient. Det må være mulig å rotere hjulene, og dette vil være en avgjørende funksjon for designet.

6.3.3 Sete

Aronsen kom frem til et setekonsept med todelt, justerbar rygg og sete. Dette er det ønskelig å videreføre for å gi brukeren optimal sittestilling.



Figur 6.13: Det er skissert tre ulike formforslag for førersetet i Dolphin Sky. Til venstre er et sete med tredelt rygg der hver del kan justeres opp og ned, og med armlener. I midten er det skissert et sete med todelt rygg der begge delene kan skyves opp og ned. På skissen til høyre er hele ryggen en del, men den har en pute nederst på ryggen som kan justeres opp eller ned eller tas helt av, og en justerbar nakkestøtte på toppen.

6.3.4 Lykter

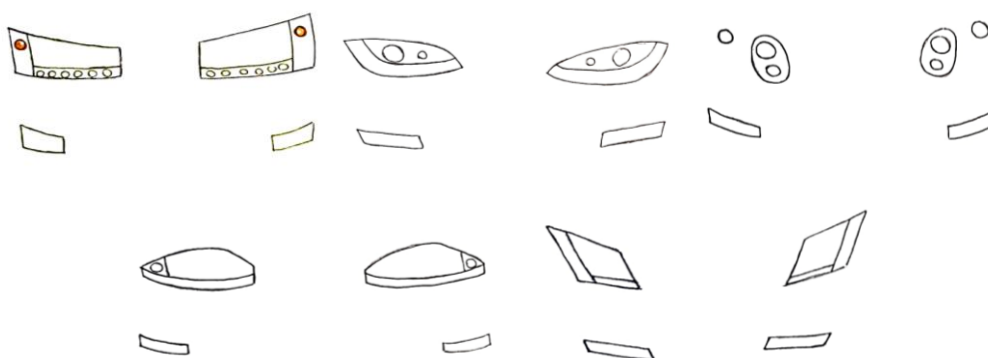
For at Dolphin skal kunne kjøre på norske veier er den nødt til å følge krav til lys på biler. Kjøretøy som er bredere enn 100 cm er nødt til å ha nærlys, kjørellys, fjernlys, tåkelys, parkeringslys, retningslys, nødsignallys, refleks, markeringslys og bremselys. Det er krav til farge og styrke på de ulike lyktene, men for dette prosjektet er det viktigste å vite hvor mangelykter som trengs og hvordan de skal plasseres forhold til hverandre for få lyktene inn i konseptet. Kravene til lys og lykter er [68]:

- Bilen skal kun ha to nærlys.
- Nærlys kan brukes sammen med fjernlys, men ikke sammen med tåkelys.
- Som kjørellys skal bilen ha to lykter foran med hvitt eller gult lys.
- Nærlys skal brukes som kjørellys.
- Lyktene for fjernlys skal monteres symmetrisk og ikke sjenerende for andre førere.
- Det er ikke lov å ha mer enn to tåkelys.

- Tåkelys kan brukes som kjørellys på dagtid, men de kan ikke brukes sammen med nærlys eller fjernlys.
- Personbiler skal ha to lykter foran med hvitt lys som parkeringslys.
- Som retningslys skal bilen ha minst to lykter foran, to bak og en på hver side som gir blinkende oransje lys.
- Som nødsignallys skal bilen ha minst to lykter foran og to bak som gir blinkende oransje lys.
- Bilens skal ha minst to røde refleksordninger bak.
- Bilen skal ha to markeringslys foran som gir hvitt lys.
- Bilen skal ha minst to lykter bak som gir rødt lys når bilen bremses.

Ved å se på punktene over er det tydelig at det er behov for flere lykter foran og bak, men mange av lyktene kan også brukes til flere funksjoner. Retningslykter og nødsignallys kan bruke samme lykten. Lyktene kan ha mange ulike former og i gradsprosjektet til Tone Skaar-Olsen i 2015 ble det vurderte ulike design for frontlykter. Disse ble tatt som inspirasjon og følgende formforslag til front- og baklykter er utarbeidet:

Frontlykter:



Figur 6.14: Skisser av alternative utseender på bilens frontlykter.

6.3.5 Fargealternativ

Hver farge har en symbolikk og kan bli assosiert med for eksempel ulike følelser og politisk standpunkt. Farger er et effektivt hjelpemiddel for å formidle et budskap. Bilprodusenten Ferrari har en egen rødfarge som kun er på deres biler, noe som fører til at når en ser den fargen, tenker man på eksklusivitet, luksus og høy fart. Hver farge kan assosieres med en følelse [69].

Tabell 6.9: Oversikt over vanlige positive og negative assosiasjoner til de vanligste fargene.

Farge:	Vanlig betydning:
Rød	Positiv: Kjærlighet, kraft, energi, mot og vilje. Negativ: Krig og revolusjon, raseri og aggresjon.
Oransje	Positiv: Glede, livsglede, aktivitet, vennskap. Negativ: Uro.
Gul	Positiv: Sol, lys, varme, glede, energi. Negativ: Misunnelse, bitterhet, falskhet, hat.
Rosa	Positiv: Ro, femininitet, kjærlighet. Negativ: --

Tabell 6.9: Forts.

Farge:	Vanlig betydning:
Lilla/fiolett	Positiv: Mystikk, ettertanke, angst, oppgjør, spiritualitet. Negativ: Frustrasjon og uro.
Purpur	Positiv: Makt, ære, prakt, kongelighet. Negativ: --
Blå	Positiv: Trofasthet, sannhet, håp og tro, fred, harmoni, evighet. Negativ: Ensomhet, nedstemthet, tristhet.
Grønn	Positiv: Vekst, miljø, frodighet, fremgang, håp, harmoni, omsorg. Negativ: Løgn.
Brun	Positiv: Fruktbarhet, frodighet, trygghet, stabilitet. Negativ: Forråtnelse, undergang, død.
Svart	Positiv: Stil, eleganse. Negativ: Sorg, lidelse og død, mørkhet og tomhet.
Hvit	Positiv: Ren og uskyld, fred. Negativ: Sårbarhet.
Gull	Positiv: Guddommelighet, herlighet, makt, ære. Negativ: --
Sølv	Positiv: Renhet og uskyld. Negativ: --

Ønskede assosiasjoner til Dolphin er at den er trygg å kjøre, stabil, miljøvennlig, stilig, at den har mye kraft og energi og at den fører til positiv vekst i samfunnet. Fra tabell 6.9 over er de mest aktuelle fargene å ta inn i konseptet: rød, oransje, gul, blå, grønn, brun og sort. Det er da aktuelt å ha fargealternativ til ytterlakken. Det vil bli kaotisk å få inn alle fargene i ett konsept, men det er mulig å teste noen fargekombinasjoner inne i kupéen. For å utvikle et kjøretøy som appellerer til alle kjønn, burde farger som rosa og lilla unngås.

6.4 Tidlig vurdering av brukspåkjenninger

Dolphin Sky vil bli utsatt for mange ulike påkjenninger. På bakgrunn av dimensjonene og massene som ble satt i grovspesifikasjonen skal det gjennomføres en tidligvurdering av brukspåkjenninger. Det er hensiktsmessig å tilegne en bedre forståelse for lastene kjøretøyet utsettes for slik at det blir lettere å senere vurdere og velge løsningsalternativ.

Målsettinger for tidlige beregninger:

1. Kartlegge de vertikale kreftene som virker i massesenteret når småbilen står stille på bakken og er montert på rammen til understellmodulen.
2. Kartlegge de horisontale kreftene som virker på Dolphin under kjøring, svingning, bremsing og ved worst-case-scenarier (pothole).

6.4.1 Felles forutsetninger for beregningene

Det er noen forutsetninger som må kartlegges før beregningene gjennomføres. Det er behov for å gjøre noen forenklinger og å definere dimensjonene som vil benyttes, i tillegg til sikkerhetsfaktorer og fysiske målstørrelser.

Forenklinger som gjøres:

- Vekt uttrykkes gjennom massesenteret (tyngdepunktet).
- Massesenteret (CG) plasseres symmetrisk i horisontalplanet og i vertikalplanet, både med og uten sjåfør.
- Maks tillatt kjørehastighet er 45 km/t, slik at kjøretøyet er lovlig i alle land, jevnfør seksjon 1.2.
- Dynamiske situasjoner forenkles til worst-case-scenarier.

I tabell 6.10 er det listet opp verdiene for ulike variabler, som skal benyttes under vurderingen av brukspåkjenninger.

Tabell 6.10: Oversikt over dimensjoner benyttet under tidlig beregninger av brukspåkjenninger.

Symbol:	Dimensjon:	Begrunnelse:
m_{tot}	750 kg	Jevnfør seksjon 5.4.
m_u	225 kg	Jevnfør seksjon 5.4
m_k	200 kg	Jevnfør seksjon 5.4
ρ_L	1,2 kg/m ³	Jevnfør seksjon 4.1
v_{maks}	45 km/t = 12,5 m/s	Jevnfør seksjon 1.2
l_u	3000 mm	Jevnfør seksjon 5.4
b_k	1300 mm	Jevnfør seksjon 5.4
h_k	1600 mm	Jevnfør seksjon 5.4
m_s	100 kg	Vekten til sjåføren.
v_{sirkel}	40 km/t = 11,11 m/s	Hastighet i rundkjøring
h_k	1600 mm	Jevnfør seksjon 5.4
h_u	500 mm	Jevnfør seksjon 5.4
Hjulbredde	120 mm	Jevnfør seksjon 5.4
Hjuldiameter	374,8 mm	Jevnfør seksjon 5.4

Tabell 6.11: Oversikt over sikkerhetsfaktorer og fysiske målstørrelser.

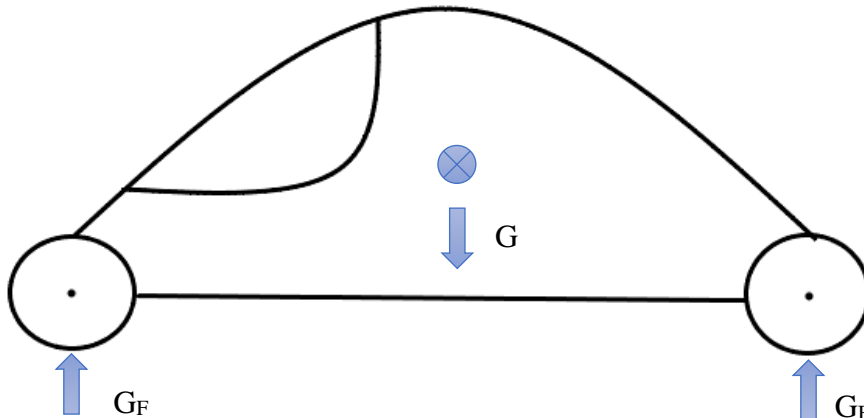
Symbol:	Verdi:	Begrunnelse:
η	1,5-2,5	Sikkerhetsfaktor ved statisk dimensjonering
η_d	3,0-6,5	Sikkerhetsfaktor ved sjokkbelastning
ρ	0,015	Rullemotstandskoeffisienten
μ	0,95	Friksjonskoeffisient, asfalt til dekkgummi

Dimensjonene og verdiene, definert i tabell 6.10 og 6.11 vil bli tatt i bruk under beregningene nedenfor.

6.4.2 Vertikale påkjenninger

De største vertikale påkjenningene som vil oppstå, som et worst case-scenario, er ved landing på understellmodulen. Da kommet all vekten fra drone-, kupé- og understellmodulen på hjulene, i tillegg til førerens vekt.

De statiske, vertikale kreftene som vil virke på Dolphin er dermed hovedsakelig tyngdekrefter av dens egen og førerens masse. Dette er statiske krefter som oppstår i bilens massesenter.



Figur 6.15: Illustrasjon av de vertikale kreftene som virker på bilen. Bilens tyngde virker i massesenteret og forkortes med bokstaven G . Normalkraften som virker under forhjulet er G_F og normalkraften som virker under de to bakhjulene er G_B .

I de fleste tilfeller kommer ikke dronemodulen til å være koplet til bilen, under kjøring på bakken. Dette er fordi bilen både blir tyngre og får et høyere massesenter, som er uønsket på kjøreturer der det ikke er planlagt å fly. Når kun understellmodulen og kupémodulen er koplet sammen, blir gravitasjonskraften med sjåfør i bilen, G_1 :

$$G_1 = (m_u + m_k + m_s) * g = (225 + 200 + 100)kg * 9,81 m/s^2 = \mathbf{5150,25 N}$$

Dette gir en normalkraft på forhjulet, G_{1F} som er halvparten av G_1 siden massesenteret ligger symmetrisk i midten av både vertikal og horisontal planet. Normalkraften er da like stor på det ene forhjulet som på begge bakhjulene totalt:

$$G_{1F} = G_{1B2} = \frac{G_1}{2} = \mathbf{2575,13 N}$$

Normalkraften på ett bakhjul er da halvparten av G_{1B2} igjen:

$$G_{1B1} = \frac{G_{1B2}}{2} = \frac{2575,13 N}{2} = \mathbf{1287,6 N}$$

Når alle tre modulene er koplet sammen, er gravitasjonskraften, G_2 :

$$G_2 = m_{tot} * g = 750 * 9,81 = \mathbf{7357,5 N}$$

Med en sjåfør i bilen oppstår den maksimale gravitasjonskraften, og den er:

$$G_3 = (m_{tot} + m_s) * g = 850 * 9,81 = \mathbf{8338,5 N}$$

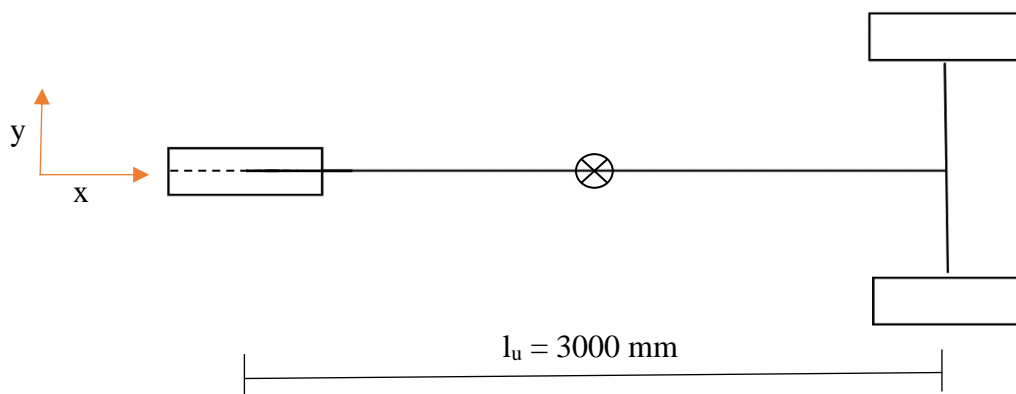
Da blir normalkraften på forhjulet, G_{3F} , som også er lik den totale normalkraften på bakhjulene:

$$G_{3F} = G_{3B2} = \frac{G_3}{2} = 4169,25 \text{ N}$$

Normalkraften på ett av hjulene bak, G_{3B1} , blir da:

$$G_{3B1} = \frac{G_{3B2}}{2} = 2084,63 \text{ N}$$

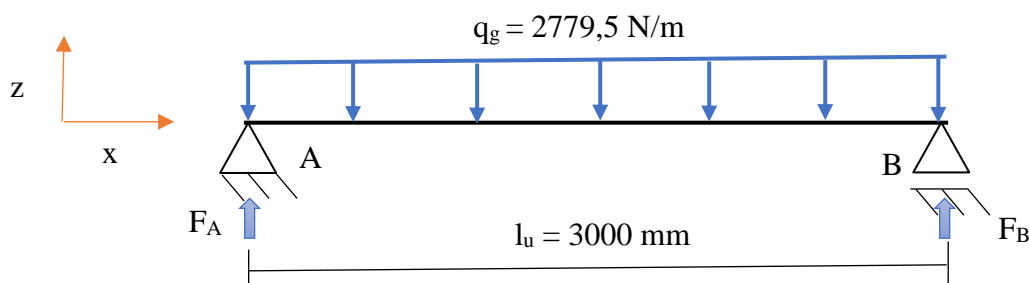
Gravitasjonskraften som virker i massesenteret, vil resultere med krefter i understellmodulens opplager. Det er ikke mulig å beregne nøyaktige opplagerkrefter før rammens utforming er bestemt, men som en forenkling antas det at massesenteret ligger i midten av opplagrene og at massekraften blir jevnt fordelt utover kun ett stag som er fritt opplagret. Det antas at lengden til staget er like langt som understellet, l_u , og at det kun er dette staget, som ligger i x-aksen, som bærer massen. Det er dermed svært grove beregninger som utføres.



Figur 6.16: Skisse av understellet ovenfra. Massesenteret er markert med en sirkel med et kryss i midten.

Når alle tre modulene er koplet sammen og en sjåfør sitter i bilen blir den jevnt fordelte kraften, q_g , på en av «bjelkene»:

$$q_g = \frac{G_3}{l_u} = \frac{8338,5 \text{ N}}{3\text{m}} = 2779,5 \text{ N/m}$$



Figur 6.17: Illustrasjon av kraftfordelingen over staget.

Dette resulterer i kreftene F_A og F_B i opplagrene, og de beregnes slik:

$$F_A = F_B = \frac{q_g * l_u}{2} = \frac{2779,5 * 3}{2} = 4169,25 \text{ N}$$

Maks bøyemoment oppstår i midten av rammen og blir:

$$M_{Maks} = \frac{q_g * l_u^2}{8} = \frac{2779,5 * 3^2}{8} = 3126,9 \text{ Nm}$$

Tyngden til dronemodulen vil påføre en jevnt fordelt horisontal kraft over kupéens tak. Når småbilen står på bakken, vil denne kraften virke som en trykkraft, mens under sveiving vil den være en strekkraft.

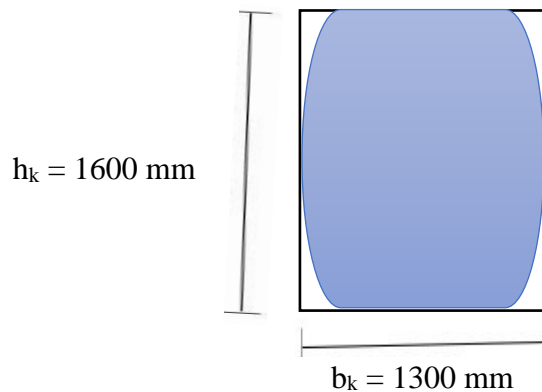
6.4.3 Horisontale påkjenninger

De horisontale kreftene som virker på Dolphin, er kjøremotstanden, sidekrefter ved svingning, kraftpåvirkning ved bremsing og kraftpåvirkning under worst-case-scenarioer. Det vil kun utføres beregninger for ett worst-case scenario og det er å kjøre i ett hull i veien (pothole).

Kjøremotstand

Den største kjøremotstander oppstår når småbilen kjører i maksimal hastighet, og som utredet i kapittel 4.1, er kjøremotstanden et resultat av luftmotstand, rullemotstand og eventuelt stigningsmotstand.

For å beregne luftmotstand mot kupéen, er det nødvendig å vite hva tverrsnittarealet er og luftmotstandskoeffisienten. Luftmotstandskoeffisienten antas å være den samme som for passasjerbiler, $C_D = 0,3$. Arealet estimeres ut fra produktspesifiseringen og målene som ble satt der. Arealet blir da:



Figur 6.18: Tverrsnittarealet kan grovt estimeres ved å multiplisere kupéens høyde og bredde, og blir da en rektangulær flate, slik figuren viser.

Arealet blir da:

$$A = b_k * h_k = 1,3 \text{ m} * 1,6 \text{ m} = 2,08 \text{ m}^2$$

Den maksimale lovlige kjørehastigheten for småbiler ble kartlagt i kapittel 1.2, og er på 45 km/t. Da kan luftmotstanden estimeres til:

$$F_L = 0,5 * C_D * A * \rho_L * v_{maks}^2 = 0,5 * 0,3 * 2,08 \text{ m}^2 * 1,02 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{12,5^2 \text{ m}}{\text{s}} = 103,4 \text{ N}$$

For å beregne rulle­motstand må rulle­motstands­faktoren, f , være kjent. I beregningen antas det at Dolphin kjører med gummidekk på tørr asfalt og får da en $f = 0,015$ [11]. Rulle­motstanden blir da:

$$F_R = f * G_3 = 0,015 * 8338,5 \text{ N} * 0,015 = \mathbf{125,1 \text{ N}}$$

For å beregne stignings­motstanden må bakkens helning være oppgitt. Ved kjøring opp en bakke med 20 graders helning, er stignings­motstanden:

$$F_S = G_3 * \sin \alpha = 8338,5 \text{ N} * \sin(20) = \mathbf{2851,9 \text{ N}}$$

Det er tydelig at stignings­motstanden er den som skaper mest motstand. Ved kjøring på en horisontal vei blir motstanden nesten ubetydelig, men opp en bakke, har den en stor påvirkning. Den totale kjøremotstanden i dette scenarioet er:

$$F_{total} = F_L + F_R + F_S = 195 + 110,4 + 2851,9 = \mathbf{3157,3 \text{ N}}$$

Effekten som trengs for å kompensere for motstanden er:

$$P_{total} = F_{total} * v_{maks} = 3157,3 \text{ N} * 12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \mathbf{39,5 \text{ kW}}$$

Sidekrefter ved svingning:

I teoriutredningen i kapittel 4.1.1 ble det utredet at når bilen svinger vil den bli usatt for sidekrefter. Blir disse kreftene for store, vil bilens hjul potensielt skrense, eller bilen velter. Sidekreftene på hjulet må være mindre enn normalkraften på hjulet for å unngå skrens, og det er sentralt å undersøke hvor store sidekrefter som oppstår for å sikre passasjerens sikkerhet under kjøring.

Ved beregning av sidekrefter forenkles bilen og anses i stedet som en sykkel der det bakerste hjulet representerer begge bakhjulene til Dolphin. Tyngdepunktet er fremdeles plassert midt mellom hjulene. Det antas at bilen kjører i en mellomstor rundkjøring der maksimal hastighet er på 40 km/t. Mellomstore rundkjøringer har som normal standard en ytre diameter på 35 m og kjørebane rundt sentraløya bør være på 8-11 m bred [70]. For å beregne maksimal sidekraft, kjører bilen der radiusen er minst, som blir omtrentlig en radius på 9,25.

Når alle tre modulene er koplet sammen og det sitter en sjåfør i bilen, blir sentrifugalkraften:

$$F_{C1} = \frac{(m_{tot} + m_s) * v^2}{r} = \frac{850 * 11,11^2}{9,25} = 11,34 \text{ kN}$$

Fra sentrifugalkraften oppstår en like stor reaksjonskraft, F_{CF} , som virker på hjulene. Reaksjonskraften er likt fordelt på front og bakhjul, og dermed blir reaksjonskraften på forhjulet:

$$F_{CF1} = \frac{F_{C1}}{2} = \frac{11,34 \text{ kN}}{2} = 5,67 \text{ kN}$$

Normalkraften på forhjulet, F_A , ble beregnet over og er på 4,2 kN. Om F_{CF} er høyere enn normalkraften på forhjulet multiplisert med friksjonskoeffisienten, vil hjulet skli.

$$N_{CF1} = G_{AF} * \mu = 4169,25 * 0,95 = 3960,79 \text{ N} \approx \mathbf{4,0 \text{ kN}}$$

Med alle tre modulene, vil forhjulet skli når man kjører så kjapt i denne rundkjøringen. Ved en lavere hastighet som for eksempel på 30 km/t, vil det gå fint.

Om man kun bruker to av modulene ved å ta av dronemodulen og senker hastigheten til 30 km/t, blir sentrifugalkraften:

$$F_{C2} = \frac{(m_u + m_k + m_s) * v^2}{r} = \frac{525 * 8,33^2}{9,25} = 3938,29 \text{ kN}$$

$$F_{CF2} = \frac{F_{S2}}{2} = \frac{3938,3 \text{ kN}}{2} = 1,97 \text{ kN}$$

Normalkraften på hjulet multiplisert med friksjonskoeffisienten blir i dette scenariet:

$$N_{F2} = G_{2F} * \mu = 2575,13 \text{ N} * 0,95 = 2446,4 \text{ N} \approx \mathbf{2,4 \text{ kN}}$$

Når bilen kjører i en lavere hastighet, skrenser den ikke, men det er ikke langt unna. Det er dermed en reel risiko for skrensing i krappe svinger, om hastigheten er for høy.

Oppbremsing

Under bremsing vil massesenteret forskyves fremover og legge mer vekt på forhjulet. Hvor stor forflytningen er avhenger av hvor kraftig bremsingen forekommer. En kraftig oppbremsing har en maksimal retardasjon på omtrent 5 m/s^2 som tilsvarer 0,5 g.

Bremsekraften, B , i massesenteret når alle tre modulene er koplet sammen og når det sitter en sjåfør i bilen blir:

$$B_1 = m * r = 850 \text{ kg} * 0,5 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{4,2 \text{ kN}}$$

Om kun de to nederste modulene er koplet sammen og det sitter en sjåfør i bilen blir bremsekraften:

$$B_2 = m * r = 525 \text{ kg} * 0,5 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{2,6 \text{ kN}}$$

Det antas fremdeles at massesenteret ligger midt imellom akslene til hjula i det horisontale planet i tillegg til i det vertikale planet. Når kun de to nederste modulene er koplet sammen og en sjåfør sitter i bilen, blir kraftendringen på hjulakslene, ΔG :

$$\Delta G = \frac{m * r * h}{L} = \frac{525 \text{ kg} * 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1050 \text{ mm}}{2700 \text{ mm}} = 1,02 \text{ kN}$$

$$G_{FD} = G + \Delta G = 5,15 \text{ kN} + 1,02 \text{ kN} = 6,17 \text{ kN}$$

$$G_{BD} = G - \Delta G = 5,15 \text{ kN} - 1,02 \text{ kN} = 4,13 \text{ kN}$$

Det fører til en bremsekraft på forhjulet på:

$$B_F = m * r = \frac{G_{FD}}{g} * r = \frac{6,17 \text{ kN}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} * 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{3,14 \text{ kN}}$$

$$B_B = m * r = \frac{G_{BD}}{g} * r = \frac{4,13 \text{ kN}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} * 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{2,10 \text{ kN}}$$

Høyden til massesenteret påvirker hvor stor tyngdepunktforflytningen blir, og et lavere massesenter vil gi en lavere endring mellom det statiske og dynamiske tyngdepunktet på for- og bakakselen.

Når hjulene til bilen låses, blir bremsekraften noe annerledes. Maksimalt blir normalkraften på forhjulet 75% av den totale tyngdekraften. Da blir bremsekraften på forhjulet:

$$B_3 = \mu * G * 75\%$$

Når alle tre modulene er koplet sammen og en sjåfør sitter i bilen, blir bremsekraften på forhjulet:

$$B_3 = 0,95 * 850 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 75\% = \mathbf{5,94 \text{ kN}}$$

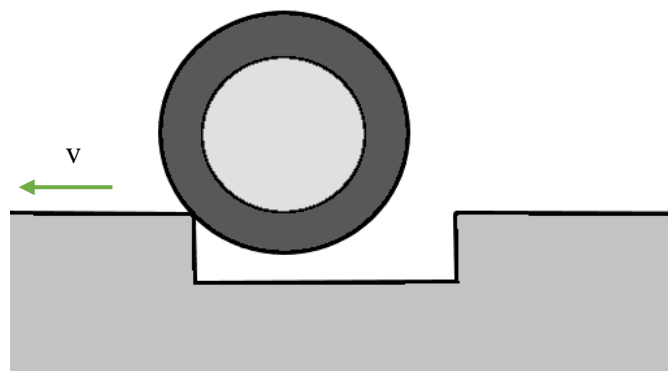
Er kun understellmodulen og kupémodulen koplet sammen, og en sjåfør sitter i bilen, blir bremsekraften på forhjulet:

$$B_3 = 0,95 * 525 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 75\% = \mathbf{3,67 \text{ kN}}$$

Worst case

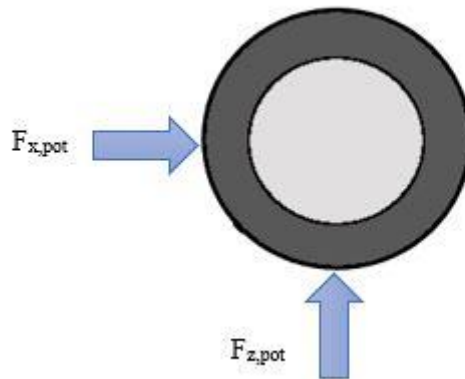
Det verste tenkelige scenarioet som kan oppstå er så klart å krasje. En kollisjon er svært uønsket og vil forårsake store ødeleggelser det ikke er mulig å dimensjonere etter. Det vil derfor ikke utføres beregninger rundt det i dette prosjektet.

Et scenario som oftere oppstår, og som bilen må dimensjoneres etter, er å kjøre i et hull i veien, også kjent som et «pothole». Dette anses som et ekstremtilfelle på grunn av belastningen det påfører framhjulet og hjuloppheget. Når forhjulet kjører inn i hullet, slås hjulet mot kanten i hullet og mister bakkekontakt.



Figur 6.19: Illustrasjon av hvordan forhjulet treffer kanten til et hull i veien, når bilen kjører mot venstre.

Kreftene som virker på hjulet, kan forenkles til kreften i x- og z-retning, og de virker i hvert sitt senterpunkt. I x-retning antas denne kraften å være $3g$ og i z-retningen er den $4g$.



Figur 6.20: Illustrasjon av hvordan kreftene virker på hjulet etter å ha kjørt i et «pothole». X-kraften, $F_{x,pot}$, virker midt på dekket i det horisontale planet, og z-kraften, $F_{z,pot}$, virker midt på dekket i det vertikale planet.

Om alle tre modulene er koplet sammen og det er en sjåfør i bilen, blir støtene i x- og z- retning følgende:

Støt i x-retning med tre moduler:

$$F_{x1,pot} = m_{\frac{1}{2}} * 3 * g = \frac{850}{2} \text{ kg} * 3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 12,5 \text{ kN}$$

Støt i z-retning med tre moduler:

$$F_{z1,pot} = m_{\frac{1}{2}} * 4 * g = \frac{850}{2} \text{ kg} * 4 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 16,7 \text{ kN}$$

For de fleste kjøreturene kommer dronemodulen til å være koplet av for å redusere vekten og få et lavere massesenter. Dette vil resultere i at støtene blir mindre, på grunn av lavere vekt. Med en sjåfør i bilen blir støtene i x- og z-retning:

$$F_{x2,pot} = m_{\frac{1}{2}} * 3 * g = \frac{525}{2} \text{ kg} * 3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 7,7 \text{ kN}$$

$$F_{z1,pot} = m_{\frac{1}{2}} * 4 * g = \frac{525}{2} \text{ kg} * 4 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 10,3 \text{ kN}$$

Kraftvirkningene bilen utsettes for er grunnlaget for materialvalg og for elementberegningene som blir utført senere, i kapittel 9.

6.5 Tidlig materialdrøfting

Ulike materialer har ulike egenskaper, og derfor er en tidlig vurdering av aktuelle materialer viktig for videreutviklingen av konseptet. Før konseptalternativene vurderes, er det nødvendig

å kartlegge hvilket materiale de ulike komponentene burde bestå av, og deretter tilpasse løsningene etter materialvalget.

Et av fokusområdene i prosjektet er å utvikle en småbil med lav vekt, som er trygg å bruke. Det skal ikke være en mulighet at en viktig komponent plutselig går til brudd under bruk. Det er også nødvendig at materialet tåler vann, siden kjøretøyet skal være på veiene i all slags vær. Det vil også bli utsatt for blant annet salter og syrer fra veien. Dermed er det viktig at materialet ikke korroderer eller svekkes av miljøpåvirkningen. Småbilen/dronen vil bestå av mange forskjellige deler med ulike behov, og derfor er det nødvendig å undersøke forskjellige materialer for hver komponent.

I konstruksjoner er stål et vanlig materiale å ta i bruk. Stål er sterkt, det er lett å sammenføre med sveising, og det kan utsettes for store laster før det deformeres. Strukturstål som S235 og S355 er to vanlige stålvarianter som begge har en høy flytegrense. En 16 mm tykk stålstang har en flytegrense på 235 N/mm^2 for S235, og 355 N/mm^2 for S355. Dermed blir stålemner hyppig brukt i konstruksjonen, da det har et godt vekt/styrke-forhold. Stål er ikke korrosjonsfritt, og derfor blir det ofte tilsatt legeringer for å få det korrosjonsbestandig. Det blir kalt rustfritt stål og finnes i mange ulike varianter, slik som 304 og 316 [71]. Det er dyrere å produsere, men har økt styrke ved høye temperaturer i tillegg til økt korrosjonsmotstand.

Stål må generelt opp i høye temperaturer før materialet smelter, og dette gjør at det krever mye energi å produsere stålemner. Det er likevel et materiale som er lett å forme, med god seighet. Det er et relativt tungt materiale sammenliknet med aluminium og karbonlegeringer, og det burde benyttes i komponenter der styrke er essensielt og heller benytte et lettere materiale for resten av komponentene.

Aluminium er et veldig allsidig materiale, som er lett å forme og har et relativt bra styrke/vekt forhold. Det er lett å resirkulere, er korrosjonsbestandig og har god holdbarhet. Materialet har høy elastisitet til å være et metall og det er lett å tilvirke, noe som gir en stor designfrihet. Aluminium kan utvinnes her i Norge og ved å bruke norsk aluminium, støttes lokal industri. Utfordringen med aluminium er at det kan bli for mykt i enkelte komponenter hvor styrke er viktig, og at det er ugunstig å sveise. Det finnes aluminiumslegeringer som kan sveises, og det er de som er mest sentrale for prosjektet.

5000-serien av aluminium er en legering som inneholder magnesium, kan lett sveises og har god motstandsdyktighet mot saltvann. Det brukes derfor mye i bygninger og kjøretøy [72]. 6000-serien inneholder silikon i tillegg til magnesium og har dermed svært gode formegenskaper i tillegg til at det også kan sveises. 7000-serien er aluminiumslegeringer med sink og har dermed de høyeste styrkeegenskapene av alle kommersielle aluminiums varianter [73] [74].

Siden det er viktig at sammenstillingen skal være lett, burde aluminium benyttes som hovedmateriale. Ved å bygge opp understellrammen av aluminium, vil den ha tilstrekkelig styrke, i tillegg til en relativt høy flytegrense, samtidig som materialet er korrosjonsbestandig og har en lav massetetthet. Aluminiumslegeringen EN AW 6082 har alle disse kvalitetene og velges derfor som et grunnlag for videreutviklingen.

Tabell 6.12: Materialegenskapene til relevante materialer.

Materiale:	Flytegrense, R_e:	Strekfasthet, R_m:	E-modul:
S235	235 MPa	360 MPa	210*10 ³ MPa
S355	355 MPa	510 MPa	210*10 ³ MPa
Al 6082	270 MPa	310 MPa	70*10 ³ MPa

Understellrammen og koplingsrammene:

Det er viktig at rammene er stive, for å unngå vibrasjoner, deformasjoner og potensiell utmatting tidligere enn ønsket. Derfor må materialet være sterkt og samtidig seigt. Både stål og aluminium kan brukes, men for å oppnå en så lav vekt som mulig, er aluminium et fornuftig valg, og da 6082 Aluminiums legering, som har en veldig høy styrke og også er det materialet som brukes i dronemodulen til Falstad. Det er en fordel å benytte det samme materialet i flere komponenter, slik at en blokk kan kjøpe inn for å produsere flere deler, og da spare penger.

Kupé:

For kupérammen velges det å bruke det samme materialet som for understellrammen, aluminiumslegeringen 6082. Får å få så lav vekt som mulig, burde karbonfiber benyttes i kupéens karosseri, men det blir fort kostbart, og i utviklingen av en prototype er glassfiber mer egnet.

Avstivere:

For avstiverne velges også 6082 aluminiumslegering. Materialet har god resistanse mot sprekker fra spenninger og korrosjon, i tillegg til at materialet har høy bruddseighet.

Resterende komponenter:

I utsatte komponenter slik som aksler, bolter og hjuloppheng burde det benyttes et sterkere og stivere materiale, og derfor velges rustfritt stål. Fordi det er viktig at det ikke ruster er det verdt å betale mer for at komponentene skal være korrosjonsbestandige.

Det er aluminium som er hovedmaterialet i konseptet, i tillegg til karbonfiber, og en grundigere materialdrøfting vil bli utført i kapittel 11, etter at produktarkitekturen er bestemt.

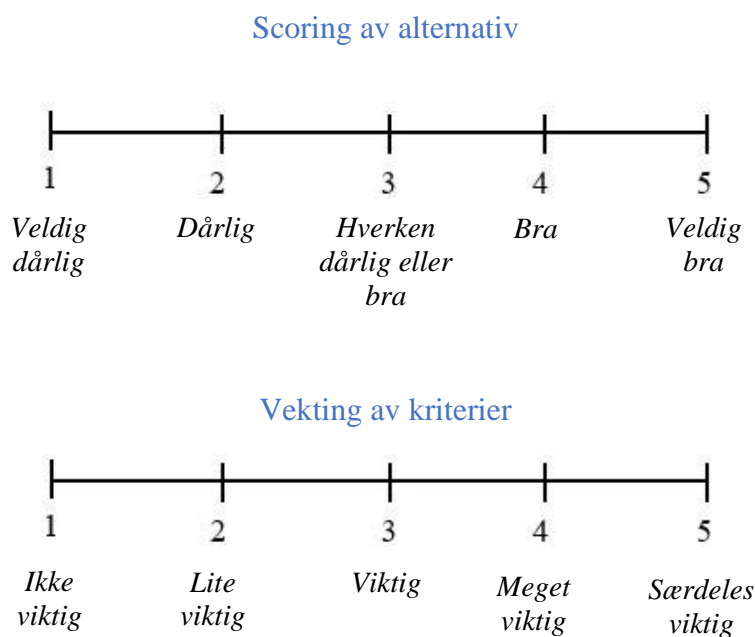
7 EGENSCREENING OG KONSEPTVALG

Hensikten med egenscreening er å kartlegge hvilke av løsningsforslagene som best dekker funksjonsmålene definert i produktspesifiseringen i kapittel 5. Alle funksjonsalternativene skal vurderes og rangeres ved bruk av Pughs metodikk. Alternativ skal velges til videreutvikling.

7.1 Seleksjonsmatrise og egen konseptscreening

For å kartlegge hvilke av funksjonsalternativene fra kapittel 6.2 som best dekker funksjonsmålene til Dolphin, vil seleksjonsmatriser benyttes. Seleksjonsmatrisenes oppbygging baserer seg på Pughs metodikk, som ble utredet i kapittel 3.2.2, og er en matematisk metode for å vekte og deretter rangere de ulike alternativene.

I dette prosjektet blir en skala fra 1-5 brukt både for vektig av kriterier og for å score alternativene. I vektingen er 1 ikke viktig og 5 særdeles viktig. Kriterienes vekt blir multiplisert med scoren. Scoringen går fra 1-5, der 1 er veldig dårlig og 5 er veldig bra.



Figur 7.1: Øverste akse viser en skala over hvor godt et alternativ kan utfylle et gitt kriterium. Den nederste aksene viser hvor viktig et kriterium er for en løsning.

Estetikken til funksjonsalternativene vil ikke bli vurdert i seleksjonsmatrisene. Det er karosseriene, lykter og kupéinteriør som vil påvirke det estetiske uttrykket til Dolphin, og de er ikke en del av funksjonsalternativene, men blir vist i markedspresentasjonen i kapittel 13.

Tabell 7.1: Seleksjonsmatrise for valg av understellrammens utforming.

Funksjon:		Geometri for understellramme:			Rammestruktur:			
Kriterium	Vekting	A	B	C	A	B	C	D
Vekt	4	5	2	3	5	3	3	1
Styring	5	3	3	3	3	3	3	3
Kopling av moduler	4	3	5	5	3	4	5	4
Kjøreegenskaper	5	5	2	2	2	5	4	2
Passasjerplass	2	2	5	3	3	4	5	5
Størrelse	4	5	2	3	5	4	4	3
Kompleksitet	3	5	3	2	5	4	2	3
Symmetri	2	5	5	5	5	5	5	5
Stabilitet	5	5	2	3	1	5	4	3
Sikker sammenkopling	5	3	3	3	3	5	5	3
Aerodynamikk	4	5	2	5	5	5	3	2
Ergonomi	4	5	3	4	3	3	3	3
Estetikk	3	-	-	-	-	-	-	-
Sum		201	135	157	160	196	178	136
Rangering		1	3	2	3	1	2	4

Rangeringen i tabell 7.1 viser at for geometrien er det A, en trekantet understellramme, som anses som den beste løsningen. For rammestrukturen er det B, dobbel ramme med lik geometri, som anses som den beste løsningen.

Tabell 7.2: Seleksjonsmatrise for valg av koplingsplattform.

Funksjon:		Koplingsplattform:		
Kriterium	Vekting	A	B	C
Vekt	4	5	4	4
Styring	5	3	3	3
Kopling av moduler	4	3	5	5
Kjøreegenskaper	5	3	3	3
Passasjerplass	2	2	5	4
Størrelse	4	5	4	4
Kompleksitet	3	3	5	2
Symmetri	2	5	5	5
Stabilitet	5	3	3	3
Sikker sammenkopling	5	3	5	4
Aerodynamikk	4	3	3	3
Ergonomi	4	3	3	3
Estetikk	3	-	-	-
Sum		159	181	165
Rangering		3	1	2

I rangeringen av løsninger for koplingsplattform, fikk alternativ B høyest poengsum.

Tabell 7.3: Seleksjonsmatrise for valg av sentreringsystem.

Funksjon:		Sentreringsystem:			
Kriterium	Vekting	A	B	C	D
Vekt	4	2	5	3	4
Styring	5	3	3	3	3
Kopling av moduler	4	4	2	5	1
Kjøreegenskaper	5	3	3	3	3
Passasjerplass	2	3	3	3	3
Størrelse	4	2	5	4	4
Kompleksitet	3	4	3	4	3
Symmetri	2	5	5	5	4
Stabilitet	5	3	1	4	3
Sikker sammenkopling	5	5	2	5	2
Aerodynamikk	4	1	5	3	3
Ergonomi	4	3	3	3	3
Estetikk	3	-	-	-	-
Sum		146	150	175	138
Rangering		3	2	1	4

For sentreringsystem, fikk alternativ C den høyeste poengsummen og anses dermed som det beste løsningsalternativet.

Tabell 7.4: Seleksjonsmatrise for valg av låsemekanikk.

Funksjon:		Låsemekanikk:			
Kriterium	Vekting	A	B	C	D
Vekt	4	4	2	5	5
Styring	5	3	3	3	3
Kopling av moduler	4	5	3	4	3
Kjøreegenskaper	5	3	3	3	3
Passasjerplass	2	3	3	3	3
Størrelse	4	4	2	5	5
Kompleksitet	3	3	1	5	4
Symmetri	2	2	5	4	3
Stabilitet	5	3	3	3	3
Sikker sammenkopling	5	5	3	4	3
Aerodynamikk	4	3	3	3	3
Ergonomi	4	3	3	3	3
Estetikk	3	-	-	-	-
Sum		165	131	174	160
Rangering		2	4	1	3

Fra rangeringen av låsemekanikk, er det alternativ C som anses som den beste løsningen.

Tabell 7.5: Seleksjonsmatrise for valg av styringskopling og styringssystem.

Funksjon:		Styringskopling:		Styringssystem:		
Kriterium	Vekting	A	B	A	B	C
Vekt	4	3	3	5	3	4
Styring	5	4	4	3	4	5
Kopling av moduler	4	4	3	3	3	3
Kjøreegenskaper	5	3	3	2	4	5
Passasjerplass	2	3	3	3	3	3
Størrelse	4	3	4	5	1	3
Kompleksitet	3	5	4	5	2	4
Symmetri	2	5	5	5	4	5
Stabilitet	5	4	5	3	3	3
Sikker sammenkopling	5	5	4	3	3	3
Aerodynamikk	4	3	3	3	3	3
Ergonomi	4	3	3	2	4	4
Estetikk	3	-	-	-	-	-
Sum		175	172	158	146	176
Rangering		1	2	2	3	1

I tabell 7.5 rangeres både alternativ for styringskopling og styringssystem. For styringskopling er det alternativ A som anses som det beste, og for styringssystemet er det alternativ C.

Tabell 7.6: Seleksjonsmatrise for valg av El-kopling.

Funksjon:		El-kopling:	
Kriterium	Vekting	A	B
Vekt	4	4	3
Styring	5	3	3
Kopling av moduler	4	3	3
Kjøreegenskaper	5	3	3
Passasjerplass	2	3	3
Størrelse	4	4	2
Kompleksitet	3	2	4
Symmetri	2	3	3
Stabilitet	5	3	3
Sikker sammenkopling	5	5	2
Aerodynamikk	4	3	3
Ergonomi	4	3	3
Estetikk	3	-	-
Sum		150	135
Rangering		1	2

For el-koplingen er det alternativ A som anses å være det beste.

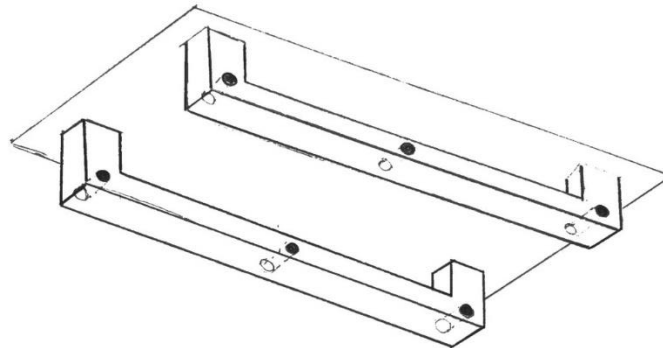
7.2 Foretrukne løsningsalternativer

Valgene av foretrukne løsningsalternativ er basert på rangeringen i seleksjonsmatrisene. De løsningsalternativene som fikk høyest score, er de det er ønskelig å gå videre med. For flere av alternativene var det tett mellom første og andre plassen og derfor utredes disse alternativene videre før det endelige valget blir tatt. Dette vil bli tatt opp under eksperttestingen i neste kapittel. De foretrukne løsningsalternativene å gå videre med er:

7.2.1 Koplingsplattform og sentreringsystem

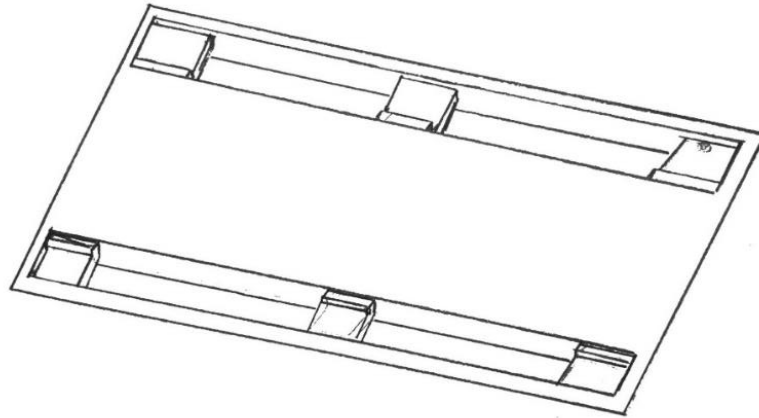
Koplingsplattformen består hovedsakelig av to komponenter. En ramme er festet under kupéen, og en annen ramme festes på toppen av understellmodulen. Den plattformgeometrien som fikk høyest poengsum i rangeringen i kapittelet over, 7.1, var den firkantede formen. Det er derfor denne formen koplingsrammen skal ha. For sentreringsystem til sammenkoplingen var det sentrering gjennom ben på understellet som fikk høyest poengsum.

Figur 7.2 viser en skisse av koplingsplaten som festes under kupéen. Den firkantede formen gjør det lett å feste den i rammen til understellet. Formen egner seg også godt for to symmetriske ben. Bena er konstruert som to rektangulære rammer som ligger langs undersiden til kupéen. Bena skal hovedsakelig benyttes for sammenkopling til understellmodulen, men kan også brukes til å lande på når understellmodulen ikke er i nærheten, under en flyvning. Hvert ben har tre gjennomgående hull, for å koples til understellet. Mer om låsemeknikken kommer lengre nede.



Figur 7.2: Koplingsplattformen som festes på undersiden av kupéen. I skissen er den sett fra undersiden og opp. Den har to lange symmetriske ben.

På understellmodulen festes den andre siden av koplingsplattformen. Den er også formet som et rektangel og har to skinner som bena til koplingsplata over, skal gå ned i, og kople sammen modulene.

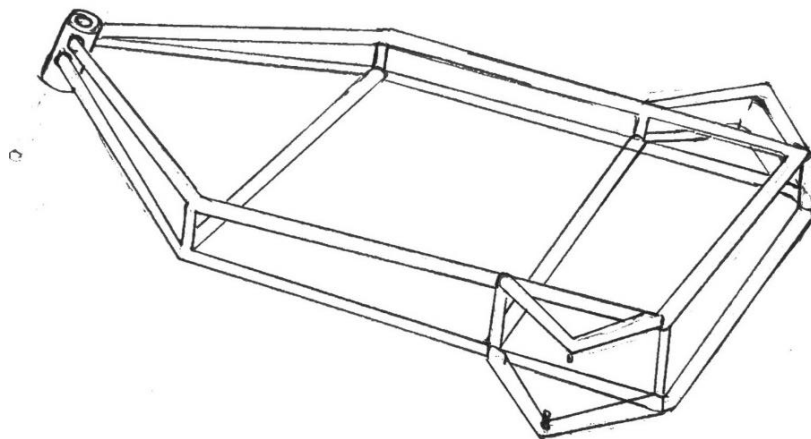


Figur 7.3: Skisse av koplingsplattformen som festes til understellmodulen. Den har to nedgående skinner der låsemekanismen er festet.

Låsemekanismen for å kople sammen modulene befinner seg nede i skinnene. Mer om selve låsingene i seksjon 7.2.4.

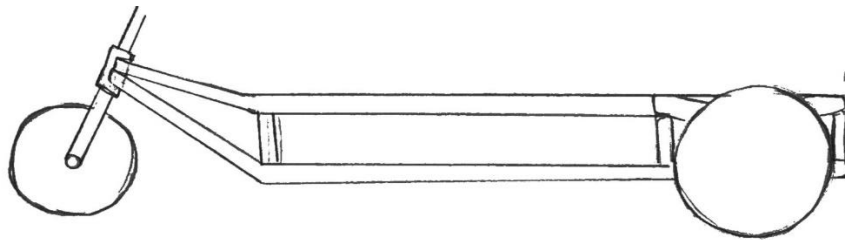
7.2.2 Understellramme

Det var den trekantede doble rørrammen som fikk høyest poengsum, men for å skape plass til koplingsplattformen, er det nødvendig å gjøre noen justeringer. Rammen er derfor en kombinasjon av firkantet og trekantet.



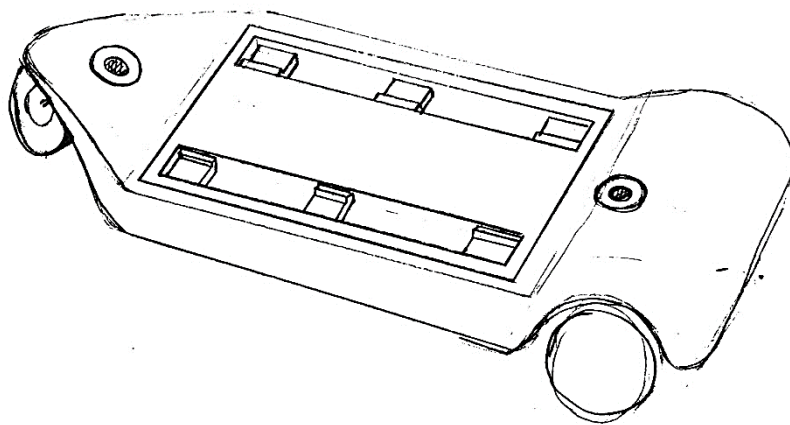
Figur 7.4: Skisse av rørrammen til understellmodulen.

Rammen er dobbel med vertikale stag for å feste sammen de to delene. I tillegg er det lagt inn to vertikale avstivere i y-retning i den nederste rammen. Trekanten i rammens front festes til en hylse der styringssystemet koples sammen. I tillegg er det satt på A-armet for hjuloppheng til bakhjulene, der både hjul og demping skal festes.



Figur 7.5: Skisse av understellets ramme fra siden med hjul.

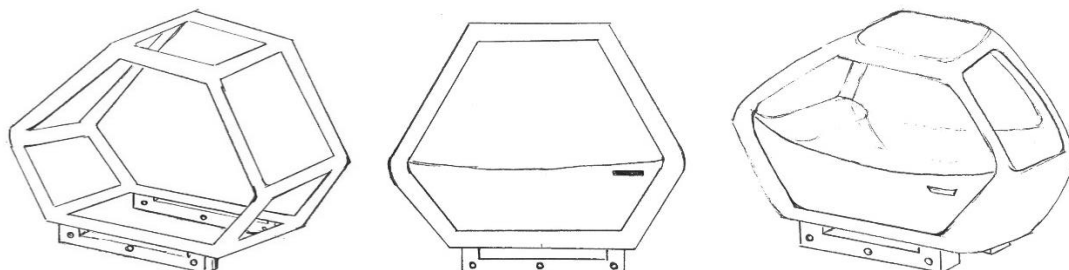
Hele understellsmodulem sammensatt skal ha et utseende liknende det skissert i figur 7.6.



Figur 7.6: Skisse av det utvendige designet til understellmodulen. Det er skissert inn hull både foran og bak for å kople inn styringen i Delta og Tadpole-variant.

7.2.3 Førerkupé

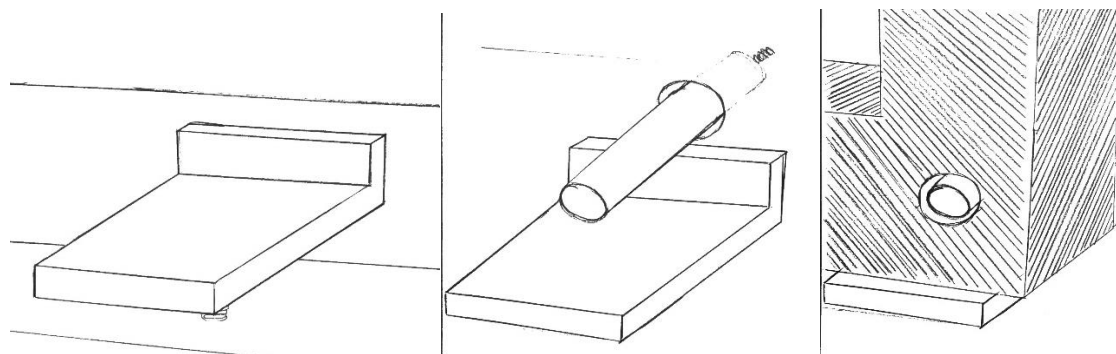
For førerkupéen skal også en rørramme brukes. Rammen har fra siden en diamantform og er helt symmetrisk, slik at den kan brukes i både Delta- og Tadpole-variant. På undersiden av kupéen er koplingsplata festet og bena er direkte festet under de to nederste rørene i rammen, slik figur 7.7 viser.



Figur 7.7: Rørrammen til kupémodulen. Til venstre er kun rammen og bena er plassert under. I midten er kupéen sett fra siden, med en innsatt dør, og til høyre er den helhetlige kupéen skissert med karosseri rundt.

7.2.4 Låsedelene

For å låse sammen understell- og kupémodulen fikk konseptet med «tapp», C, høyest poengsum. Låsingen skjer mellom bena på kupéens koplingsplate, og sporene på understellets koplingsplate. Det er tre hull i hvert av bena, og disse hullene er til låsing. Nede i skinnene er det tre låsepinner. En på hvert ytterpunkt og en i midten. Når bena går ned i sportene, dytter de ned en fjæret plate, slik som den illustrert til venstre i figur 7.8. Da popper en tapp ut, slik illustrasjonen i midten av figuren viser. Denne tappen er plassert slik at den treffer inn i hullet i benet, og dermed fester fast hvert ben i tre punkter, slik skissen til høyre i figur 7.8 viser.

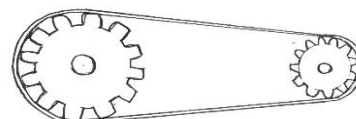


Figur 7.8: Skisser av låsemekanikken. T.v. vises platen som presses ned når benet senkes ned i sporet. I midten er det skissert hvordan tappen spretter ut, når platen presses ned. T.h. er det skissert hvordan tappen går gjennom et av hullene i det ene benet, og låser det fast.

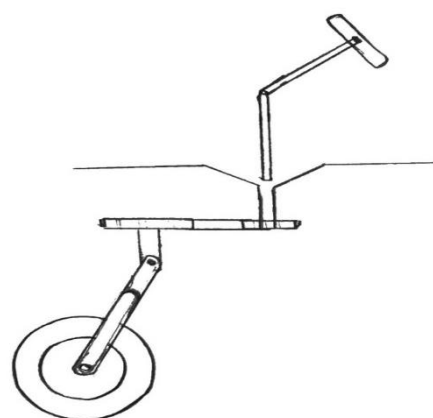
7.2.5 Styringssystem og koplning

For valg av styringssystem, var det styringssystemet med reim/skjede som fikk høyest poengsum. På forhjulet er det festet en gaffel som går opp til ett tannhjul. Dette tannhjul er festet til et mindre tannhjul, slik figur 7.9 viser, som er festet til en hylse med konisk utforming på toppen.

De to tannhjulenes hensikt er å få styringens koplingle lengre bakover, slik at kupémodulen enkelt koples til hjulstyringen i bakkemodulen når en lander. Styringskoplingen er utformet som en trakt/konisk, for at det skal være lett å sentrere styreakselen fra kupéen, ned på tannhjul. Systemet er enkelt skissert i figur 7.10.



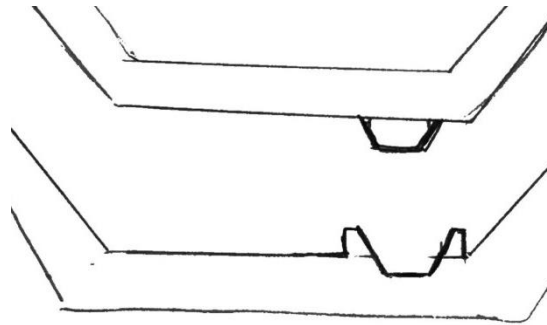
Figur 7.9: Skisse av de to tannhjulene med en reim rundt.



Figur 7.10: Skisse av styringssystemet sett fra siden.

7.2.6 Elektriske koplinger

For kopling av elektronikk mellom modulene var det konseptforslaget «kontakt» som fikk den høyeste poengsummen. Det er mulig å ha en stikkontakt midt under kupéen, som koples inn i motparten på understellmodulen når de er låst sammen, slik figur 7.11 viser. Det elektriske systemet er ikke i fokus i dette prosjektet og dermed er dette kun et forslag på et kontaktpunkt for å overføre elektrisitet.



Figur 7.11: Koplingen av elektronikk, den hann-enden er festet under kupémodulen mellom bena og hunn-enden er på bakkemodulen mellom skinnene.

Dette er de komponentene som anses som de beste for å utvikle et fungerende modulprodukt. Det er derfor valgt å gå videre med akkurat disse funksjonene til ekstern konsepttesting i neste kapittel.

8 EKSTERN KONSEPTTESTING

Hensikten med eksperttesting er å rådføre seg med personer som har ekspertise innenfor ulike fagområder, for å kvalitetssikre de valgte elementene for konseptet.

8.1 Testmålsetting

Testens mål deles inn i to kategorier, et overordnet hovedmål og utfyllende delmål. Dette er for å sikre innhenting av nyttig og relevant informasjon for prosjektet.

8.1.1 Hovedmål

Hovedmålet med eksperttestingen er å kartlegge om det er fornuftig å gå videre med de valgte konseptløsningene fra kapittel 7.2. Fordeler og ulemper med konseptene skal kartlegges i tillegg til eventuelle nødvendige forbedringer i konseptet eller endringer av valgene. Ekspertisen skal også benyttes til å videreutvikle konseptet for å gjøre det mest mulig realiserbart med å undersøke produksjonsmetoder og kostnadsestimering.

8.1.2 Delmål

Delmålene for testingen skal sikre at hovedmålet oppnås og gjør det ved å definere konkrete målsettinger. Delmålene er følgende:

- Kartlegge fordeler og ulemper med valgte konseptløsninger, og om det eventuelt bør gjøres endringer.
- Kartlegge fornuftige produksjonsmetoder og maskinering for de ulike komponentene, og innhente informasjon om realistisk tilvirkningstid og kostnader.

8.2 Ekspertgruppe

Ekspertgruppen består av to utvalgte ansatte ved NMBU, som sitter på nødvendig kompetanse for å kunne svare på delmålene.

Tabell 8.1: Oversikt over deltagere i ekspertgruppen.

Navn:	Tittel:	Fagfelt:
Henrik Folke Holmberg	Overingeniør	Konstruksjon
Øyvind Hansen	Overingeniør/verkstedmester	Produksjon

8.3 Kommunikasjonsform

Eksperttestingen ble utført i form av åpen diskusjon under fysiske møter, ikke digitale. Konseptskisser og relevante figurer ble medbrakt som hjelpemiddel for å forklare funksjonene og utforming og design på komponentene. For å gi testpersonene innsikt i prosjektets problemstillinger og hovedmål, ble en kladd av den daværende rapporten tatt med for å vise prosessen og tankegangen som førte frem til valgte konsepter. Da de var tilstrekkelig informert om utført arbeid og tanker om videre arbeid, kunne de gi tilbakemeldinger og rådgøring. Tilbakemeldingene ble diskutert og de viktigste punktene notert.

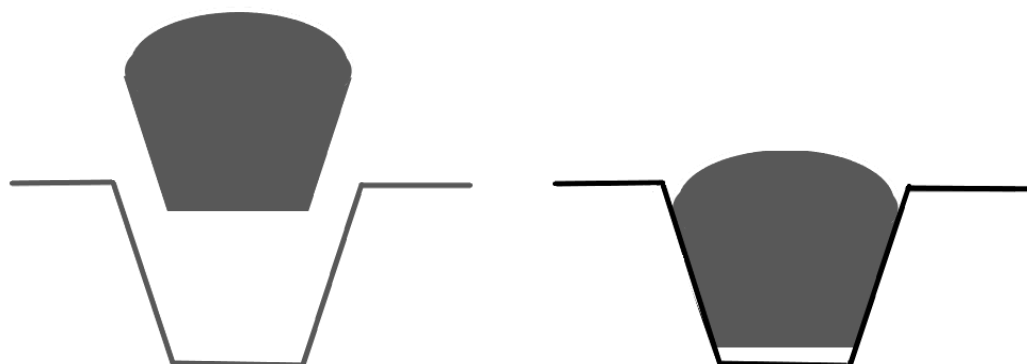
8.4 Resultat og resultattolkning

Det ble utført to individuelle møter i form av en åpen samtale. Ekspertenes fagfelt er innenfor ulike områder, og de svarte på ulike spørsmål. Derfor er resultatene fra hvert møte fremstilt separat. Hovedfokuset er på de konseptene der det er mest usikkerhet. Til slutt legges det frem en resultattolkning som oppsummerer de to samtalene og hva som burde tas med videre fra dem.

8.4.1 Resultater

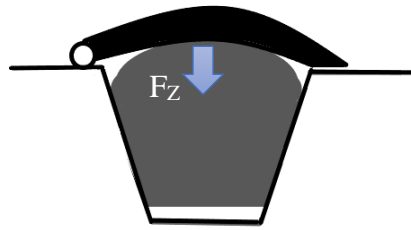
Møte med Holmberg [75]

Hovedkonseptene som ble diskutert med Henrik Holmberg var sentrerings og låsemeknikken. Han påpekte at for å få bena ned i skinnene er det mer egnet med konisk formede ben enn rektangulære. Rektangulære ben vil ha behov for en klaring for å treffe sporet, og denne klaringen er svært ugunstig under kjøring. Cabinene skal ikke kunne skli frem og tilbake under kjøring. Fordelen med en konisk form er at så lenge benet er bredere nederst enn sporet er nederst, vil benet gå ned i sporet uten problemer og feste seg fast, uten at det blir klaring mellom modulene.



Figur 8.1: Illustrasjon av selvsentrering med konisk form og hvordan benet senker seg ned i sporet uten klaring.

Han poengterte at når bena skal låses fast så må det påføres en nedovervirkende kraft, som gjør at kupéen ikke løsner oppover. Låsemetoden som fikk høyest score under vurderingen (C), overfører ingen vertikale krefter, og er derfor en ugunstig løsning å velge. En mulighet for å få overført vertikale krefter for å holde fast benet, er at det holdes fast av en leddet arm som legger seg ovenfor benet og låser det fast sånn (flere bortover).



Figur 8.2: Illustrasjon av forslaget til Holmberg, med en arm som går over benet og påfører vertikale krefter ned på det for å holde det på plass.

For sammenkoplingen av styringssystemet påpekte han at det kan være lurt å undersøke bruk av spline-kopling. Da er ikke sammenkoplingen lengdeavhengig, og det vil bli mye lettere å kople styringen gjennom to separate moduler. Spline-koplinger brukes mye i Automotive kjøretøy.

Det siste diskusjonsområdet var utforming av rammen og hjulopphenget. Han var positiv til å benytte A-armer for hjulopphenget og at de burde være leddet slik at de tillater bevegelse om z-aksen. Mellom de to A-armene burde det være demping, og da er det normalt å benytte enkel hydraulikk for å ta imot støt, og å ha en fjær rundt hydraulikken for å unngå mye bevegelse og jumping.

Til slutt tipset han om å se på bilen som har blitt laget på NMBU og står på campus. Den har en liknende ramme som det som er tenkt i dette prosjektet.

Møte med Hansen [76]

Hovedtemaet for samtalen med Øyvind Hansen var hvordan de ulike komponentene kan produseres og om noe eventuelt burde justeres eller tas hensyn til ved produksjon.

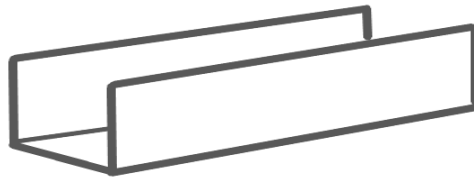
Han var positiv til rammekonstruksjonen for understellet, figur 7.4, men hvordan den burde sammenstilles avhenger av profilvalget på rørene. Rørene kjøpes inn som ferdigekstruderte profiler. Det er ikke noe problem å sveise aluminium, så lenge materialet er av 5000, 6000 eller 7000-kategorien. Hvis hele rammen skal sveises sammen i alle hjørner og knutepunkt, er det lettest å bruke kvadratiske rør. De har rette flater på rørets sider, og det er dermed lett å sveise fast enden til et annet rør. Med sirkulære rør kreves mer arbeid for å skape en kontaktflate mellom de to rørene som skal sveises sammen. Siden de er helt sirkulære, må enden til røret som skal sveises fast, for eksempel en avstiver, rundes av innover slik at overflatene får god kontakt.



Figur 8.3: Illustrasjon av kontaktflatene ved sveising av rør. Til venstre er to sirkulære rør, til høyre er to firkantede.

Han nevnte at siden det er planlagt å bruke en dobbel ramme, kan plater benyttes istedenfor. Da kan man få en veldig stiv ramme, som har plass til komponenter inni seg. Ved å vannskjære en eller to plater og deretter knekke ned sidene til platen, får man et stivt understell, veldig enkelt. Det er da heller ikke behov for et karosseri rundt. Det er utfordrende å få runde former med denne metoden, med det er kjapt og enkelt å produsere, i hvert fall for en prototype.

På koplingsplaten anbefalte han å bruke kanalprofiler som fås kjøpt som standardprofiler. De burde sveises fast på innsiden av rørrammen, slik at de sitter godt fast og klarer å holde vekten til kupémodulen.



Figur 8.4: Skisse av en kanalprofil som anbefales brukt til skinnene i koplingsplaten.

Det er nesten umulig å si hva det vil koste å produsere en sånn bil. For å lage en prototype, anbefales det å bruke restbiter og profiler fra verkstedet for å gjøre det billigst mulig. Om eksperter jobber med å sette sammen rammene vil det antageligvis kreve en ukes effektivt arbeid, med en timelønn på ca. 1000-1200 kr. Materialkostnaden kommer i tillegg. For en prototype kan karosseriet lages i glassfiber. Da må en form lages i for eksempel skum, med to formhalvdeler, og hele karosseriet kan formes i ett støp. Dette vil av dyktige spesialister kreve omtrent to ukers effektivt arbeid, til ca. samme timespris. For serieproduksjon er det mer fornuftig å produsere karosseriet i karbonfiber. Det vil være behov for store støpeformer som koster flere millioner kroner.

Vi kikket på bilen Henrik Holmberg nevnte. Den var bygget opp av en ett-lags rørramme i aluminium, med diagonale avstivere som skapte en fagverkstruktur. Karosseriet var produsert i karbonfiber.

8.4.2 Resultattolkning

- Det velges å gå videre med valgte løsningsalternativer, men med enkle justeringer. Låsingsmekanismen skal byttes ut etter råd fra Holmberg.
- Bena til kupéen skal få en konisk utforming for selvsentrering.
- For styringskoplingen skal spline-kopling benyttes.
- Det velges en rørramme for både understell og kupé, der rørene bøyes og avstivere sveises på.
- Skinnene i koplingsplaten skal fremstilles av to kanalprofiler og sveises fast på innsiden av det øverste røret i understellet.
- Karosseriene til en prototype skal produseres i glassfiber, men til produksjon skal karbonfiber brukes.

9 ELEMENTBEREGNINGER OG OPTIMERING

Hensikten med elementberegninger er å kartlegge hvilke profiler som burde benyttes i ulike komponenter i småbilen og de mest kritiske områdene i understellmodulen, kupémodulen og for koplingen mellom dem og styringssystemet. Dette vil være en indikator på om valgte løsninger er realiserbare og hvilke dimensjoner profilene burde ha.

9.1 Målsettinger for profil- og elementberegninger

Det er valgt å utføre beregninger på de mest sentrale komponentene for at konseptet skal kunne realiseres. Målene for profil- og elementberegningene:

1. Bestemme hvilken profil som best egner seg i understellrammen for å unngå store spenninger og nedbøying (seksjon 9.2).
2. Bestemme hvilken profil som egner seg best på forhjulsgaffelen og beregne de største spenningene som opptrer, i tillegg til å kartlegge om det er fare for knekk (seksjon 9.3).
3. Bestemme hvilken profil som egner seg best i koplingsrammens ben og kartlegge nødvendig veggtykkelse i sporene/skinnene til sammenkopling (seksjon 9.3).
4. Kartlegge belastningen og spenningene låsingene utsettes for (seksjon 9.4)
5. Bestemme kreftene og utveksling på rattet og på forhjulsgaffelen (seksjon 9.5).

Fellesforutsetninger for beregningene er de samme som de definert i kapittel 6.4. Elementberegningene utføres med bakgrunn i belastningene i ulike scenarioer som ble kartlagt i kapittel 6.4. Enkelte av forutsetningene for beregningene defineres i de ulike seksjonene.

9.2 Dimensjoner og krefter på hovedramme

Det har allerede blitt kartlagt i kapittel 4.1 at ulik geometri har ulike egenskaper. Det gjelder også for hvordan spenninger fordeles over geometrien og hvor stort motstandsmomentet er. For å kunne beregne spenningene som opptrer i konstruksjonen, er det nødvendig å kartlegge hva motstandsmomentet er i rammen. Dette er fordi bøyepeningen, σ_b , er [77]:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

- W_b er motstandsmomentet.
- M_b er bøyemomentet.

Bøyepeningen er en dimensjonerende faktor, da det blir den maksimale spenningen som vil oppstå i rammen. Det er nødvendig å få med en sikkerhetsfaktor for variasjon i spenninger og for statiske belastninger settes en sikkerhetsfaktor på 2,0. I understellrammen er det valgte materialet AL 6082, som har en flytegrense på 270 MPa. Da blir den tillatte bøyepeningen for statiske belastninger på rammen:

$$\sigma_{till} = \frac{R_e}{n_F} = \frac{270}{2,0} = 135 \text{ MPa}$$

Bøyepeningen som oppstår i konstruksjonen, må være mindre eller like stor som maksimalt tillatt spenning.

$$\sigma_b \leq \sigma_{till}$$

Det maksimale bøyemomentet i rammen ble beregnet i kapittel 4.1 og er på 3126,9 Nm. Ut fra dette kan nødvendig motstandsmomentet beregnes:

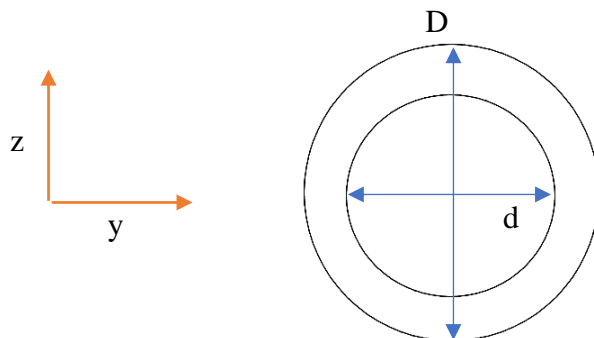
$$W_{b,tot} = \frac{M_{maks}}{\sigma_b} = \frac{3126,9 * 10^3 \text{ Nmm}}{135 \text{ MPa}} = 23162,2 \text{ mm}^3$$

Dette skal fordeles på fire rør, siden det er en dobbel rørramme:

$$W_{b,per} = \frac{W_{b,tot}}{4} = 5790,6 \text{ mm}^3$$

W_b endrer seg med ulike geometriske former. Standardformer skal benyttes i rammen for å unngå unødvendige kostnader ved å bruke egendefinerte profiler. De mest relevante profilene er sirkulært eller kvadratisk rør.

Sirkel [78]:



Figur 9.1: Illustrasjon av dimensjonene i en sirkulær rørprofil.

For slike profiler er motstandsmomentet det samme i y- og z-aksen.

$$W_b = W_y = W_z = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32 * D}$$

Starter med å undersøke om standartprofilen 30x3 rør er tilstrekkelig for konstruksjonen:

$$W_b = \frac{\pi (30^4 - 24^4)}{32 * 30} = 1564,98 \text{ mm}^3$$

Siden W_b er lavere enn $W_{b,per}$, er denne profilen for liten. Derfor testes det med et rør av en størrelse større, som er 40x3:

$$W_b = \frac{\pi (40^4 - 34^4)}{32 * 40} = 3003,3 \text{ mm}^3$$

Denne rørprofilen er heller ikke stor nok, og derfor testes profilen som er en størrelse større, 48,8x4,45:

$$W_b = \frac{\pi (48,8^4 - 39,9^4)}{32 * 48,8} = \mathbf{6310,5 \text{ mm}^3}$$

Dette røret er akkurat innenfor kravet. For å beholde en lav vekt er det ikke ønskelig med et større rør enn dette. Denne profilen har en vekt på 1,8 kg/m. For denne profilen blir bøyemomentet på hvert rør i statiske scenarier:

$$M_b = \frac{M_{maks}}{4} = \frac{3126,9}{4} = \mathbf{781,7 \text{ Nm}}$$

Og dermed er bøyespenningen:

$$\sigma_b = \frac{781,7 * 10^3}{6310,5 \text{ mm}^3} = \mathbf{123,9 \text{ MPa}}$$

Denne spenningen er akkurat lavere enn tillatt spenning, og gir en nedbøying på:

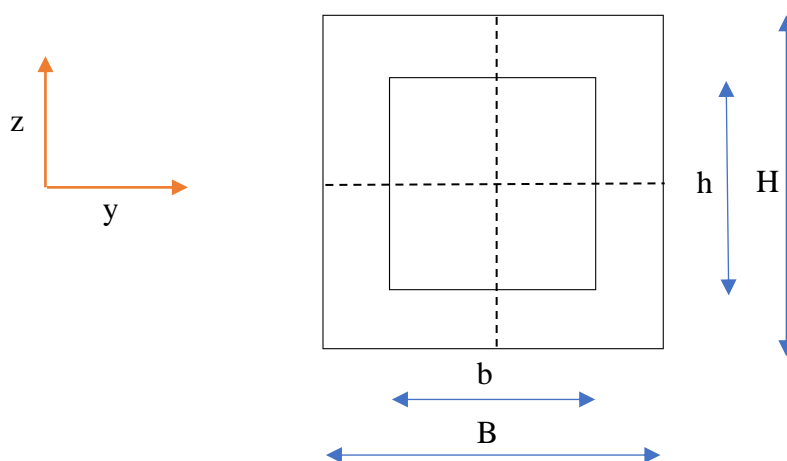
$$y_{maks} = \frac{5 * qL^4}{384EI}$$

$$I_x = I_y = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi(48,8^4 - 39,9^4)}{64} = 153975,4 \text{ mm}^4$$

$$y_{maks} = \frac{5 * 2779,5 * (3 * 10^3)^4}{4 * 10^3 * 384 * 70 * 10^3 * 153975,4} = \mathbf{68,0 \text{ mm}}$$

Det er også behov for å kartlegge hvilken firkantet rørprofil som egner seg best, sånn at det beste alternativet av de to kan kartlegges.

Rektangel [77]:



Figur 9.2: Illustrasjon av dimensjonene i et firkantet rørprofil.

Også for slike profiler er det motstandsmomentet likt i y- og z-aksen, siden profilen er like høy som den er bred, og defineres ved:

$$W_y = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$$

Starter med å sjekke om en 40x40x3 profil er tilstrekkelig:

$$W_y = \frac{40^4 - 34^4}{6 * 40} = 5098,6 \text{ mm}^3$$

Den er akkurat for lav. Derfor testes en profil med tykkere vegger, 40x40x4:

$$W_y = \frac{40^4 - 32^4}{6 * 40} = 6297,6 \text{ mm}^3$$

Denne er akkurat grei nok og har en vekt på 1,61 kg/m. Den maksimale bøyepeningen som oppstår med denne profilen blir:

$$\sigma_b = \frac{781,7 * 10^3}{6297,6 \text{ mm}^3} = \mathbf{124,1 \text{ MPa}}$$

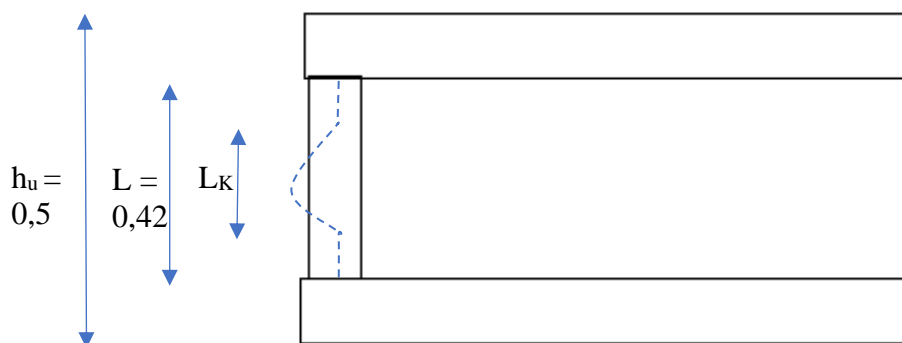
$$I_z = I_y = \frac{BH^3 - bh^3}{12} = \frac{40^4 - 32^4}{12} = 125952 \text{ mm}^4$$

Og dette gir en maksimal nedbøying på:

$$y_{maks} = \frac{5 * 2779,5 * (3 * 10^3)^4}{4 * 10^3 * 384 * 70 * 10^3 * 125952} = \mathbf{68,2 \text{ mm}}$$

Det er ikke store forskjeller i hverken spenning eller nedbøying mellom kvadratiske og runde rør. Det er lettere å bøye et rundt rør, men det er lettere å sammenstille konstruksjoner med kvadratiske profiler. Derfor velges den kvadratiske profilen 40x40x4, siden det er nødvendig å sveise sammen flere av profilene. I tillegg blir konstruksjonen noe lettere i vekt med firkantede rør.

Skjærspenninger ved bøyning ses bort fra, men det er relevant å undersøke hvor mye krefter de vertikale stagene blir utsatt for, hvilke rør som burde benyttes og om det er fare for knekk.



Figur 9.3: Illustrasjon av et av de vertikale stagene. Den stiplede linjen illustrerer knekk lengden.

Det er naturlig å velge kvadratiske rør for hele rammen, men hvilken profil de vertikale stagene skal ha må bestemmes. Alle vertikale rør skal sveises på og betraktes derfor fast innspennt i begge lengder, mellom de horisontale rørene. Høyden til understellet, h_u , er satt til 0,5 m, og om man trekker fra det ytre målet fra de horisontale rørene, blir lengden til det vertikale staget 0,42 m. Knekk lengden er da:

$$L_K = 0,5 * 0,42 \text{ m} = 0,21 \text{ m}$$

Knekkraften beregnet ut fra Eulers formel [77]:

$$F_E = \frac{\pi^2 E I_{min}}{L_K^2}$$

Siden det er den rammekonstruksjon er Tetmajers formel for knekking mer egnet, men det blir avansert å gjennomføre den for hele rammekonstruksjonen og derfor benyttes Eulers formel som en forenkling i håndberegningene. Deretter blir FEM-analyser av konstruksjonen utført.

Knekkraften stagene utsettes for er massekraften fordelt på antall stag. Det er planlagt å ha totalt seks vertikale stag som skal ta opp disse kreftene, i tillegg til en hylse, men den vil ha en annen dimensjon enn stagene. Det antas at kreftene fordeles likt på alle stag:

$$F_E = \frac{G_3}{7} = \frac{8338,5 \text{ N}}{7} = 1191,2 \text{ N}$$

Det er da mulig å finne det laveste, akseptable treghetsmomentet, I_{min} :

$$I_{min} = \frac{F_E * L_K^2}{\pi^2 * E} = \frac{1191,2 \text{ N} * 210^2 \text{ mm}}{\pi^2 * 70 * 10^3 \text{ MPa}} = 76,04 \text{ mm}^4$$

Dette er veldig lavt. Av standard rørprofiler er den minste størrelsen Tibnor leverer 40x40x3 [78]. Derfor velges dette røret for sidestagene i understellet.

Hvis all vekten hadde vært på ett rør, er det da godt nok dimensjonert med dette røret? Når knekklasten er lik tyngdekraften på 8338,5 N:

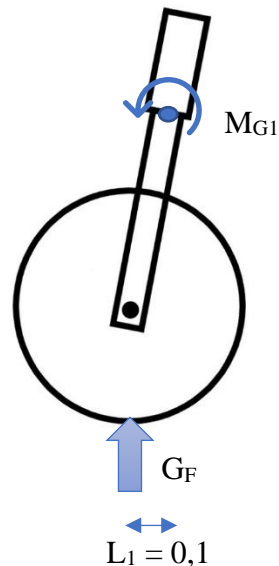
$$I_{min} = 5098,6$$

$$L_K = \sqrt{\frac{\pi^2 * E I_{min}}{F_E}} = \sqrt{\frac{\pi^2 * 70 * 10^3 \text{ MPa} * 5098,6 \text{ mm}^4}{8338,5 \text{ N}}} = 650,0 \text{ mm}$$

Ut fra de utførte beregningene, konkluderes det med at de mest egnede rørprofilene for understellrammen er 40x40x4 kvadratiske rør for de horisontale stagene og 40x40x3 rør for de vertikale. For de vertikale er det mulig å velge en mindre tykkelse, men da må sirkulære rør benyttes. Det er behov for å utføre FEM-analyser på konstruksjonen, siden flere forenklinger ble utført i beregningene.

9.3 Dimensjoner og krefter på forhjulsgaffel

For å enkelt rotere forhjulet er det logisk å velge en sirkulær rørprofil til forhjulsgaffelen. Forhjulsgaffelen må tåle en rekke ulike belastninger, og den største belastningen den kommer til å utsettes for er å kjøre i et «pothole». Det vil forårsake spenningskonsentrasjoner i forhjulsgaffelen. Profilvalget for gaffelen er en dimensjonerende faktor for valg av hylse og kulelager i hylsen.



Figur 9.4: Skisse av forhjulsgaffelen og den statiske tyngdekraften som virker på det.

Den statiske lasten til bilen er maksimalt 850 kg. Ved å anta at det er like mye last på alle tre hjulene, blir det da en last på omtrent 2779,5 N ved hvert hjul. Forhjulet er utstyrt med en forhjulsgaffel med to fjærer. Hver av fjærene må kunne ta opp en kraft på ca. 1400 N. Gaffelen skal ha en castervinkel på 11°. Ved å sette fjærvandringen til 10 cm, er det behov for en fjær med fjærkonstanten:

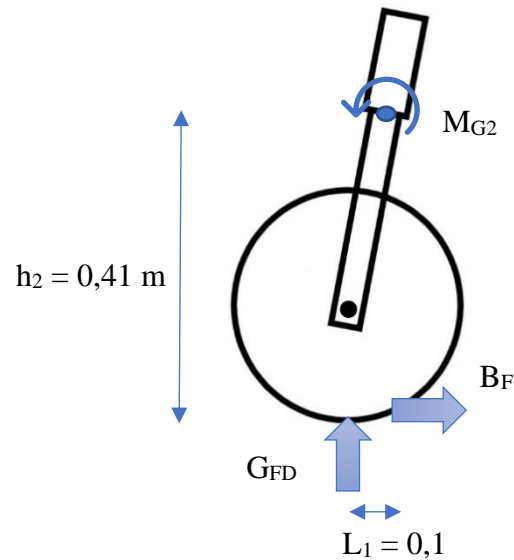
$$k = \frac{F_S}{x} = \frac{1400 \text{ N}}{0,1 \text{ m}} = 1387,5 \text{ N/m}$$

Ved å bruke 120x70 dekk er diameteren til dekket ca. 375 mm. Med en castervinkel på 11°, blir da momentarmen fra motstandskraften under dekket og opp til hylsen ca. 0,1 m. Momentet som oppstår i forhjulsgaffelen på grunn av de statiske kreftene er da:

$$\sum M = 0$$

$$M_{G1} = G_F * 0,1 \text{ m} = 4169,25 \text{ N} * 0,1 \text{ m} = \mathbf{416,9 \text{ Nm}}$$

Ved sterk bremsing vil lasten bli høyere på forhjulsgaffelen, og det vil i tillegg oppstå en bremsekraft. Da blir momentet til festepunktet til forhjulsgaffelen:



Figur 9.5: Kraftene som virker på forhjulsgaffelen når Dolphin bremses.

$$M_{G2} = -G_{FD} * 0,1 \text{ m} + B_F * 0,4126 = 6,17 \text{ kN} * 0,1 \text{ m} - 3,67 \text{ kN} * 0,41 \text{ m} = \mathbf{0,9 \text{ kNm}}$$

Det dimensjonerende momentet blir da M_{G2} , siden det er størst. For å få gaffelen så sterk som mulig, velges S355 som materiale. Den tillatte bøyenspenningen blir da:

$$\sigma_{till} = \frac{355}{2} = 177,5 \text{ MPa}$$

Nødvendig profil blir da:

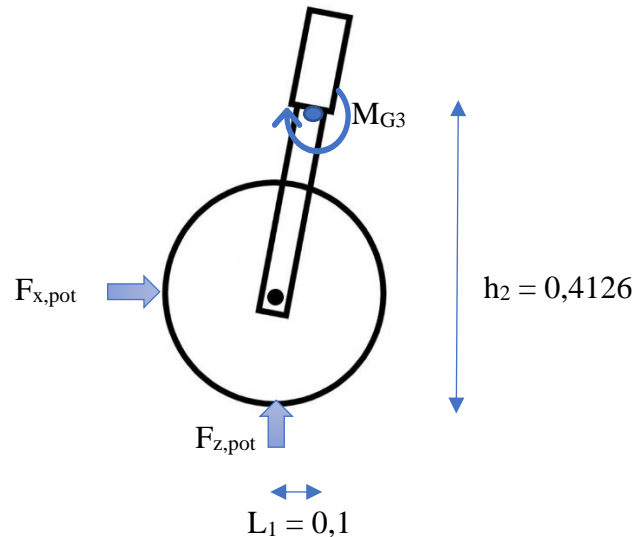
$$W_b = \frac{M_b}{\sigma_{till}} = \frac{900\,000 \text{ N}}{177,5 \text{ MPa}} = \mathbf{5070 \text{ mm}^3}$$

Dette muliggjør bruk av flere ulike profiler. Det er planlagt å bruke en stålaksel i forhjulsgaffelen og undersøker derfor om en aksel med 30 mm diameter er tilstrekkelig:

$$W_{b30} = \frac{\pi * D^3}{16} = \frac{\pi * 30^3}{16} = \mathbf{5301,4 \text{ mm}^3}$$

Denne profilen er tilstrekkelig for svært brå bremsing, og velges derfor i forhjulsgaffelen.

Den største belastningen forhjulsgaffelen vil utsettes for er å kjøre i et «pothole», og derfor er det viktig å undersøke hvor store spenninger som oppstår i dette scenariet.



Figur 9.6: Kraftene som virker på forhjulsgaffelen når den kjører inn i et pothole.

I kapittel 6.4 ble det kartlagt at de maksimale kreftene som oppstår i et slikt scenario er:

$$F_{x,pot} = 7,7 \text{ kN}$$

$$F_{z,pot} = 10,3 \text{ kN}$$

Disse kreftene fører til spenninger og muligens knekk og torsjon. På grunn av disse kreftene blir momentet i gaffelens festepunkt ved hylsen:

$$\sum M = 0$$

$$F_{z,pot} * 0,1m - F_{x,pot} * \left(0,6 - \frac{374,8}{2}\right) - M_{G3} = 0$$

$$M_{G3} = 10,3kN * 0,1m - 7,7kN * 0,4126m = -2,147 \text{ kNm}$$

Bøyepeningene som da oppstår, er:

$$\sigma_{b30} = \frac{M_b}{W_{b30}} = \frac{2\,147\,000 \text{ Nmm}}{5301,4 \text{ mm}^3} = 405,0 \text{ MPa}$$

Denne spenningen er langt over tillatt spenning, som er på 88,75 MPa, for krappe bevegelser. Det forventes at det oppstår større spenninger enn tillatt i et slikt scenario, men en spenning som er over fire ganger så stor, er for høyt. Dermed er ikke en 30 mm aksel tilstrekkelig og en stålaksel med 40 mm diameter undersøkes istedenfor.

$$W_{b40} = \frac{\pi * D^3}{16} = \frac{\pi * 40^3}{16} = 12566,4 \text{ mm}^3$$

Da blir den største spenningen som oppstår:

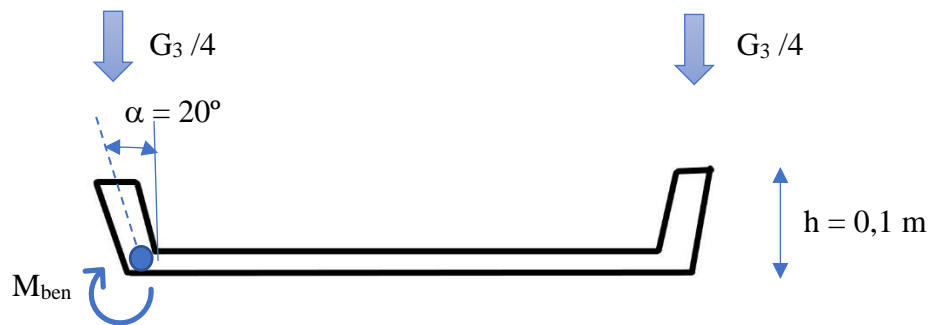
$$\sigma_{b40} = \frac{M_b}{W_{b40}} = \frac{2\,147\,000 \text{ Nmm}}{12566,4 \text{ mm}^3} = 170,8 \text{ MPa}$$

Denne spenningen er også alt for høy, men ved kjøring inn i «potholes» er det forventet at det vil oppstå deformasjoner i forhjulsakselen. Derfor velges en stålaksel med diameter på 40 mm for forhjulsgaffelen, med det er nødvendig å utføre en FEM-analyse for å kontrollere hvor store deformasjonene blir i akselen.

9.4 Dimensjoner og krefter på koplingsramme

For å oppnå selvsentrerende kopling med koniske spor, er det fornuftig å velge runde rør for bena kupéen skal stå på. Det er da nødvendig å kartlegge hvilken størrelse de burde ha. Det skal være to ben og de skal være omtrent en meter lange, horisontalt. De mest utsatte stagene i bena er de vertikale stagene. På det meste vil 8338,5 N, G_3 , fordeles på fire vertikale stag.

For å få en så tett kopling som mulig mellom kupé og understell er det gunstig med korte ben under kupéen, og derfor settes en benhøyde på 0,1 m. De vinkles utover, for å oppnå selvsentrering, og har en vinkel på 20° , slik figur 9.7 viser.



Figur 9.7: Et av låsebenene til kupeen. På grunn av kraften $G_3/4$ oppstår et moment M_{ben} i begge hjørnene. I figuren er kun det ene hjørne illustrert.

Når positivt moment er med klokka blir momentet i benets hjørne:

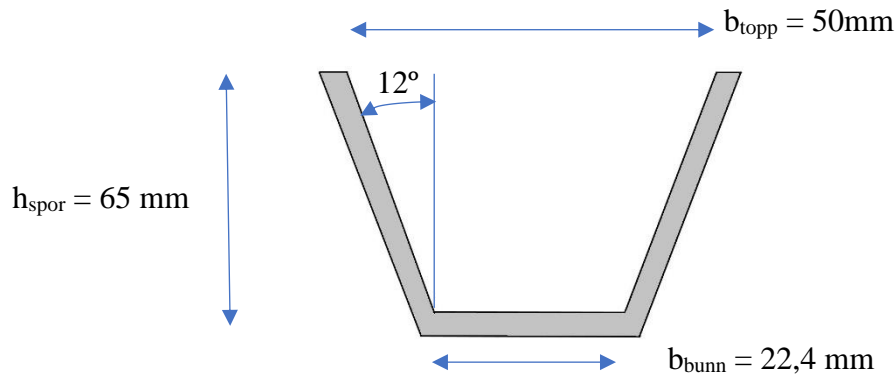
$$\sum M = 0 \rightarrow M_{Ben} - \frac{G_3}{4} = 0 \rightarrow M_{Ben} = 75,1 \text{ Nm}$$

$$W_b = \frac{M_b}{\sigma_{till}} = \frac{75100 \text{ Nmm}}{125 \text{ MPa}} = 600,8 \text{ mm}^3$$

Det er dermed ikke behov for en stort profil, men det kan likevel være lurt å velge et profil med relativt stor ytre diameter. Dette er for å uttrykke sikkerhet til brukeren og at det er stabilt og trygt, men også for å klare selvsentrering. Større rør vil gi en større koplingsoverflate, slik at det er lettere å lande i sporene og slik at spenningen på koplingsplaten blir fordelt utover. Derfor velges en 40x3 rørprofil.

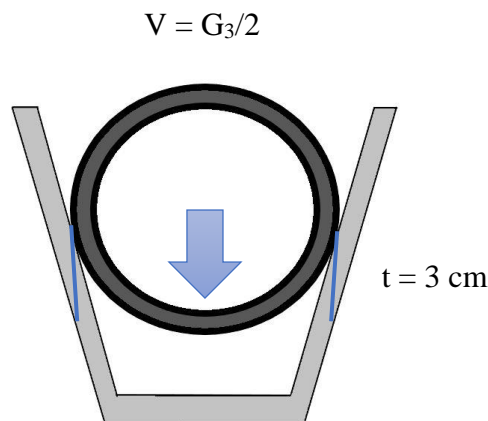
For at bena skal sitte godt oppi sporene, er en fornuftig spordimensjon 1 m lang, 0,05 m bred og 0,065 m dyp med en innover gående vinkel på omtrent 12° , slik figur 9.8 viser. Dette er for at rørene som er 40 mm i diameter, skal passe ned i sporet. Siden sporet skal ha en konisk utforming, må det på toppen være en åpning som er bredere enn 40 mm, derav 50 mm. For at røret skal sitte godt nede i sporete, er det en fordel at det er relativt dypt. Med en dybde på 65

mm og en innovergående vinkel på 12 grader, vil tykkelsen i midten av sporet være 36,2 mm, og i bunnen 22,4 mm. Hvert av sporene skal sveises fast i understellets rør.



Figur 9.8: Profilen til sporet med satte dimensjoner.

Når den totale vekten til kjøretøyet ligger på koplingsrammen, er det fare for at rammen blir utsatt for avskjæring. Veggtykkelsen, t , må derfor være:



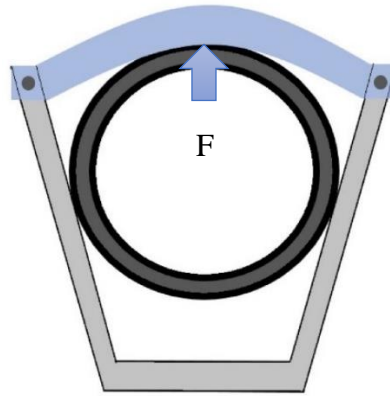
Figur 9.9: Skjærkreftene som virker på sporet på grunn av vektbelastning.

$$t = \frac{V}{\tau_{\text{till}} * L * 2} = \frac{8338,5\text{ N}}{0,6 * 125 * 2 * 2 * 1\text{ m}} = 27,8\text{ mm} \approx 3\text{ cm}$$

9.5 Dimensjoner og krefter på låsene

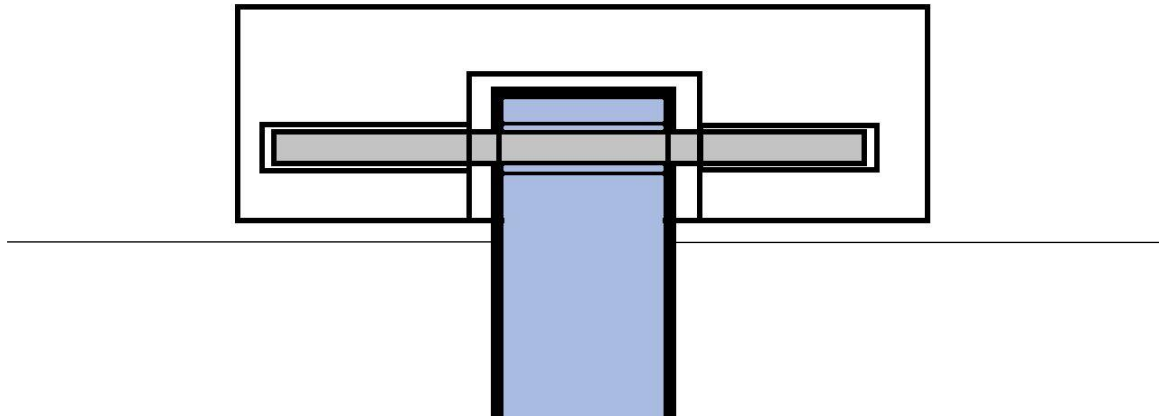
Det er flere knutepunkt i konstruksjonen det er behov å utføre beregninger på. De viktigste delene er låsingskomponentene på koplingsplattformen. Det er disse som skal holde modulene sammen og det er helt essensielt at de er tilstrekkelig dimensjonert.

Det vil totalt være seks låser, tre for hvert ben. Hver av låsene vil festes til låsesporet, med en bolt i hver ende. En er bevegelig og den andre er konstant i samme posisjon.



Figur 9.10: Illustrasjon av en av seks låser. Benet til kupéen senkes ned i sporet, og en låsearm legger seg over å låses på den andre siden.

Avskjæring av nagleskaft:



Figur 9.11: En side av låsing sett ovenfra. Den blå delen er låsearmen, den grå er boltene som går gjennom armen og er festet i låsesporet på begge sider. Det antas i beregningene at det ikke er noe klaring mellom låsearmen og låsespotet, og boltene er dermed kun utsatt for avskjæring på to flater. En på hver side av låsearmen.

For å finne en tapp/aksel til låsen med tilstrekkelig diameter er det utført beregninger på avskjæring av nagleskaft i to ulike tilfeller. Det antas at kreftene fordeles likt på alle låsene, og at det totalt er seks låser med en tapp/bolt i hver lås.

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi * d_h^2 * i}{4}}$$

- τ er den tillatte skjærkraften i boltene.
- F er skjærkraften som virker på boltene
- d_h er naglediameteren
- i er antall skjærflater

Boltene anses som syrefaste stålskruer i fasthetsklasse 4.6. De har en strekkfasthet på 400 MPa, og flytegrensen er da 240 MPa.

Den tillatte skjærspenningen er:

$$\tau_{till} = 0,6 * \sigma_{till} = 0,6 * \frac{240}{2} = 72$$

$$d_h = \sqrt{\frac{4F}{\tau_{till} * \pi * i}}$$

Med totalt 12 bolter, blir det 24 avskjæringsflater. Ved nagleberegninger er hullet like stort som naglen. Den nødvendige naglediameteren er:

$$d_h = \sqrt{\frac{4 * 8338,5N}{72 * \pi * 24}} = 2,5 \text{ mm}$$

Dermed må låseakselen være minst 2,5 mm. Dette rundes opp til 3 mm. For å være sikker på at kupéen sitter fast i understellet når en kjører inn i et pothole, utføres det beregninger for dette tilfellet også:

$$\tau_{till} = 0,6 * \sigma_{till} = 0,6 * \frac{240}{4} = 36 \text{ MPa}$$

Da blir den nødvendige hulldiameteren:

$$d_h = \sqrt{\frac{4 * 10300N}{36 \text{ MPa} * \pi * 24}} = 3,9 \text{ mm}$$

Det er dermed behov for M4 boltstørrelse for å feste låsen. Den mest relevante varianten er passbolter. Hulldiameteren bolten skal føres gjennom, burde være mindre eller like stor som bolt diameteren pluss 0,15 mm. Dermed settes hullets størrelse til 4,15 mm.

Det er ikke bare låsetappen som blir utsatt for spenningskonsentrasjoner, men også materialet den festes i. For å kartlegge hvor tykk låsearmen minst må være, blir hullkantrykksformelen benyttet:

$$p_h = \frac{\text{kraft}}{\text{projisert hullflate}} = \frac{F}{t * d_h * n}$$

- p_h er hulltrykket
- $t * d_h$ er den projiserte hullflaten
- n er antall nagler

Materialet i armen er S355, og for statiske tilfeller er sikkerhetsfaktoren 2 og ved plutselige belastninger er den 4. Tillatt hullkantrykk i statiske tilfeller er da:

$$p_h = \frac{355 \text{ MPa}}{2} = 177,5 \text{ MPa}$$

$$t = \frac{F}{p_h * d_h * n} = \frac{850 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{177,5 \text{ MPa} * 4,15 \text{ mm} * 12} = 0,94 \text{ mm}$$

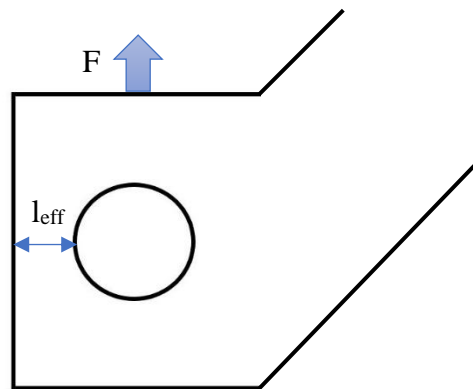
Ved en plutselig belastning, som å kjøre inn i et pothole, blir nødvendig veggtykkelse:

$$p_h = \frac{355 \text{ MPa}}{4} = 88,75 \text{ MPa}$$

$$t = \frac{F}{p_h * d_h * n} = \frac{10300 \text{ N}}{88,75 \text{ MPa} * 4,15 \text{ mm} * 12} = 2,3 \text{ mm}$$

Det er dermed nødvendig med en minimumstykkelse for låsearmen på 2,3 mm, som rundes opp til 3 mm.

Det er også nødvendig å undersøke hvor langt det må være fra kanten av hullet og til enden på armen, l_{eff} for å motstå utrivning av grunnmateriale.



Figur 9.12: Illustrasjon av hvor utrivning av grunnmateriale kan oppstå, når en vertikal kraft virker på armen. l_{eff} er lengden på utsiden av hullet, der utrivning kan oppstå.

$$\tau_{till} \geq \frac{F}{2 * l_{eff} * t}$$

$$l_{eff} \geq \frac{F}{2 * t * \tau_{till}} = \frac{8338,5 \text{ N}}{2 * 3,5 * 106,5 * 12} = 1,86 \text{ mm} \approx 2 \text{ mm}$$

Når bilen kjører inn i et pothole blir den maksimale belastningen:

$$l_{eff} \geq \frac{F}{2 * t * \tau_{till}} = \frac{10300 \text{ N}}{2 * 3,5 * 53,25 * 12} = 4,6 \text{ mm} \approx 5 \text{ mm}$$

Etter normal praksis er normale hullavstander:

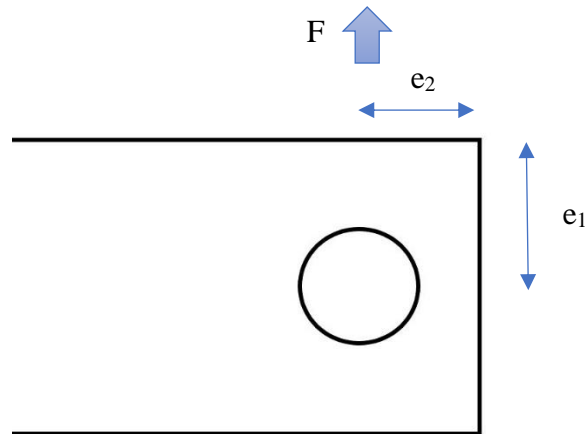
$$e_1 = d_0 * 2,0$$

$$e_2 = d_0 * 1,5$$

Med en hull diameter d_0 på 4,15 mm, blir anbefalt avstand:

$$e_1 = 4,15 * 2,0 = 8,3 \text{ mm}$$

$$e_2 = 4,15 * 1,5 = 6,3 \text{ mm}$$



Figur 9.13: Figuren viser lengdene e_1 og e_2 når en vertikal kraft påføres låsearmen.

Det er ikke bare vertikale belastninger som virker på låsearmen, men også horisontale. I de fleste kjørescenarioer vil dronemodulen være avkopleet. Ved bråbremsing oppstår en vertikal kraft på 2,6 kN. Om denne kraften fordeles likt på alle de seks låsene, belastes de med en skjærkraft på 0,43 kN per stykk. Arealet som da utsettes for denne skjærspenningen er platetykkelsen multiplisert med avstanden fra hullet og til enden:

$$A = t * (e_1 - d_{\frac{1}{2}}) * 2 = 25 * 7 * 2 = 350 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{430 \text{ N}}{350 \text{ mm}^2} = 1,23 \text{ MPa}$$

Skjærspenningen er dermed mye lavere en maksimal tillatt spenning dermed er valgte dimensjoner ok.

9.6 Dimensjoner og utveksling på styringen

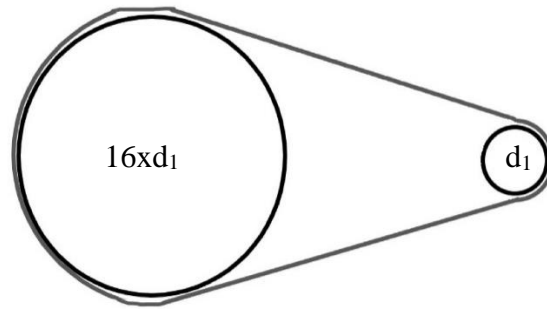
Avslutningsvis er det nødvendig å beregne kreftene som opptrer i rattet ved styring og utvekslingen i tannhjulene ned til forhjulet. Rattet burde ikke være tyngre å rotere enn 25 kg. Det tilsvarer en kraft på omtrent 250 N. Forhjulet må kunne rotere 45 grader til begge veier, men ikke noe mer enn det. Rattet skal kunne roteres omtrent 2 runder hver vei. For å kartlegge nødvendige tannhjuldimensjoner i styringssystemet beregnes utvekslingsforholdet i:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{360 * 2}{45} = 16$$

- n_1 er omdreiningen til rattet
- n_2 er omdreiningen til forhjulet
- z_1 er tanntallet til det drivende tannhjulet
- z_2 er tanntallet til det drevende tannhjulet

Utvekslingsforholdet er direkte knyttet til dimensjonsforholdet mellom tannhjulene i styresystemet. Det vil si at det drevende tannhjulet, det som er festet til forhjulet, må være seksten ganger så stort som det drivende, det som er koplet til rattet. Med stort, menes det at det

må det ha seksten ganger så mange tenner og/eller ha en ytre diameter som er seksten gangen så stor som det drivende tannhjulet har.



Figur 9.14: Illustrasjon av tannhjulenes utvekslingsforhold. Tannhjulet til venstre må ha seksten ganger så mange tenner på tannhjulet, som tannhjulet til høyre, for at ønsket rotasjon skal oppnås.

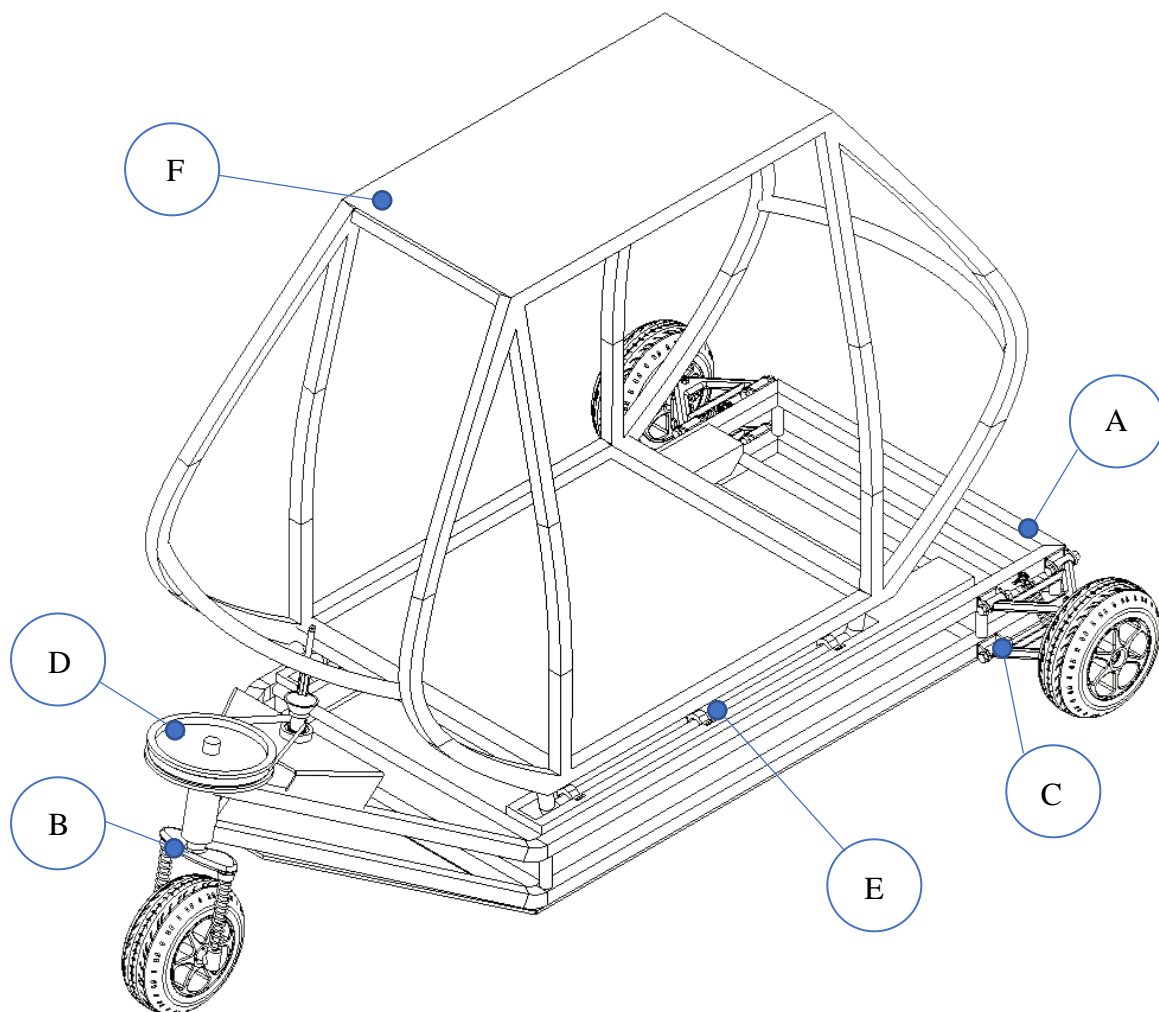
For å oppsummere, skal understellsrammen bygges opp av kvadratiske 40x40x4 rør. De vertikale rørene skal være av dimensjonen 40x40x3. Forhjulsgaffelen skal ha en 40 mm stålaksel. Låsebena under kupéen skal produseres i 40x3 rørprofiler og låseskinnen skal ha en platetykkelse på 3 cm. Disse dimensjonene danner grunnlaget for 3D CAD-modelleringen som legges frem i neste kapittel.

10 PRODUKTARKITEKTUR OG KONSEPTDESIGN

I dette kapitlet legges det frem et konseptdesign basert på dimensjoneringsberegningene og informasjonsinnsamlingen tidligere i rapporten. For å visualisere de foretrukne løsningsalternativene som en sammensatt helhet, er konseptdesignet 3D-modellert i Solidworks.

10.1 Sammenstilling

Figur 10.1, under, viser sammenstillingen av understellmodulen og kupéen, med alle tilhørende komponenter. Understellmodulen deles inn i seks hoveddeler som er: Understellramme, forhjulsgaffel, bakhjulsoppheng, styringssystemet, koplingsystemet og kupé. Kupéen blir kun sett på som en hoveddel, med koplingsben inkludert.



Figur 10.1: Tegning av sammenstillingen som består av fire hoveddeler. A) er understellrammen, B) er forhjulsgaffelen, C) er bakhjulsoppheng, D) er styringssystemet, E) er koplingsystemet og F) er kupéen.

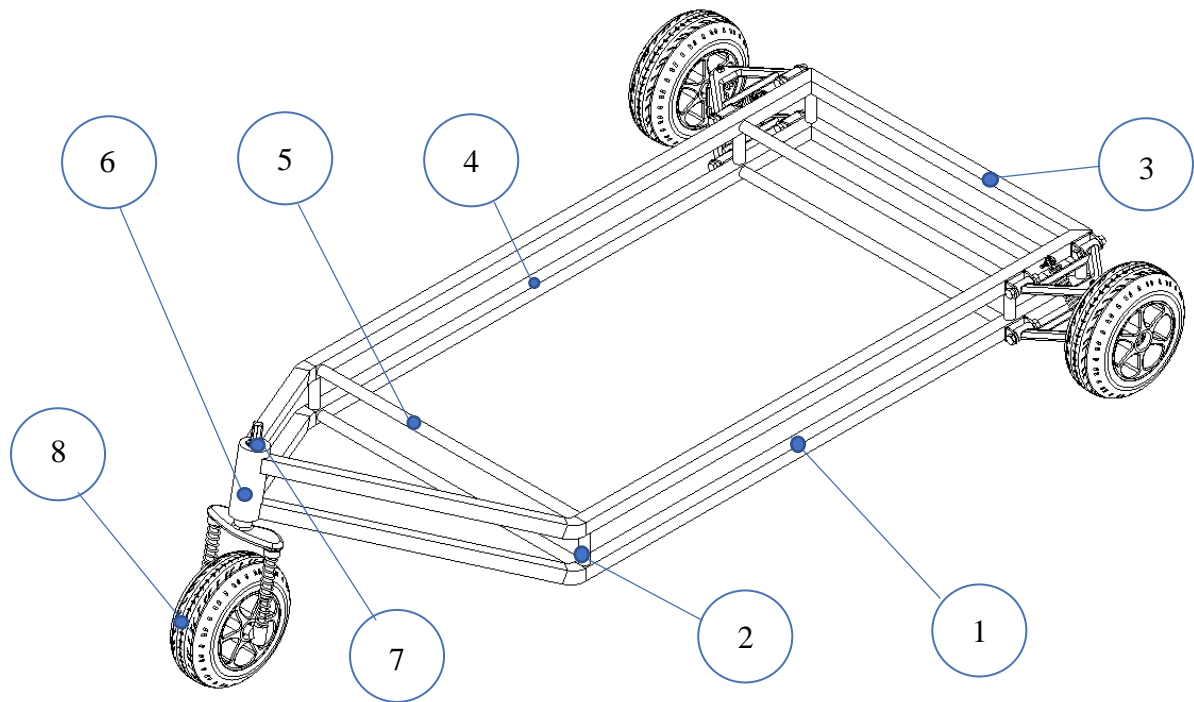
Sammenstillingen består av mange komponenter. I tabell 10.1, under, er alle komponentene i sammenstillingen navngitt og listet opp etter delnummer.

Tabell 10.1: Dellisten for alle komponentene i sammenstillingen.

Del:	Navn:	Del:	Navn:
1	Bærerør venstre	22	Mutter M10
2	Vertikalt rør	23	Bolt M8x40
3	Bakre mellomrør	24	Mutter M8
4	Bærerør høyre	25	Navgaffel
5	Midtrør	26	Styringsens festeplate
6	Hylse forhjulsgaffel	27	Kulelager 15 ABB - 0040
7	Kulelager 15ABB-4025	28	Drivende hylse styringskopling
8	Hjul	29	Drevene hylse styring
9	Styreaksel forhjulsgaffel	30	Reim 300x1220
10	Festeplate forhjulsgaffel	31	Trakt styringskopling
11	Forhjulsdemping	32	Aksel styringskopling
12	Koplingshylse	33	Låseskinne
13	Forhjulsaksel	34	Låsearm
14	Skrue M4x15	35	Låsefjær
15	Festeører	36	Aksel låsearm
16	Bakhjulsdemping	37	Kupé sideramme
17	A-arm bakhjul	38	Nedre mellomrør kupé
18	Festeøre bakhjulsdemping	39	Øvre mellomrør kupé
19	Bolt M16x80	40	Låseben
20	Bolt M10x45	41	Midtre mellomrør kupé.
21	Mutter M16		

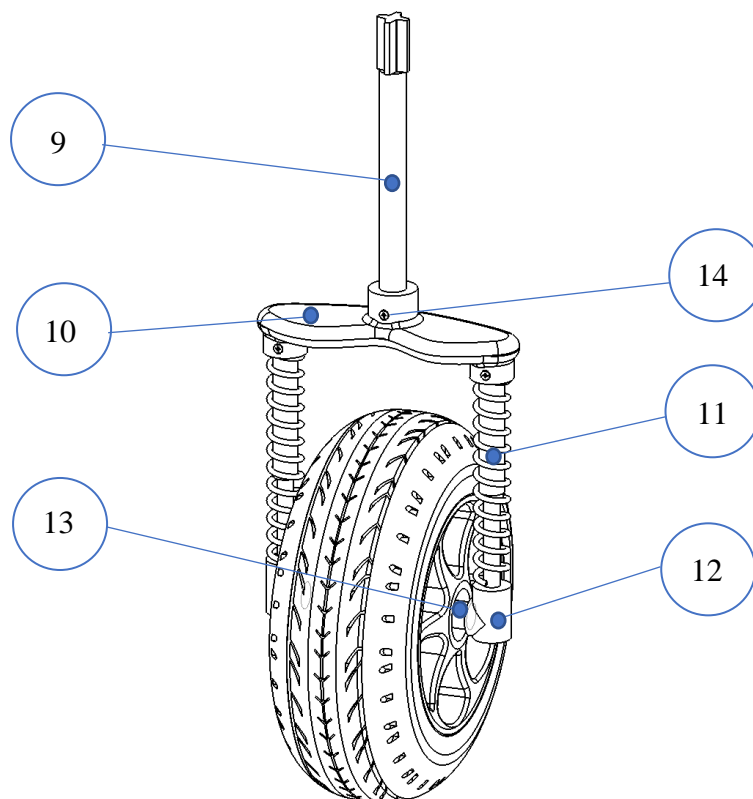
For å oversiktlig vise hvor de ulike komponentene er plassert, blir sammenstillingen delt opp i seks hoveddeler, der hver av de tilhørende komponentene er markert med tilhørende nummer. Forklaringer av hvordan komponentene henger sammen og hvordan systemene fungerer kommer lengre nede i kapittel 9.2 og 9.3 i tillegg til i monteringsanvisningen i kapitel 13.2.1.

Understellsramme (A)



Figur 10.2: Figuren viser hovedkomponenten understell, og komponentene 1 – 8 er nummert.

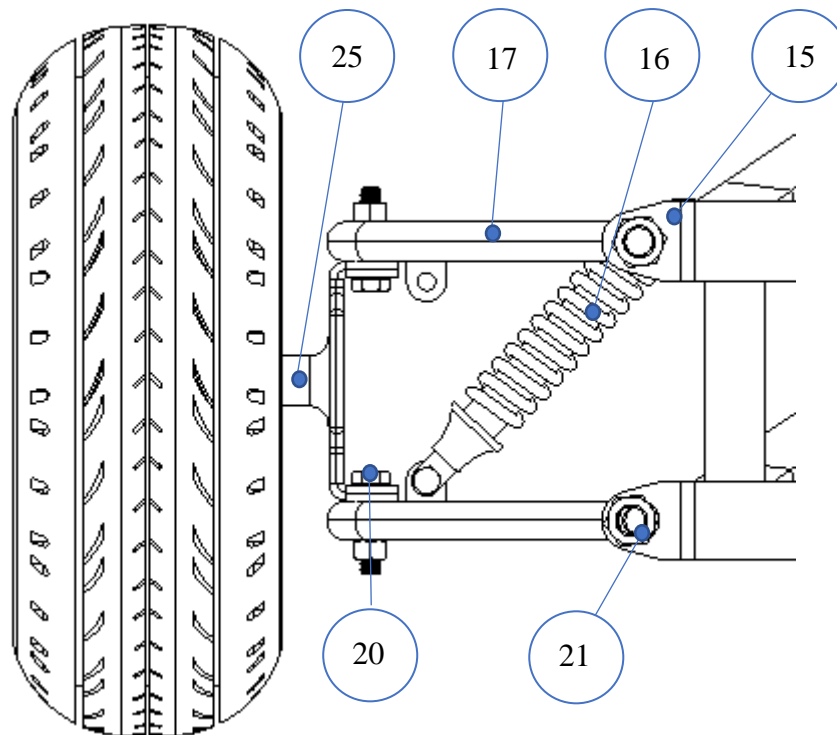
Forhjulsgaffel (B)



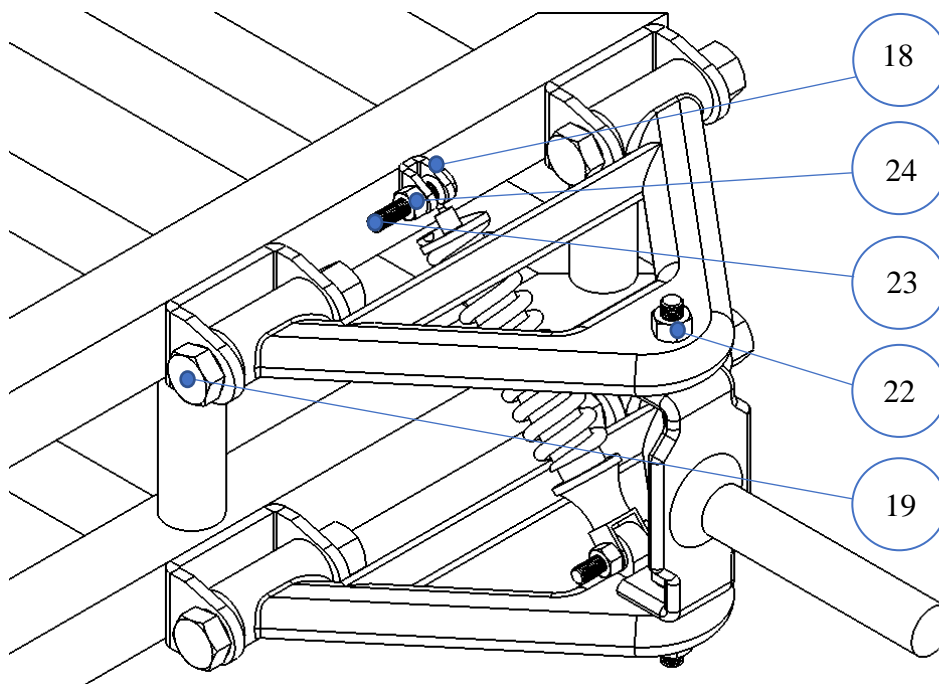
Figur 10.3: Figuren viser hovedkomponenten forhjulsgaffel sett bakfra. Den består av komponent nummer 9 – 14.

Bakhjulsoppheng (C)

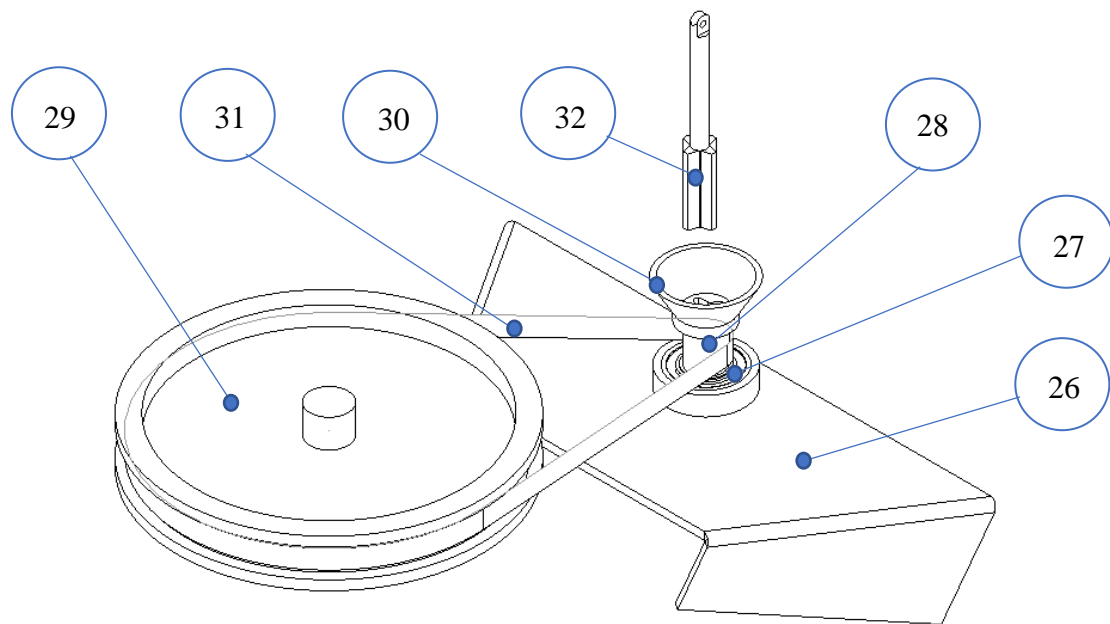
For å vise alle komponentene som tilhører bakhjulsoppheng er det valgt å sette inn to figurer fra ulike vinkler, slik at alle komponentene kommer frem.



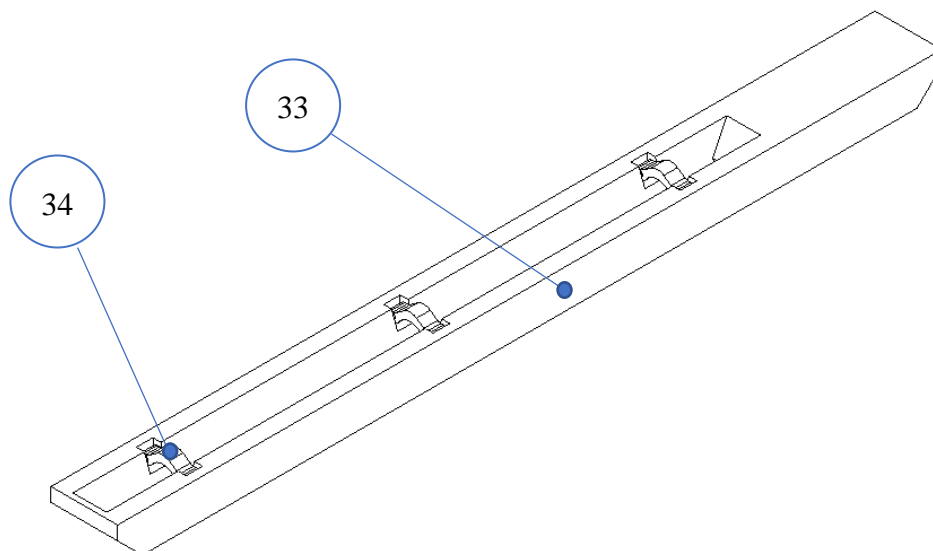
Figur 10.4: Figuren viser hovedkomponent bakhjulsoppheng med tilhørende komponenter. Komponent nummer 15-17, 20-21 og 25 blir vist i denne figuren.



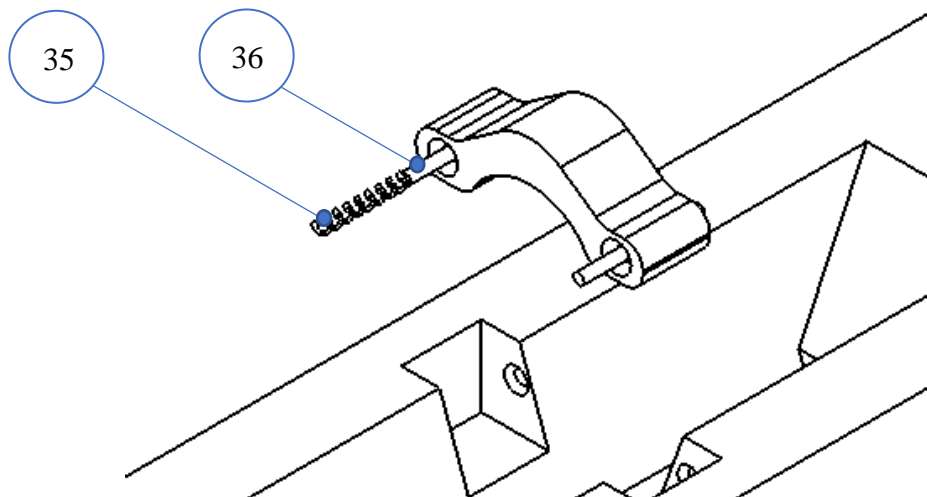
Figur 10.5: Figuren viser hovedkomponent bakhjulsoppheng med tilhørende komponenter. Komponent nummer 19-20 og 22-24 blir vist i denne figuren.

Styringsystem (D)

Figur 10.6: Figuren viser hovedkomponenten Styringsystem, og komponentene 26 - 32 er nummert.

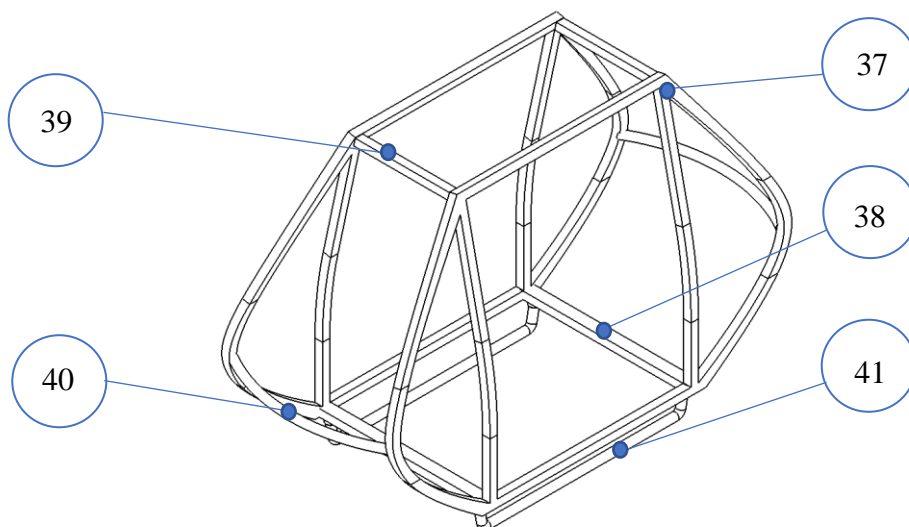
Låsesystem (E)

Figur 10.7: Figuren viser hovedkomponenten Låsesystem, og komponentene 33 - 34 er nummert.



Figur 10.8: For å se komponentene inne i låsesystemet er en eksplodert figur fremstilt av låsesystemet, der komponent 35 og 36 vises.

Kupé (F)



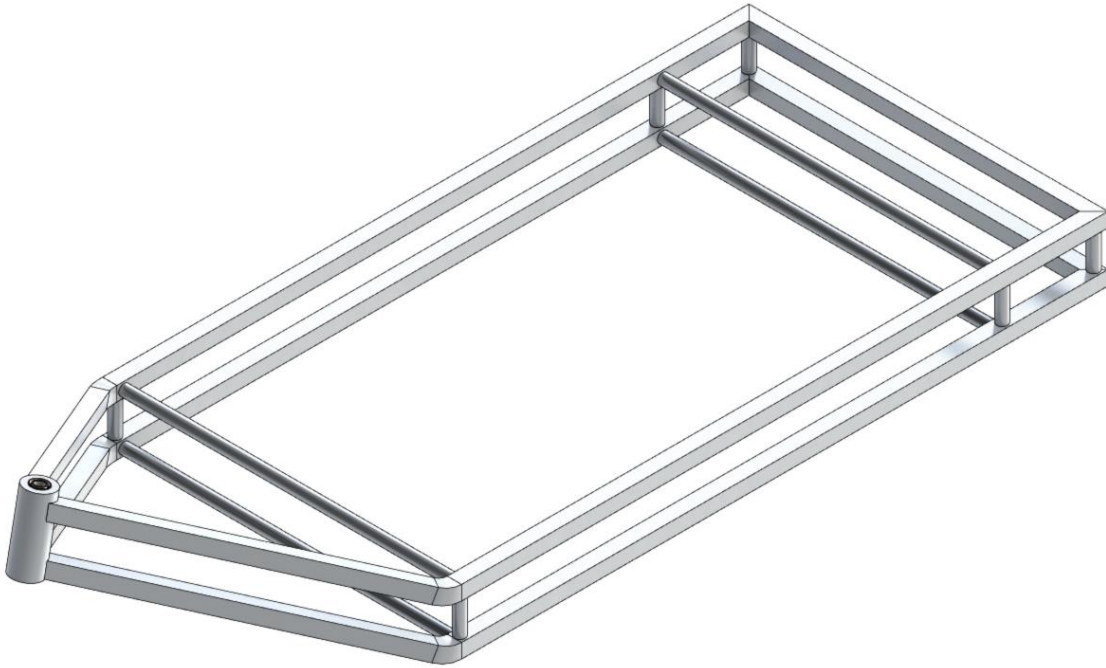
Figur 10.9: Figuren viser hovedkomponenten Kupé, og komponentene 37 - 41 er nummert.

10.2 Design av hovedelementer

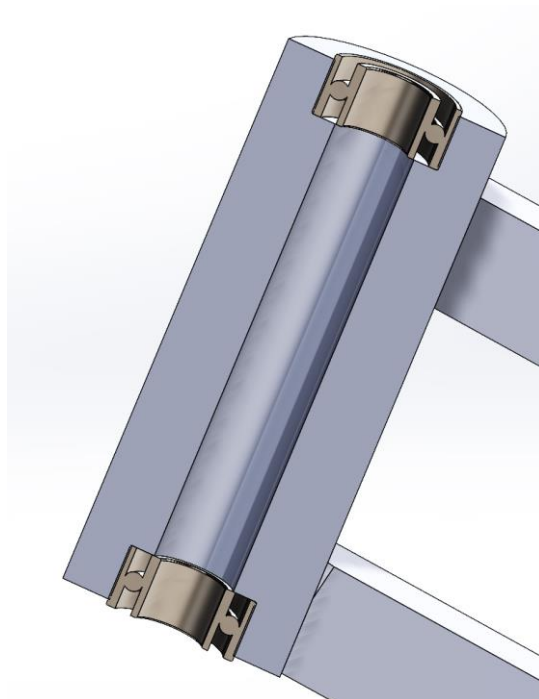
I denne seksjonen vises designet av hovedkomponentene og hvordan ulike komponenter er sammenstilt. Hensikten bak designvalgene blir forklart.

10.2.1 Understellramme (A)

Den første hoveddelen er understellrammen. Dette er den bærende strukturen for hele sammenstillingen.

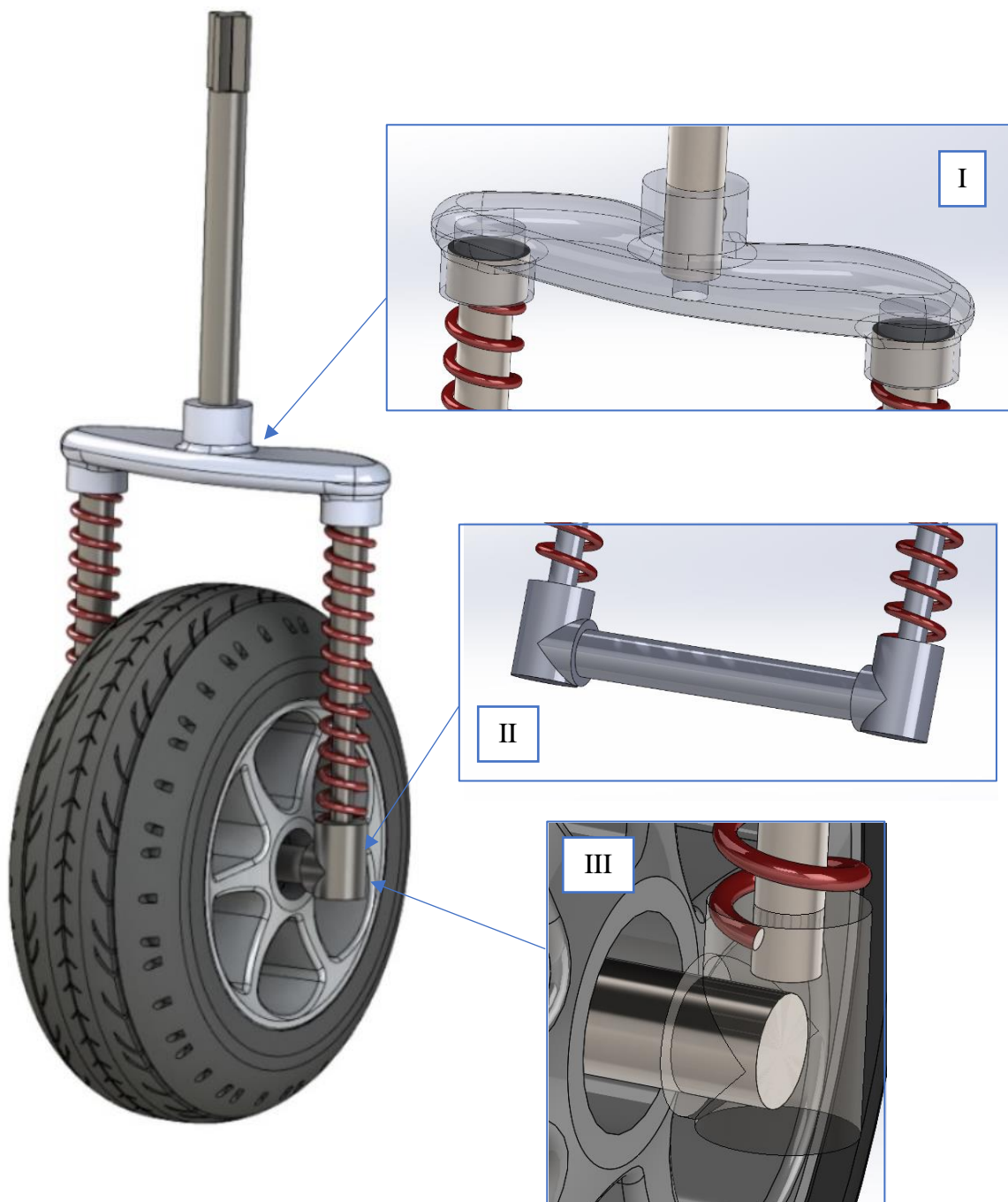


Figur 10.10: Figuren viser en oversikt over hovedkomponenten. Den ytre rammen består av kvadratiske rørprofiler, mens de fire avstivende stagene inni rammen er av en mindre dimensjon, og er sirkulære for å redusere vekten.



Figur 10.11: Inni forhjulshylsen er det to kulelager, ett i hver ende. Disse gjør det lettere å rotere akselen til forhjulsgaffelen i tillegg til at lagrene tar opp krefter.

10.2.2 Forhjulsgaffel (B)

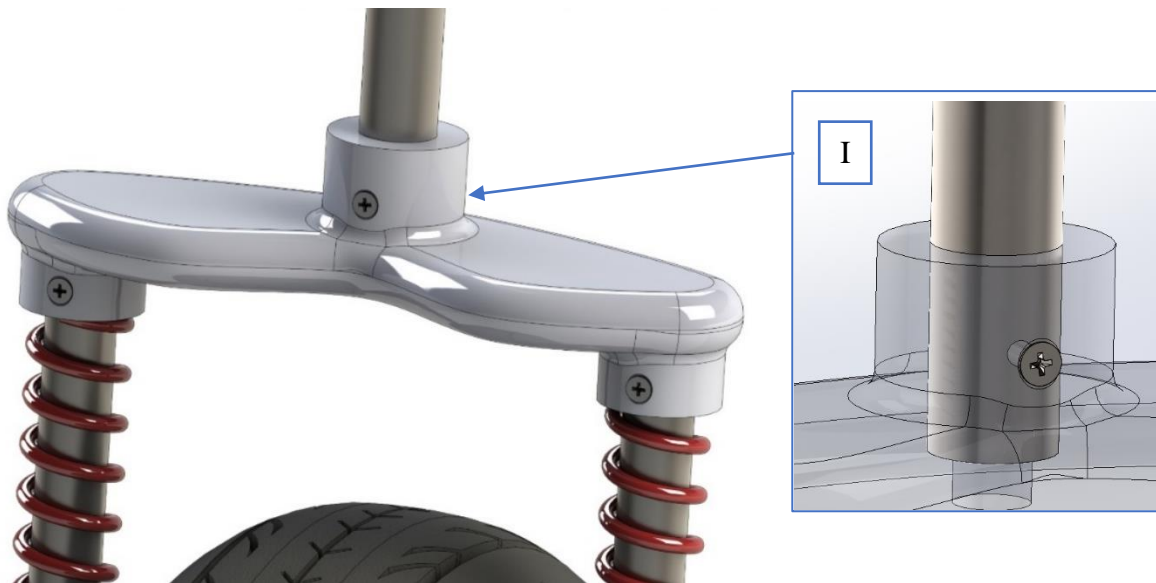


Figur 10.12: Hovedfiguren viser forhjulsgaffelen med alle tilhørende komponenter.

I) Viser hvordan forhjulsdemperne og styreakselen til forhjulsgaffelen festes inn i festeplaten til forhjulsgaffelen.

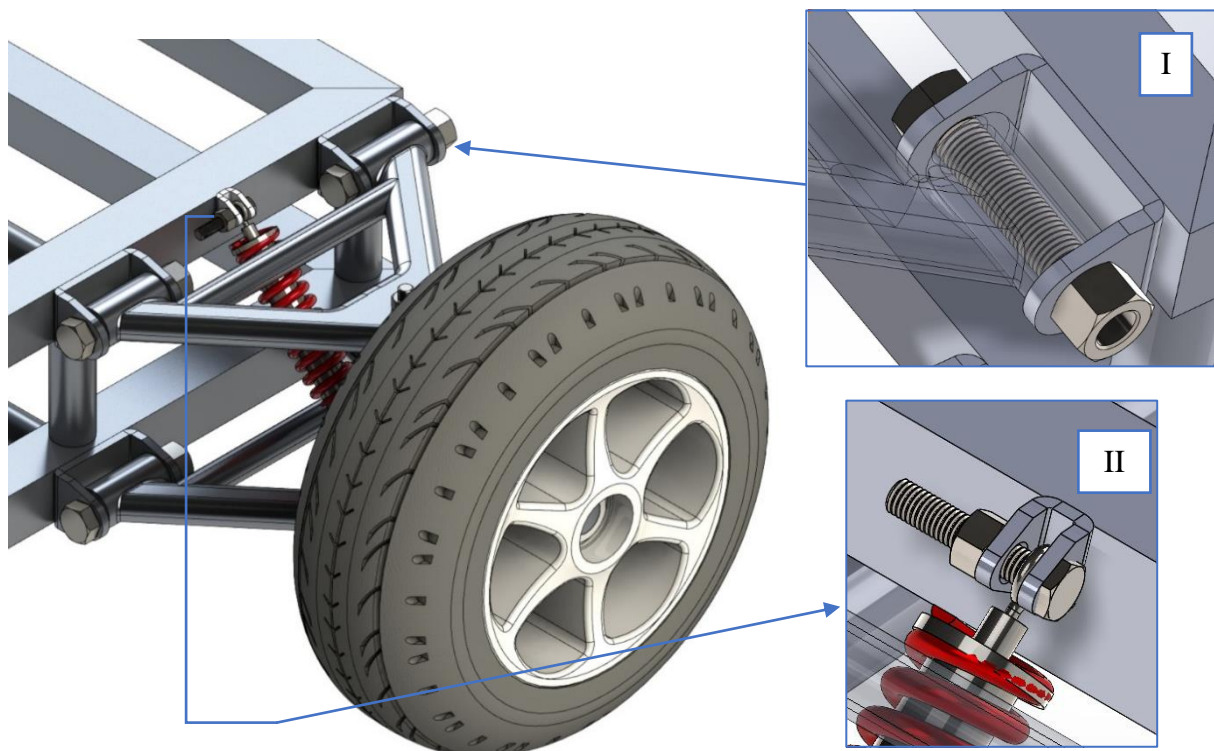
II) Viser forhjulakselen og koplingshylsene som fester hjulet til forhjulsdempingen.

III) Viser sammenkoplingen inne i koplingshylsen.

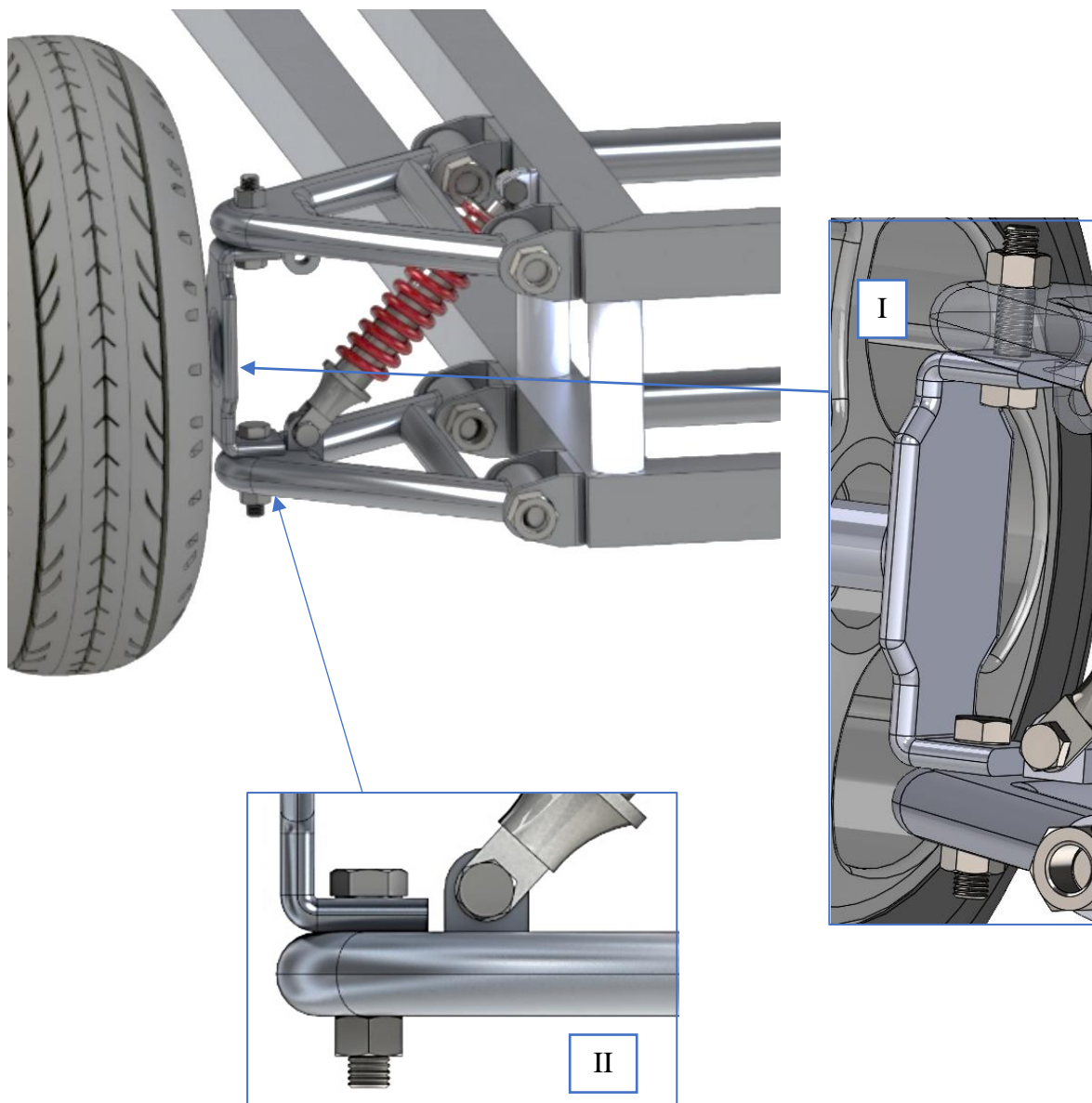


Figur 10.13: Figuren viser baksiden av forhjulsgaffelen. I) Viser festepunktet mellom styreakselen og festeplaten, der sistnevnte er transparent. Delene er festet sammen med en skrue i tillegg til en pressforbindelse.

10.2.3 Bakhjulsoppheng (C)



Figur 10.14: Hovedfiguren viser bakhjulsoppheng med alle tilhørende komponenter. I) Viser hvordan hjulopphenget festes til understellsrammen, med løfteører og skruebolter. II) Viser feste av bakhjulsdempingen med løfteøre og en skruebolt.



Figur 10.15: Figuren viser bakhjulsopphenget fra en annen vinkel der alle sammenføyingspunktene vises.

I) Viser navgaffelen som er skrudd fast i begge A-armene. Navgaffelen kan enkelt byttes ut med for eksempel en el-motor og det kan legges inn styremekanismer for å styre bakhjulene.

II) Viser hvordan bakhjulsdempingen festes til den nedre a-armen.

III) Viser hvordan navgaffelen festes til den nedre a-armen. Innfestningen er lik for begge a-armene.

10.2.4 Styringsystem (D)



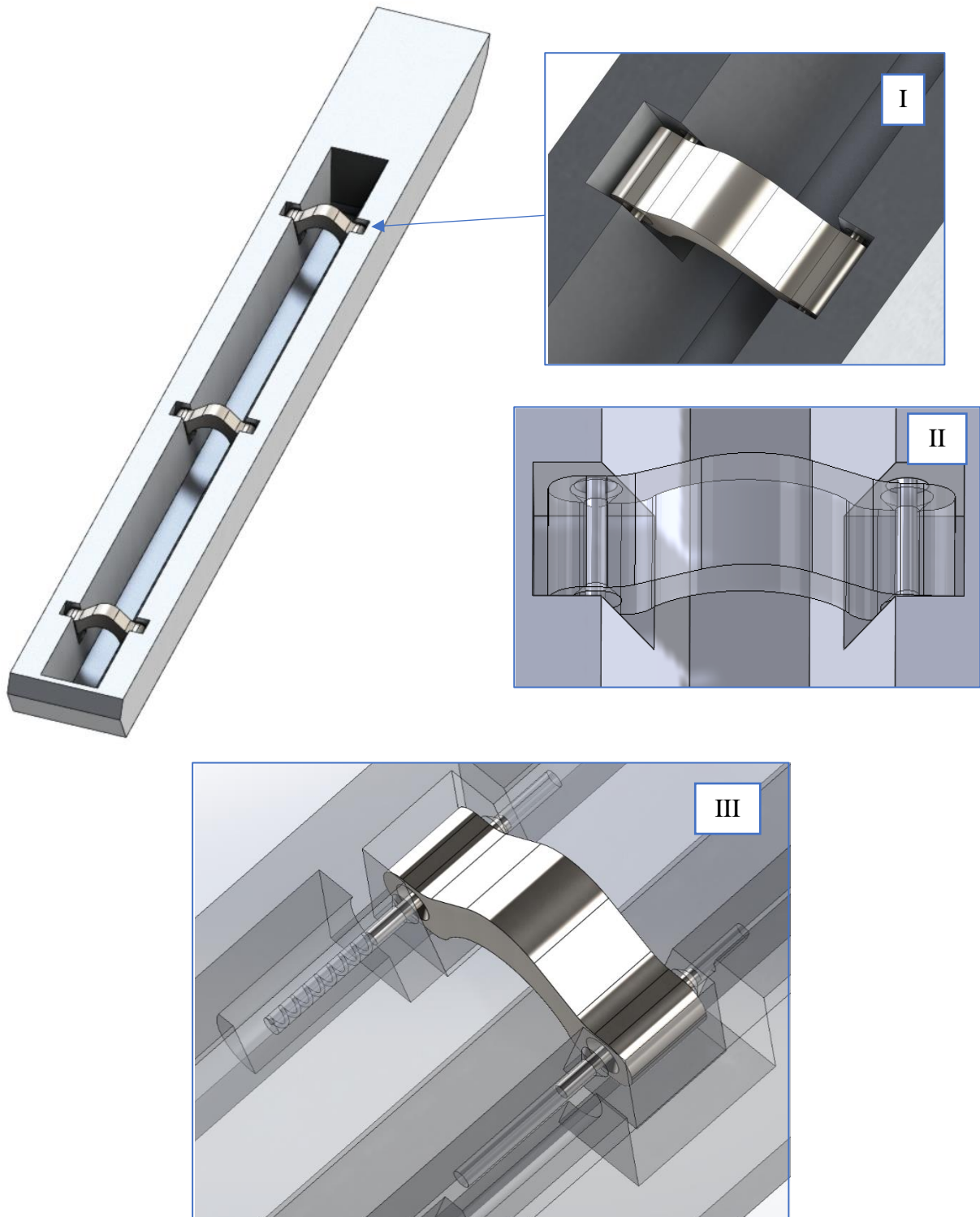
Figur 10.16: Figuren viser Styringsystemet når det ikke er montert på understellet. Øverst til venstre vises det fra oversiden og nederst til venstre vises det underfra.

I) Figuren viser den drivende hylsen med reimen rundt. Her er det gjort en forenkling med at overflatene er slette. Det er her behov for tenner og en tannreim for å sikre friksjon og feste til enhver tid.

II) Viser hvordan kulelageret er plassert ned i festeplaten.

III) Viser hvordan styreakselen fra kupéen føres ned i den drivende hylsen.

10.2.5 Låsesystem (E)

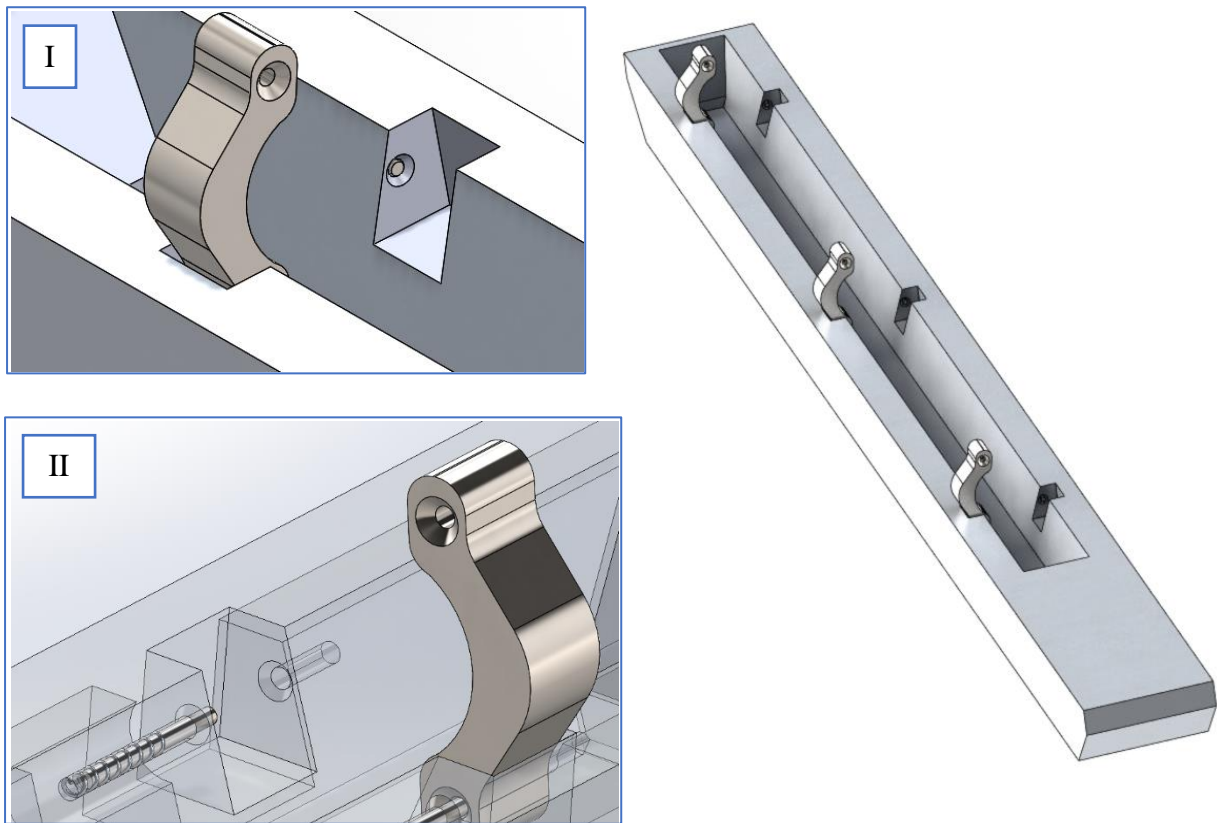


Figur 10.17: Figuren viser låsesystemet med alle tilhørende komponenter, når systemet er i låst fase. Totalt er det tre identiske låser på hver skinne.

I) Viser låsearmens posisjon i skinnen.

II) Viser en transparent låsearm med låseakslene gjennom seg.

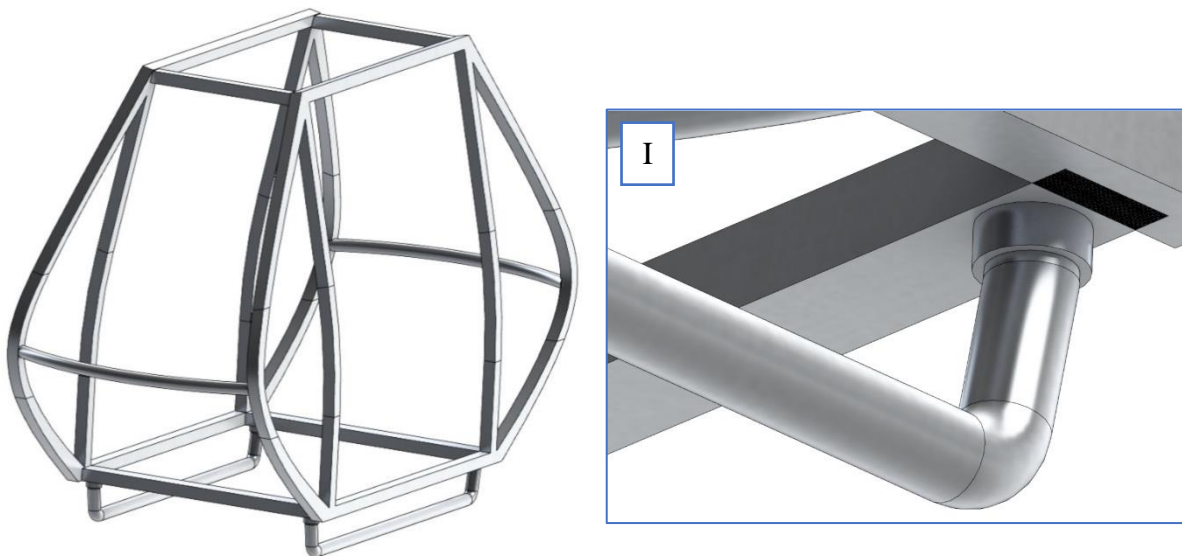
III) Viser sammenlåsingene inne i skinnen. Skinnen er gjort transparent for å vise låseakslene og fjæren. Det er kun den ene låseakselen, den med fjæren, som beveger seg under låsingene.



Figur 10.18: Figuren viser låsesystemet når låsene er åpne.

- I) Viser låsearmen i åpen posisjon og låseakselen er trukket inn i hullet.
 II) Viser låseakselens posisjon når systemet er åpent, gjennom låseskinnen i transparent tilstand.*

10.2.6 Kupé (F)

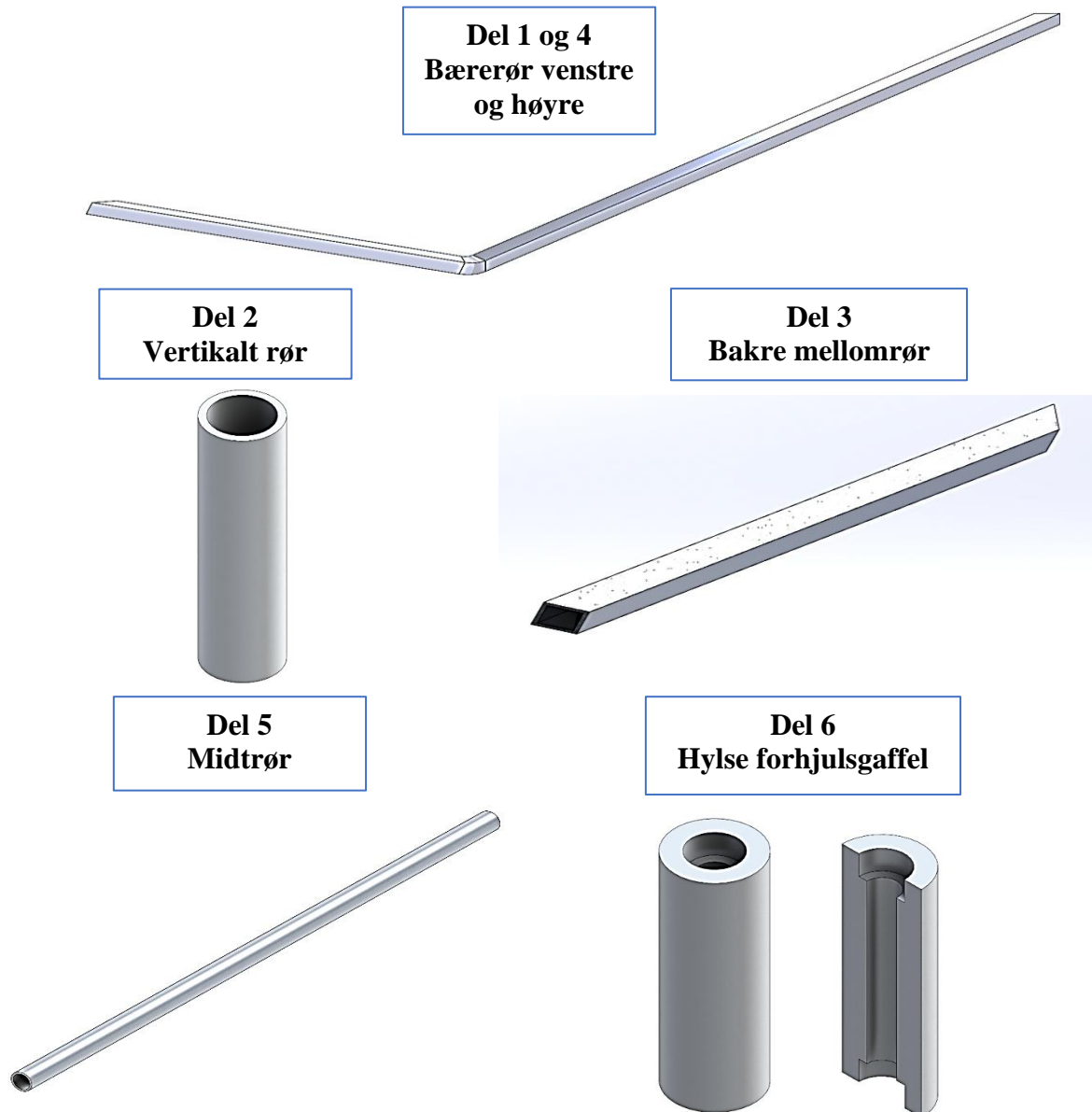


Figur 10.19: Figuren visen kupéens rammestruktur.

- I) Viser innfestningen av låsebenet til undersiden av kupéen.*

10.3 Design av komponenter

Hver av hoveddelene består av flere elementer, slik som seksjon 10.1 viste. I dette kapittelet blir elementene og deres detaljer sett nærmere på.



Figur 10.20: Figuren viser komponentene 1-6.

Del 1 og 4: Venstre og høyre bærerør er hovedkomponentene til understellsrammen og festes i front i hylsen til forhjulsgaffelen og går helt bak til bakhjulsopphengget. Det er to av hver komponent i rammestrukturen.

Del 2: De vertikale rørene festes mellom vestre og høyre bærerør for å få en to-lags ramme.

Del 3: Det bakre mellomrøret festes mellom venstre og høyre bærerør og fullfører rørrammen.

Del 5: Midtrørene er avstivende rør i midten av rammen. De benyttes også til å feste låseskinnene.

Del 6: Hylsen til forhjulsgaffelen festes i tuppen av understellsrammen. Den har to ulike indre diametere, en for kulelagrene og en smalere for styreakselen.

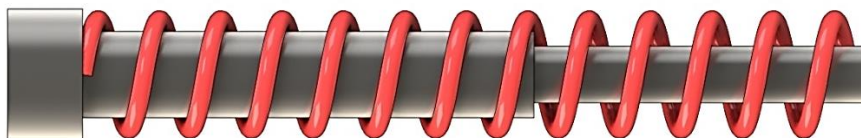
Del 9
Styreksel forhjulsgaffel



Del 10
Festplate forhjulsgaffel



Del 11
Forhjulsdemping



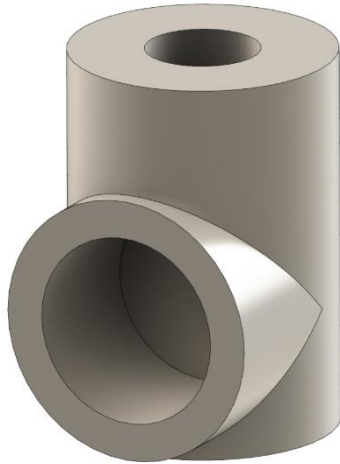
Figur 10.21: Figuren viser komponentene 9-11.

***Del 9:** Akselen har utstikkende tenner på den ene enden for å kunne kople seg inn i den drevene styringshylsen.*

***Del 10:** Festeplaten for forhjulsgaffelen har tre innstøpte hylser. En på oversiden til å feste styreakselen til forhjulsgaffelen, og to på undersiden for å feste forhjulsdemperne. En på hver side av forhjulet.*

***Del 11:** Forhjulsdempingen består av en ytre fjær som tar imot støt, og et hydraulisk system i midten for å unngå jumping.*

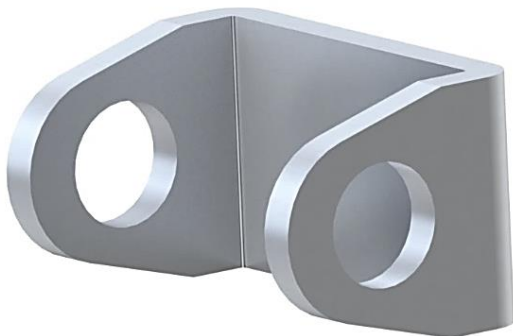
Del 12
Koplingshylse



Del 13
Forhjulsaksel



Del 15
Festeører



Del 18
Festeører bakhjulsdemping



Figur 10.22: Figuren viser komponent 12-13, 15 og 18.

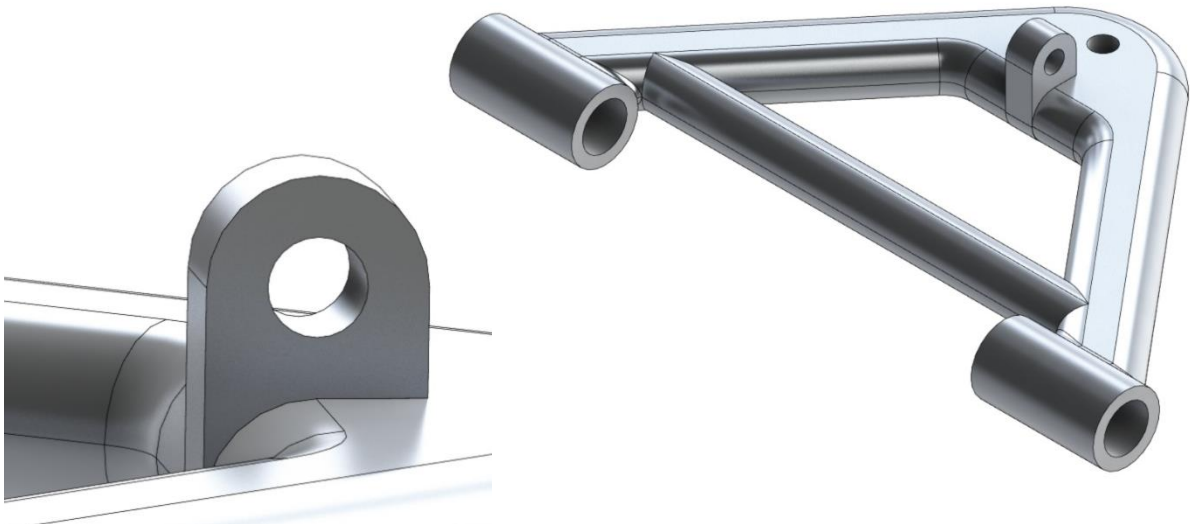
Del 12: Den har to hull. Ett for å kople inn forhjulsdempingen og ett for å feste forhjulsakselen.

Del 13: Forhjulsakselen går gjennom hjulet og sørger for at hjulet festes til styringen samtidig som det får fri rotasjon. Inne i hjulet er et lager som sørger for fri rotasjon, tar opp krefter, og akselen presses mot lageret.

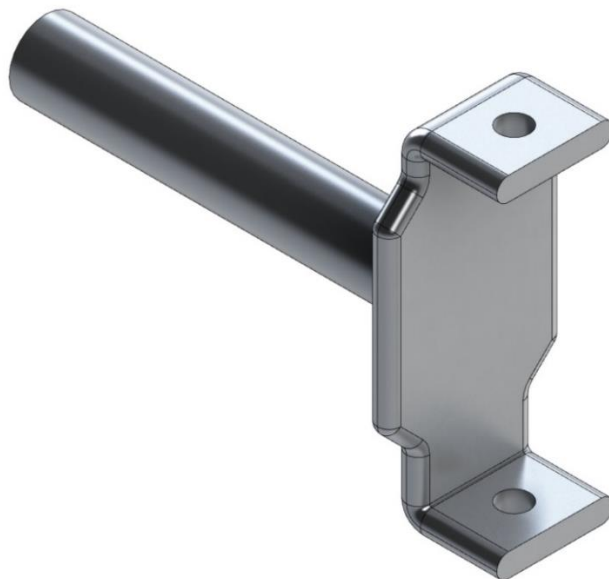
Del 15: Festeøret har to hull for å kunne tre en bolt gjennom.

Del 18: Festeøret for bakhjulsdempingen har også to hull for å kunne tre en bolt gjennom.

**Del 17
A-arm bakhjul**



**Del 25
Navgaffel**

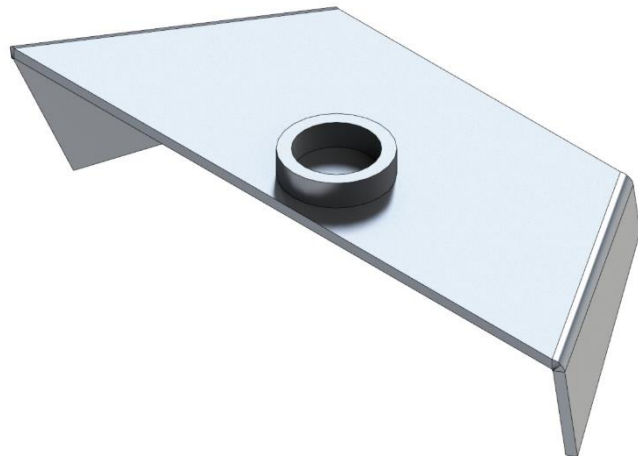


Figur 10.23: Figuren viser komponent 17 og 25.

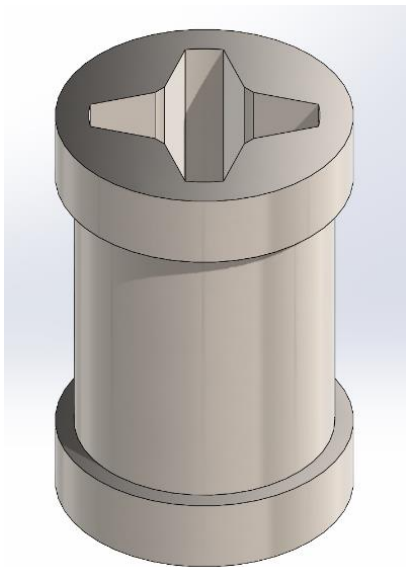
Del 17: A-armen har to hylser for å kunne feste armen til understellsrammen. Detaljbildet 1 viser et løfteøre for å feste bakhjuls dempingen.

Del 25: Navgaffelen er utstyrt med to hull for å kunne festes på innsiden av a-armene.

Del 26
Styrings festeplate



Del 28
Drivende hylse til styrings



Del 29
Drevene hylse til styrings



Figur 10.24: Figuren viser komponent 26, 28-29.

***Del 26:** Festeplaten til styringen skal festes over understellsrammen. Den har en liten hylse til kulelageret som sørger for rotasjon av del 28.*

***Del 28:** Den er en tannhylse som passer med splinen på styreakselen. Styreakselen fra kupéen føres ned i hullet og de festes sammen.*

***Del 29:** Den drevene hylsen har et likt tannhull som del 28. Dette er for at den skal festes på styringsakselen til forhjulsgaffelen. Den har spor på siden for at reima skal ligge trygt rundt.*

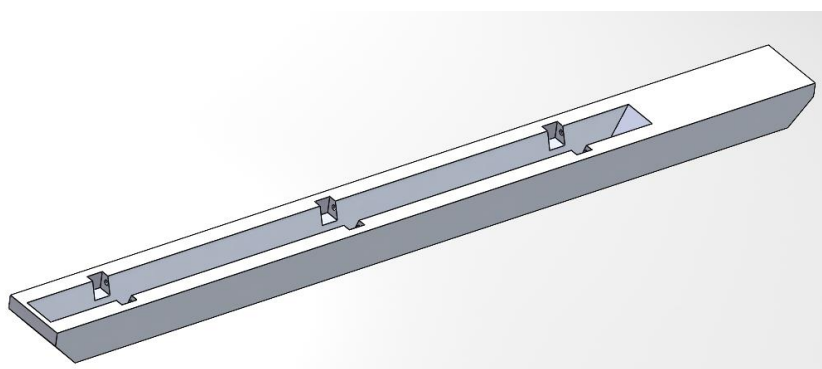
Del 31
Trakt styringskopling



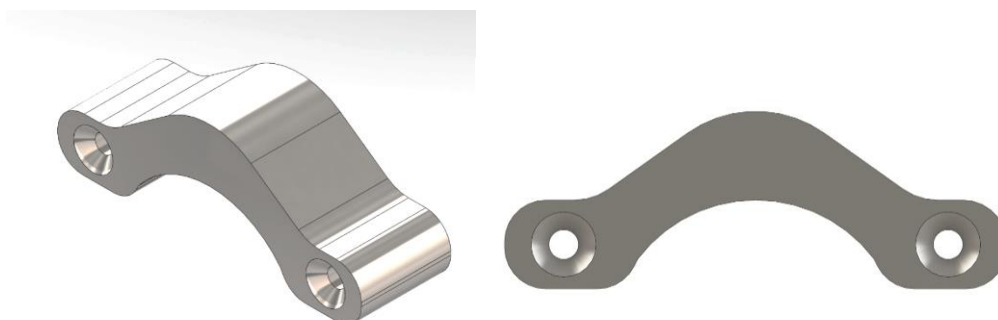
Del 32
Aksel styringskopling



Del 33
Låseskinne



Del 34
Låsearm



Figur 10.25: Figuren viser komponent 31-33.

Del 31: viser en trakt med funksjon å gjøre sammenkopling av styringen enklere. Den er derfor videre på topp enn i bunnen, for at styringsakselen skal føres ned i hullet.

Del 32: Akselen til styringskopling skal føres ned i trakten og den har en spline på bunnen for å få godt grep i den drivende hylsen.

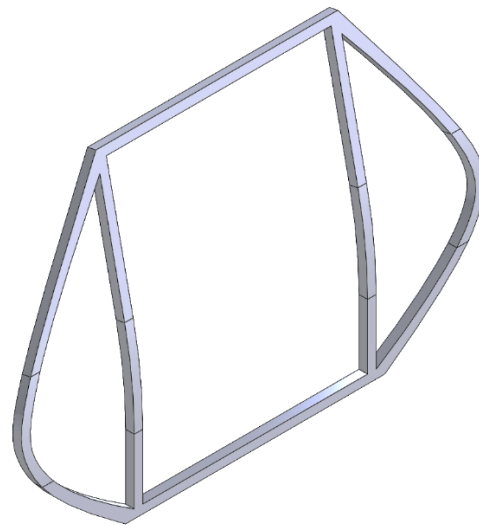
Del 33: Låseskinnen har et spor i midten med konisk utforming for å sentrere låsebenene. I tillegg er det tre nedsynkede hakk på hver side av sporet som festepunkt til låsearmen.

Del 34: Låsearmen skal legge seg over låsebenet og feste det fast. Den har to gjennomborede hull der er fast og en bevegelig låseaksel vil plasseres. Låsearmen roterer om den låste låsearmen.

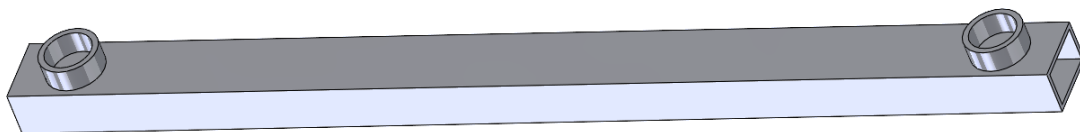
Del 36
Aksel låsearm



Del 37
Kupé sideramme



Del 38
Nedre mellomrør kupé



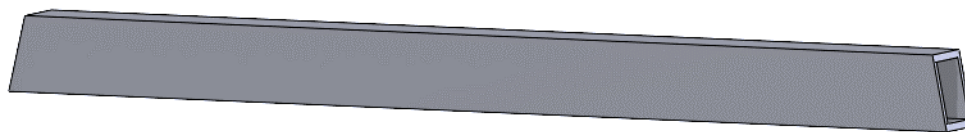
Figur 10.26: Figuren viser komponent 36-38.

***Del 36:** Låsearmen er en enkel, kompakt stang som benyttes for å feste låsearmen til låseskinnen.*

***Del 37:** Kupéens sideramme er en sammensveiset konstruksjon. Den er symmetrisk for at kupeen skal kunne snu og passe understellet i både tadpole- og deltavariant.*

***Del 38:** Det nedre mellomrøret er på bunn av kupeen og benyttes for å feste sammen siderammen. Den har to hylser på undersiden som er til å feste låsebena, før bena sveises fast.*

Del 39
Øvre mellomrør kupé



Del 40
Låseben



Del 41
Midtre mellomrør kupé



Figur 10.27: Figuren viser komponent 39-41.

Del 39: Det øvre mellomrøret danner, sammen med siderammen til kupéen, den øverste strukturen på kupéens ramme, og er essensiell for å ta opp vekten til dronemodulen som skal festes på taket.

Del 40: Låsebenet er den komponenten på kupéen som sørger for at modulen kopler seg til understellet. Det er en kompakt stang i aluminium som er bøyd i hver ende for å få en glippe fra kupeen, slik at låsearmene kan folde seg rundt benet.

Del 41: Det midtre mellomrøret er det siste konstruksjonselementet i kupéens ramme. Det er avbøyd for å få en rundere nese på kupéen og dermed en lavere drag koeffisient enn om den var flat.

10.4 Standard komponenter

For å redusere produksjonskostnaden er det valgt å bruke flere standardkomponenter. Der er også flere av komponentene i kapitlet over som baserer seg på standard rørprofiler eller stag. Del 1, 3 og 4 tar utgangspunkt i rørprofil 40x40x4. Del 2 og 5 tar utgangspunkt i rørpofil 40x3.

**Del 7, 27
Kulelager 15 ABB 4025 og 0040**



**Del 8
Hjul 120x70**



**Del 16
Bakhjulsdemping**



**Del 14, 19, 20, 23
Hex Bolt M4, M16, M10, M8**



**Del 21, 22, 24
Mutter M16, M10, M8**



**Del 30
Reim 300x1220**



**Del 35
Låsefjær**



Figur 10.28: Figuren viser standardkomponentene 7, 8, 14, 16, 19-24, 30 og 35.

Del 7 og 27: Kulelager [79]

Del 8: Hjul [80]

Del 16: Bakhjulsdemping [81]

Del 14, 19, 20, 23: Hex bolter [82][83][84][85]

Del 21, 22, 24: Hex muttere [86] [87] [88]

Del 30: Reim [89]

Del 35: Låsefjær

11 ROBUSTHET, VEDLIKEHOLD OG SIKKERHET

For at det skal være trygt å kjøre Dolphin for passasjerer er det viktig at konstruksjonen er bygget opp av de rette materialene og at sammenstillingen har tilstrekkelig konstruksjons- og brukssikkerhet. Passasjerer skal ikke utsettes for fare på grunn av utviklingsfeil i konseptet, og derfor blir dette vurdert nedenfor.

11.1 Konstruksjonssikkerhet

For å kartlegge konstruksjonssikkerheten til konseptet blir det utført en materialdrøfting der materialer sammenliknes for å være sikker på at de mest egnede materialene velges. Sikkerhetsfaktorer for varierende belastninger utredes, så vel som nødvendig overflatebehandlinger. Til slutt vil det utføres FEM-analyser for å undersøke spenningskonsentrasjoner i hovedkomponentene.

11.1.1 Materialeegenskaper og materialvalg

I seksjon 6.5 ble det utført en tidlig materialdrøfting der egnede materialer ble foreslått. Det ble da kartlagt at aluminium 6082 skal benyttes i rammekomponentene. For å sikre at dette er det mest egnede materialet, vurderes tre ulike aluminiumslegeringer, et fra 5000, 6000 og 7000 serien. Materialinformasjonen hentes fra programvaren Granta EduPack og de viktigste egenskapene er oppsummert i tabell 11.1.

- **EN AW 5754** – En legering som inneholder magnesium og har med utmerket korrosjonsbestandighet. Den brukes typisk i kjøretøy og offshore applikasjoner.
- **EN AW 6082** – Har den høyeste styrken av alle legeringene i 6000 serien og inneholder magnesium, manganese og silikon i tillegg til aluminium. Materialet blir vanligvis brukt i høybelastningsapplikasjoner som struktur rammer, broer og kraner. Legeringen kan sveises og tåler godt å bli utsatt for vann.
- **EN AW 7075** – En svært sterk aluminiumslegering som inneholder sink, magnesium og kopper. Legeringen brukes typisk i flystrukturer på grunn av sin høye utmattingsfasthet, men den har dårlig korrosjonsbestandighet.

Tabell 11.1: Egenskapene til utvalgte aluminiumslegeringer.

Egenskaper:	Enhet:	EN AW 5754 O:	EN AW 6082 T6:	EN AW 7075 T6:
Tetthet	kg/m ³	2,7*10 ³	2,7*10 ³	2,8*10 ³
E-modul	GPa	71	72	73
Skjærmodul	GPa	26	26	27
Poissons tall	-	0,33	0,33	0,33
Bruddgrense	MPa	200	320	560
Flytegrense	MPa	100	270	500
Utmattingsgrense*	MPa	120	115	160

Tabell 11.1: Forts.

Egenskaper:	Enhet:	EN AW 5754 O:	EN AW 6082 T6:	EN AW 7075 T6:
Elongation	%	22	9-11	2-10
Smeltepunkt	°C	620	600	635
Maksimum brukstemperatur	°C	160	140	100
Weldability	-	Utmerket	God	Uegnet
Vann (fersk)	-	Utmerket	Utmerket	Utmerket
Vann (salt)	-	Akseptabel	Akseptabel	Akseptabel

* Utmattingsgrense for bøyeutmatting, σ_{bw} , ved 10^7 sykluser.

Basert på materialeegenskapene, er det **EN AW 6082** som er den beste legeringen i konseptet. Den er allsidig, har høy flytegrense og egner seg til ekstrudering, og det er mulig å kjøpe standard rørprofiler i 40x4 i denne legeringen [90]. Derfor velges dette materialet for alle konstruksjonselementer i både understellet og kupéen.

For karosseriet til chassisene er det fornuftig å velge en karbonfiber kompositt. Det er to karbonfiber kompositter det er vanlig å bruke i karosseri, og det er:

- **Epoxy/HS carbon fiber, resin infused woven fabric, QI lay-up:** En kompositt med omtrentlig 60 % karbon og 40 % polymer. Materialet brukes typisk i automotive komponenter som krevet lett vekt, som chassis, hjul og takbuer.
- **Epoxy/HS carbon fiber, resin infused woven fabric, biaxial lay-u:** En kompositt med omtrent 60 % karbon og 40 % polymer. Materialet har en lett vekt og blir derfor hyppig brukt i chassis og bagasjeromspaneler. Kompositten er designet storproduksjon av komponenter med lett vekt og er svært korrosjonsbestandig.

Tabell 11.2: Egenskapene til utvalgte karbonfiberkompositter.

Egenskaper:	Enhet:	Epoxy/HS carbon fiber, resin infused woven fabric, QI lay-up:	Epoxy/HS carbon fiber, resin infused woven fabric, biaxial lay-up:
Tetthet	kg/m ³	1,5*10 ³	1,5*10 ³
E-modul	GPa	46	60
Skjærmodul	GPa	15	3,5
Poissons tall	-	0,34	0,07
Bruddgrense	MPa	552	774
Flytegrense	MPa	552	774
Utmattingsgrense*	MPa	359	503
Kompresjons-styrke	MPa	347	760
Elongation	%	1	1,6

Tabell 11.2: Forts.

Egenskaper:	Enhet:	Epoxy/HS carbon fiber, resin infused woven fabric, QI lay-up:	Epoxy/HS carbon fiber, resin infused woven fabric, biaxial lay-up:
Maksimum brukstemperatur	°C	220	220
Vann (fersk)	-	Utmerket	Utmerket
Vann (salt)	-	Utmerket	Utmerket
Brennbarhet	-	Saktebrennende	Saktebrennende

* Utmattingsgrense for bøyeutmatting, σ_{bw} , ved 10^7 sykluser.

Materialene er like på mange områder og de koster det samme, 191 NOK/kg. Begge har en høy flytegrense. Siden komposittene med **biaxial lay-up** utforming tåler mest belastning, velges dette som materialet til karosseriet.

For akselen i forhjulsgaffelen og styringsakselen i tillegg til i styringssystemet og låsearmene, er det svært viktig at det ikke oppstår brudd. Derfor er det nødvendig med stål i disse komponentene. Stållegeringer har en svært høy flytegrense og kan utsettes for store belastninger. Det har en høyere massetetthet enn aluminium, men for mindre deler i konstruksjonen er det av liten betydning for totalvekten. Siden Dolphin kjører utendørs, er det fornuftig å velge rustfritt stål. Det er dyrere, men rustfritt stål har en utmerket korrosjonsbestandighet mot både fersk- og saltvann, og dette er nødvendige egenskaper i et utendørs kjøretøy. Det aller viktigste er brukssikkerhet og da er det verdt å bruke mer penger på materialer. I aksler utsatt for korrosive omgivelser, er stållegeringen **AISI 431**, godt egnet. Materialet har både høy bruddfasthet, torsjonsfasthet og er korrosjonsbestandig.

Tabell 11.3: Materialeegenskapene til rustfritt stål, AISI 431.

Egenskaper:	Enhet:	AISI 431:
Tetthet	kg/m ³	7,8*10 ³
E-modul	GPa	200
Skjærmodul	GPa	80
Poissons tall	-	0,28
Bruddgrense	MPa	1000
Flytegrense	MPa	850
Utmattingsgrense*	MPa	410
Kompresjon-styrke	MPa	875
Elongation	%	20
Maksimum brukstemperatur	°C	580
Vann (fersk)	-	Utmerket
Vann (salt)	-	Utmerket
Brennbarhet	-	Ikke brennbart
Galvanisk potensiale	V	-0,14

* Utmattingsgrense for bøyeutmatting, σ_{bw} , ved 10^7 sykluser.

Det siste materialet i sammensettingen er for skruene og boltene i konstruksjonen, og de skal være i syrefast stål i kvalitet 4.6. Dette er en standard kvalitet for skruer og bolter og egner seg god, siden det både er korrosjonsbestandig og har høy stivhet. De har en strekkfasthet på 400 MPa, og flytgrensen er da 240 MPa.

For å oppsummere, er de valgte materialene EN AW 6082, Epoxy/HS carbon fiber, resin infused woven fabric, biaxial lay-up og AISI 431.

11.1.2 Sikkerhetsfaktor og tillatte spenninger

Hvor høy spenning som er tillatt avhenger ikke bare av materialet som velges, men også av belastningstypen komponenten blir utsatt for. I kapittel 4.1 ble det kartlagt at kjøretøy blir utsatt for ulike belastninger, både statiske og dynamiske. Der i bland endring av kjørehastighet eller vindretning, kjøring inn i et pothole, bråbremsing, inn- og utlåsning mellom komponentene, i tillegg til vibrasjoner fra motoren.

Det er de dynamiske belastningene som er mest avgjørende for dimensjoneringen av konstruksjonen, siden alle dynamiske belastninger med tid vil bidra til utmatting i konstruksjonen. Det stilles derfor krav til sikkerhet i konstruksjonen.

I boken «Tekniske tabeller» [91] er belastningstypene kategorisert i tre grupper:

- A I gjelder for statiske belastninger
- B II gjelder for hurtig utsvingende belastninger
- C III gjelder for hurtig vekslende belastninger

De største belastningene som virker på Dolphin går inn under kategori B II, hurtig utsvingende belastninger. For stål av kvaliteten S235 er de tillatte spenningene ved ulike belastninger kartlagt, og dette kan benyttes som en god indikator for nødvendig sikkerhetsfaktorer.

Tabell 11.4: Oversikt over tillatte spenninger for de tre belastningskategoriene A, B og C ved strekk-, trykk-, bøye- og vridebelastninger.

Materiale:	Belastningstype:	Strekk:	Trykk:	Bøying:	Vridning/ skjæring:
NS- EN10025 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

Verdiene i tabell 11.4 har en begrenset gyldighet, men kan benyttes der det ikke har blitt gjort nøyaktige beregninger etter bruddhypotesen, slik som i denne oppgaven. For bøyning og vridning er det tatt utgangspunkt i et sirkulært tverrsnitt, men det er godt nok for å kunne kartlegge en sikkerhetsfaktor.

For å bestemme nødvendige sikkerhetsfaktorer benyttes forholdet mellom flytegrense og utmattingsgrensen. Komponentene i Dolphin skal ha en utmattingsgrense på «uendelig levetid», som ligger mellom 10^6 - 10^8 lastsykler i S-N kurven. For aluminiumslegeringer angis

ofte en utmatingsgrense på 10^8 , og derfor velges denne grensen for komponentene i Dolphin [92].

Materialet S235 har, som navnet indikerer, en flytegrense på 235 MPa og får da følgende sikkerhetsfaktorer:

$$\eta_{I,bøyy} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{till,s}} = \frac{235}{135} = 1,7$$

$$\eta_{II,strekk} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{till,s}} = \frac{235}{80} = 2,9$$

$$\eta_{II,bøyy} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{till,b}} = \frac{235}{87,5} = 2,7$$

$$\eta_{II,skjær} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{till,v}} = \frac{235}{50} = 4,7$$

Kravene til sikkerhetsfaktorene anses som like for aluminium. Tillat spenning for komponenter av EN AW 6082 blir da:

For statiske belastninger i strekk/trykk er da tillatt spenning:

$$\frac{\sigma_f}{\eta_{I,bøyy}} = \frac{270}{1,7} = 158,8 \text{ MPa}$$

For vekslende trykk. og strekkbelastning:

$$\frac{\sigma_f}{\eta_{strekk}} = \frac{270}{2,9} = 93,1 \text{ MPa}$$

For vekslende bøyebelastning:

$$\frac{\sigma_f}{\eta_{till,b}} = \frac{270}{2,7} = 100 \text{ MPa}$$

For vekslende torsjons/skjærbelastninger:

$$\frac{\sigma_f}{\eta_{till,v}} = \frac{270}{4,7} = 57,4 \text{ MPa}$$

Fra seksjon 9.2 ble det beregnet en maksimal bøyespenning i understellrammen på 124,1 MPa, som er høyere enn den tillatte bøyespenningen på 100 MPa for EN AW 6082. Det er nødvendig å kjøre en FEM-analyse på den ferdige sammenstillingen siden det ble gjort en del forenklinger i håndberegningene, og undersøke om dimensjonene er tilfredsstillende.

11.1.3 Overflatebehandling og vedlikehold

For å sikre en lang levetid er det nødvendig med overflatebehandling av de ulike delene og en plan for vedlikehold.

Overflatebehandling

For overflatebehandling er det viktigste at komponentene ikke begynner å korrodere. Alle stålkomponentene er av legeringen rustfast stål og enkelte er også syrefaste. De har utmerket korrosjonsbestandighet, og derfor velges det å ikke videre overflatebehandle disse komponentene.

Aluminiumkomponentene har akseptabel korrosjonsbestandighet, men det er behov for overflatebehandling i tillegg, siden Dolphin skal kjøre i all slags vær og på saltede veier. Det er derfor valgt å bruke eloksering på aluminiumkomponentene. I elokseringsprosessen forsterkes aluminiumens naturlige oksidsjikt slik at det blir tettere og tykkere, og gir maksimal økning av metallens naturlige egenskaper [93]. Eloksering gir god korrosjonsbestandighet, økt hardhet og slitasjebestandighet i tillegg til et dekorativt utseende.

Karbonfiberkompositten som skal brukes i karosseriet, har utmerket korrosjonsbestandighet både i fersk- og saltvann. Det er likevel ønskelig å lakkere utsiden for få en fin overflate med ønskede fager.

Vedlikehold

Det er nødvendig med kontinuerlig vedlikehold av Dolphin. Det skal være lett å renholde både understell og kupé og å bytte ut slitte komponenter som bolter, skruer og dempere. De viktigste punktene for vedlikehold er:

- Det skal være mulig å vaske alle ytre overflater.
- Det skal kontrolleres at alle bolter er tilstrekkelig strammet.
- Kontrollere alle komponenter for å finne eventuelle sprekker eller tegn på utmatting, spesielt på forhjulsgaffelen og låseakslene.
- Gjennomføre funksjonstester av de ulike mekanismene, spesielt styringen og sammenkoplingen.

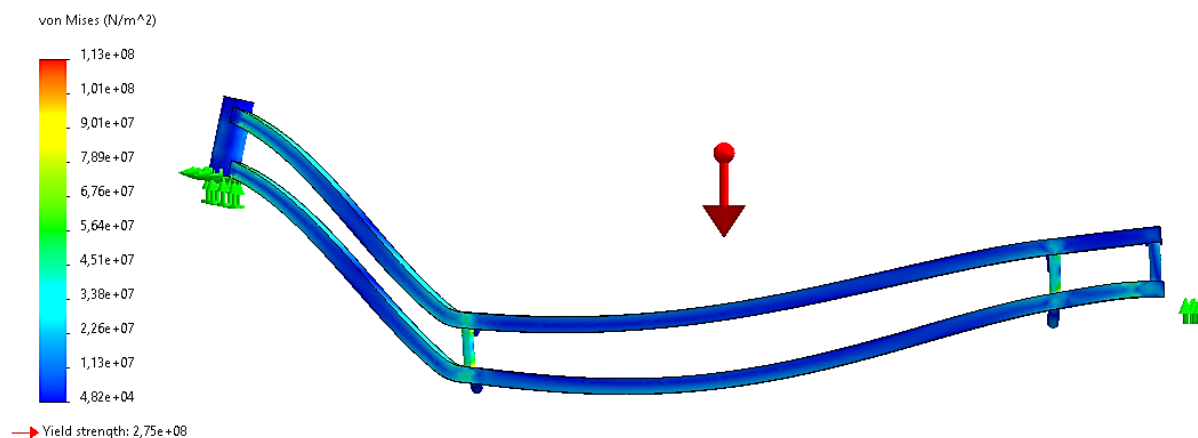
Alle kontroller og eventuelle reparasjoner skal loggføres.

11.1.4 FEM-analyse av hovedelementer

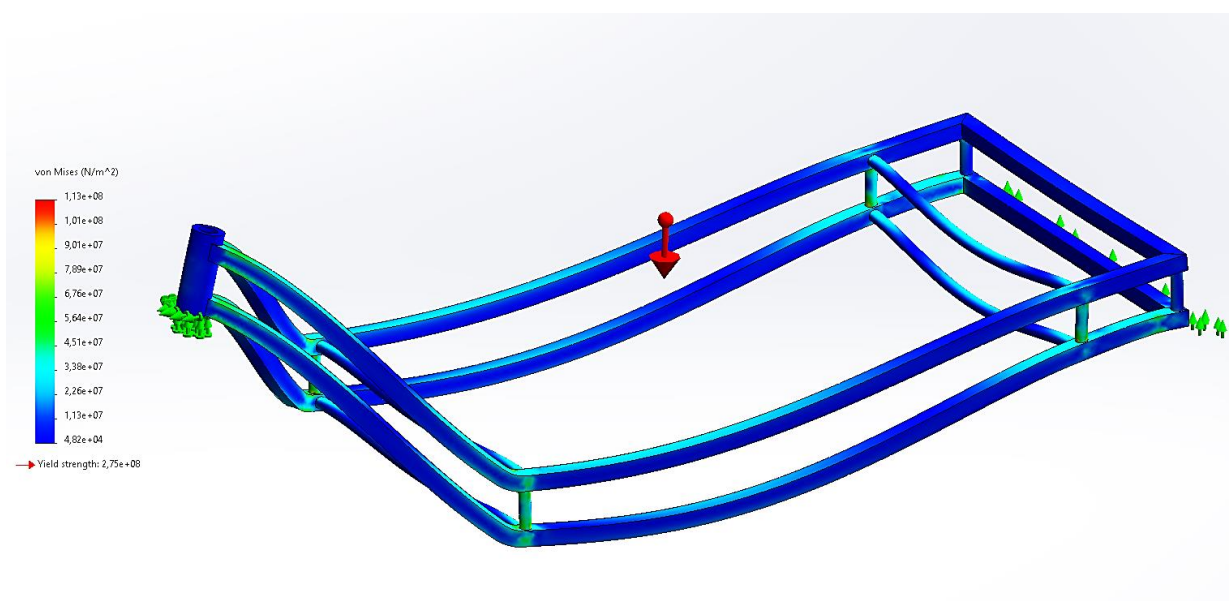
Det er nødvendig å utføre FEM-analyser på de mest utsatte komponentene for å undersøke om de er tilstrekkelig dimensjonert og eventuelt finne feil fra beregningene i kapittel 9. I kapittel 11.1.2 ble det oppdaget at med en sikkerhetsfaktor på 2.7 for vekslende nedbøying, blir spenningene i understellrammen høyere enn det som er tillatt. Derfor er det nødvendig å kjøre en FEM-analyse av konstruksjonen.

For FEM-analysen på understellrammen ble kun aluminiumkonstruksjonen analysert. I analysen ble materialet EN AW 6082 tildelt rammekonstruksjonen. Som opplager ble en forenkling utført og rammen er fastopplagret under hylsen til forhjulsgaffelen. Som erstatning på bakhjulene ble det satt et rullelager langs det nederste, bakerste røret, slik de grønne pilene i figur 11.1 og 11.2 viser. En tyngdekraft på 8338,5 N ble lagt til, og til slutt ble konstruksjonen

meshet og analysen kjørt. Den røde pila i figurene viser tyngdekraftens retning. Resultatet fremstilles i figurene nedenfor.



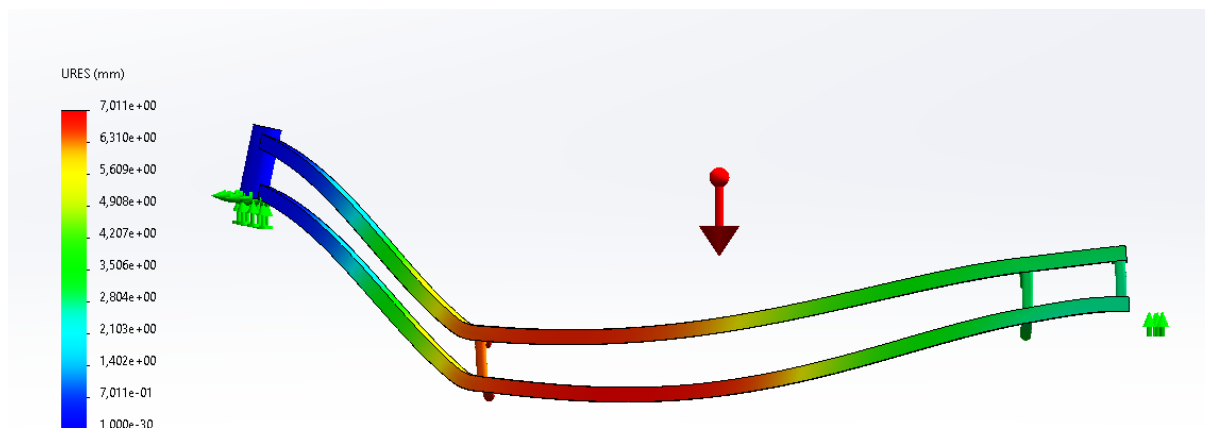
Figur 11.1: Figuren viser resultatet fra FEM-analysen og spenningsfordelingen i understellrammen. Spenningene illustreres med farger fra blå og gradvis opp til rød, etter hvor store spenningskonsentrasjonene er. Blå områder er de med lavest spenninger og de røde er de maksimale spenningskonsentrasjonene. Den maksimale spenningen i rammen er på 113 MPa og oppstår i knutepunktene ved de vertikale rørene.



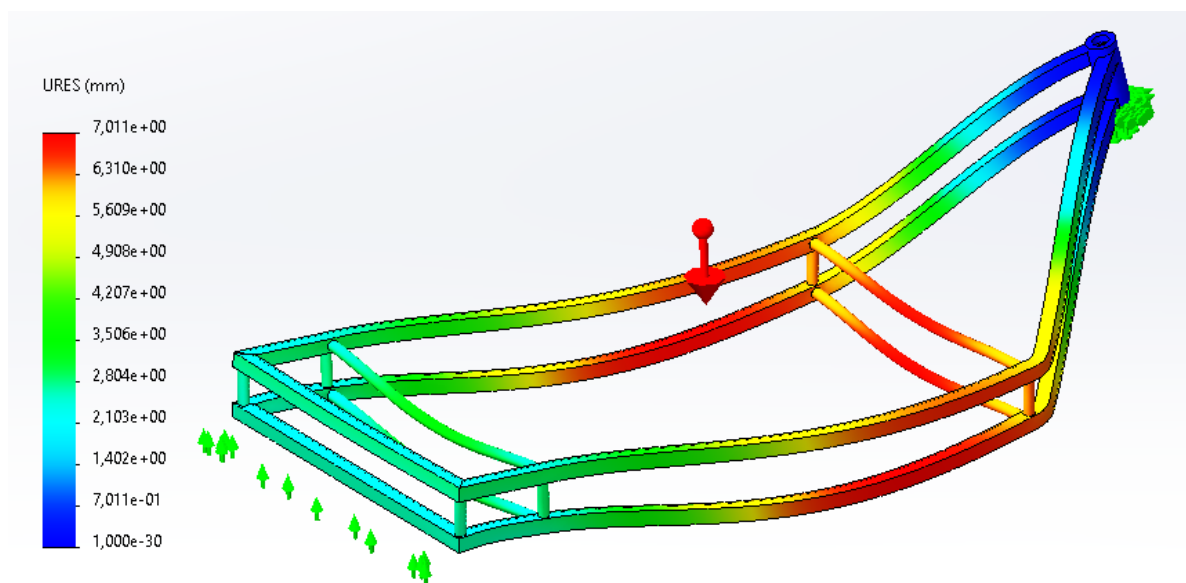
Figur 11.2: Illustrasjon av spenningsfordelingen som fordeler seg utover rammen, sett diagonalt forfra. Det er tydelig at det er mest spenninger i knutepunktene ved de vertikale rørene.

Den maksimale Von Mises spenningen som oppstår er på 113 MPa. Dette er litt lavere enn det som ble beregnet i kapittel 9.2, men det er bare en feilmargin på 9,1%, som er forventet. Spenningen er litt høyere enn den tillatte spenningen beregnet i 11.1.2, og det antyder behov for videre beregninger og muligens noen andre rørprofiler. Konstruksjonen kan også gjøres kortere, som er ønskelig for å få et mindre kjøretøy og det vil da oppstå et lavere bøyemoment og lavere spenningskonsentrasjoner. Det er i knutepunktene at spenningskonsentrasjonene er høyest, og det er som forventet.

Den maksimale nedbøyningen er omtrent på midten av konstruksjonen, og er på 7,01 mm. Dette er mye lavere enn det som ble beregnet i kapittel 9.2.



Figur 11.3: Figuren illustrerer nedbøyningen i understellrammen og følger en fargeskala fra blå til rød. De røde områdene er der nedbøyningen er størst, og i dette tilfellet er det omtrent midt på bjelken. Den største nedbøyningen er på 7 mm.



Figur 11.4: Illustrasjon av nedbøyningen i understellrammen, sett diagonalt bakfra.

En tydelig feil i analysen er at det ikke er nedbøyning ved hylsen. Dette er fordi hylsen er definert som fast innspent på bunn, mens i virkeligheten vil det være nedbøyning der. Dette resulterer i en lavere nedbøyning i analysen, enn den som vil oppstå i virkeligheten.

11.1.5 FEM-analyse av knutepunkt og låseelementer

Det er to andre komponenter i konseptet som er spesielt utsatt for belastninger, og som det er helt nødvendig at ikke er underdimensjonert. Det er komponentene «forhjulsgaffel» og «låsesystem»

I seksjon 9.3 ble det oppdaget at når bilen kjører inn i et «Pothole» vil det oppstå svært store spenninger, og disse spenningene vil virke på forhjulsgaffelen. For å undersøke håndberegningene som er utført rundt dette, er det nødvendig med en FEM-analyse for å kartlegge hvor store spenninger og deformasjoner som oppstår, og om dette stemmer overens med beregningene.

Det er også behov for å kjøre en FEM-analyse av låsesystemet for å undersøke spenningene som opptrer ved sammenkopling og ved bråbremsing. Av sikkerhetshensyn til passasjerer er det avgjørende at det ikke skjer feil i låsing, som at en komponent knekker.

Ved kjøringen av analysene, oppstod ulike utfordringer. Komponentene består av flere mindre deler og programmet slet derfor med å mesh delene, spesielt de med mange fillets. Etter å ha tildelt hver enkelt komponent et mesh som ble akseptert av Solidworks, ble simuleringene kjørt. Da kom det opp en feilmelding på at deformasjonene ble urealistisk store og ville ikke gi noe resultat. Etter å ha forsøkt å forenkle på flere ulike måter, som for eksempel å fjerne mindre viktige komponenter slik som hjulet, ble resultatet det samme. Det er behov for å gjøre store endringer i modelleringen av komponentene for å klare å kjøre disse analysene, og for forhjulsgaffelen må også demping inkluderes. Å utføre dette vil ta mye tid, på grunn av det omfattende arbeidet, og det ble derfor besluttet at det må gjøres senere og blir en del av det videre arbeidet.

11.2 Brukssikkerhet

Et viktig krav til Dolphin er at den skal være helt trygt å bruke. Det er derfor utredet for nødvendige sikkerhetslementer i styringssystemet. I tillegg legges det frem et forslag til signaliseringslementer på instrumentpanelet for å enkelt vise når sammenkoplingen er komplett og det er trygt å kjøre.

11.2.1 Styringssystem

I kapittel 10.2.4 ble det lagt frem et løsningsforslag for styringssystemet. Det er valgt å benytte et kilereimsdrevet styringssystem, men dette er ikke sikkert nok i en så essensiell del som styringen. Hvis reimen ryker, forsvinner også all styringen, og da vil svært farlige situasjoner oppstå. Som en ekstra sikkerhet er det derfor behov for en dobbel reim. Hvis den ene ryker, vil den andre stå for hele styringen frem til feilen blir reparert. Den ødelagte reima må byttes ut med en gang.

Det er også behov for en økt sikkerhet når det kommer til reimens grep rundt reimskivene. Når de er sirkulære, blir det svært høye krav til friksjon, og hvis friksjonsløse øyeblikk oppstår, vil all styringen forsvinne. For å unngå dette må en tannreim benyttes istedenfor en kilereim. Det er helt uforsvarlig å produsere et kjøretøy som kan miste styringsevnen på grunn av feil i styringssystemet. Derfor skal styringssystemet bestå av to tannreimer og reimskiver med passende tenner. Dette må tas med til videre arbeid.

11.2.2 Instrumentpanel og sikkerhetsrutiner

Det er viktig at sjåføren vet når det er trygt å starte motoren, etter en sammenkopling av understell- og kupémodulen. Et signal på instrumentpanelet er en enkel måte å vise når det er trygt og utrygt å kjøre. I denne seksjonen er det generert forslag til signalsymboler for å informere passasjerene om kjøretøyets tilstand, og det benyttes totalt fire symboler. Symbolene er illustrert i figuren under.



Figur 11.5: Figuren viser de fire sikkerhetssymbolene. Symbolene beskrives fra venstre. Det første symbolet representerer at Dolphin er i svevemodus. Det neste representerer bakkemodus. De to hengelåsene representerer at modulene ikke er låst sammen, og at de er låst sammen.

Klargjøring for landing

Når Dolphin er ute og flyr, er det kun svevesymbolet som lyser. Det lyser grønt for å vise at det er trygt å fly.



Figur 11.6: I svevemodus, lyser kun svevelampen, og den signaliserer at det er trygt å fly.

Sammenkopling

Når Dolphin nærmer seg understellmodulen, blir dette fanget opp av en sensor som sier fra at modulene ikke er låst sammen. Den lyser rødt frem til sammenkoplingen er komplett.



Figur 11.7: Ved påbegynt sammenkopling lyser låselampen rødt frem til sammenkoplingen er komplett.

Kjøring

Når låsingen av modulene er komplett og låsearmene er festet, styringen er koplet sammen, i tillegg til elektronikk og bremseser, lyser kjøresymbolet og sammenlåst-symbolet grønt, for å vise at det er trygt å kjøre.



Figur 11.8: Når sammenkoplingen er komplett lyser både kjørelampen og låselampen grønt. De signaliserer at det er trygt å kjøre.

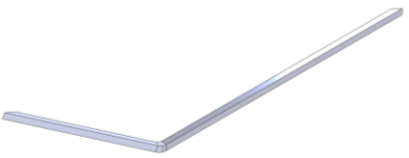

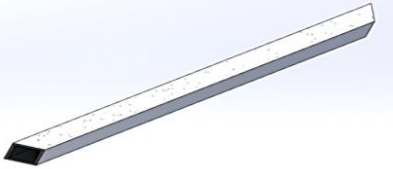


12 FRAMSTILLING OG PRODUKSJONSKOSTNADER

For å kartlegge om prosjektet er realiserbart, blir en grov kartlegging av produksjonsmetoder og kostnader utført. Det er ønskelig å kunne produsere en prototype på NMBU, og derfor er det ønskelig med relativt lave kostnader.



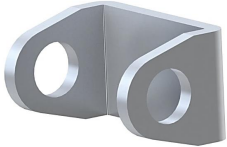


12.1 Produksjonsmetoder

For å kunne utvikle en prototype er det nødvendig å kartlegge hvilke produksjonsmetoder som skal benyttes for de ulike komponentene. I tabellen 12.1 under følger en oversikt over planlagte produksjonsmetoder for komponentene fra seksjon 10.3. Produksjonsmetodene er valgt for at komponentene skal kunne produseres på NMBU sitt verksted. Ved serieproduksjon vil det være mer fornuftig å lage formverktøy slik som støpeformer til flere av komponentene, men dette er kostbart og er derfor ikke fornuftig for en prototype.

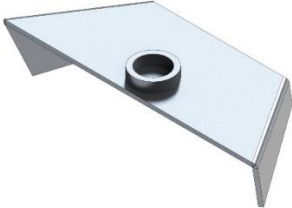
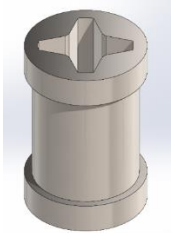
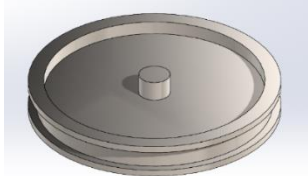


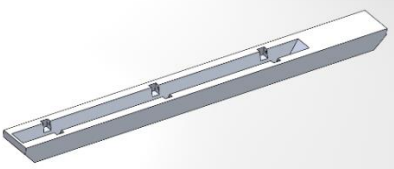
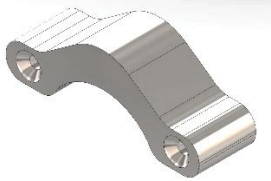
Tabell 12.1: Oversikt over komponentene, med komponentnummer, figur og en grov beskrivelse av produksjonsmetode.

Del:	Komponent:	Produksjonsmetode:
1 og 4		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rør <ul style="list-style-type: none"> • Ekstruderes • Kappes i korrekte lengder • Bøyes
2		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rør <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i korrekt lengde
3		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rør <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i korrekt lengde med 45-graders vinkel.
5		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rør <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i korrekt lengde
6		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rundbolt <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i korrekt lengde • Dreies utvendig. • Bore hull gjennom midten. • Dreies innvendig for å få bredere innvendig diameter i begge ender.


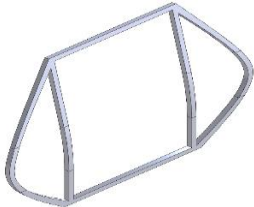




Tabell 12.1: Forts.

Del:	Komponent:	Produksjonsmetode:
9		Materiale: AISI 431 Emne: Rundbolt <ul style="list-style-type: none"> • CNC freser for å lage tennene. • Dreier utvendig.
10		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Bolt <ul style="list-style-type: none"> • CNC freses • Borer hull • Sliper med kantene.
12		Materiale: AISI 431 Emne: Bolt <ul style="list-style-type: none"> • CNC freses.
13		Materiale: AISI 431 Emne: Stang <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i korrekt lengde.
15		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: U-vinkel <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i riktig lengde • CNC freses
17		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Bolt <ul style="list-style-type: none"> • CNC freses • Midtarmen skal sveises på. • Etterglødes • Pusse kantene • Borer hull
18		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: U-vinkel <ul style="list-style-type: none"> • Klippes i riktig lengde • CNC freses
25		Materiale: AISI 431 Emne: Bolt <ul style="list-style-type: none"> • CNC freses • Sliper ned kantene. • Hull bores ut.

Tabell 12.1: Forts.

Del:	Komponent:	Produksjonsmetode:
26		<p>Materiale: EN AW 6082 T6</p> <p>Emne: Plate</p> <ul style="list-style-type: none"> • Klipper platen • Dreier hylsen utvendig og innvendig. • Sveiser fast hylsen på en plate. • Ettergløder. • Knekker platen.
28		<p>Materiale: AISI 431</p> <p>Emne: Rundbolt</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dreier utvendig. • CNC freses innvendig.
29		<p>Materiale: AISI 431</p> <p>Emne: Rundbolt</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dreies utvendig. • CNC freser spor innvendig.
31		<p>Materiale: AISI 431</p> <p>Emne: Rundbolt</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dreies utvendig og innvendig.
32		<p>Materiale: AISI 431</p> <p>Emne: Rundbolt</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dreies utvendig • CNC freser for å lage tennene. • Borer hull
33		<p>Materiale: EN AW 6082 T6</p> <p>Emne: Plater</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kappe plater • Bøye plater • Sveise sammen • Ettergløde • Bore hull til låseakselen inn fra undersiden.
34		<p>Materiale: AISI 431</p> <p>Emne: Firkantbolt</p> <ul style="list-style-type: none"> • CNC freses. • Borer hull.

Tabell 12.1: Forts.

Del:	Komponent:	Produksjonsmetode:
36		Materiale: AISI 431 Emne: Stang <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i riktig lengde
37		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rør <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i riktige lengder • Bøyer stagene • Sveises sammen • Etterglødes
38		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rør <ul style="list-style-type: none"> • Kappes korrekt lengde. • Sveiser på hylsene • Etterglødes
39		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rør <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i korrekt lengde med vinkel
40		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Stang <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i korrekt lengde • Bøyes
41		Materiale: EN AW 6082 T6 Emne: Rør <ul style="list-style-type: none"> • Kappes i korrekt lengde • Bøyes

Alle sveisede komponenter skal etterglødes for å fjerne spenninger i sveisen og grunnmaterialet.

Karosseriet til kupeen og understellet skal produseres i karbonfiber, men det er kostbart å lage støpeformer, og derfor er det godt nok med glassfiber til en prototype. Da kan en modell lages av skum, en støpeform lages rundt modellen, og til slutt kan glassfiber støpes i formen for å få det ønskede utseende.

12.2 Kostnads kalkyle for prototype

Før en prototype kan produseres er det nødvendig å vite hva det vil koste. Derfor er det utarbeidet en kostnads kalkyle for å estimere prisen for å utvikle én prototype. Kalkylen tar utgangspunkt i konseptutviklingsarbeidet med timespris og tidsbruk, prisen for standardkomponenter basert på nettsøk, materialkostnader basert på massen til innkjøpte materialer og meterpris fra leverandør eller kilopris hentet fra Granta Edupack.

Den siste kategorien i kalkylen er tilvirkningskostnadene basert på tidsbruk og en timepris på 600 kr. Det er utfordrende å finne korrekte priser for aluminiumsprofiler, da kun prisen for

grunnmaterialet oppgis. Derfor benyttes prisen hentet i Granta Edupack på 35 kr/kg. Rustfritt stål av ønsket kvalitet koster hos Stena stål mellom 90-152 kr/kg for de ulike profiltykkelsene [94]. Dette brukes som utgangspunkt i kalkylen.

Tabell 12.2: Kostnadskalkyle for produksjon av en prototype av konseptet.

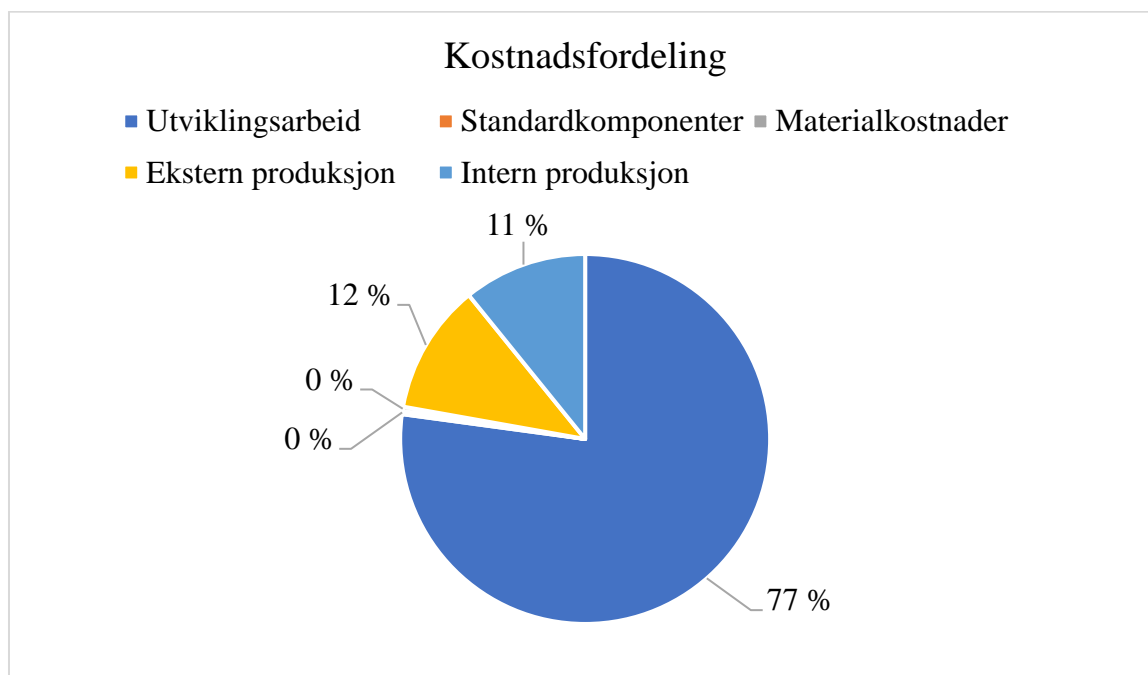
Utviklingsarbeid:	Timer:	Kvanta:	Pris (NOK/time):	SUM (NOK):
Utredning	245	-	550	134750
Utvikling	180	-	550	99000
Konstruksjon og design	185	-	550	101750
Ferdigstilling	55	-	550	30250
Rapportskrivning	260	-	550	143000
Delsum	925	-	550	508750
Standardkomponenter:			(NOK/del):	
Kulelager 4025	-	2 stk	100	200
M4 skrue	-	3 stk	3	9
Hjul 120x70	-	3 stk	330	990
Bakhjulsdemping	-	2 stk	108	216
M8 skruer	-	4 stk	5	20
M10 skruer	-	4 stk	7	28
M16 skruer	-	8 stk	30	240
Reim kr 117	-	1 stk	117	117
Mutter M8	-	4 stk	1	4
Mutter M10	-	4 stk	3	12
Mutter M16	-	8 stk	6	48
Delsum	-	-	-	1884
Materialkostnader:			(NOK/kg):	
Alu rør 6082 T6 (40x40x4 mm)	-	37 kg	35	1295
Alu rør 6082 T6 (30x3)	-	3 kg	35	105
Alu plate 6082 (8x2020x1020)	-	8,6	35	301
Alu stang 6082 (80 x 200)	-	2,72	35	95,2
Alt stang 6082 (40 x 6000)	-	3,3	35	115,5
Alu blokk 6082	-	1,5	35	52,5
Stål stang AISI 431 (40x3000)	-	1,3	91,7	119,2
Stål stang AISI 431 (4x9300mm)	-	0,6	104,5	62,7
Stål firkantet bolt AISI 431 (150mm)	-	1,5	152	228
Stål firkantet bolt AISI 431 (40mm)	-	0,5	91,7	45,9
Delsum	-			2420
Ekstern produksjon:			(NOK/time):	
Glassfiber chassis	75	-	1000	75000
Delsum		-		75000

Tabell 12.2: Forts.

Intern produksjon:	Timer:	Kvanta:	Pris (NOK/time):	SUM (NOK):
CNC fresing	60	-	600	36000
Dreining	15	-	600	9000
Boring	3	-	600	1800
Kapping	4	-	600	2400
Bøying	3	-	600	1800
Sveising	20	-	600	12000
Ettergløding	8	-	600	4800
Sliping	6	-	600	3600
Delsum				71400
Totalsum				
				659454

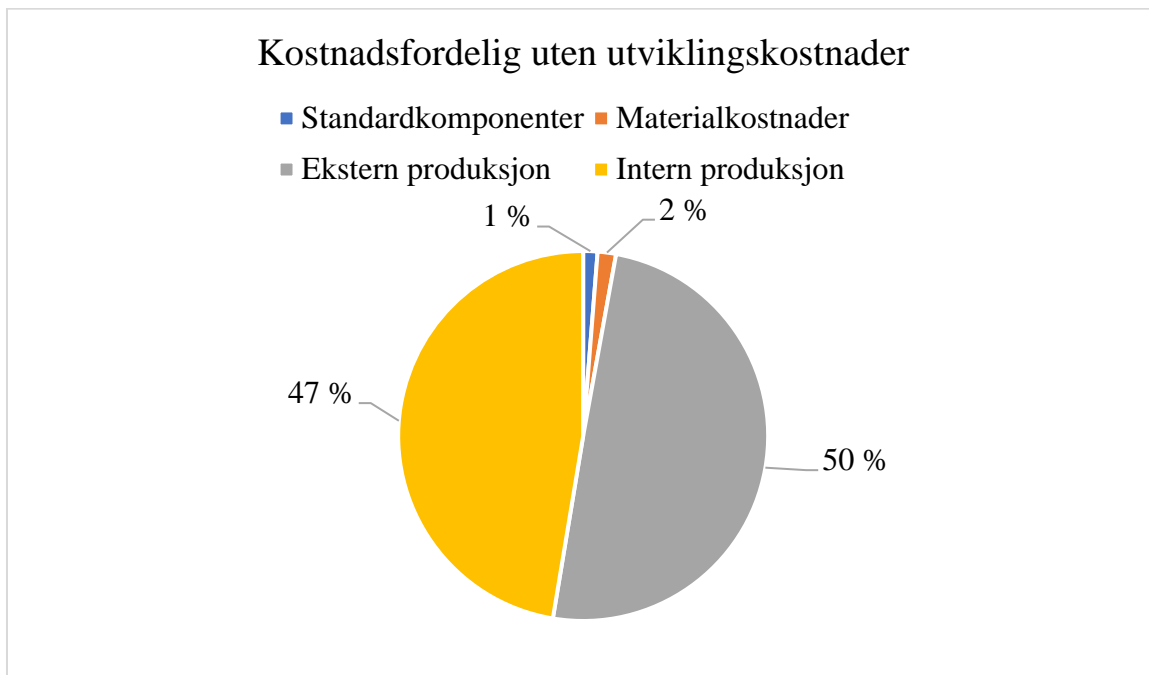
Ut fra kostnadskalkylen vil det koste omtrent **659454** kr å utvikle en prototype. Kalkylen baserer seg på grove estimater og det er derfor behov for en mer omfattende kalkyle der materialkostnadene blir grundigere undersøkt, basert på pristilbud fra leverandører. Det kommer likevel tydelig frem at det som koster, er arbeidskraft. Utviklingsarbeidet utgjør majoriteten av totalsummen, og ved å neglisjere denne kostnaden, vil det bare koste omtrentlig **150704** kr å utvikle en prototype.

For å illustrere kostnadsfordelingen, er det laget et kakediagram med delsummene fra tabell 12.2.



Figur 12.1: Kakediagram over kostnadsfordelingen ved utvikling av en prototype. Hvert kakestykke illustrerer hvor stor prosentandel av kostnadene hver av delsummene utgjør.

I figur 12.1, ser man nesten ikke to av delsummene, standardkomponenter og materialkostnader, fordi de utgjør en så liten andel av de totale kostnadene. Ved å neglisjere utviklingskostnadene, siden det utføres gjennom en gradsoppgave, vil fordelingen endre seg. Dette illustreres i figur 12.2, under.



Figur 12.2: Kakediagram over kostnadsfordelingen ved utvikling av en prototype, når utviklingskostnadene neglisjeres. Hvert kakestykke illustrerer hvor stor prosentandel av kostnadene hver av delsummene utgjør.

Det kommer tydelig frem at materialkostnaden og standardkomponentene utgjør en svært liten andel av kostnadene. Det er viktig å poengtere at flere viktige komponenter ikke er tatt med i kalkylen, slik som motor, batterier og generelt inventar og instrumentering. Dermed vil den faktiske totalprisen bli betydelig høyere.

12.3 Kostnadsanalyse for serieproduksjon

Ved serieproduksjon vil de fleste av produksjonsmetodene endres. Dette er fordi maskinering av alle komponentene er tidkrevende, og slik som kostnadskalkylen fra kapittelet over viser, er arbeidskraft kostbart. Det vil derfor forekomme en større engangssum ved innkjøp av verktøy som erstatter mye av tilvirkningsarbeidet. Investeringskostnaden av å starte serieproduksjon vil dermed bli mye høyere, men lavere på sikt, siden tilvirkningskostnaden blir kraftig redusert.

Under eksperttestingen med Øyvind Hansen, ble det kartlagt at støpeformer for å produsere karosseriet, kan koste flere millioner kroner. Dette vil være det mest kostbare verktøyet for produksjonen.

For kostnadsanalysen for serieproduksjon settes følgende forutsetninger og forenklinger:

- Utviklingsarbeidet vil ikke påvirkes av produksjonen og forblir 508 750 kr.
- Det antas at materialkostnaden og prisen for standardkomponenter er konstant og fremdeles ligger på 2420 kr og 1884 kr per enhet.

- Støpeform for karosseri i karbonfiber vil koste 1 000 000 kr per form, og det er behov for to former, en til understellmodulens skall og en til kupémodulen.
- Alle andre støpeformer antas å koste 60 000 kr og det er behov for åtte støpeformer. Dette gir en total sum på 480 000 kr.
- Det vil fremdeles være behov for tilvirkning av komponentene og tilvirkningstiden settes til åtte timer per enhet, og timeprisen økes til 1000 kr/timen, som blir totalt 8000 kr per enhet.

Basert på disse forutsetningene er kostnaden for å produsere kun én enhet oppsummert i tabell 12.3.

Tabell 12.3: Kostnader for serieproduksjon av én enhet.

Kostnad:	Sum (NOK):
Utviklingsarbeidet *	508750
Standardkomponenter **	1884
Materialer **	2420
Produksjonsverktøy *	2 480 000
Tilvirkningskostnad **	8000
Total	3 001 054

* Engangskostnader (Totalt 2 988 750)

** Faste kostnader per enhet (Totalt 12304)

Det er kostbart å starte opp en serieproduksjon. Det er dermed nødvendig å undersøke hvor mange enheter som må produseres før det lønner seg å drive produksjon. De totale enhetskostnadene per produserte enhet kan beregnes gjennom formelen:

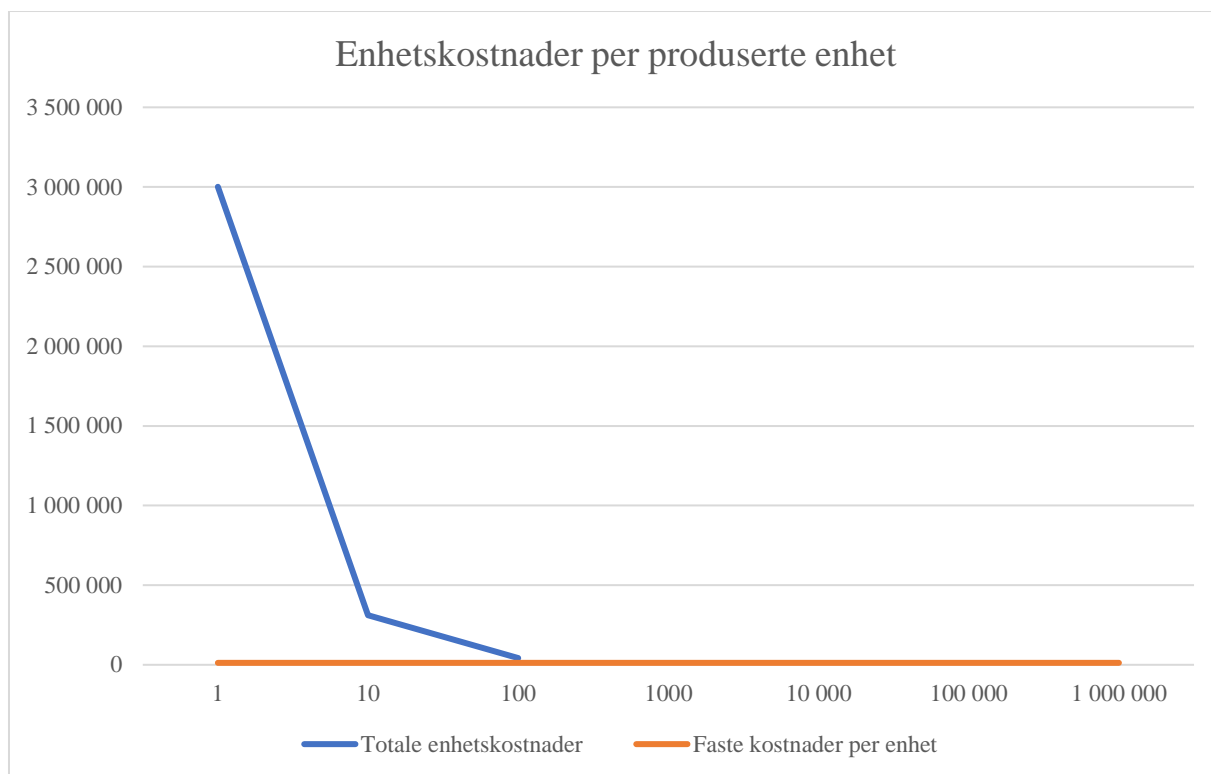
$$\text{Totale enhetskostnader} = \text{Faste kostnader per enhet} + \frac{\text{Engangskostnader}}{\text{Antall enheter}}$$

Kostnadene per produserte enhet vil dermed bli lavere desto flere enheter som produseres. For å vise dette er de totale enhetskostnadene kalkulert etter en logaritmisk skala for antall enheter, slik tabell 12.4 viser:

Tabell 12.4: Tabellen viser de totale enhetskostnadene ved produksjon av ulikt antall enheter.

Antall enheter produser:	Totale enhetskostnader:
1	3 001 054
10	311 179
100	42 192
1000	15 293
10000	12 603
100000	12 334
1000000	12 307

De totale enhetskostnadene senkes raskt når flere enheter produseres. For å illustrere dette er informasjonen i tabell 12.4 satt inn i et linjediagram som vises under.



Figur 12.3: Figuren viser enhetskostnaden per produserte enhet. Det ser ut som de totale enhetskostnadene går til null ved ca. 100 produserte enheter, men den ligger på omtrent 12000 kr, det samme som faste kostnader per enhet.

Ved ti produserte enheter er det lavere enhetskostnader enn for utviklingen av en prototype. Det viser at enhetskostnadene svært raskt reduseres ved å starte produksjon av Dolphin. Ved en produksjon på 100 enheter har enhetskostnadene blitt drastisk redusert, og ved 10 000 enheter begynner linjen å flate seg ut på litt over 12 000 kr.

13 MARKEDSPRESENTASJON

For å vise frem designresultatet av prosjektarbeidet, blir helhetskonseptet av understellmodulen og kupémodulen, presentert i en markedspresentasjon. Renderte bilder av konseptløsningen blir lagt frem, samt hvordan bilen ser ut med ulike farger, i tillegg til hvordan den monteres og brukes.

13.1 Renderte framstillinger

Den renderte modellen kommer i ulike farger basert på fargedrøftingen i kapittel seks. Renderte bilder viser hvordan sammenstillingen vil se ut i ulike farger og settinger.



Figur 13.1: Figuren viser renderte bilder av modulkonseptet Dolphin. Det øverste bildet viser sammenkoplingen av understellmodulen og kupé, med karosseri og lykter. Nede til venstre vises bilen med lys i lyktene, og bildet nede til høyre viser hvordan modulene ser ut rett før sammenkopling, når kupéen senkes ned i understellet.

Dolphin kommer i flere ulike farger, for at den skal passe kundens preferanser. Basert på drøftingen av fargealternativ i kapittel 6.3.5, skal Dolphin komme i fargene rød, grønn, brun, blå, sort og grå, slik figur 13.2 viser.



Figur 13.2: Fargealternativ for Dolphin sitt ytre karosseri.

Dolphin vil kjøre ute i ulike omgivelser, både i byen og i landlige områder, som vi har så mye av i Norge.



Figur 13.3: Dolphin på en parkeringsplass i solnedgangen.



Figur 13.4: Dolphin som kjører på en landevei.



Figur 13.5: Dolphin er et grønt kjøretøy, som er snilt mot naturen og holder verden grønn.



Figur 13.6: Dolphin kjører gjennom gatene i sentrum av en større by.

13.1.1 Logo og varemerke

For at Dolphin Sky skal bli et etblet varemerke, trenger det en gjenkjenbar logo. Logoen tar utgangspunkt i produktnavnet, og avbilder er delfin. Delfinen er vinklet oppover, slik at det ser ut som den letter. Dette er for å symbolisere at Dolphin Sky kan fly når dronemodulen er koplet til. Delfinens runde overflater symboliserer Dolphins organiske former og den lave luftmotstanden som vil oppstå rundt kjøretøyet. Den sorte ovalen som omringer delfinen gir logoen et mer maskulint preg, i motsetning til delfinen, slik at den skal appellere til alle. Dette er et helt unik design som ikke er å finne på dagens marked, og forhåpentligvis skaper interesse for Dolphin.



Figur 13.7: Logodesign til kjøretøyet Dolphin.

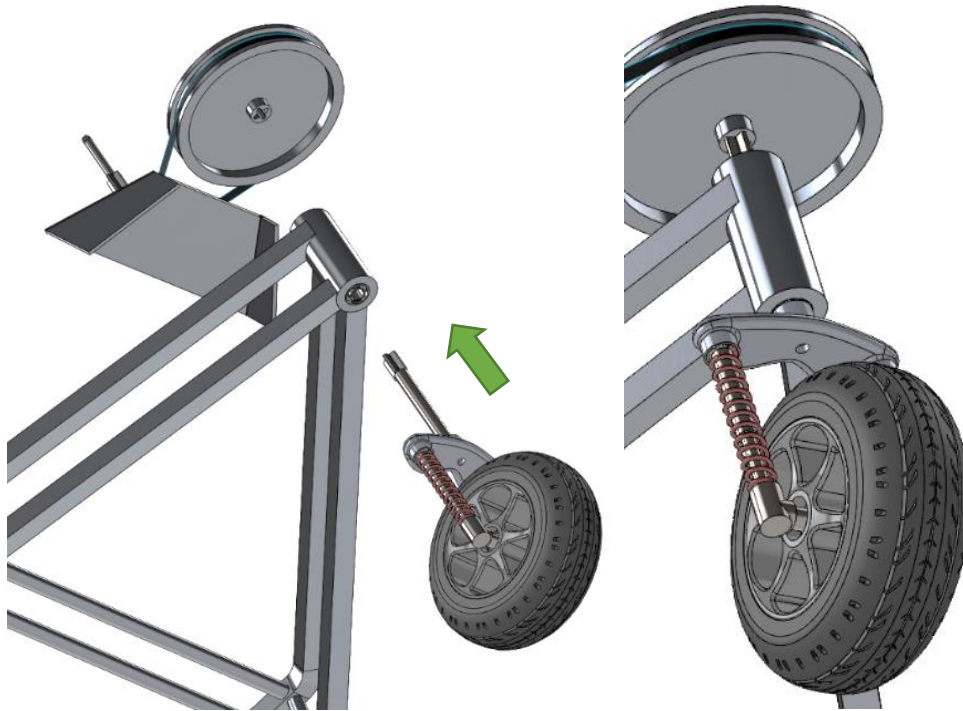
13.2 Tekniske beskrivelser

For å forklare hvordan komponentene henger sammen legges det frem en monteringsanvisning av det helhetlige konseptet. Deretter følger en bruksanvisning av hvordan sammenkoplingen og låsingen av modulene utføres.

13.2.1 Monteringsanvisning

Monteringen av Dolphin vil foregå på et verksted. Det er behov for noe mer utredning av sammenføyingsmetoder, og det vil derfor ikke vises en detaljert monteringsanvisning av alle de mindre komponentene, men kun hvordan hovedkomponentene plasseres i forhold til hverandre. En monteringsstegning av hovedkomponentene er å finne i vedlegg 8.

Hylsen til forhjulsgaffelen er utgangspunktet for sammenkoplingen. Komponenten «forhjulsgaffel» skal koples inn i hylsen fra undersiden, slik at styringsakselen går gjennom hele hylsen. Styringssystemet skal festes rett over hylsen, slik at styringsakselen festes inni tannhylsen til den drevende styringsskiven i styringssystemet. Dette illustreres nedenfor i figur 13.8.



Figur 13.8: Ved montering går forhjulsgaffelen inn i hylsen, under fra, og koples inn i styringskiven over.

Når alle delkomponentene er koplet sammen, er det kun karosseri som gjenstår. Et stort skall legges over understellet. Kupéens karosseri består av to halvdeler som festes sammen på midten, slik den midtre delelinjen i figur 13.9 viser. Og til slutt koples kupé og understellet sammen.



Figur 13.9: Eksplovert bilde av sammenstillingen av Dolphin.

13.2.2 Bruksanvisning

Bruksanvisningen viser hvordan sammenkoplingen skjer mellom kupémodulen og understellet og hvordan delene låses sammen. Utgangspunktet er at kupeen er koplet fra understellmodulen, slik figur 13.10 viser.



Figur 13.10: Kupémodulen er koplet fra understellmodulen, og bruker låsebena som landings plattform.

Når kupéen skal lande på understellmodulen, senker den seg vertikalt nedover, slik figur 13.11 viser. Dronemodulen skal være på taket til kupéen og det er den som styrer landingen.



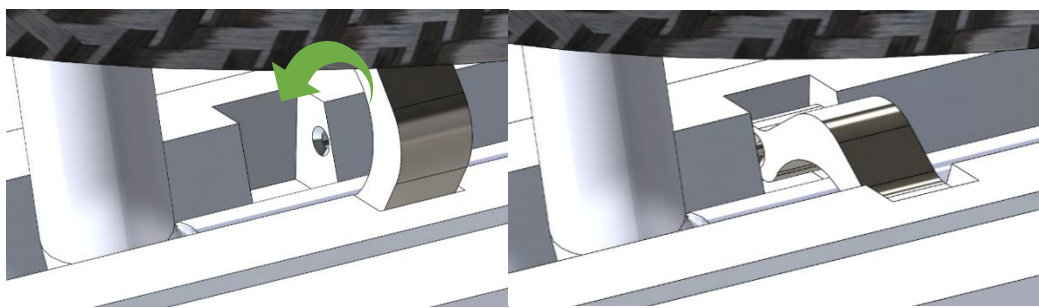
Figur 13.11: Figuren viser kupéens posisjon over understellmodulen, når den lander. Dronemodulen skal være plassert på taket til kupéen, kupéen klarer ikke å sveve av seg selv.

Låsesystemet på understellet er åpent, som vil si at låsearmene er vippet opp i vertikal posisjon, og er klargjort for at låsebena skal senkes ned i sporet, slik figur 13.12 viser. Kupéen senker seg da sakte nedover. Karosseriet er formet slik at kupéen skal sentreres og at låsebena da naturlig plasseres over låsene. Når bena treffer låseskinnen, vil de naturlig skli ned og sentreres i sporet. Da kan svevemodus skrues av. En sensor skal fange opp at låsebena er plassert ned i sporet, som forteller låsearmen at den kan lukkes.

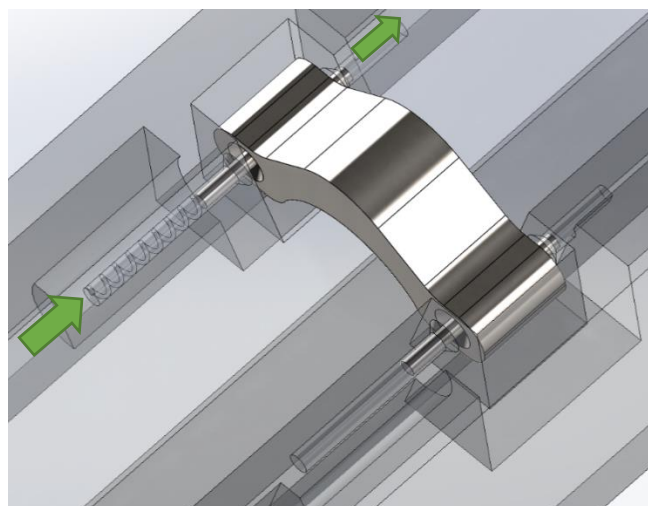


Figur 13.12: Låsearmen står i "åpen" posisjon og er klar for at kupéen skal lande ned i sporet.

Låsearmen roteres da ned mot hakket den skal ligge i, slik figur 13.13 viser. Når den treffer sporet, og rotasjonsbanen er komplett, går låseaksene ut, gjennom hullet i låsearmen og festes på den andre siden av låseskinnen. Sammenlåsing er da komplett.

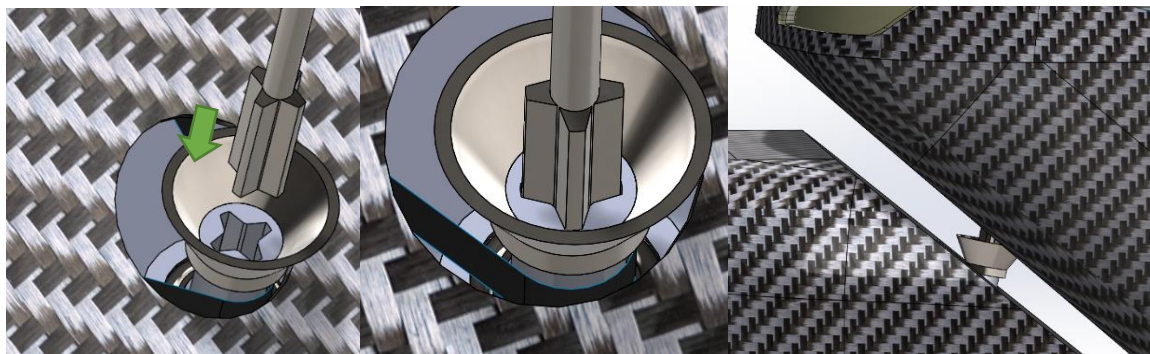


Figur 13.13: Nærbilde av lås under sammenkopling. Låsebenet ligger i sporet og låsearmen har fått signal om å lukke seg. Til venstre illustreres bevegelsesbanen til låsearmen fra åpen posisjon. Til høyre vises den komplette sammenslåingen.



Figur 13.14: Illustrasjon av bevegelsesbanen til låseakselen. Den beveger seg fra å være dyttet inn i låseskinnen, inntil en sammenpresset fjær, til å skyves ut, gjennom låsearmen, og inn i et spor på andre siden.

Styringssystemet starter da sin sammenkopling. Kupéens styringsaksel blir skjøvet litt ut av hullet sitt i kupéen, og treffer ned i kopl原因strakten, og inn i det drivende tannhjølet.

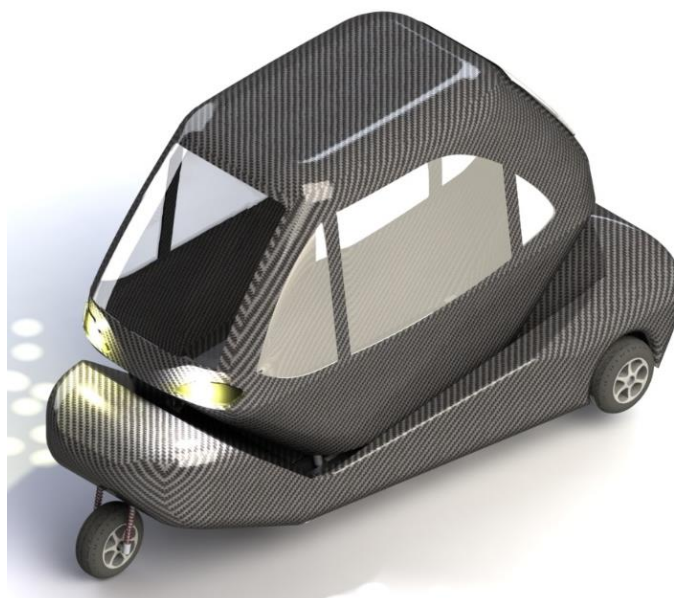


Figur 13.15: Figuren illustrerer sammenkoplingen av styringssystemet. Til venstre vises hvordan kupéens styreaksel senkes ned mot trakten. Bildet i midten viser sammenkoplingen av styringssystemet, og bildet til høyre, viser hvordan det ser ut utenfra.



Figur 13.16: Grønt signal på kontrollpanelet, som viser sjåføren at sammenkoplingen er komplett.

Når sammenlåsing er komplett for styringen, bremsene, og det elektriske systemet, lyser det grønt på instrumentpanelet i kupéen og sjåføren vet det er trygt å kjøre.



Figur 13.17: Bilde av Dolphin som er klar for å kjøre.

14 PROSESSEVALUERING OG DISKUSJON

For å få en oversikt over utfordringer i prosessarbeidet og usikkerhetsmomenter, er en prosessevaluering utarbeidet. Hensikten er å vurdere og diskutere utviklingsprosessen og sette lys på utfordringer gjennom prosjektet og viktige forbedringspotensial for prosessarbeidet og resultatet.

14.1 Læring og kompetanseutvikling

Dette har vært et omfattende prosjekt der gode arbeidsrutiner har vært viktig. Gradsarbeidet har gitt økt kompetanse innenfor planlegging og gjennomføring av et tidsavgrenset prosjekt. Å jobbe selvstendig med et prosjekt som har krevd omtrent 900 arbeidstimer, har vært utfordrende, men også svært lærerikt. En viktig lærdom er at tiden går mye fortere enn forventet, og selv med en tydelig prosjektplan fra starten, ble det for lite tid igjen på slutten til å gjennomføre alle de planlagte analysene og designarbeidet. En viktig lærdom er derfor at det er nødvendig med konkrete arbeidsmål for hver dag i et slikt prosjekt.

En annen erfaring som ble gjort er at det har vært viktig å variere arbeidsplass for å få nye impulser og energi. Det var spesielt givende å møte medstudenter og dele erfaringer underveis i prosjektet for å motivere hverandre og få gode innspill.

Prosjektarbeidet har også gitt en økt kompetanse innenfor utviklingsmetodikk og ulike elementer for å sikre en strukturert utviklingsprosess. I tillegg har temaet i oppgaven ført til økt kompetanse innen kjøretøyteknologi og hvor omfattende fagområdet er. For å utvikle et mest mulig helhetlig konsept, bestående av alle nødvendige komponenter, måtte det settes begrensninger for utviklingen av enkeltkomponentene og fokuset var dermed på å generere et overordnet design.

For videre refleksjon rundt de ulike fasene i prosjektarbeidet, benyttes prosesstrinnene beskrevet i seksjon 3.5.

14.2 Utredningsfasen

- Oppgaven bygger videre på arbeid utført i tidligere gradsprosjekter, og ved oppstarten av prosjektet var det utfordrende å etablere hvor det var behov for videre arbeid og hva problemstillingen i dette prosjektet skulle være. Det var overveldende å starte prosjektet med å gå gjennom de tidligere oppgavene, for det virket som en enorm mengde arbeid å utføre på kort tid.
- Det var utfordrende å kartlegge hvor mye tid og ressurser som ville brukes på hver arbeidsoppgave, under utviklingen av prosessplanen.
- Terminologibeskrivelsen ble utfylt underveis i prosjektet, siden det var usikkert i starten hvilke begreper, formler og symboler som kom til å bli brukt. Dette førte til at kapittelet lenge sto uferdig.
- I teori- og teknologiutredningen, har det vært utfordrende å kartlegge hvilken teori som er relevant for prosjektarbeidet. Det var så mye relevant å skrive om, og alt virket like

viktig. Dermed ble det utfordrende å begrense seg, og å faktisk trekke ut den viktigste teorien.

- Det kunne gjerne ha blitt utredet flere teknologiske løsninger, spesielt for automatiske koplingssystemer. Det hadde vært gunstig å inkludere eksperter på dette tidspunktet for å skaffe en bedre forståelse av hva som eksisterer, tidligere i prosjektet.

14.3 Utviklingsfasen

- Produktspesifiseringen er hovedsakelig basert på tidligere gradsarbeid med Dolphin, og de er igjen basert på grove estimater. Det burde blitt utredet hva gjennomsnittlig størrelse for et trehjuls kjøretøy er, for å danne et bedre grunnlag for den metriske grovspefiseringen. Dimensjonene som ble satt er relativt høye, som gav følgefeil til konseptmodelleringen.
- Det var utfordrende å få oversikt over all den innsamlede informasjonen fra utredningsfasen, og på bakgrunn av dette utvikle en funksjonsanalyse. Det var utfordrende å kartlegge sammenhengene mellom de ulike modulene, og hvilke funksjoner som var nødvendige for helhetskonseptet.
- Da funksjonsalternativene skulle utredes, var det utfordrende å tegne tydelige skisser som viste de tenkte funksjonene.
- Ved beregningen av brukspåkjenninger ble det gjort flere forenklinger og antagelser. De beregnede verdiene er dermed kun estimater og burde sjekkes av en ekspert.
- Under den tidlige materialdrøftingen ble det kun sett på noe få materialer. En bedre utredelse av krav til materialer i de ulike komponentene burde blitt utført, og flere legeringer burde blitt utredet.
- Under egenscreeningen ble funksjonsalternativene vektet opp imot hvor godt de utfyller satte krav. Tildelte poeng ble ikke spesifikt begrunnet og dette er fordi de baserer seg på tenkt funksjon og hvordan de ville fungere i det helhetlige designet. På grunn av usikkerhet rundt resultatene ble det valgt å utføre eksperttester rett etterpå for å undersøke om valgte komponenter var fornuftige.

14.4 Konstruksjon og designfasen

- Eksperttestene ble utført før CAD-modellering, noe som var et lurt valg, da det var fint å få innspill før modellen var ferdigstilt. Det er lettere å endre en skisse enn en 3D-modell. Ekspertene hadde mange gode råd rundt teknologiske løsninger som det hadde vært fint å vite om tidligere i prosjektet, spesielt under teknologiutredelsen. Derfor burde eksperter blitt inkludert i prosjektarbeidet tidligere.
- Ved elementberegningene var det utfordrende å kartlegge de mest utsatt komponentene og hvor det var nødvendig med dimensjoneringsberegninger. Med mange sveise, bolter, hull og stag i sammenstillingen, måtte det settes begrensninger. Det ble derfor ikke regnet

på sveiser. I knutepunktet rundt hylsen i understellrammen, vil det oppstå bøye- og skjærspenninger i sveisen, og derfor burde disse beregningene blitt inkludert. I tillegg burde det blitt utført beregninger på demping.

- Elementberegningene ble mer utfordrende enn antatt. Det ble utført flere forenklinger. Det burde blitt satt av mer tid til å utføre en eksperttesting med fokus på beregninger, og få forsikre at det ble korrekt utført og at dimensjonene ser fornuftige ut. De beregnede spenningene i låsearmene ble svært små og burde utføres på nytt med veiledning av en ekspert. Det er stor usikkerhet rundt beregningene som ble utført på forhjulsgaffelen og på låsesystemet og dermed utsikkerhet rundt satte dimensjoner.
- Det oppstod flere utfordringer under 3D-modelleringen, og det var mer komplisert enn forventet. Alle komponentene måtte passe inn i hverandre, og underveis i justeringen ble lengde til delene i understellrammen større enn planlagt. På taket måtte det være plass til dronemodulen, og dermed ble designfriheten begrenset og det førte til at den sammenstilte konstruksjonen ble større enn ønsket både i bredde og høyde.
- Under elementberegningene ble det bestemt å ha firkantede rørprofiler i hele understellrammen, også de vertikale rørene og avstiverne. 3D-modellen ble visuelt veldig kompakt og massiv, og det ble derfor besluttet å bruke 30x3 sirkulære rør for avstiverne og de vertikale stagene.
- Det var behov for flere komponenter i sammenstillingen enn antatt, og formen på flere av de mindre delene ble derfor svært enkel, og dimensjonene er usikre, med tanke på belastninger. Det kunne vært fornuftig å gjennomføre en ny funksjonsanalyse rundt de uteglemte komponentene som hjulopphengene og hvordan alle delene skal monteres.
- Det var utfordrende å få de organiske, runde, overflatene med Solidworks, spesielt ved modelleringen av karosseriene. Flere ulike metoder og funksjoner ble testet, og mye tid ble brukt på å teste «surface»-funksjonen og å lage runde former med splines og støtte geometri. Det resulterte i bølgeformede overflater, og designet likner mer på en klovnebil. Ved å starte på nytt og ekstruderne et emne og legge på fillets og å skalle den ut, ble resultatet mye bedre.
- Planen var å utvikle et helhetlig konsept med inventar i kupeen, slik som en førerstol. På grunn av tidsmangel, ble dette nedprioritert.

14.5 Analyse- og ferdigstillingsfasen

- Valg av materialer og produksjonsmetoder, burde blitt utført i samarbeid med verkstedet på NMBU. Materialene ble hovedsakelig valgt på bakgrunn av materialeegenskapene. Formegenskapene til materialene burde blitt vurdert, spesielt ved valg av stållegering og karbonfiber kompositt. Det burde også ha blitt vurdert flere stållegeringer for å bedre begrunne materialvalget.
- Valg av overflatebehandling er basert på nettbaserte kilder. Det er derfor utsikkerhet knyttet til valgte behandlingsmetoder. Igjen burde det vært et tettere samarbeid med verkstedet, både for å kartlegge hva det er mulig å utføre på NMBU sitt verksted og

hvilke overflatebehandlinger de har god erfaring med, og på bakgrunn av dette ta en avgjørelse.

- FEM-analysene ble mer utfordrende å gjennomføre enn antatt. Det var kun mulig å gjennomføre en av tre planlagte analyser, og det er noen tydelige feil i den ene analysen. Det burde blitt satt av mer ressurser til å analysere de mest sentrale komponentene i sammenstillingen, og det burde ha blitt bedt om hjelp fra eksperter.
- Det var utfordrende å finne priser for ferdiglegerte materialer. De fleste leverandørene oppgir ikke prisene på sine nettsider, og kostnadene ble derfor svært grovt beregnet. Materialkostnadene burde derfor undersøkes nærmere, ved å kontakte leverandører. I tillegg burde nødvendig materialmasse undersøkes på nytt. Massen ble hentet ut av Solidworks for hver komponent, men ved innkjøp av materialer, vil standardiserte lengder av et emne selges, og materialprisen vil derfor bli høyere. Mer materialer må kjøpes inn enn akkurat det som er igjen i komponentene etter maskinering. Materialkostnaden er derfor ikke riktig.
- Produksjonspris og tid var et samtaleemne ved eksperttesten med Øyvind Hansen. Samtalen ble gjennomført før 3D-modellene var utviklet, og det burde derfor blitt utført en ny eksperttest da alle konseptelementene var ferdigstilt for å kartlegge tilstrekkelige produksjonsmetoder og tiden det vil ta.
- Ved fotorenderingen var det utfordrende å lyssette riktig. Det resulterte i skygger inne i rør og i hull og spor som det hadde vært ønskelig å få tydeligere frem i renderingene.
- Det var i utgangspunktet planlagt å ha med en detaljert monteringsanvisning over sammenstillingen av alle komponentene. På grunn av det begrensede tidsrammen, ble utredning av monteringsmetoder nedprioritert og dermed ble det ikke relevant å ha med en detaljert anvisning.

14.6 Designrevisjon

I denne fasen fokuseres det på forbedringspotensial og for konkrete designelementer i sammenstillingen.

- Sammenstillingens ytre dimensjoner er omtrent like store som de definert i den metriske grovspesifiseringen, men disse målene burde justeres. Når bilen er tre meter lang, er det ikke lenger så liten. I tillegg er den totale høyden på litt under 2 meter, en høyde det er ønskelig å redusere. Det er da spesielt relevant å redusere høyden til understellet, og gjøre rammesammenstillingen tynnere. Kupéen kan også bli noe lavere, og nærmere minimums høyden utredet i kapittel 4.3.1.
- Avstanden fra understellet og ned i bakken er litt kort og kan skape utfordringer ved fartsdumper. Dette kan justeres med å sette inn større hjul.
- På grunn av høyden til understellet, er det begrenset sikt nedover. Det var utfordrende å lage «surface» i vinduene til kupéen. Det var ønskelig med større vinduer rundt hele,

men det ble for utfordrende geometri på de runde overflatene for surface funksjonen og derfor ble vinduene gjort smalere og kortere enn ønskelig.

- Det ble helt på slutten observert at det er en klaring mellom låsearmen og låsebenet. Denne klaringen må fjernes helt, slik at låsearmen kan overføre krefter til låsebenet.
- Karosseriet til understellet fikk ikke den ønskede formen. Understellrammen måtte dekkes helt, og det førte til et design som ble høyere, bredere og lengre ned mot bakken enn ønskelig. Fronten ble mer firkanten, mens målet var en eggform. Understellet måtte være bredere enn kupéen, og fronten på kupéen ble bredere enn planlagt, som smittet over på understelldesignet.

15 KONKLUSJON

Gjennom dette prosjektet er det utredet, utviklet og designet et helhetskonsept av Dolphin Sky med delvis revisjon og videreutvikling av tidligere løsningsforslag fra forutgående gradsarbeider knyttet til understellmodul, styring, samt kupéløsning.

En praktisk løsning på sammenkopling av understellmodul og kupé har vært fokus i dette arbeidet, og er blitt lagt frem. Det har vært et gjennomgående fokus på lav vekt ved valg av løsninger og materialer, samt funksjonell og konstruktiv sikkerhet.

Kjøretøyet er utviklet som et modulprodukt med godt fungerende sammenkoplinger, det er lett å framstille, har en lett vekt, er miljøvennlig og har gode kjøreegenskaper både på bakken og i lufta, som gjør at kjøretøyet er trygt å bruke. Det utvendige designet er så aerodynamisk som det lar seg gjøre, og kupéløsningen har fått en ergonomisk utforming med hensyn til videre raffinering av interiør og bruk. Alle trinn i utviklingsarbeidet er blitt dokumentert med løsningsvalg og tekniske anbefalinger.

15.1 Resultater og anbefalinger

Hovedresultater for arbeidet er som følger:

- Sammenstillingen består av to moduler, kupé og understellmodul, og det er tilrettelagt for en tredje modul, dronemodulen, på taket.
- Understellmodulens bredde gir kjøretøyet et lavt massesenter. Dolphin vil dermed bli svært stabil og trygg å kjøre.
- Sammenstillingen har fungerende sammenkoplinger for å låse sammen komponentene og kople styringssystemet. Det er totalt seks låser, fordelt over to låsespor.
- Det er utviklet et styringssystem som er lett å produsere, sammenstille og manøvrere. Styringssystemet bruker reim for å få styringen nærmere midten av understellet.
- Understellet og kupéen kan brukes i Delta- og Tadpole-variant.
- De ytre dimensjonene for sammenstillingen er: 1890x1684x3000 mm.
- Kupéens ytre dimensjoner er: 1582 x 1158 x 2501 mm.
- Understellets ytre dimensjon er: 825 x 1684 x 3000 mm.
- Sammenstillingen veier totalt 232 kg, uten hjul, motor, batterier, isolering og resterende instrumentering slik som innhold i kupéen.
- Understellrammen utsettes for en maksimal bøyepening på 124 MPa,
- Rammekonstruksjonene og mesteparten av komponentene produseres i aluminiumlegeringen EN AW 6082.
- Kostnadene for å utvikle én prototype er estimert til 659454 kr der 77% er til utviklingsarbeid.

Anbefalinger å ta med videre er:

- Symmetrien til kupéen muliggjør Delta- og Tadpole-versjonen. Dette gir en stor fleksibilitet for kjøretøyet.
- Låsebenene under kupéen har to funksjoner. De kan både landes på og benyttes til sammenkopling og låsing. Det anses som en stor fordel.
- Det anbefales å benytte seks låser, da det reduseres belastninger per lås, sammenliknet med for eksempel 4 låser. Låsene er jevnt fordelt over to spor og festes over ytterpunktene på hvert låseben i tillegg til midten. Dermed vil låsene fungere like godt i Delta- og Tadpole-versjon.
- Det anbefales å beholde linjeføringen i kupéen da den har en rund og organisk form samtidig som det er godt med plass på innsiden. Den burde nedskaleres litt, med designet burde i stor grad beholdes.
- Det anbefales å bruke en dobbel rørramme. Den er lett i vekt samtidig som den har høy stivhet.

15.2 Videre arbeid

For å kunne realisere Dolphin-prosjektet, og produsere en prototype, er det behov for videre arbeid. Det har oppstått uforutsette utfordringer gjennom prosjektarbeidet, som har ført til at viktige elementer har blitt utelatt på grunn av begrenset tid. Det er derfor satt opp en punktvis prioriteringsliste av gjenstående arbeid som må utføres:

- Lage en RP-modell.
- Videreutvikle og ferdigstille låsesystemet. Det må utredes for og utvikles et system for automatisk sammenkoplingen som styrer låsearmen og låseakselen. I tillegg ble det observert en klaring mellom låsearmen og låsebenet. Denne klaringen må fjernes, og dermed må låsesystemets dimensjoner på nytt og justeres.
- Utføre FEM-analyser av alle hovedkomponenter og knutepunkt. Programvaren Ansys burde benyttes istedenfor Solidworks.
- Utføre beregninger av kreftene i styringssystemet og utrede hvordan komponentene skal monteres sammen.
- Optimalisere designet av understellrammen, ved å gjøre den tynnere/lavere i tillegg til noe kortere, smalere.
- Det er nødvendig å gå over beregningen på nytt for å sikre tilstrekkelig dimensjonering av komponenter, hull og bolter. Det er nødvendig å utføre beregninger på sveisene i sammenstillingen. Dette er avgjørende for at konstruksjonen skal tåle de ulike belastningene den utsettes for.
- Utføre CFD-analyser og på bakgrunn av det, optimere karosseridesignet.
- Utvikle inventar i kupéen og få det med i sammenstillingen.

- Videre utvikle taket på kupéen slik at dronemodulen kan festes til det.
- Sammenkoplingsmetoder av de ulike komponentene må spesifiseres og på bakgrunn av dette må en detaljert monteringsanvisning utarbeides.
- Utrede og utvikle styring av bakhjulene.
- Utrede og utvikle det elektriske systemet til Dolphin.
- Gjøre eventuelle endringer på understellet for å tilpasse etter plassen til ønsket motor og batterier, og sette sammen alle komponenter i en komplett og produksjonsklar løsning.
- Lage en prototype med fungerende systemer.

16 REFERANSER

16.1 Skriftlige kilder

11. Terjesen, Geir: «*Grunnlag i drivverk og drivkraftteori*», 2. Utgave, REALTEK, NMBU, 2021, s. 54
13. Ewert, A., Schmid, S., Brost, M., Davies, H. og Vinchx, L.: “*Small Electric Vehicles, An International View on Light Three- and Four-Wheelers*”, Springer Nature, Cham, Switzerland, 2021, s. 193
17. Rees, Chris: “*Three Wheelers A-Z, The definitive encyclopedia of three-wheeled vehicles form 1940 to date*”, Quiller Print, Storbritania, 2013, s. 239
20. Rummelhoff, Kristoffer Ødegaard: «*Dolphin Sky, Del A: Utvikling av integrert design- og helhetskonsept for sveve-løsning*», REALTEK, NMBU, Ås, 2016, s. 153
21. Thømt, Anders: «*Utredning, dimensjonering og utvikling av testoppsett for thrusterfunksjon til persondrone.*», REALTEK, NMBU, Ås, 2017, s. 106
22. El-Gewely, Tarek: «*Dolphin Sky: Utredning og utvikling av sammenfoldbart propell- og thrustersystem*», REALTEK, NMBU, Ås, 2018, s. 137
23. Falstad, Henrik: «*Videreutvikling av sammenfoldbare oppheng for propell- og thrustersystem med sikkerhetsfunksjoner*», REALTEK, NMBU, Ås, 2019, s. 200
24. Birkelund, Ingvild Svartstad: «*Utforming av førerkupe og fører plass for Dolphinkonseptet*», REALTEK, NMBU, Ås, 2018, s. 67
25. Aronsen, Steffen: «*Utvikling av førerkupé og førerplass for Dolphin Sky*», REALTEK, NMBU, Ås, 2020, s. 157
26. Gisholt, Einar: «*Utvikling av elektrisk drivlinje for Dolphin*», REALTEK, NMBU, Ås, 2019, s. 200
27. Botnevik, Jon Ole: «*Dolphin Sky: Videreutvikling av understell og styring for bakkemodul*», REALTEK, NMBU, Ås, 2021, s. 120
28. Eversheim, W.: “*Innovation Management for Technical Products: Systematic and Integrated Product Development and Production Planning (RWTH-edition)*”, 1st edition, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Tyskland, 2009, 444 s.
30. Departement of Defense: “*DoD Guide to Integrated Product and Process Development*”, Version 1.0, Office of the Undersecretary of Defense, Acquisition and Technology, Washington DC, USA, 1996, 42 s
31. Pugh, S.: “*Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*”, Pearson Education, Essex, United Kingdom, 1991, 296 s.
32. Pugh, S., Clausing, D. & Andrade, R.: “*Creating Innovative Products Using Total Design*”, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Boston, MA, USA, 1996, 544 s.

33. Dieter, G. E., Schmidt, L.: “*Engineering design*”, Fifth Edition, McGraw-Hill International Edition, New York, USA 2013, 825 s. + vedlegg.
34. Madu, C.N.: “*The House of Quality in a Minute. A Guide to Quality Function Deployment*”, Third edition, Information Age Publishing, USA, 2020, 154 s.
35. Osborn, A. F.: “*Applied Imagination, Principles and Procedures of Creative Problem-Solving*”; 3rd Revised edition, Charles Scribner's Sons, New York, USA, 1979, 417 s.
36. Baxter, M.: “*Product Design (Design Toolkits)*”, 2nd Reprint, CRC Press, (1995)/ Nelson Thorne Ltd, Cheltenham, United Kingdom, 2001, 308 s.
39. Norsk Standard: «*NS-EN ISO 9001: Systemer for kvalitetsstyring Krav*», Norsk standard, 3.utgave, desember 2000, s. 42
- 40 International Organization for Standardization, “*ISO 128: Technical product documentation (TPD)—General principles of presentation*”, International Organization for Standardization
41. Haugan, J.: «*Formler og Tabeller*», 3. utgave, NKI Forlaget, Oslo, 2016, s. 205
42. Terjesen, G.: «*Grunnlag i bremses og bremseteori*», 1. utgave, REALTEK, NMBU, Ås, 2021, s. 63
43. Çengel, Y.A., Cimbala, J.M.: “*Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*”, Fourth Edition, McGraw-Hill International Edition, New York, USA, 2018, s. 945
46. Tilley, A. R, Henry Dreyfuss Associates: “*The Measure of Man and Woman*”, Revised edition, John Wiley & Sons, New York, USA, 2002, 104 s.
47. Adams, H.: “*Chassis Engineering: Chassis design, building & tuning for high performance handling*”, First edition, HPBooks, New York, USA, 1992, s. 125
77. Terjesen, G.: «*Dimensjoneringsteknikk for ingeniører*», 1. utgave, Fagbokforlaget, s.639
91. Johannessen, J.: «*Tekniske Tabeller*», Cappelen Damm Undervisning, 2002, s. 160
92. Terjesen, G.: «*Grunnleggende om utmatting av metaller*», REALTEK, NMBU, Ås, 2020, s. 65
95. Bosch, R.: “*Bosch Automotive Handbook*”, 10th edition, SAE International, 2018, s.277

16.2 Personlig meddelelse

75. Holmberg, Henrik Folke, Overingeniør, eksperttest om konstruksjon, 10.11.21
76. Hansen, Øyvind, Overingeniør, eksperttest om produksjonsmetoder, 15.11.21

16.3 Nettkilder

1. FNs klimarapport, FN Sambandet, sitert 31.08.2021; <https://www.fn.no/nyheter/fns-klimarapport-en-alarm-for-menneskeheten>

2. Hovedfunn i første del i sjette hovedrapport, Miljødirektoratet, sitert 31.08.2021;
<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/fns-klimapanel-ipcc/dette-sier-fns-klimapanel/sjette-hovedrapport-forste-delrapport/hovedfunn-forste-delrapport/>
3. Transport står for 30 prosent av klimautslippene i Norge, Statistisk sentralbyrå, sitert 31.08.2021;
<https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/transport-star-for-30-prosent-av-klimautslippene-i-norge>
4. Klimagassutslipp fra transport, Miljødirektoratet, sitert 31.08.2021;
<https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/klimagassutslipp-fra-transport/>
5. Nesten juli hele året i Oslo-trafikken, Motor.no, sitert 31.08.2021;
<https://motor.no/bompenger-oslopakke-3-samferdsel/nesten-juli-hele-aret-i-oslo-trafikken/103510>
6. Los Angeles is building an e-highway, Quartez, sitert 31.08.2021;
<https://qz.com/273786/los-angeles-is-building-an-e-highway/>
7. Bærekraftige byer og lokalsamfunn, FN Sambandet, sitert 31.08.2021;
<https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/baerekraftige-byer-og-lokalsamfunn>
8. Dette er fordelene for elbiler, NAF, sitert 01.09.2021;
<https://nye.naf.no/elbil/bruke-elbil/dette-er-fordelene-for-elbiler/>
9. Fakta om bil og transport, Statistisk sentralbyrå, sitert den 31.08.2021;
<https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/faktaside/bil-og-transport>
10. Tesla Model 3, Tesla, sitert 01.09.2021;
https://www.tesla.com/no_no/model3
12. Urban Transport, New Atlas, sitert den 29.09.21;
<https://no.pinterest.com/pin/>
14. Podbike Frikar e-bike, Podbike, sitert 30.09.21;
<https://www.podbike.com/products/podbike/>
15. The future is electric for Nissan, Nissan Motor Corporation, sitert den 30.09.21;
<https://global.nissannews.com/en/releases/>
16. PIVO 3, Nissan Motor Corporation, sitert den 30.09.21;
<https://www.nissan-global.com/COMMON/HTML/MOTORSHOW/2011/pivo3>
18. POP.UP.NEXT, Italdesign, sitert den 30.09.21;
<https://www.italdesign.it/project/pop-up-next>
19. World's first flying car production model, PAL-V, sitert den 30.09.21;
<https://www.pal-v.com/en/explore-pal-v>
29. The Principles of Integrated Product Development, NPD Solutions, sitert den 21.09.21;
<http://www.npd-solutions.com/principles.html>

37. FEM Analysis, SSEB, sitert den 21.09.21; <https://www.sseb.eu/en/expertise/fem-analysis/>
38. What is CFD, Femto Engineering, sitert den 21.09.21; An introduction to CFD: what, why and how - Femto Engineering
44. Volocity, The superior air taxi, Volocopter, sitert den 10.10.21; <https://www.volocopter.com/solutions/volocity/>
45. Ehang AAV, Ehang, sitert den 10.10.21; www.ehang.com/ehangaav/
48. Trike Frames, Custom Trike Frames, sitert den 28.10.21; <https://www.gogllgo.top/ProductDetail.aspx?iid=120268284&pr=>
49. Standard Vintage Go-Kart Kit, Go Power Sports, sitert den 28.10.21; <https://www.gopowersports.com/standard-vintage-go-kart-kit/>
50. What are the types of Automobile Chassis?, Explore Automotive, sitert den 01.11.21; <https://autoexplor.blogspot.com/2020/04/what-are-types-of-automobile-chassis>
51. Types of car chassis, Go Mechanic, sitert den 01.11.21; <https://gomechanic.in/blog/types-of-car-chassis/>
52. Monocoque chassis, Gmotors, sitert den 01.11.21; <http://www.gmotors.co.uk/news/tag/monocoque-chassis/>
53. Hyundai E-GMP EV platform revealed with up to 310 miles of range, motors1.com, sitert den 01.11.21; <https://uk.motor1.com/news/457877/2022-hyundai-egmp-modular-ev-platform/>
54. Onuk Sazan Race Car Chassis, roll center, sitert den 01.11.21; <https://www.rollcentre.com/>
55. Pop.Up Next 2018, Bildeutklipp fra video, tid 1:50, sitert 01.11.21; Pop.Up Next 2018 - YouTube
56. Locking Mechanism, Bildeutklipp fra video, tid 0:00 og 0:05, sitert 14.11.21; Locking Mechanism.avi - YouTube
57. Release Lock Mechanism for BMW, banggood, sitert den 14.11.21; Lås på panseret Mekanisme For BMW 1 3 5 Series E60 E61 E81 E87 Salg - Banggood Norge
58. How the steering system works Rack and Pinion, Bildeutklipp fra video, tid 2:34, 2:46 og 2:50; <https://www.youtube.com/watch?v=Iw1duKjGcto&t=152s>
59. Pirelli Angel City, XLmoto, sitert den 14.11.21; https://www.xlmoto.no/mc-deler/mc-dekk_c52/mc-dekk-sport
60. Rococo armrest chair, The Royal Palace, sitert den 06.11.21; <https://www.kunligaslotten.se/english/archives/palace-chairs/2018-06-01-rococo-armrest-chair>
61. Midtstykke og skjenk, catawiki, sitert den 06.11.21; <https://www.catawiki.com/no/1/35803273-midtstykke-og-skjenk-barokk-stil>
62. Peel, Møbelgalleriet, sitert den 06.11.21; <https://mobelgalleriet.no/produkter/stol/peel>

63. Cubist Console Table, Chaddock, sitert den 06.11.21;
<https://chaddockhome.com/styles/sku/MM1965-44>
64. Nytt hus, Byggebolig.no, sitert den 06.11.21;
<https://byggebolig.no/byggeperioden-for-under-etter-overtagelse/funkis-hus/>
65. Fibonacci number, Wikipedia, sitert den 06.11.21;
https://simple.wikipedia.org/wiki/Fibonacci_number
66. Volkswagen e-golf, VG, sitert den 08.11.21; <https://www.vg.no/bil/volkswagen/e-golf>
67. Eight facts you need to know about the Ford Mustang Mach-E electric SUV, electric hunter, sitert den 08.11.21; <https://www.electrichunter.com/electric-cars/eight-facts-you-need-know-about-ford-mustang-mach-e-electric-suv>
68. Vet du hvilke lys bilen din har?, NAF, sitert den 22.10.21;
<https://nye.naf.no/bilhold/teknisk/bilens-lys>
69. Fargesymbolikk, Nasjonal digital læringsarena, sitert den 22.10.21;
<https://ndla.no/subject>
70. Detaljutforming av rundkjøringer, Statens Vegvesen, sitert den 12.11.2021;
Detaljutforming av rundkjøringer (vegvesen.no)
71. Forskjellen på 304, 304L, 316, 316L, Nordic Steel, sitert den 08.11.21;
Forskjellen på 304, 304L, 316 og 316L - Nordic Steel Group
72. 5083 Aluminium Alloy, Smiths, sitert den 08.11.21;
Aluminium 5083 | Aluminium 5083 Properties (smithmetal.com)
73. 7000 Series Aluminum, Smith, sitert den 08.11.21;
Aluminium 7000 Series | 7000 Series Aluminium (smithmetal.com)
74. 2099 Aluminium Lithium Alloy, Smiths, sitert den 08.11.21;
Aluminium 2099 | 2099 Aluminium Lithium Alloy | 2099 T83 (smithmetal.com)
78. Aluminium rør runde, Tibnor, sitert den 16.11.21;
https://www.tibnor.no/nb_NO/Aluminium/
79. SKF Ball bearing, RS, sitert den 05.12.21;
<https://no.rs-online.com/web/p/ball-bearings/1440840/>
80. Pirelli Angel City, XLMOTO, sitert 05.12.21;
<https://www.xlmoto.no/mc-deler/mc-dekk>
81. Koet Suspension Spring, amazon.co.uk, sitert den 07.12.21;
<https://www.amazon.co.uk/KOET-Mountain-Suspension-Accessories-Shock-absorbing/>
82. M4 hex socket buttom machine screw, amazon, sitert 05.12.21;
<https://www.amazon.co.uk/Socket-Button-Machine-Screw-Bolt/dp/>
83. M16 Hex Head Bolt, highland fasteners, sitert 05.12.21;
<https://highlandfasteners.com/product/m16-x-150-hex-head-bolt-a4-marine-grade>
84. Hex Bolt M10, RS, sitert 05.12.21; <https://uk.rs-online.com/web/p/hex-bolts/>

85. Hex Bolt M8, RS, sitert 05.12.21;
<https://www.amazon.co.uk/M8-8mm-Hex-Nuts-Steel/dp/>
86. M16 hex nut, amazon, sitert 05.12.21;
<https://www.amazon.co.uk/M16-16mm-Hex-Nuts-Steel/dp/>
87. M10 hex nut, amazon, sitert 05.12.21;
<https://www.amazon.co.uk/M10-10mm-Hex-Nuts-Steel/dp/>
88. M8 Hex full nut, amazon, sitert 05.12.21;
<https://www.amazon.co.uk/M8-Hex-Full-Nut-Grade/dp/>
89. Viftereim, bildeler.no, sitert 05.12.21; <https://www.bildeler.no/viftereim/>
90. Aluminium rør firkant, Tibnor, sitert den 16.11.21; <https://www.tibnor.no/nb>
93. Eloksering, Eloksial, sitert den 03.12.21; Eloksering – Eloksal AS
94. Prisliste, Stena Stål, sitert den 07.12.21; <https://www.stenastal.se/prislistor/>

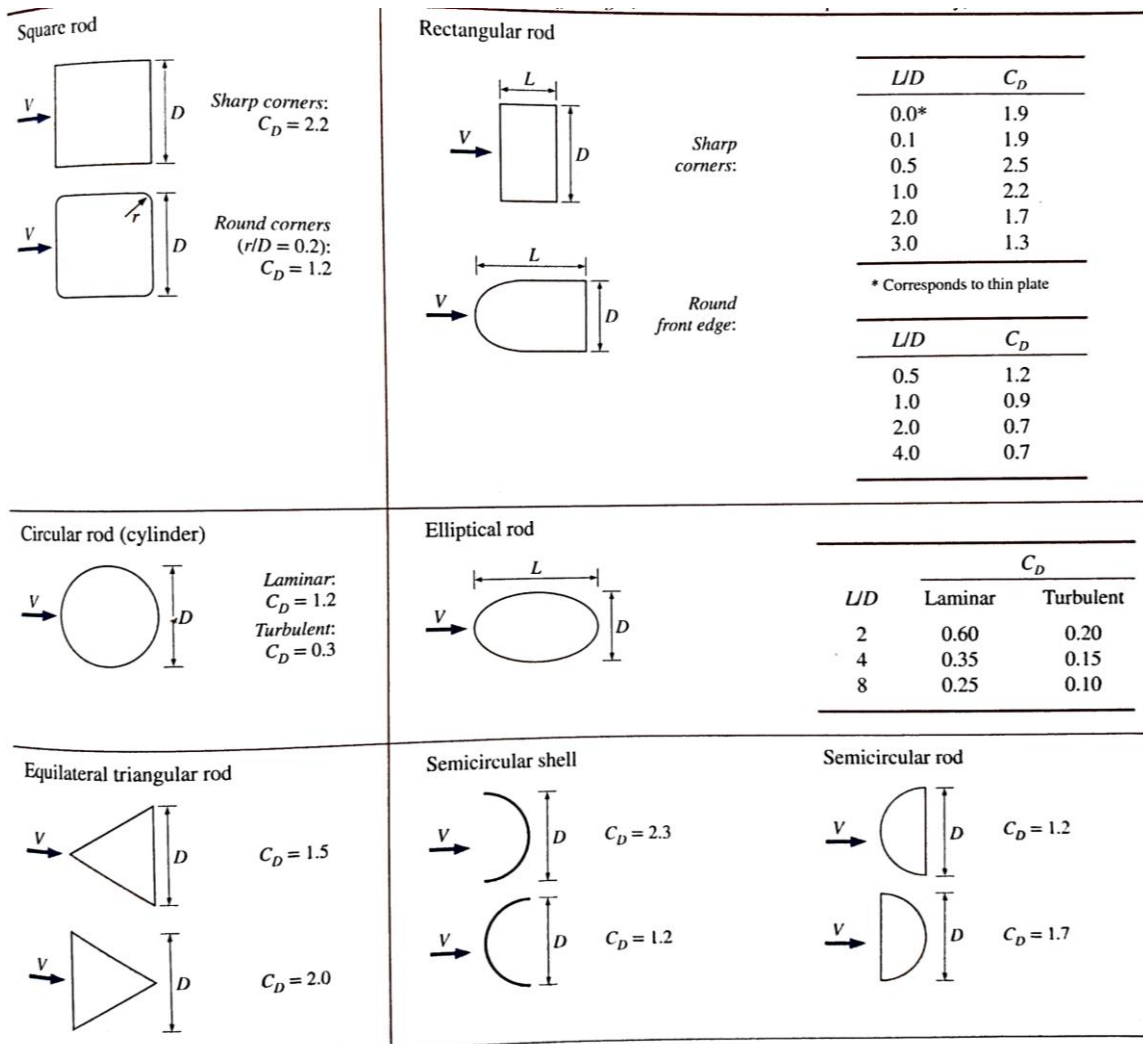
17 VEDLEGG

Tabell 17.1: Vedleggsliste.

Tegning nr.:	Beskrivelse:	Side:
1.	Drag koeffisienten til ulike former	A
2.	Minste mål for én passasjer i en kupé	B
3.	Tillatte belastninger for stålkonstruksjoner	C
4.	Materialeegenskaper til lettvektsmetaller	D
5.	Ytre mål - Sammenstilling	E
6.	Ytre mål – Understellmodul	F
7.	Ytre mål - Kupémodul	G
8.	Eksplodert tegning	H

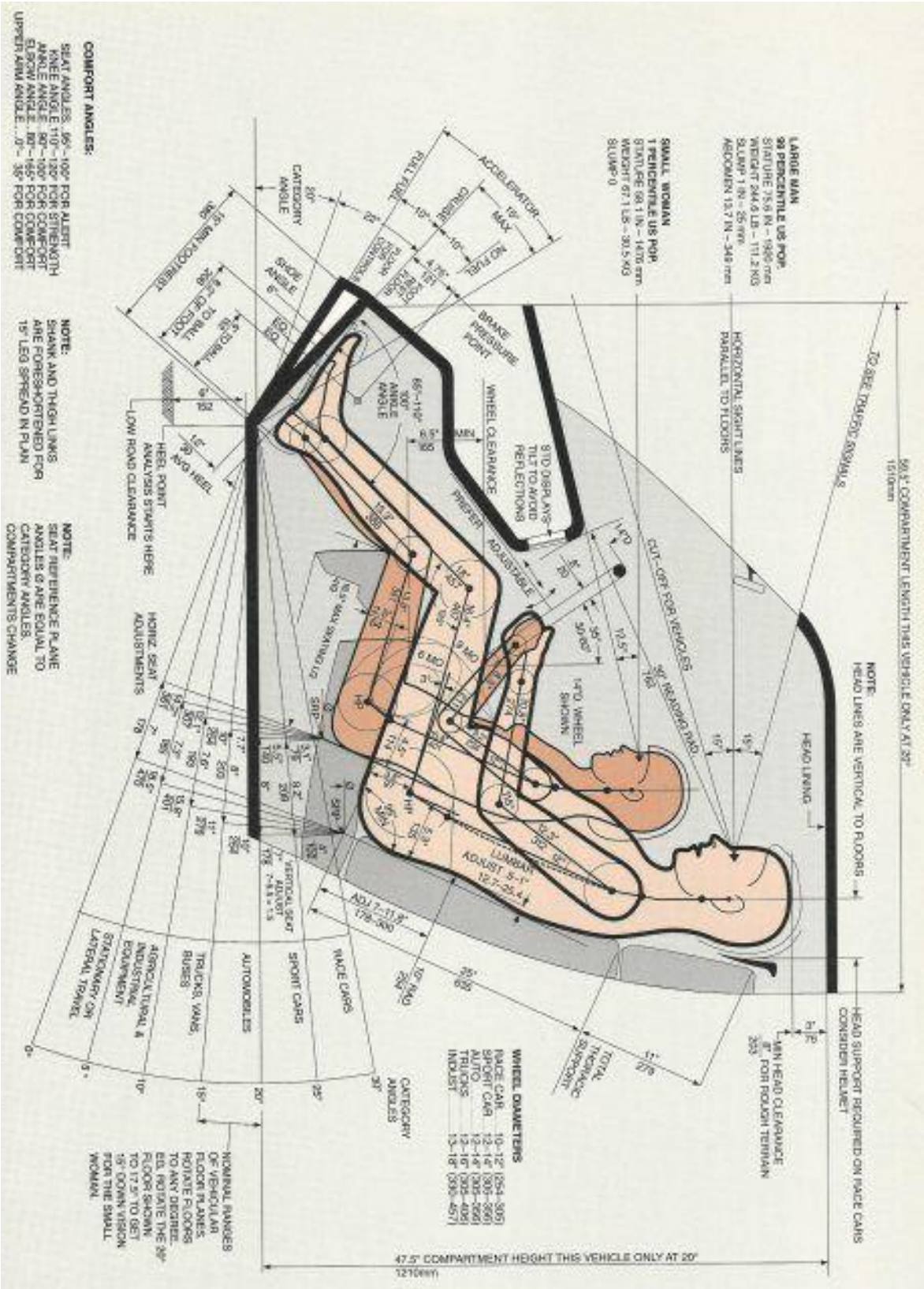
Vedlegg 1

Drag for ulike geometriske former, hentet fra «*Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*» [43].



Vedlegg 2

Measures of man and woman [46].



Vedlegg 3

Tillatte belastninger for stålkonstruksjoner [91]

Tillatte belastninger

Tillatte belastninger for stålkonstruksjoner i N/mm²

Materiale	Belastningstype	Strekk σ_s	Trykk σ_t	Bøying σ_b	Vridning/ skjæring τ
NS-EN10025 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 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 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 Seigherdingsstål 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 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 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* 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 4

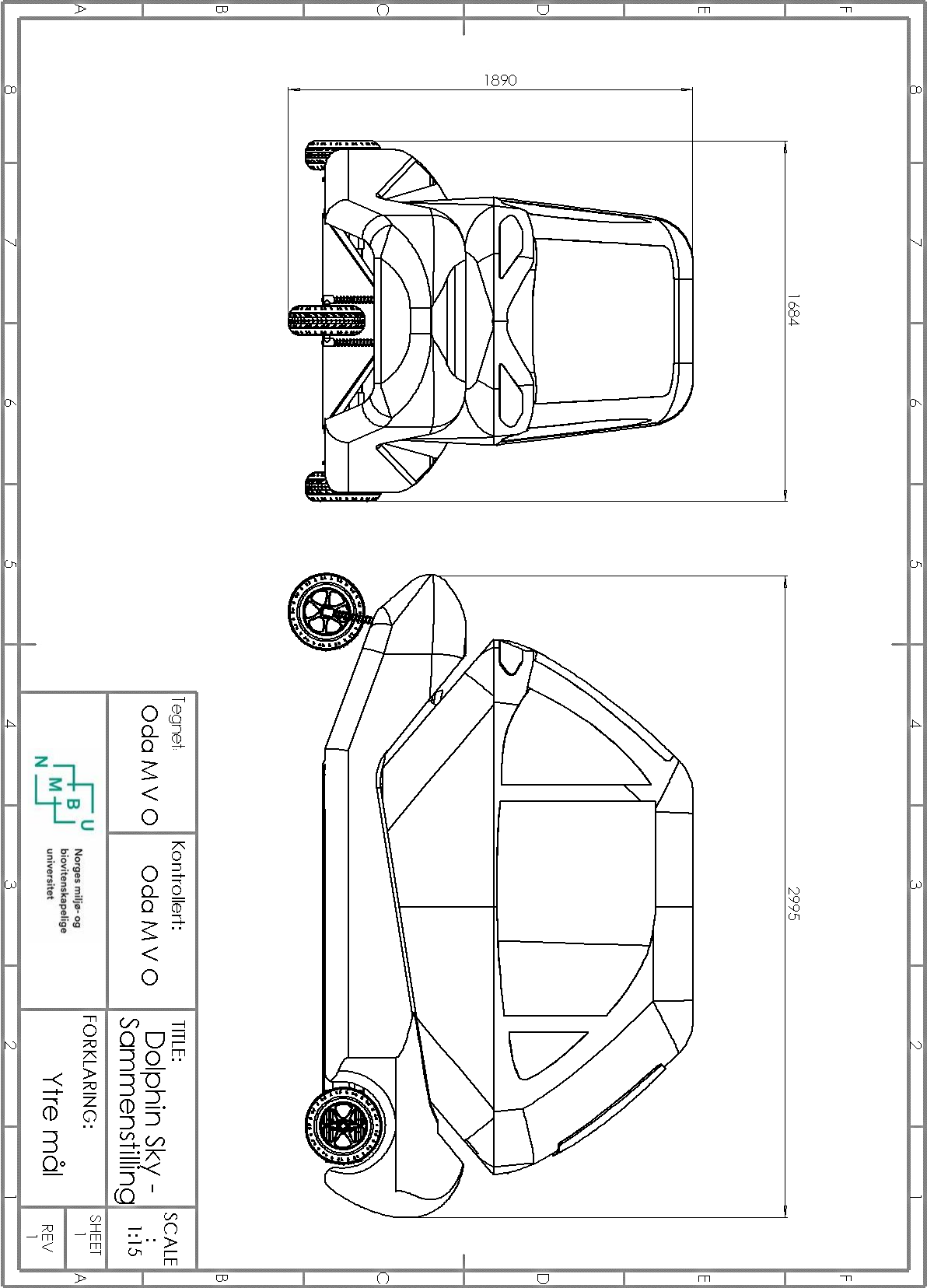
Materialegenskaper til lettvktsmetaller [95]

Light metals

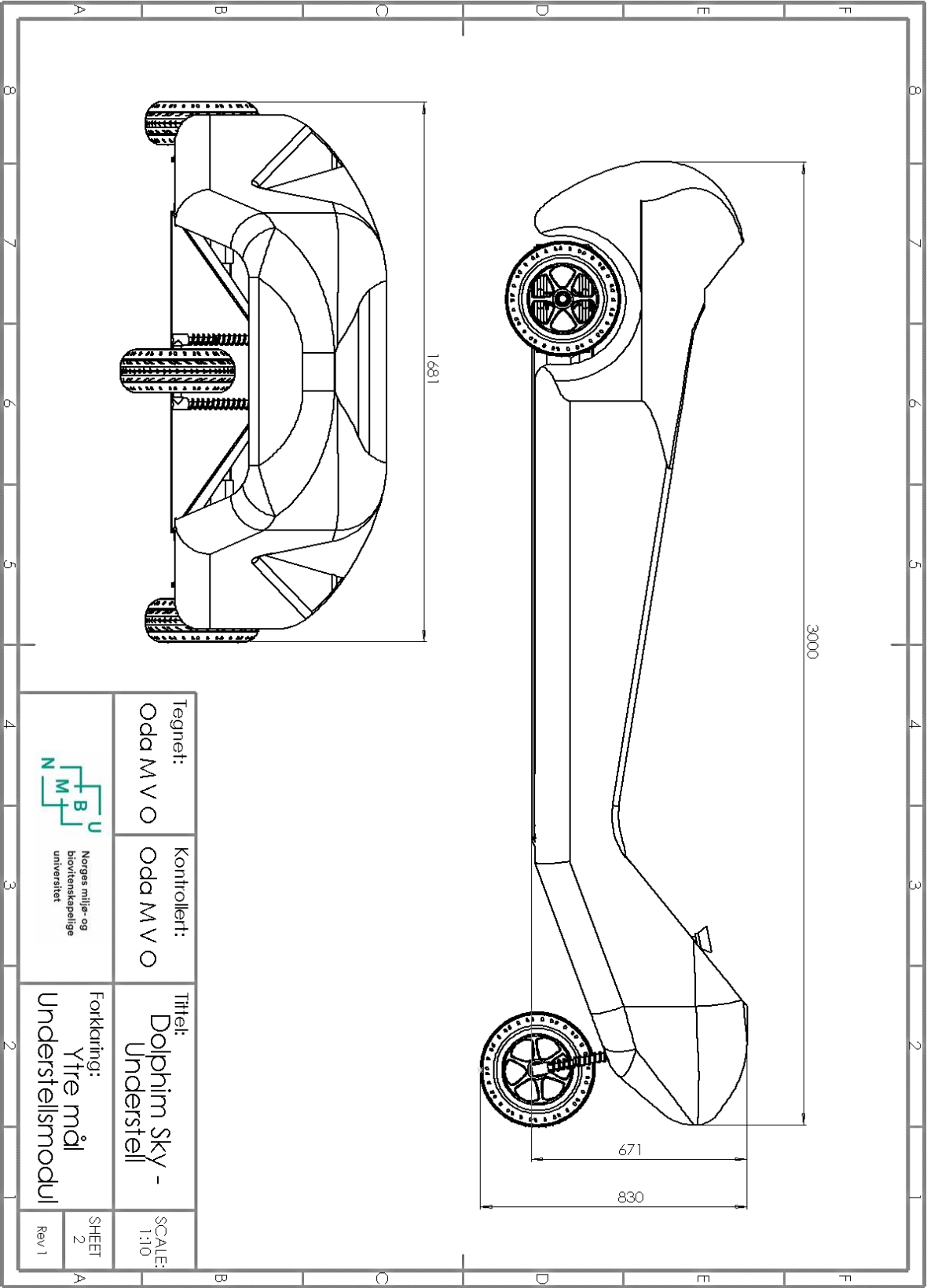
Material	Nominal composition, mean values %/ by wt.	R_m ¹⁾ min. N/mm ²	$R_{p0.2}$ ²⁾ min. N/mm ²	σ_{TW} ³⁾ min. N/mm ²	Properties, typical applications
Wrought Aluminum Alloys (DIN 1712, 1725, 1745 ... 1749, 40501), modulus of elasticity $E \approx 70,000$ N/mm ²					
Al99.5W7	99.5 Al	65	55 ⁴⁾	40	Soft, good conductor, can be anodized/polished;
AlMg2Mn0.8W19	97 Al; 2 Mg; 0.8 Mn	190	80	90	Resistant to sea water, can be anodized
AlMgSi1F28	97 Al; 0.9 Mg; 1 Si; 0.7 Mn	275	200	90	Precipitation hardened, resistant to sea water
AlCuMg1F40	94 Al; 4 Cu; 0.7 Mg; 0.7 Mn; 0.5 Si	395	265	120	Precipitation hardened, good creep properties
AlZnMgCu1.5F53	90 Al; 6 Zn; 2 Mg; 2 Cu; 0.2 Cr	530	450	140	Maximum strength
Cast-Aluminum Alloy⁵⁾ (DIN 1725, Part 2), modulus of elasticity $E \approx 70,000$ N/mm ²					
GK-AlSi12	88 Al; 12 Si; 0.2 Mn	180	80	70	Thin-walled parts with good fatigue strength
GK-AlMg5Si	94 Al; 5 Mg; 1 Si; 0.2 Mn; 0.1 Ti	180	110	70	Sea-water resistant; can be anodized/polished
GK-AlSi10Mgwa	89 Al; 10 Si; 0.4 Mg; 0.2 Mn	240	210	100	Precipitation hardened; highly-stressed parts with good fatigue strength
GK-AlSi5Mgwa	94 Al; 5 Si; 0.6 Mg; 0.2 Mn; 0.1 Ti	260	240	80	Precipitation hardened; highly-stressed parts
GK-AlCu4Tiwa	95 Al; 5 Cu; 0.2 Ti	330	220	90	Precipitation hardened; simple parts to meet maximum strength and toughness requirements
GD-AlSi8Cu3	88 Al; 8 Si; 3 Cu; 0.4 Mn; 0.2 Mg	240	160	70 ⁶⁾	Good thermal strength; complex diecastings
GD-AlMg9	90 Al; 9 Mg; 1 Si; 0.4 Mn	200	140	55 ⁶⁾	Sea-water resistant; medium-stressed parts.
Magnesium Alloy (DIN 1729, 9715), modulus of elasticity $E \approx 45,000$ N/mm ²					
MgAl6ZnF27	93 Mg; 6 Al; 1 Zn; 0.3 Mn	270	195	—	Parts subject to medium to high stress
GK-MgAl9Zn1wa	90 Mg; 9 Al; 0.6 Zn; 0.2 Mn	240	150	80	Precipitation hardened
GD-MgAl9Zn1	90 Mg; 9 Al; 0.6 Zn; 0.2 Mn	200	150	50	Complex diecastings
Titanium Alloy (DIN 17850, 17851, 17860 ... 17864), modulus of elasticity $E \approx 110,000$ N/mm ²					
Annealed titanium	99.7 Ti	290	180	—	Corrosion-resistant
TiAl6V4F89	90 Ti; 6 Al; 4 V	890	820	—	Corrosion-resistant, maximum strength

¹⁾ Tensile strength. ²⁾ Yield strength (0.2% offset). ³⁾ Rotating bending fatigue limit. ⁴⁾ Maximum. ⁵⁾ Strength values apply to permanent mold castings and die-castings for separately cast test specimens. Sand castings have slightly lower values than permanent mold castings. ⁶⁾ Bending fatigue limit reversed bending stress.

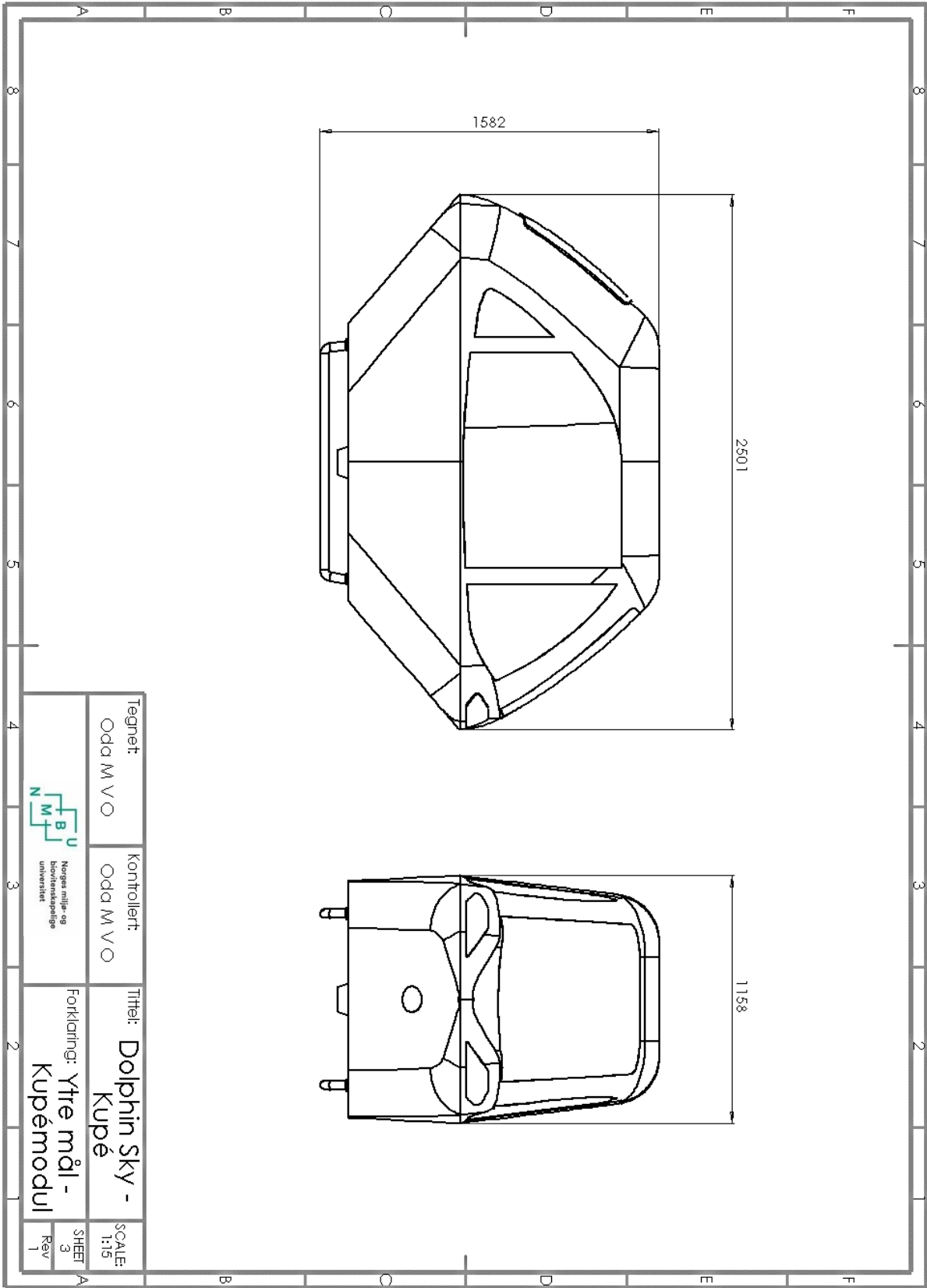
Vedlegg 5



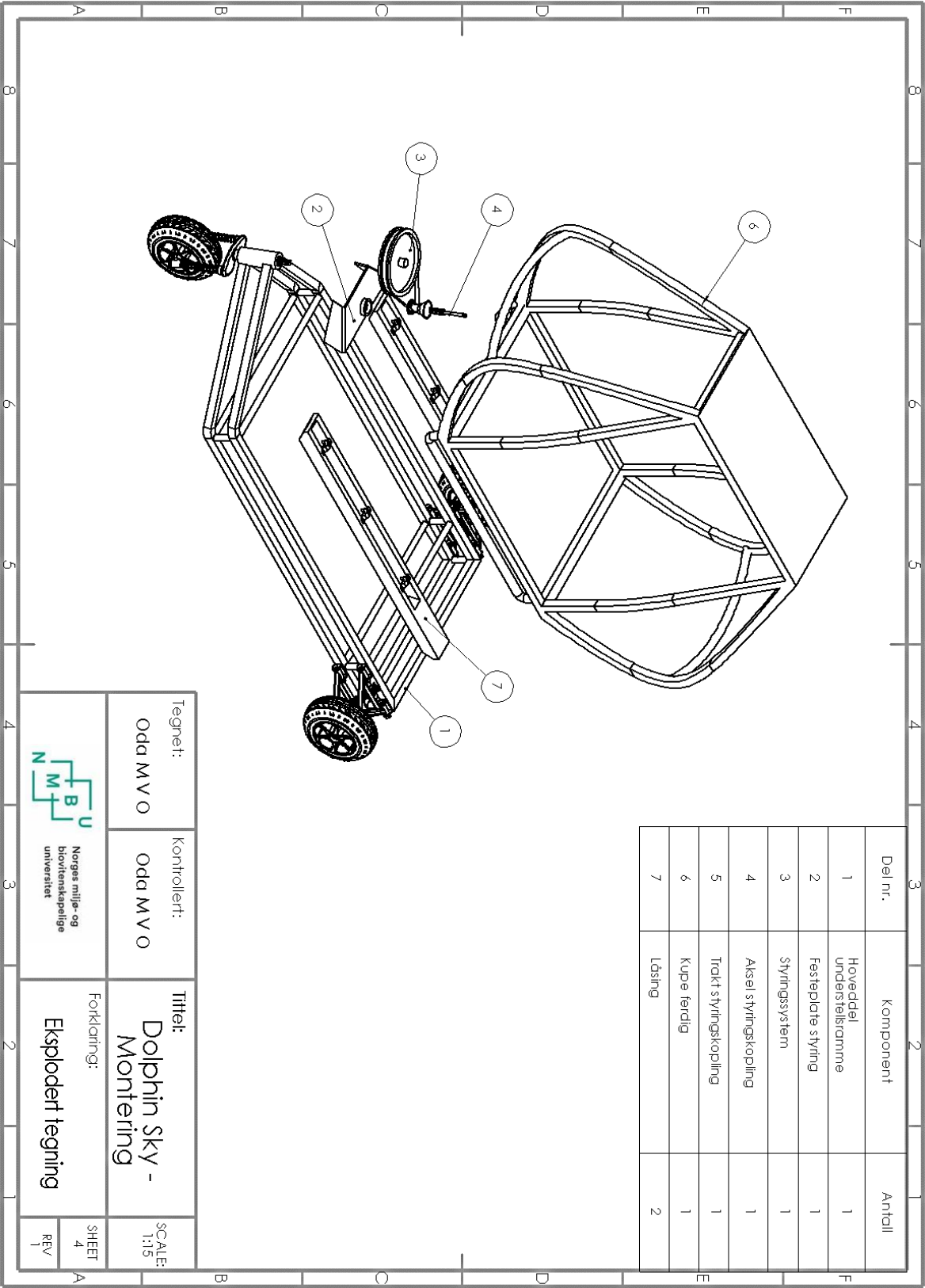
Vedlegg 6



Vedlegg 7



Vedlegg 8





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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway