



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2018 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

# **Dolphin Sky: Chassisløsning for person- og varetransport-drone**

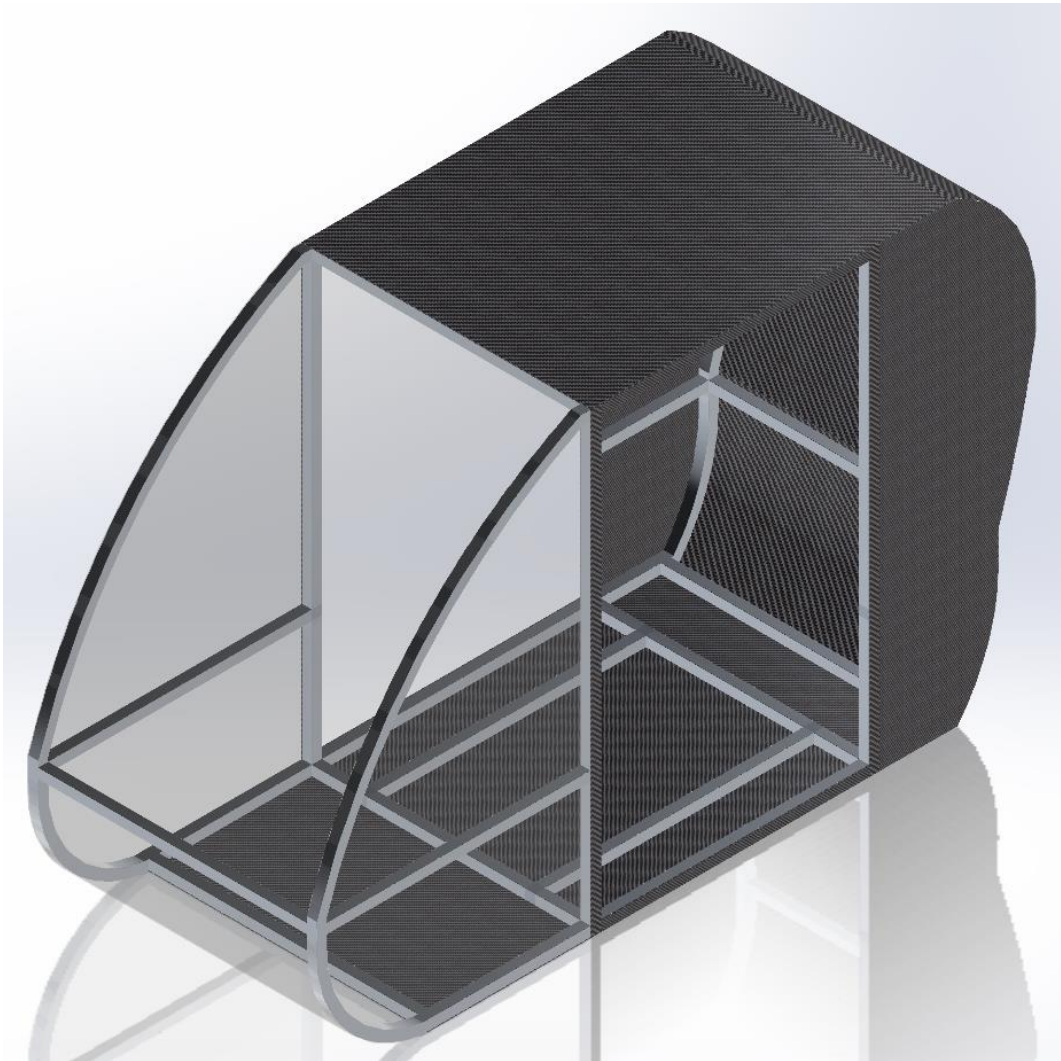
**Thomas Andre Møller Magnussen**  
Maskin, prosess- og produktutvikling

---

# DOLPHIN SKY:

## Chassisløsning for person- og varetransport-drone

---



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

## FORORD

Denne mastergradsoppgaven er skrevet for fakultetet for realfag og teknologi ved Norges miljø-og biovitenskapelige universitet, og er den avsluttende delen av masterprogrammet i maskin og produktutvikling. Gradsoppgaven ble planlagt og er blitt gjennomført i vårsemesteret 2018, og har et omfang på 30 studiepoeng.

Oppgavepremisset for mastergradsoppgaven er framlagt av hovedveileder; førsteamanuensis Jan Kåre Bøe, og omhandler utvikling av en lettvekts chassisløsning til person og varetransportdronekonseptet Dolphin Sky. Med undertegnedes bakgrunn fra flyteknisk utdanning, samt en fasinasjon for flyveanordninger framstod dette oppgavepremisset som svært tiltalende. En vesentlig del av oppgaven ville omhandle aspekter som; modellering, materialteknologi og beregninger og analyse, hvorav undertegnede finner samtlige av områdene interessante.

Gjennomføringen av mastergradsarbeidet har vært meget interessant og lærerik, men også til tider utfordrende, da spesielt med tanke på å utarbeide utviklingsrammene for løsningen innledningsvis i prosjektet, samt å sette begrensinger for oppgavens omfang og berøringsområder. Selv føler undertegnede at han har hatt et betydelig læringsutbytte av prosjektet, og føler han har forbedret sine ferdigheter innenfor blant annet tredimensjonal modellering og elementmetodeberging på data, som var personlige målsettinger for prosjektet.

Undertegnede ønsker å rette en stor takk til hovedveileder, førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for utmerket veiledning og oppfølging gjennom hele mastergradsarbeidet. Videre ønsker undertegnede også å takke konsulent Anders Christian Thømt for veiledning i prosjektet. Det rettes også en takk til overingeniør Henrik Folke Holmberg for hjelp med å forenkle beregningsmodellen i ANSYS Workbench, slik at denne kunne verifiseres med en håndberegning. Avslutningsvis vil undertegnede takke medstudent Tarek El-Gewely for god kommunikasjon og for et godt samarbeid i koordinering av festepunktplasseringen for løftemodulen.

Ås,

15.05.2018

---

Thomas André Møller Magnussen

## SAMMENDRAG

Det eksisterer vesentlige framkommelighets og slitasje problemer på dagens veier grunnet stor trafikk tetthet, spesielt i og rundt store byer og på hovedveier, og det er antatt at disse problemene vil øke i fremtiden. Det vil derfor være gunstig å utforske mulighetene for å kunne utvide bevegelsesrommet for personlig, person og varetransport til å også omfatte rommet oppover i luften. Konseptet Dolphin har siden 2007 vært under utvikling ved REALTEK, med målsettingen å utvikle små, lette, kompakte og miljøvennlige kjøretøyskonsepter. Konseptet omfatter flere kjøretøysvarianter med ulike bruksområder og størrelser, der en av variantene er et person og varetransport dronekonsept med tiltenkt kapasitet for en person. Dronekonseptet heter Dolphin Sky og har vært utgangspunktet for denne gradsoppgaven.

Denne masteroppgaven har hatt som målsetting å utrede, utvikle og designe en lettvekts chassisløsning for person og varetransportdronekonseptet Dolphin Sky. Videre skulle det utarbeides en masterrapport som redegjør for alle trinn i utviklingsprosessen, herunder; beregninger, tekniske tegninger og anvisninger. Gradsoppgaven skulle også danne grunnlaget for det videre arbeid med konseptet.

Det er gjennomgående i mastergradsoppgaven benyttet forskjellige produktutviklingsmetodikker og verktøy, deriblant; IPD, Pughs og Ashbys-seleksjonsmetodikk og SCAMPER. Standard beregningsprosedyrer er også fulgt. Metodikkene ble benyttet for å sikre at prosjektet ble gjennomført på en strukturert og effektiv måte, for å minimere feil, samt for å fatte gunstige løsningsvalg.

Mastegradsarbeidet ble påbegynt med en utredningsprosess der tidligere arbeid utført på Dolphin konseptet, samt konkurrerende løsninger ble utredet. Hensikten med dette var å oppnå en forståelse av Dolphin prosjektets nåværende utviklingsstatus, og for å innhente spesifikasjoner som kunne være med på å danne grunnlaget for kravspesifikasjonen. Deretter ble det teoretiske og teknologiske grunnlaget for oppgaven utredet og redegjort for i rapporten. Dette omfattet temaene aerodynamikk, konstruksjonsteknologi og antropometri, som alle ville spille en viktig rolle i utarbeidingen av løsningsens kravspesifikasjon, samt danne grunnlaget for å kunne utarbeide gode kriterier og løsningsalternativer i seleksjonsprosessen.

Etter at utredningsprosessene var unnagjort, begynte arbeidet med å utarbeide en kravspesifikasjon til løsningen. Det ble besluttet at løsningen skulle designes for å tilfredsstille målene til personer innenfor 1 og 99 prosentilene. Ut ifra dette ble det fastsatt krav om vekt og plasskapasitet, inn og utgangsmuligheter og utsiktsforhold. Med fastsatt maksimal tilgjengelig løftekraft gitt i en tidligere utført gradsoppgave, ble det utarbeidet krav til hva løsningen maksimalt kunne veie. Maksimalvekten ble fastsatt til 100 kg. Det ble også satt krav om at løsningen minst skulle inneha en sikkerhet på 2,0 mot materialflyt og 2,6 mot materialbrudd.

Neste steg i prosessen var å utarbeide løsningsalternativer for utforming, konstruksjonsmetode og konstruksjonsmateriale. Løsningsalternativene omvendt usymmetrisk dråpeform, forsterket skall konstruksjon og aluminiumslegeringen AA-7150-T6151 ble valgt som henholdsvis utformingsprinsipp, konstruksjonsprinsipp og konstruksjonsmateriale. Det ble besluttet at det videre i prosjektet kun skulle fokuseres på utviklingen av den interne rammestrukturen i det valgte konstruksjonsprinsippet, ettersom det ikke ville være mulige å utvikle en forsterket skallkonstruksjon med de tilgjengelige ressursene.

Det ble deretter utført grunnlagsberegninger for å bestemme nødvendig tverrsnittdimensjon for rammens elementer. Først ble det utført en kartlegging av belastningene som virker på konstruksjonen, og utarbeidet to belastningstilfeller som løsningen skulle dimensjoneres mot. Det ble så utarbeidet et løsningsforslag for plasseringen av elementer i den høyest belastede delen av rammekonstruksjonen (sikkerhetsstrukturen). Beregningsmodellen ble dimensjonert i ANSYS Workbench slik at den tilfredsstiller kravene til sikkerhet fra kravspesifikasjonen, samt innehar en sikkerhetsfaktor på minst 3 mot knekking (ANSYS og metode 1). Den



anvendte beregningsmodellen ble verifisert med håndberegninger for å sikre at de innhentede resultatene var pålitelige. Det ble besluttet at det skulle benyttes ekstruderte profiler med hult kvadratisk tverrsnitt, da dette ville medføre vektbesparelser ovenfor solide tverrsnitt. Videre ble det besluttet at profilene skulle sammenføres med limfobindelser i knutepunktene. Grunnet utilstrekkelig limareal på profilenes overflate, ble det utformet knutepunktoverganger som øker limearealet i forbindelsene.

Neste steg i prosessen var å utarbeide en 3 dimensjonal modell av sikkerhetsstrukturen i SolidWorks med alle løsningsvalgene implementert. Modellen ble importert til ANSYS Workbench og det ble verifisert at den tilfredstilte kravspesifikasjonen. Det ble også utarbeidet et løsningsforslag for en komplett ramme som inkluderer en fremre og bakre del. Merk at det for disse ikke er benyttet det angitte sammenføyningsprinsippet, og at disse derfor kun benyttes til illustrasjoner og til vektberging. Løsningsforslaget for den komplette rammen er heller ikke analysert i ANSYS. Til slutt ble det utarbeidet anvisninger og estimert kostnader for framstilling av en prototype.

Resultatet av mastergradsarbeidet er at det er blitt utarbeidet et løsningsforslag for sikkerhetsstrukturen til person og varetransportdronekonseptet Dolphin Sky. Løsningsforslaget er utført i aluminiumslegering AA-7150-T6151, og består av totalt 38 sammenlimte deler, derav; 22 stk. ekstruderte profiler med standardisert hult kvadratisk tverrsnitt av ulike lengder og 16 stk. knutepunktoverganger med to ulike overgangsutforminger (8 stk. per utforming). Konstruksjonen tilfredstiller de fastsatte kravene i kravspesifikasjonen, og er laget for å kunne bli benyttet av både en 1 prosentil kvinne og en 99 prosentil mann. Konstruksjonen veier totalt 13,8 kg og er 860 mm lang, 860 mm bred og 1360 mm høy. Sikkerhetsfaktorene i konstruksjonen er 3,9, 3,5, over 3, 33,9 og 8, mot henholdsvis statisk brudd, materialflyt, knekking (metode 1), knekking (ANSYS) og mot avskjæring i limte forbindelser. Dimensjoneringen er utført med belastningstilfeller som er ekvivalente med en lastfaktor på henholdsvis +2,26 og -0,69 med en 99 prosentil mann og et fører sete på 50 Kg innsatt i konstruksjonen. Maksimal deformasjon i konstruksjonen er 29,4 mm ved maksimal belastning. Den totale kostnaden for framstilling av en prototype er blitt estimert til 675640 NOK. Videre er innfestingspunkter for integrasjon med løftemodulen ikke utarbeidet, men plasseringen til disse er blitt koordinert med Tarek El-Gewely, det er også lagt inn bjelker i gulvet til innfesting av fører sete og øvrig interiør. Det komplette løsningsforslaget for rammen er 2140 mm langt, 860 mm bredt og 1360 mm høyt, og har en totalvekt på 25,8 Kg.

Undertegnede vurdering er at både oppgavens hovedmål og delmål er nådd. Oppgaveomfanget ble dog noe underestimert, og det medførte at oppgaven måtte innskrenkes til å omhandle utvikling av sikkerhetsstrukturen i chassiset, samt at det er måttet blitt gjort en del antakelser og forenklinger underveis.

Videre arbeid ble delt inn i forbedringer av utviklet løsning og videreutvikling av konseptet. De viktigste momentene fra første punkt er at forenklinger og antakelser gjort i oppgaven bør etteres av eksperter (karlegging av krefter, belastningstilfeller, framstilling og kostnadsestimat og limforbindelser) av sikkerhetsmessige årsaker, da dette ikke er gjort underveis. Videre bør det lages en modell av limforbindelsen som testes for aktuelle statiske og dynamiske laster. Det må også etableres om det er mulig å framskaffe de aktuelle profilene i den valgte legeringen. Dersom dette ikke er tilfellet må legeringsvalget forandres, legeringene 7075-T6 og 2024-T8 er mulige alternativer. Videre anbefales det at løsningsforslagene for fremre og bakre chassis ferdigstilles slik at den komplette rammen kan ferdigstilles. Det burde også utvikles innfestingspunkter til løftemodulen og interiørløsningen. For videre utvikling av konseptet er det anbefalt å utvikle en forsterket skallkonstruksjon, fortrinnsvis med utgangspunkt i den utviklede løsningen, grunnet konstruksjonsprinsippets mange fordeler. Det burde vurderes muligheten for å designe løsningen etter standarder slik at den kan sertifiseres som trehjuls kjøretøy og som normal kategori rotorluftfartøy.

## ABSTRACT

There are significant congestion and wear problems on today's roads due to high traffic density, especially in and around major cities and on main roads, and it is likely that these problems will increase in the future. It would therefore be beneficial to explore the possibilities of expanding the usable space for personal, transportation of people and goods to also include the space upwards in the air. The Dolphin concept has since 2007 been under development at REALTEK, with the aim of developing small, lightweight, compact and environmentally friendly vehicles. The concept consists of several different vehicle variants with different intended uses and sizes, with one of variants being a person and freight drone concept with the intended load capacity for one person. The drone concept is called Dolphin Sky and has been the basis for this master thesis.

This aim of this master thesis has been to investigate, develop and design a lightweight chassis for the person and freight transport drone concept Dolphin Sky. Furthermore, to produce a thesis report that describes and documents all stages of the development process, including; calculations, technical drawings and instructions. The thesis also aims to form the basis for further development of the concept. Throughout this project, various product development methods have been used, including; IPD, Pughs and Ashby's selection methodology and SCAMPER. Standard procedures for calculations have also been followed. The methods were used to ensure that the project was implemented in a structured and efficient manner, to minimize errors, as well as to ensure that favorable solution choices were selected in the selection processes.

The project started with an investigation process where previous work on the Dolphin concept, and similar competing drone solutions were investigated. The purpose of the investigation was to gain an understanding of the current development status of the Dolphin project, and to obtain specifications that might help form the basis for the requirement specification. Then the theoretical and technological basis for the thesis were investigated and explained in the report. This included topics such as aerodynamics, construction technology and anthropometry, all of which would play an important role in the development of the solution's requirements specification and provide the basis for developing alternatives for the selection process.

After the investigation process was completed, the work of developing the requirement specification for the solution began. It was decided that the solution should be designed such that it could accommodate both 1 and 99 percentile persons. From this, requirements for weight and space capacity, door dimensions and viewing conditions were derived. With the specification for maximum lifting force established in a previously completed thesis, requirements for the chassis maximum allowable weight was set to 100 kg. It was also decided that the safety factors in the solution should be equal or higher than 2,0 against the construction material's yield limit and 2,6 against the construction material's ultimate failure limit. The next step in the process was to develop different solution options for the selection process. Options for design, construction and material were derived. The solution options; reversed unsymmetrical drop shape, reinforced shell construction and aluminum alloy AA-7150-T6151 were chosen as design principle, construction principle and construction material respectively. It was then decided that the further development of the project would be limited to developing the internal framework of the chosen construction principle, due to limited resources.

Baseline calculations were then conducted to ascertain the required cross-sectional specifications for the frame elements. First, a survey of the loads that affect the construction was conducted and from this two load cases for which the solution was to be designed after were derived. A proposed solution for the placement of construction elements in the highest loaded part of the frame structure (safety structure) was made. The proposed safety structure was then dimensioned in ANSYS Workbench to meet the requirements of safety from the requirement specification, and a safety factor of at least 3 against buckling (ANSYS and Method 1). The calculation model used in ANSYS was then verified by hand calculations to ensure that the obtained

results were reliable. It was then decided that extruded profiles with hollow square cross section were to be used in the chassis, as this would result in weight savings compared to profiles with solid cross sections. Furthermore, it was decided that the profiles should be joined by adhesive bonds at the junctions. Due to insufficient adhesion area on the surface of the profiles, node junctions were designed. The next step in the process was to develop a 3-dimensional model of the security structure in SolidWorks with all the selected solutions implemented. The model was then imported to ANSYS Workbench and it was verified that it satisfied the specified requirements. A complete framework was also developed that includes solution suggestions for the front and rear part of the chassis. Note that for these, the designed node junction has not been implemented in the junctions, and that these therefore only are used for illustrations and weight calculations. The complete frame has also not been analyzed in ANSYS. The development process was concluded with cost estimations and development of production instructions for the solution prototype.

The result of the master thesis is that a solution proposal for the safety structure for Dolphin Sky has been derived. The proposed solution is made of aluminum alloy AA-7150-T6151 and consists of a total of 38 parts assembled by adhesive bonds, using two component epoxy; 22 pcs. extruded profiles with standardized hollow square cross section of different lengths and 16 pcs. node junctions with two different junction designs (8 pcs. per design). The construction meets the requirements of the requirement specification and is designed to accommodate both a 1 percent woman and a 99 percent male. The construction weighs a total of 13.8 kg and is 860 mm long, 860 mm wide and 1360 mm high. The safety factors in the construction are 3.9, 3.5, above 3, 33.9 and 8, respectively, against static fracture, material yield, buckling (method 1), buckling (ANSYS) and failure due to shear in the adhesive connections. The dimensioning was performed with load cases equivalent to a load factor of +2,26 and -0,69 with the weight of a 99-percentile man and 50 Kg of interior inserted in the construction. Maximum deformation in the construction is 29.4 mm at maximum load. The total cost of producing a prototype has been estimated at 675640 NOK. Furthermore, attachment points for integration with the lifting module have not been designed, but the location of these has been coordinated with Tarek El-Gewely, and there are also beams placed in the floor for the mounting of the driver's seat and other interior elements. The complete solution for the frame is 2140 mm long, 860 mm wide and 1360 mm high, with a total weight of 25.8 Kg.

The author's assessment is that both the main and intermittent objectives for the thesis have been reached. However, the scope of the assignment was somewhat underestimated, which meant that the project had to be limited to addressing the development of the safety structure in the chassis, and that some assumptions and simplifications had to be made along the way.

Recommendations for further work was divided into improvements of the developed solution and further development of the Dolphin Sky concept. The main points from the first of these; are that the simplifications and assumptions should be verified by experts (estimation of forces, load cases, production and cost estimates and adhesive joints) for safety reasons, as this has not been done along the way. Furthermore, a model of the adhesive joint should be constructed and tested for relevant static and dynamic loads. It should also be established whether it is possible to obtain extruded profiles of the selected alloy. If this proves not to be the case, the choice of alloy must likely be changed. Alloys 7075-T6 and 2024-T8 are possible alternatives. Furthermore, it is recommended that the front and rear chassis solutions are fully developed so that the internal chassis is completed. It should also be developed attaching points for the lifting module and interior. For further development of the concept, it is recommended that a reinforced shell structure with basis in the developed solution is developed, due to the favorable characteristics of the construction principle. It should also be considered to fully implement the requirements from standards for certification of three-wheel vehicles and normal category of rotor aircrafts, so that the solution can be certified as such.

## Innholdsfortegnelse

1	INNLEDNING .....	1
1.1	Bakgrunn.....	1
1.2	Oppdragsbeskrivelse .....	1
1.3	Forkortelser .....	2
1.4	Dolphin Konseptet.....	2
1.4.1	Dolphin: formkonsept for trike.....	3
1.4.2	Dolphin Family .....	3
1.4.3	Dolphin Duo 1+1 .....	5
1.4.4	Dolphin Expression 2.0 .....	5
1.4.5	Dolphin Sky .....	6
1.4.6	Komponenter og systemer til Dolphin plattformen .....	7
1.5	Liknende løsninger.....	7
1.5.1	Ehang 184 .....	8
1.5.2	Workhorse SureFly .....	9
1.5.3	Airbus Pop.Up.....	10
1.5.4	AeroMobile versjon 4.0 .....	11
1.6	Problemstillinger .....	12
1.7	Teknologiske flaskehalsar.....	12
2	PROSJEKTPLAN .....	14
2.1	Hovedmålsetting .....	14
2.2	Delmålsettinger .....	14
2.3	Arbeidsplan med milepeler .....	15
2.4	Begrensninger.....	16
3	METODEBESKRIVELSE.....	18
3.1	Terminologi, symboler og formler.....	18
3.1.1	Terminologi.....	18
3.1.2	Symboler.....	19
3.1.3	Formler .....	23
3.1.4	Koordinatsystemer og rotasjonsakser.....	26
3.2	Metodebruk.....	27
3.2.1	IPD.....	27
3.2.2	Stuart Pughs seleksjonsmetodikk.....	27
3.2.3	Osbornes SCAMPER.....	27

3.2.4	Ashbys metode for materialeleksjon .....	28
3.3	Løsningsverktøy .....	29
3.4	Kvalitetssikring .....	29
3.4.1	Kildebruk .....	29
3.4.2	Håndbøker og standarder .....	30
3.4.3	Feilretting .....	30
3.5	Prosesstrinn .....	31
4	TEORETISK OG TEKNOLOGISK GRUNNLAG .....	32
4.1	Aerodynamikk .....	32
4.2	Antropometri .....	34
4.3	Konstruksjonsteknologi for aerodyner .....	36
4.3.1	Terminologi for strukturelle elementer .....	36
4.3.2	Fagverkskonstruksjoner .....	37
4.3.3	Skallkonstruksjoner .....	38
4.3.4	Forsterkede skallkonstruksjoner .....	39
4.3.5	Sandwich strukturer .....	40
5	SPESIFISERING AV LØSNINGEN .....	42
5.1	Rangering av egenskaper .....	42
5.2	Kravspesifikasjon .....	42
5.2.1	Antropometriske krav .....	43
5.2.2	Andre absolutte krav .....	44
5.2.3	Øvrige krav og anbefalinger .....	47
5.2.4	Oppsummering av krav .....	47
6	LØSNINGSALTERNATIVER .....	48
6.1	Funksjonsanalyse .....	48
6.2	Alternativer for løsningen .....	48
6.2.1	Utformingsalternativer .....	49
6.2.2	Konstruksjonsprinsippalternativer .....	52
6.2.3	Innledende vurdering av materialer .....	52
6.2.4	Spesifikk vurdering av materialer .....	55
7	LØSNINGSVALG .....	57
7.1	Seleksjonsmatrise .....	57
7.2	Løsningsvalg .....	58
7.2.1	Utformingsalternativer .....	58

7.2.2	Konstruksjonsprinsippalternativer .....	59
7.2.3	Innledende seleksjon av materialer .....	60
7.2.4	Spesifikk seleksjon av materialer.....	63
7.3	Oppsummering av løsningsvalg .....	66
8	GRUNNLAGSBEREGNINGER.....	67
8.1	Tidlig vurdering av brukspåkjenninger .....	67
8.1.1	Tidligvurderinger og forutsetninger, bakkelaster.....	67
8.1.2	Tidligvurdering og forutsetninger, luftlaster .....	68
8.2	Tidligvurdering av plassering av laster og elementer.....	71
8.2.1	Foreslått plassering av elementer .....	71
8.2.2	Beregningsmodell for sikkerhetsstruktur .....	73
8.2.3	Plassering av laster i forenklet beregningsmodell.....	74
8.3	Kartlegging av maksimale laster i sikkerhetsstruktur.....	75
8.3.1	Forutsetninger .....	75
8.3.2	Bakkelaster .....	77
8.3.3	Laster ved plan flyvning.....	78
8.3.4	Laster ved PITCH manøver.....	79
8.3.5	Laster ved ROLL manøver .....	80
8.4	Belastningstilfeller .....	82
8.4.1	Belastningstilfelle nummer 1.....	83
8.4.2	Belastningstilfelle nummer 2.....	84
8.5	Tidlig dimensjonering .....	84
8.5.1	Kort om gjeldene regelverk for sertifisering av rotordrevne luftfartøy .....	85
8.5.2	Forutsetninger og begrensinger for dimensjonering .....	86
8.5.3	Oppsett for ANSYS Workbench beregningsmodeller .....	87
8.5.4	Resultater av analyse og dimensjonering mot statisk brudd .....	90
8.5.5	Dimensjonering mot knekking.....	92
8.5.6	Verifikasjon av ANSYS modeller .....	96
8.6	Tverrsnittutforming .....	101
8.6.1	Belastningsretninger for tverrsnittet.....	101
8.6.2	Videre vurdering av tverrsnittutforming .....	102
8.6.3	Spesifisering av SHS tverrsnittet.....	104
8.7	Elementsammenføyning.....	107
8.7.1	Sveising .....	107





8.7.2	Knutepunktutforming.....	109
8.7.3	Dimensjonering av lim forbindelsen.....	112
9	ARKITEKTUR OG SPESIFIKASJONER.....	114
9.1	Utformingsbeslutninger .....	114
9.1.1	Elementutforming .....	114
9.1.2	Dimensjoner .....	114
9.2	Eksplosjonstegninger.....	115
9.3	Sammenstillingstegninger .....	117
9.4	Overgangsutforming.....	119
9.5	Spesifikasjoner.....	119
10	FEM VERIFISERING AV UTBEIDET LØSNING .....	120
10.1	Oppsett beregningsmodell.....	120
10.2	Mesh.....	121
10.3	Resultater .....	121
10.3.1	Nedbøyning .....	122
10.3.2	Spenning .....	123
10.3.3	Knekking .....	124
11	FRAMSTILLING AV LØSNING.....	128
11.1	Produksjonsmetoder for elementer.....	128
11.1.1	Produksjonsanvisninger for ekstruderte profiler .....	128
11.1.2	Produksjonsanvisninger for knutepunktoverganger .....	129
11.2	Sammenstilling av elementer .....	130
11.2.1	Forberedelser av elementer til liming .....	130
11.2.2	Sammenstilling av elementer .....	130
11.2.3	Overflatebehandling.....	131
11.3	Kostnadsestimat for utvikling og framstilling av prototype .....	132
11.3.1	Konseptutviklingskostnader .....	132
11.3.2	Materialkostnader .....	132
11.3.3	Produksjonskostnader.....	134
11.3.4	Estimerte total kostnader for fremstilling av prototype .....	134
12	PRESENTASJON AV LØSNING.....	135
13	PROSESSEVALUERING.....	137
13.1	Evaluering av arbeidsprosessen .....	137
13.2	Mulige designforbedringer .....	139



14	KONKLUSJON .....	140
14.1	Oppnåelse av målsettinger.....	140
14.2	Resultater og spesifikasjoner .....	140
14.3	Videre arbeid .....	141
14.3.1	Forbedring av utarbeidet løsning .....	141
14.3.2	Videreutvikling av konseptet.....	143
15	Referanser .....	145
15.1	Skiftelige kilder .....	145
15.2	Nettkilder.....	146
16	VEDLEGG.....	148

## 1 INNLEDNING

I dette kapittelet vil bakgrunnen for oppgaven, en oppgavebeskrivelse, samt problemstillinger for oppgaven framlegges. Kapittelet inneholder også en oppsummering av Dolphin og Dolphin Sky prosjektet. Videre vil resultatet av en utredning av et utvalg liknende droneløsninger beregnet for person og varetransport fremlegges.

### 1.1 Bakgrunn

Det har i senere tid blitt et økt fokus på å redusere de negative miljøpåvirkningene av motorisert person og varetransport. Det blir stadig vedtatt strengere utslippskrav for fossile forbrenningsmotorer, samt at det fra politisk hold har blitt vedtatt en målsetting om et forbud av salg av kjøretøy med fossile forbrenningsmotorer innen år 2030. Videre foreligger det også klare insentiver til salg av motoriserte kjøretøy med mer miljøvennlige motor løsninger i form av avgiftsreduksjoner og særfordeler, noe som har medført en økning i salget av disse. Kjøretøysindustrien har på grunn av dette også i større grad begynt å satse på utvikling av miljøvennlige kjøretøy.

Samtidig har økonomisk vekst og styrket kjøpekraft i befolkningen ført til en økning i antallet personbiler på veiene. Sentralisering av arbeidsmarked og diverse tilbud har ført til en stor tilflytting fra land og bygd til byer. Disse forholdene har forårsaket at det særlig i de store byene er framkommelighetsproblemer i trafikken, noe som koster samfunnet store summer. Høy trafikkbelastning medfører også en betydelig slitasje på veiene, noe som utgjør stor samfunnskostnad da vedlikehold av veibaner er meget kostbart, samt problematisk å gjennomføre ettersom den aktuelle veibanen ofte må avstenges under vedlikeholdsarbeidet. Av den grunn vil det å utvide bevegelsesmulighetene til person og varetransport fra å primært foregå på bakkeplan langs en veibane til å også omfatte rommet oppover i luften kanskje være en fremtidig løsning på framkommelighets og slitasje problemene som finnes i dag. Det gjenstår fremdeles mye før dette kan bli en realitet, både når det kommer til nødvendige endringer i regelverk, samt utvikling av løsninger som er tilstrekkelig praktiske, sikre, og konkurransedyktige på pris.

Kjøretøyskonseptet Dolphin har siden 2007 vært under utvikling ved REALTEK. Hensikten med prosjektet har vært å utvikle et lite, lett, kompakt og miljøvennlig kjøretøyskonsept. Dette er blitt gjort ved å; redusere kjøretøyets størrelse, vekt og tverrsnitts areal i forhold til tradisjonelle kjøretøy, benytte lettvekts materialer i konstruksjonen, redusere antall hjul og benytte en elektrisk motor og/eller en slags hybridmotorløsning. Dolphin konseptet omfatter flere forskjellige kjøretøysvarianter med ulike bruksområder og størrelser, der en av variantene er et person og varetransport dronekonsept påbegynt i 2016. Dronekonseptet heter Dolphin Sky og vil være utgangspunktet for denne gradsoppgaven.

### 1.2 Oppdragsbeskrivelse

Det gjenstår fremdeles flere aspekter som trenger å bli utredet og utviklet før Dolphin Sky konseptet kan realiseres. Et av disse aspektene er å utvikle chassiset/rammeverket til Dolphin Sky. En av forutsetningen for chassisløsningen er at den må være relativt lett, slik at det ikke behøves urealistiske mengder motorkraft for å ivareta dronens sveveegenskaper.

Denne masteroppgaven tar sikte på å gjennomføre utredningen og utviklingen av chassisløsningen til Dolphin Sky konseptet. Målet vil være å utvikle en lettvekts chassisløsning som kan integreres i Dolphin Sky plattformen, og dette skal gjøres gjennom en vurdering av forskjellige utforminger, konstruksjonsmetoder, materialer og en vurdering av hvilke sammenføyingsmetoder som skal brukes i konstruksjonen. Oppgaven vil

bygge videre på tidligere arbeid utført i Dolphin og Dolphin Sky prosjektet, samt annet relevant arbeid og gradsoppgaver utført for NMBU.

## 1.3 Forkortelser

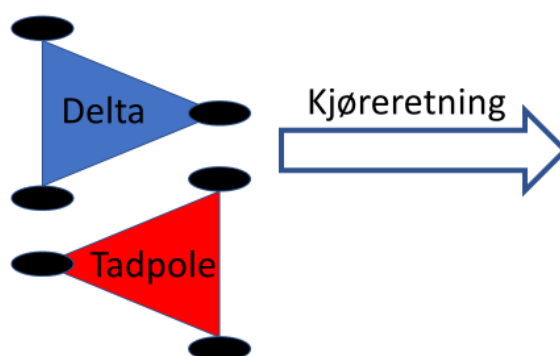
Forkortelser benyttet i kapittel 1 og 2 er angitt i tabell 1:

Tabell 1: Forkortelser benyttet i kapittel 1 og 2.

Forkortelse	Betydning
Trike	Tre hjuls kjøretøy
CES	Consumer Electronics Show
VTOL	Vertical take-off and landing
FAA	Federal Aviation Administration
CAD	Computer aided design
FEM	Finite element method
NTH	Nederst til venstre
NTV	Nederst til høyre

## 1.4 Dolphin Konseptet

Dolphin er et kjøretøy og svevekjøretøyskonsept som siden 2007 har vært under utvikling ved REALTEK på NMBU. Ideen til konseptet stammer fra et forprosjekt i faget TIP300, der to studenter ved navn Anders Brevik og Lars Timberlid Lundheim begynte utredningen av et trehjuls småbilkonsept i tadpole formasjon med plass til to personer. Formålet med prosjektet var å utvikle et lite, lett og miljøvennlig kjøretøyskonsept, som skulle redusere de negative miljøpåvirkningene og plassbehovet transport med personkjøretøy medfører. Dette skulle bli gjort ved å halvere volumet på kjøretøyet, samt redusere antall hjul i forhold til en tradisjonelt utformet personbil. Noe som ville medføre en reduksjon i vekt og antallet kontaktflater med veibanen, og dermed redusere rulle, akselerasjons og stigningsmotstand, samt redusert luftmotstand grunnet reduksjonen i tverrsnitts areal. Det skulle også benyttes lettvekts materialer i konstruksjonen, samt en miljøvennlig motorløsning. Denne konseptfilosofien har vært gjennomgående i utviklingen av konseptet fra starten i 2007 til den dag i dag.



Figur 1: To forskjellige utformingsprinsipper for trehjuls kjøretøy: øverst; delta prinsipp, nederst; tadpole prinsipp

Det har siden konseptets unnfangelse i 2007 blitt skrevet flere masteroppgaver på konseptet, som har resultert i utviklingen av flere forskjellige Dolphin versjoner. Versjonene er av forskjellig størrelse og design, og har forskjellige tiltenkte bruksområder. De forskjellige versjonene blir i tabellen under oppsummert, og er i

de påfølgende delkapitlene kort redegjort for, med de bidragsgivende masteroppgavene oppgitt. Det er også blitt utredet og/eller utviklet diverse komponenter og systemer til Dolphin plattformen, disse er også oppgitt i tabellen og kort redegjort for i påfølgende delkapitler.

*Tabell 2: Oppsummering av tidligere utført arbeid i Dolphin prosjektet, delt inn etter kriterier: utforming, antall seter, plattform og oppgavetype.*

Utformingsprinsipp	Antall seter (Foran + Bak)	Plattform	Oppgavetype			
			Design, interiør	Design, Eksteriør	Utredning	Konstruksjon
Tadpole	1 + 1	Formkonsept for trike		1		
		Duo		1		1
	2 + 1	Family		1		
		Expression 2.0		1		
Delta	1 + 2	Family	1	2		1
Sveveversjon	1	Sky		1	2	
Komponent/system	-	-			1	2

## 1.4.1 Dolphin: formkonsept for trike



*Figur 2: Dolphin: formkonsept for trike [1]*

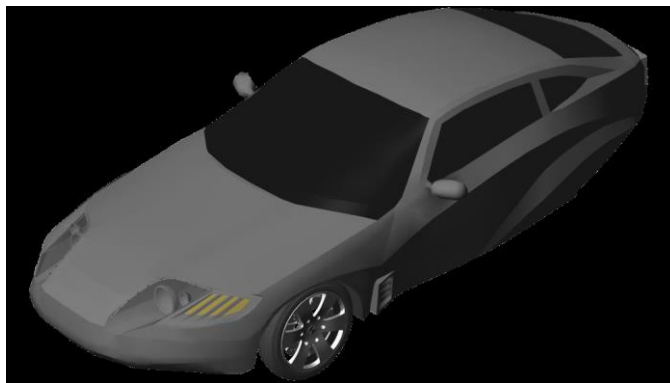
Dette er den første versjonen av Dolphin konseptet som ble utviklet i faget TIP300 i år 2007/2008 av Anders Brevik og Lars Timberlid Lundheim. Konseptet er et trehjuls småbilkonsept i tadpole formasjon med plass til to personer [1].

## 1.4.2 Dolphin Family

Dolphin Family er treseters versjon av Dolphin konseptet, Dolphin Family finnes i både tadpole formasjon (to seter foran, ett sete bak) og i delta formasjon (ett sete foran, tre seter bak). Det er utført totalt fem masteroppgaver på Family plattformen, der fire av de er for delta versjonen og en er for tadpole versjonen.

### Tadpoleversjon av Dolphin Family

Det er utført totalt en masteroppgave på tadpole versjonen av Dolphin Family. Masteroppgaven ble utført av Kristoffer Roca i 2011 og tok for seg utvikling av eksteriørdesignet til denne versjonen [2].



Figur 3: Eksteriørdesignet til tadpole versjon av Dolphin Family konseptet [2].

## Deltaversjon av Dolphin Family



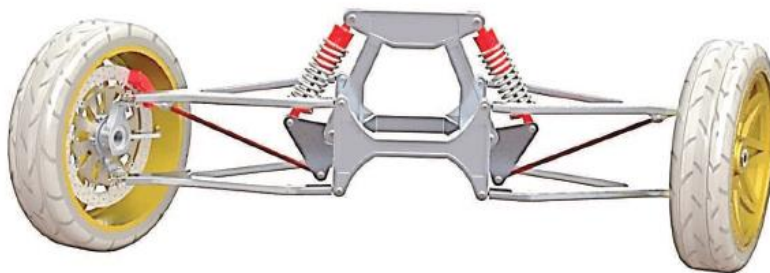
Figur 4: Resultat av forskjellige oppgaver utført på deltaversjonen av Dolphin Family: ØTV; Del A: Eksteriør [3], ØTH; Del B: Interiør [4], NTV; Del C: Ramme og hjuloppheng [5], NTH; Del D: Overchassis [6].

Det er utført totalt fire masteroppgaver på deltaversjon av Dolphin Family i tidsrommet 2010 til 2011, arbeidet er opp i fire deler (del; A, B, C og D), og følgende er blitt utviklet i de forskjellige delene av følgende studenter:

- Del A: Utvikling av eksteriørløsning, Lindebø Østby (2010) [3].
- Del B: Utvikling av interiørløsning, Magnus Ottesen (2010) [4].
- Del C: Utvikling av ramme og hjuloppheng, Jan-Fredrik Aasheim (2011) [5].
- Del D: Konseptualisering og design av overchassis, Christoffer Faye Leandersson (2012) [6].



## 1.4.3 Dolphin Duo 1+1



*Figur 5: Dolphin Duo 1+1: til venstre; Interiørdesign [7], til høyre; Hjuloppheng [8].*

Dolphin Duo er en trehjuls toseters versjon av Dolphin konseptet i tadpole formasjon, der utvendig spesifikasjoner og størrelse er basert på det originale Dolphin konseptet fra 2007. Det har for Duo 1+1 versjonen blitt utført to mastergradsoppgaver i tidsrommet 2012 til 2014. Masteroppgavene har omhandlet utvikling av interiørdesign utført av Mizgin Aziz Rashid i 2012 [7] og utvikling av hjuloppheng av Jarle Hjertaas Hanssen i 2014 [8].

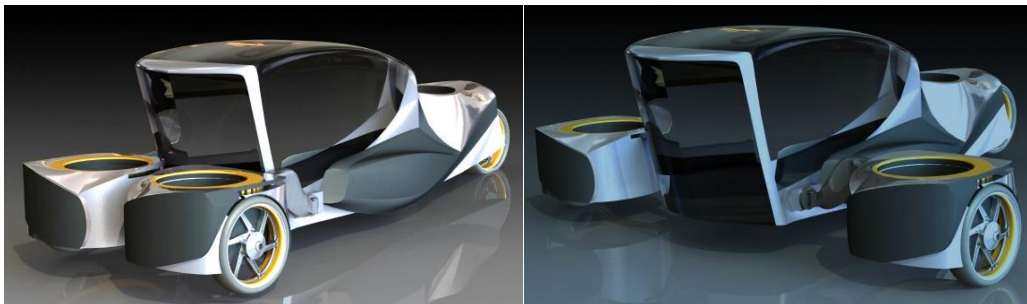
## 1.4.4 Dolphin Expression 2.0



*Figur 6: Dolphin Expression 2.0 [9].*

Dolphin Expression 2.0 er et trehjuls, treseters kjøretøyskonsept i tadpole konfigurasjon i Dolphin familien. Det er utført en mastergradsoppgave på dette konseptet. Oppgaven ble utført av Tone Skaar-Olsen i år 2015 og omfattet utvikling av eksteriørdesignet for denne versjonen av Dolphin [9].

## 1.4.5 Dolphin Sky



Figur 7: Mulig designløsning for Dolphin Sky. TV: Thrusterenheter foldet inn, TH: Thrusterenheter foldet ut [10].

Dolphin Sky er et enseters svevebilskonsept med utgangspunkt i Dolphin plattformen. Hensikten med prosjektet er å videreutvikle bilkonseptet Dolphin til å også omfatte en svevefunksjon, slik at kjøretøyet skal kunne benyttes som en person og varetransport drone. Utvikling av Dolphin Sky startet i 2016 og det er foreløpig utført tre mastergradsoppgaver i dette prosjektet:

- Del A: Utvikling av integrert design- og helhetskonsept, Kristoffer Ødegaard Rummelhoff [10].
- Del B: Utredning av systemkonsept, sikkerhet, produksjon, markedsnisjer og økonomi, Karen Elise Røsandnes [11].
- Utredning, dimensjonering og utvikling av testoppsett for thrusterfunksjonen, Anders Christian Thømt [12].

Det vil i dette våsemesteret utføres ytterligere tre mastergradsoppgaver i dette prosjektet, disse er med unntak av denne oppgaven:

- Utredning og utvikling av sammenfoldbart propell- og thrustersystem, Tarek El-Gewely [13].
- Utforming av førerkupe og førerplass for Dolphinkonseptet, Ingvild S. Birkelund [14].

## 1.4.6 Komponenter og systemer til Dolphin plattformen



Figur 8: Ulike komponenter og systemer utviklet til Dolphin plattformen. Øverst: Multifuel gassturbin [15], NTV: Waste heat recovery system [16], NTH: Dampturbinløsning [17].

Det er blitt utviklet flere forskjellige komponenter og systemer til Dolphin Plattformen. Disse er kort oppsummert i avsnittet under:

I 2012 ble det gjennomført en mastergradsoppgave av studentene Anders Møen Thue og Petter Sundquist, der det ble utviklet en liten multifuel gassturbinmotor [15]. Gassturbinen er tiltenkt å benyttes som en del av en hybridmotorløsning (sammen med elektriske motorer) i Dolphin kjøretøyene. I 2014 ble det gjennomført en mastergradsoppgave av Sigve Eikem Finnøy, der det ble utført en utredning av et eksternt varmevekslersystem som benytter seg av eksosvarmen til en gassturbin motor [16]. Hensikten var å kartlegge den potensielle økningen i virkningsgrad et slikt system kan tilføre gassturbinmotor systemet. I 2016 ble det gjennomført en mastergradsoppgave av Vidar Giske Henriksen, der det ble utviklet en dampturbinløsning til et varmevekslingsystem. Dampturbinen er ment å skulle drive en generator for strømproduksjon, og er tiltenkt å skulle benyttes i et varmevekslingsystem til gassturbinmotoren i en hybridmotorløsning til Dolphin kjøretøyene [17].

## 1.5 Liknende løsninger

Det finnes mange ulike person og varetransportdrone konsepter, noen av disse er fungerende løsninger som allerede er ute på markedet eller i nærmeste framtid vil være det, mens andre kun er konseptuelle. Det vil i dette delkapitlet bli foretatt en begrenset utredning av utvalgte droneløsninger fra eksterne aktører. Omfanget til utredningen vil begrense seg til å omfatte et utvalg av droner av lignende størrelse og med et tilsvarende anvendelsesområde som Dolphin Sky, dvs. droner som er beregnet til å bli anvendt til person og varetransport. Noen av konseptene som presenteres vil også være tiltenkt å kunne brukes som en bil på

veibane, slik som Dolphin Sky. Det vil kun presenteres grunnleggende spesifikasjoner i denne utredningen. Dersom det skal benyttes informasjon, egenskaper eller spesifikasjoner fra en eller flere av de presenterte løsningene som ikke er oppgitt i denne utredningen, vil den aktuelle løsningen og/eller den egenskapen/spesifikasjonen til løsningen som skal benyttes bli presentert i større detalj i det kapittelet der den aktuelle egenskapen/spesifikasjonen benyttes.

## 1.5.1 Ehang 184



Figur 9: Ehang 184, med noen nøkkelspesifikasjoner [18].

Ehang 184 er en enseters autonom flyveanordning designet for persontransport over korte avstander. Dronen er utviklet av det kinesiske dronefirmaet Ehang, og ble lansert i 2016 under teknologimessen CES. Dronen styres ved at passasjerer plotter inn ønsket destinasjon i en applikasjon, dronen vil deretter styres autonomt via 4G mobilt nettverk til destinasjonen. Det er altså ingen muligheter for manuell kontroll av dronen for passasjerer. Dronen har 4 bunnmonterte motoropphengs armer med totalt 8 propeller, der propellene på armene er kontraroterende (X8 oppsett). Hver av propellene er individuelt drevet av en elektrisk motor. Dronen er hovedsakelig utført i forsterket karbonfiber kompositt, men består også av aluminiumslegeringer i "flyindustrikkvalitet". Det er ifølge Ehang blitt utført en rekke suksessfulle bemannede testflyvninger [18]. Dronen er på dette tidspunktet ikke i drift noe sted, men det foregår for tiden fullskala testing og verifisering av dronen i Dubai, der planen er at den skal benyttes til taxivirksomhet [19].

Nøkkelspesifikasjoner for Ehang 184 er gitt i tabellen under. Informasjon og spesifikasjoner er hentet fra produksiden til Ehang 184 på produsentens egen nettside [18].

Tabell 3: Spesifikasjoner for Ehang 184 [18].

Spesifikasjon	Verdi
Ytterdimensjoner (lengde; høyde; bredde)	3989; 1447; 4024 mm
Nettvekt	260 Kg
Maksimal tillat nyttelast	100 Kg
Cruise hastighet	100 km/t
Flyvetid ved cruise hastighet	25 min
Cruise høyde	500 m
Maksimal flyhøyde	3000 m

## 1.5.2 Workhorse SureFly



Figur 10: Workhorse SureFly: til venstre; dronen med motoropphengarmer utslått, til høyre; dronen med motoropphengarmer sammenslått [20].

SureFly er en toseters VTOL flyveanordning designet for person og varetransport over korte avstander. Dronen er utviklet og produsert av det amerikanske firmaet Workhorse, som har spesialisert seg på å lage person og nyttekjøretøy i form av pickuper og små lastebiler med hybrid/elektriske motorer, samt droner til vare og persontransport. SureFly styres manuelt ved input fra pilot. Dronen har 4 toppmonterte sammenleggbare motoropphengs armer med totalt 8 propeller, der propellene på armene er kontraroterende (X8 oppsett). Hver av propellene er individuelt drevet av en elektrisk motor. Strømmen til de elektriske motorene leveres av en generator drevet av en liten bensin stempelmotor. Dronen bærer også to batteripakker for å sikre nødvendig kraftforsyning til en eventuell nødlanding i nødtilfeller. Dronens skrog og propeller er utført i karbonfiber kompositt. Dronen er på dette tidspunktet ikke i drift, men det amerikanske luftfartsverket FAA, har per 8. januar gitt Workhorse godkjenning for å starte med bemannet testflygning [21].

Nøkkelspesifikasjoner for SureFly er gitt i tabellen under. Informasjon og spesifikasjoner er hentet fra produksiden til SureFly på produsentens egen nettside [20].

Tabell 4: Spesifikasjoner for SureFly [20].

Spesifikasjon	Verdi
Nettvekt	500 Kg
Maksimal tillat vekt	680 Kg
Maksimal tillat nyttelast	180 Kg
Topp hastighet	113 Km/t
Flyvetid	1 t
Rekkevidde	113 Km
Maksimal flyhøyde	1200 m



## 1.5.3 Airbus Pop.Up



Figur 11: Airbus Pop.Up: til venstre; Modulene dronen består av, til høyre; Dronen i kjøremodus og i flymodus [22].

Pop.Up er et kjøretøyskonsept tiltenkt for kortdistanse persontransport på veibane og gjennom luft. Konseptet er utviklet av flyindustrigiganten Airbus og kjøretøysindustri firmaet Italdesign, og ble lansert 7. mars 2017. Løsningen er per nå kun konseptuell, og Airbus har forespeilet en tidshorisont på opptil 10 år før produktet vil være på markedet.

Det interessante med dette konseptet er at det er modulbasert; passasjerkabinmodul, kjøremodul og flymodul er alle uavhengige og har sin egen energikilde. Passasjerkabinmodulen vil til enhver tid kun være koblet til en av de andre modulene avhengig av hvilken modus man er i. Den store fordelen med et slikt modulært oppsett er at kjøretøyet i de forskjellige modusene ikke behøver å oppta mer plass enn nødvendig, samt at vekten vil kunne reduseres.

Tiltenkte egenskaper for Pop.Up er følgende [22]:

- Elektrisk drift for samtlige moduler.
- Mulighet for autonom styring i både kjøre og flymodus.
- Lettvekts monocoque karbonfiberkompositt passasjerkabin.
- Rotorer i X8 oppsett.



## 1.5.4 AeroMobile versjon 4.0



Figur 12: AeroMobil v4.0: til venstre; AeroMobil i kjøremodus, til høyre; AeroMobil i flymodus med vingene utfoldet [23].

AeroMobil v4.0 er en toseters svevebil laget for persontransport på veibane og gjennom luft. Svevebilen produseres av det slovakiske firmaet AeroMobil, og produksjonsversjonen v4.0 ble lansert i april 2017. Svevebilen har to moduser; kjøremodus og flymodus, og det tar 3 minutter for kjøretøyet å omkonfigurere seg mellom modusene. I kjøremodus er kjøretøyet sine vinger og propell sammenfoldet. I denne modusen drives bilen av et hybridsystem, der en turboladet bensinmotor i boxerkonfigurasjon driver en generator som igjen driver en elektrisk motor. I flymodus foldes vingene og den bakmonterte propellen ut, og kjøretøyet drives her kun av boxer motoren. Kjøretøyet behøver en rullebane for å kunne ta av. Svevebilen kan styres manuelt i både kjøre og flymodus, men det er også muligheter for autonom styring i flymodus. Kjøretøyet primære konstruksjonsmateriale er karbonfiberkompositt. AeroMobil v4.0 er per nå ikke i salg, men de første produksjonsmodellene er forventet levert innen år 2020. AeroMobil v4.0 er sertifisert for både kjøring på vei, samt flyving (betinget småflysertifikat i aktuelt land) i både USA og EU.

Nøkkelspesifikasjoner for AeroMobil v4.0 er gitt i tabellen under. Informasjon og spesifikasjoner er hentet fra produksiden til AeroMobil v4.0 på produsentens egen nettside [23].

Tabell 5: Spesifikasjoner for AeroMobil v4.0 [23].

Spesifikasjon	Verdi
Dimensjoner i flymodus (lengde; høyde; bredde)	5800; 1400; 8800 mm
Dimensjoner i kjøremodus (lengde; høyde; bredde)	5900; 1500; 2200 mm
Nettovekt	720 Kg
Maksimal tillat nyttelast	240 Kg
Topp hastighet flymodus	360 Km/t
Cruise hastighet flymodus	260 Km/t
Topp hastighet Kjøremodus	160 Km/t
Rekkevidde ved cruise hastighet flymodus	750 Km
Rekkevidde ved kjøremodus	2000 Km

## 1.6 Problemstillinger

Under følger problemstillinger og fokusområder som denne masteroppgaven tar sikte på å belyse.

- Kartlegge eksisterende relevante løsninger fra eksterne og interne (REALTEK) aktører. Undersøke egenskapene og spesifikasjonene til disse, samt finne ut om informasjonen fra kartleggingen kan benyttes i denne oppgaven og om den eventuelt kan tilpasses og integreres i Dolphin Sky konseptet.
- Kartlegge hva som er nødvendig å ta hensyn til i utformingen av chassiset, for eksempel plassbehov til komponenter, systemer, fører, nyttelast, med mer. Og ut ifra dette bestemme dimensjoner og utforming for chassisløsningen, slik at det vil være mulig å integrere løsningen i Dolphin Sky plattformen. Spesifikasjoner skal tilstrebes å basere seg på tidligere og pågående arbeid i Dolphin Sky prosjektet der dette er mulig.
- Utvikle en chassisløsning som er lett, og som samtidig innehar tilstrekkelig sikkerhet, stivhet og styrke.
- Undersøke hvilket, eventuelt hvilke materialer som er hensiktsmessig å benytte som konstruksjonsmateriale i chassisløsningen.
- Undersøke hvilken, eventuelt hvilke sammenføyningsmetoder som er hensiktsmessige å benytte i konstruksjonen av chassiset.

## 1.7 Teknologiske flaskehals

Under følger mulige teknologiske flaskehals for oppgaven:

### Materiale(r):

Dersom det besluttes å benytte komposittmateriale (r) i løsningen kan blant annet følgende teknologiske flaskehals som kan oppstå:

- Egenskapene til komposittmaterialer er ikke like godt kartlagt som for andre konstruksjonsmaterialer.
- Egenskapene vil være retningsavhengige.
- Fibermaterialer kan ha andre karakteristikk rundt dimensjoneringspunktene (flyt og bruddgrense).
- Avvik mellom oppgitte egenskaper og faktiske egenskaper.
- Usikkerhet rundt hensiktsmessige sammenføynings og bearbeidningsteknikker.

Dette medfører blant annet at:

- Vanskelig å finne egenskapsdata.
- Vanskeligere å fastsette nødvendige sikkerhetsfaktorer.
- Kan være vanskelig å analysere i FEM, og få pålitelige resultater.

### Struktur (er):

Dersom det skal benyttes sandwich strukturer i løsningen kan blant annet følgende teknologiske flaskehals oppstå:

- Egenskapene til sandwich strukturer vil være retningsbestemte.

Dette medfører blant annet at:

- Kompliserer dimensjoneringsarbeidet (undertegnede har også lite erfaring med å regne på denne typen strukturer).
- Vanskelig å modellere og analysere denne typen strukturer i FEM.

## Forsterkede skallkonstruksjoner:

Dersom løsningen skal konstrueres som en forsterket skallkonstruksjon vil en mulig flaskehals være at undertegnede har manglende kunnskaper og lite erfaring og med å regne på denne typen strukturer.

## Utmattingsproblematikk:

Ettersom løsningen vil bli utsatt for varierende belastning kan utmatting være aktuelt. Dette kan medføre følgende flaskehals:

- Finne utmattingsdata for komposittmaterialer, dersom disse skal benyttes.
- Finne utmattingsdata og beregningsmetoder for sandwich strukturer, dersom disse skal benyttes.
- Usikkerhet rundt utmattingssegenskaper ved forskjellige sammenføyningsmetoder (for eksempel liming).
- Pålitelig utmattings data for komponenter og helhetsløsning finnes kun ved testing.
- Usikkerhet rundt nøyaktig hvilke belastninger konstruksjonen utsettes for, og hvilken frekvens disse vil ha.

## FEM-analyse:

Studentversjonen av ANSYS Workbench har et begrenset antall tilgjengelige noder og elementer. Dette medfører at dersom det skal oppnås en viss nøyaktighet i resultatene kan ikke modellen som skal analyseres være spesielt omfattende i størrelse og/eller kompleksitet. Det er derfor ikke usannsynlig at FEM analysene må begrense seg til utvalgte komponenter og knutepunkter, eller at forfining av mesh kun utføres for aktuelle områder, der meshet har lavere densitet på modellen generelt.

## Plattform integrasjon:

Samtidig med denne oppgaven er to andre oppgaver som omhandler Dolphin Sky plattformen pågående:

- Interiørdesign [14].
- Løftemodul [13].

Dersom de tre løsningene skal integreres, kan følgende flaskehals oppstå:

- Dersom løftemodulen skal kunne festes fast i kabinen; betyr dette at feste punktene på løftemodulen må korrespondere med feste punktene på kabinen. Dette medfører en potensiell flaskehals dersom progresjonen i oppgavene ikke er tilsvarende og en av studentene må vente.
- Dersom interiøret skal kunne passe inn i kabinen; betyr dette at det innvendig rommet i kabinen ikke kan være mindre enn interiørløsningen. Dette medfører også en potensiell flaskehals dersom progresjonen i oppgavene ikke er tilsvarende og en av studentene må vente.

## Krefter:

- Luftmotstand vil eventuelt kun bli målt i CFD analyse, verdiene kan avvike fra eksperimentelle verdier. Undertegnede ferdigheter er også svært mangelfulle på dette området.
- Usikkerhet rundt hvilke manøvrere løsningen skal kunne utføre.

## 2 PROSJEKTPLAN

Dette kapitlet redegjør for oppgavens målsettinger inndelt i hoved- og delmål, planleggingen av oppgavegjennomføringen gitt i en arbeidsplan med milepeler og begrensingene som er blitt satt for oppgaven.

### 2.1 Hovedmålsetting

Hovedmålsettingen for mastergradsoppgaven er følgende:

«Å utrede, utvikle og designe en lettvekts chassisløsning for person og varetransportdronekonseptet Dolphin Sky. Videre skal det utarbeides en masterrapport som redegjør for alle trinn i prosessen, herunder; beregninger, tekniske tegninger og anvisninger. Rapporten skal danne grunnlaget for videre arbeid med konseptet»

### 2.2 Delmålsettinger

Delmålsettinger med hovedaktiviteter (punktvis), for mastergradsarbeidet er følgende:

- 1. Å utføre bakgrunnsundersøkelser, prosjektplanlegging og redegjøre for metodebruk**
  - Gjennomføre en utredning og oppsummering av Dolphin prosjektet.
  - Gjennomføre en utredning av lignende droneløsninger for person- og varetransport.
  - Det skal utarbeides en prosjektplan og settes begrensinger for gradsoppgaven.
  - Det skal redegjøres for mastergradsarbeidets metodebruk.
- 2. Utføre en utredning av teori og teknologi**
  - Det skal redegjøres for relevant grunnlagsteori.
  - Det skal redegjøres for eksisterende konstruksjonsteknologi.
- 3. Utarbeide en kravspesifikasjon for løsningen**
  - Undersøke hvilke krav løsningen må oppfylle.
  - Spesifisere og utarbeide krav som løsningen skal oppfylle.
- 4. Å Utrede og spesifisere konseptet**
  - Det skal utarbeides forskjellige løsningsalternativer for løsningen.
  - Det skal velges ut gunstige løsninger fra de utarbeide løsningsalternativene.
- 5. Modellering og dimensjonering**
  - Tidlig dimensjonere den valgte chassisløsningen (beregningsmodell), ved beregninger og FEM-analyse.
  - Det skal utarbeides en tredimensjonal CAD modell av chassisløsningen og denne skal dimensjoneres ved FEM-analyse (eventuelt også CFD-analyse).
  - Bestemme produksjonsmetoder for elementløsninger og helhetsløsning.
  - Utarbeide tekniske tegninger og anvisninger.
- 6. Ferdigstilling**
  - Ferdigstille mastergradsrapport.

## 2.3 Arbeidsplan med milepeler

Tabellen under viser prosjektets arbeidsplan med milepeler, milepeler er markert med symbolet  $\Delta$ :

Tabell 6: Arbeidsplan med milepeler og tilhørende hovedaktiviteter.

Delmål	Hovedaktivitet	Januar	Februar	Mars	April	Mai
1	Utrede Dolphin prosjektet	■				
	Utrede liknende løsninger	■				
	Prosjektplan og begrensinger		■			
	Redegjøre for metodikk		Δ			
2	Redegjøre for teori		■			
	Redegjøre for teknologi		■	Δ		
3	Utredning av krav			■		
	Utarbeide kravspesifikasjon			Δ		
4	Løsningsalternativer			■		
	Løsningsvalg			■	Δ	
5	Tidlig dimensjonering			■	■	
	CAD modellering og analyse				■	■
	Tegninger og anvisninger				■	■
	Produksjonsmetoder					Δ
6	Ferdigstille rapport					Δ
<b>Rapportskriving</b>		■	■	■	■	■
<b>Frister:</b>	<b>Innleveringsfrist rapport</b>	<b>15. mai</b>				
	<b>Presentasjon</b>	<b>9. juni</b>				

Tabell 7: Milepeler med fullføringsdato.

Milepel [Δ]	Dato fullført
Delmål 1	30. januar
Delmål 2	09. februar
Delmål 3	20. februar
Delmål 4	03. mars
Delmål 5	02. mai
Delmål 6	11. mai

## 2.4 Begrensninger

Delkapittel redegjør for mastergradsarbeidets begrensninger. Følgende begrensninger er blitt satt:

### Fastsatte rammer for mastergradsarbeidet:

- Tidsomfang: Tidsrammen for mastergradsarbeidet er fastsatt til 900 timer.
- Budsjettomfang: Budsjettet for prosjektet er fastsatt til 3000 NOK.

### Øvrige begrensninger for masteroppgaven:

Materialer og materialeegenskaper:

- Materialeegenskaper hentes primært fra CES EduPack og faglitteratur. Flere verdier er estimater og muligens utdatert.
- For noen av materialene er det ikke mulig å oppdrive visse egenskaper. Egenskapene blir da estimert med basis i nærliggende materials egenskaper.
- Materialeegenskapene for det valgte konstruksjonsmaterialet i ANSYS Workbench samsvarer ikke helt med det som er oppgitt i CES EduPack (skjær og trykkmodul er høyere i ANSYS).
- Ved valg av konstruksjonsmateriale blir ikke hensiktsmessigheten til materiale som skall/kledning vurdert.

Kartlegging av krefter:

- Det er blitt gjort antagelser om hvordan løsningen skal styres, og derav også hvilke manøvrere løsningen skal kunne utføre.
- Det er blitt gjort mange antagelser og forenklinger i kartlegging av krefter, og mange krefter er blitt sett bort ifra, på grunn av at de er antatt å være neglisjerbare og/eller ikke mulige/svært tidkrevende å kartlegge.
- Dynamiske laster utredes ikke.

Stabilitet:

- Tyngdepunktplassering for den helhetlige kabinmodulen med komponenter, interiør, nyttelast og systemer vil ikke bli kartlagt.

Sertifisering av løsning for bruk på vei og flyving:

- Løsningen dimensjoneres ikke etter gjeldene regelverk og sertifiseringskrav for tilsvarende flyveanordninger.
- Regelverk for trehjuls kjøretøy vil kun bli kartlagt og implementert for visse aspekter.

Dimensjonering og FEM-analyse:

- Det er kun sikkerhetsburet/strukturen som vil bli dimensjonert.
- Styrken til skall/kledningsplater blir ikke vurdert.
- Løsningen dimensjoneres mot statiske laster.
- Løsningen dimensjoneres ikke mot kollisjon.
- Lyd laster (støy) vurderes ikke.

Sammenføyninger:

- Det er blitt gjort antakelser og forenklinger av belastningssituasjonen til limforbindelsene.



- Dugeligheten til limforbindelsen blir ikke testet.
- Utmattingsegenskapene til limforbindelsen er ikke kjent, ettersom det ikke eksisterer data for utmattingsegenskapene til det valgte limet og dynamiske laster ikke er kartlagt.

#### Modellering:

- Det er kun sikkerhetsburet/strukturen som modelleres med korrekte innfestninger i knutepunktene mellom elementene, øvrig rammestruktur modelleres kun for illustrative formål.
- Skallet/kledningsplater blir ikke modellert.

#### Plattform integrasjon:

- Det legges kun til rette for og koordineres plassering av (skal ikke designes eller dimensjoneres) innfestingsløsning/punkter for innfesting av løftemodul og interiør.
- Integrasjon med en eventuell kjøremodul vurderes ikke.

#### Strukturoptimering:

- Det vil ikke bli foretatt strukturoptimering av løsnings elementer.

#### Produksjon:

- Det foretas ikke konsultasjon/rådgiving med fagpersonell/ekspertgruppe om hensiktsmessigheten og dugeligheten av de produksjonsmetodene som er valgt for sikkerhetsstrukturen.

#### Kostnadsvurdering for framstilling av løsningen:

- Framstillingskostnader (materialkostnader og produksjonskostnader) baseres på estimater fra CES EduPack og annen litteratur, dette medfører at kostnadsestimatet sannsynligvis er unøyaktig.
- Framstillingskostnader estimeres kun for framstilling av en prototype.
- Det vil ikke bli utført eksperttesting av tidsestimater for framstilling.

#### CFD-analyse:

- Det vil ikke bli foretatt strømningsanalyse av løsningen, da oppgaven kun har tatt for seg konstruksjon av det interne rammeverket i sikkerhetsstrukturen i detalj (Det vil kun bli utført enkle håndberegninger med antatte CD verdier for de forskjellige utformingsalternativene).

## 3 METODEBESKRIVELSE

Kapittelet 3 redegjør for mastergradsarbeidets metodebruk. Det første delkapittelet inneholder en forklaring av terminologi, symboler og formler som er benyttet i gradsarbeidet. Videre vil de forskjellige produktutviklings og problemløsningsmetodene som er benyttet i masterarbeidet bli beskrevet. Kapittelet inneholder også en beskrivelse av de forskjellige løsningsverktøyene som er benyttet, samt en beskrivelse av hvilke steg som ble tatt for å kvalitetssikre gradsarbeidet. I siste delkapittel er en prosessoversiktsfigur som viser de ulike prosessstrinnene i mastergradsarbeidet.

### 3.1 Terminologi, symboler og formler

I dette delkapittelet vil terminologi, symboler og formler benyttet i oppgaven bli framlagt og forklart.

#### 3.1.1 Terminologi

Tabell 8: Terminologi, begreper og forkortelser brukt i oppgaven.

Begrep/Forkortelse	Forklaring
IPD	Se kapittel 3.2.1
TV	Til venstre
TH	Til høyre
CFD	Analyse av strømningsproblemer i fluider ved numerisk metode
CG/CM/TP	Massesenter til legeme
Roll	Rotasjon om X-aksen, positiv dreieretning etter høyrehåndsregelen
Yaw	Rotasjon om Z-aksen, positiv dreieretning etter høyrehåndsregelen
Pitch	Rotasjon om Y-aksen, positiv dreieretning etter høyrehåndsregelen
Konstruksjonsstivhet	En konstruksjons evne til å motstå deformasjoner i det elastiske området
Aerodyn	Luftfartøy, hvis tyngde er større enn tyngden til den fordrevne luften
Grenselag	Overgangen mellom solid legeme og fluid
CFRP	Karbonfiber forsterket polymer
USD	Amerikanske dollar
NOK	Norske kroner
Utmattingsfasthet	Den utmattende spenningen som gir brudd etter et gitt antall sykler
St	Stållegeringer
Rst	Rustfrie stållegeringer
Al	Aluminiumslegeringer
Mg	Magnesiumlegeringer
Ti	Titanlegeringer
CFRP	Karbonfiber forsterket polymer
est	Estimert verdi
ISO	International Organization for Standardization
IIW	International Institute of Welding
SS	Solid sirkulært tverrsnitt
IP	I/H profil
Kanal/SP	Ikke lukket kanalformet tverrsnitt
SHS	Kvadratisk lukket hulprofil
RHS	Rektangulær lukket hulprofil
CHS	Sirkulær lukket hulprofil
MIG	Metal Inert Gas
TIG	Tugsten Inert Gas

Tabell 9: Terminologi, begreper og forkortelser brukt i oppgaven. Forts.

Begrep/Forkortelse	Forklaring
FSW	Friction Stir Welding
LBW	Laser Beam Welding
HAZ	Heat Affected Zone
SW	SolidWorks
WB	ANSYS Workbench

### 3.1.2 Symboler

Tabell 10: Symboler, med forklaringer og enheter brukt i oppgaven.

Symbol	Forklaring	Enhet [SI]
$\phi$	Rotasjonsvinkel om X-aksen	$^{\circ}$
$\theta$	Rotasjonsvinkel om Y-aksen	$^{\circ}$
$\psi$	Rotasjonsvinkel om Z-aksen	$^{\circ}$
$l$	Lengde	mm
$l_k$	Knekk lengde	mm
$l_{OG}$	Lengde av overlapp i limforbindelse	mm
$h$	Høyde	mm
$h_{bm}$	Høyde beregningsmodell	m
$b_{bm}$	Bredde beregningsmodell	m
$s$	Sidekant i kvadratisk tverrsnitt	mm
$s_i$	indre sidekant dimensjon, SHS profil	mm
$s_y$	Ytre sidekant dimensjon, SHS profil	mm
$s_{OG}$	Sidekantdimensjon i overgang	mm
$R$	Radius i sirkel	mm
$r_i$	Indre radius, SHS profil	mm
$r_y$	Ytre radius, SHS profil	mm
$r_{OG}$	Radius i overgang	mm
$x$	Avstand fra punkt 3 til punkt 5 i håndberegningmodeller	mm
$i$	Tregehetsradius	mm
$A_{prj}$	Projisert frontareal	$m^2$
$A_{prj, est}$	Estimert projisert frontareal	$m^2$
$A_{tv}$	Areal av vilkårlig tverrsnitt	$mm^2$
$A_k$	Areal for kvadratisk tverrsnitt	$mm^2$
$A_s$	Tverrsnittareal, solid sirkel flate	$mm^2$
$A_{SHS}$	Tverrsnittareal, SHS profil	$mm^2$
$A_{lim}$	Limflatens totalte overflateareal	$mm^2$
$V_{tv}$	Volum av element ved vilkårlig tverrsnittareal og lengde	$mm^3$
$V_{fb}$	Estimert volum av elementer i forenklet beregningsmodell (beregnet av ANSYS)	$m^3$
$m$	Estimert masse av forenklet beregningsmodell/vilkårlig masse	Kg
$m_{tot}$	Totalvekt Dolphin Sky	Kg

Tabell 11: Symboler, med forklaringer og enheter brukt i oppgaven. Forts.

Symbol	Forklaring	Enhet [SI]
$m_{lm}$	Estimert løftmodulvekt	$Kg$
$m_{ev}$	Totalvekt Dolphin Sky eksklusive løftemodul	$Kg$
$m_{i+p}$	Estimert vekt for 99 prosentil mann og interiør	$Kg$
$m_{CO2}$	Masse CO2 utslipp per masse produsert materiale	$\frac{Kg}{Kg}$
$V_{str}$	Strømningshastigheten til luften relativt til objektet	$\frac{m}{s}$
$\rho$	Materialdensitet	$\frac{Kg}{m^3}$
$\rho_l$	Lufttetthet	$\frac{Kg}{m^3}$
$g$	Tyngdeakselerasjon	$\frac{m}{s^2}$
$a_x$	Akselerasjon i X-retning	$\frac{m}{s^2}$
$a_y$	Akselerasjon i Y-retning	$\frac{m}{s^2}$
$a_z$	Akselerasjon i Z-retning	$\frac{m}{s^2}$
$F_x$	Kraftkomponent i X-retning	$N$
$F_y$	Kraftkomponent i Y-retning	$N$
$F_z$	Kraftkomponent i Z-retning	$N$
$F$	Trykkraft	$N$
$F_k$	Knekkraft	$N$
$F_{k\text{till}}$	Tillatt knekkraft	$N$
$F_{OG}$	Maksimal avskjærende kraft i limforbindelsen	$N$
$F_d$	Luftmotstands kraft komponent i retningen av strømningshastigheten	$N$
$F_{d, est}$	Estimert luftmotstands kraft komponent	$N$
$F_{d, x, est}$	Estimert luftmotstands kraft komponent i X-retningen	$N$
$F_{d, z, est}$	Estimert luftmotstands kraft komponent i Z-retningen	$N$
$F_{d, xz, est}$	Resulterende estimert luftmotstands kraft komponent i XZ-planet	$N$
$F_{s, est}$	Estimert skyvekraft komponent	$N$
$F_{s, x, est}$	Estimert skyvekraft komponent i X-retningen	$N$
$F_{s, z, est}$	Estimert skyvekraft komponent i z-retningen	$N$
$F_{s, xz, est}$	Resulterende estimert skyvekraft komponent i XZ-planet	$N$
$F_l$	Løftekraft komponent	$N$

Tabell 12: Symboler, med forklaringer og enheter brukt i oppgaven. Forts.

Symbol	Forklaring	Enhet [SI]
$F_{l,x}$	Løftekraft komponent i X-retningen	N
$F_{l,y}$	Løftekraft komponent i Y-retningen	N
$F_{l,z}$	Løftekraft komponent i Z-retningen	N
$F_{l,z,eff}$	Effektiv løftekraft komponent i XZ-planet	N
$F_{l,xz}$	Resultierende løftekraft komponent i XZ-planet	N
$F_{l,yz}$	Resultierende løftekraft komponent i YZ-planet	N
$W_{lm,z,est}$	Estimert tyngde løftemodul	N
$W_{ev,x,est}$	Estimert tyngde komponent av Dolphin Sky eksklusive løftemodul i X-retningen	N
$W_{ev,y,est}$	Estimert tyngde komponent av Dolphin Sky eksklusive løftemodul i Y-retningen	N
$W_{ev,z,est}$	Estimert tyngde komponent av Dolphin Sky eksklusive løftemodul i Z-retningen	N
$W_{ev,xz,est}$	Resultierende estimert tyngde komponent av Dolphin Sky eksklusive løftemodul i XZ-planet.	N
$W_{ev,yz,est}$	Resultierende estimert tyngde komponent av Dolphin Sky eksklusive løftemodul i YZ-planet.	N
$W_{i+p,x,est}$	Estimert tyngde komponent av for 99 prosentil mann og interiør i X-retningen	N
$W_{i+p,y,est}$	Estimert tyngde komponent av for 99 prosentil mann og interiør i Y-retningen	N
$W_{i+p,z,est}$	Estimert tyngde komponent av for 99 prosentil mann og interiør i Z-retningen	N
$R_1, R_2$	Vertikale opplagerkrefter i henholdsvis punkt 1 og 2	N
$H_1, H_2$	Horisontale opplagerkrefter i henholdsvis punkt 1 og 2	N
$M_{xy}$	Moment virkende i XY-planet	Nmm
$M_{xz}$	Moment virkende i XZ-planet	Nmm
$M_{yx}$	Moment virkende i YZ-planet	Nmm
$M_b$	Bøyemoment	MPa
$M_{b,maks}$	Tillatt bøyemoment	Nmm
$M_3, M_4, M_5$	Moment i henholdsvis punkt 3, 4 og 5	Nmm
$W_k$	Tverrsnittmodul for kvadratisk tverrsnitt	mm <sup>3</sup>

Tabell 13: Symboler, med forklaringer og enheter brukt i oppgaven. Forts.

Symbol	Forklaring	Enhet [SI]
$W_{SHS}$	Tverrsnittmodul, SHS profil	$mm^3$
$W_{n\ddot{o}dv}$	N\ddot{o}dvendig tverrsnittmodul for kvadratisk tverrsnitt	$mm^3$
$I_k$	Annet arealmoment for kvadratisk tverrsnitt	$mm^4$
$I_s$	Annet arealmoment, solid sirkel flate	$mm^4$
$I_{SHS}$	Annet arealmoment, SHS profil	$mm^4$
$E$	Elastisitetsmodul	MPa
$\sigma_{till}$	Tillatt spenning	MPa
$\sigma_{hb}$	Spenning regnet ut ved h\dd{a}ndbergening, brukt til sammenlikning av ANSYS resultater	MPa
$\sigma_f$	Flytegrense ( $R_e$ )	MPa
$\sigma_b$	Bruddgrense ( $R_m$ )	MPa
$\sigma_d$	Utmatningsfasthet ved $10^7$ sykler	MPa
$\sigma_e$	Ekvivalent spenning (Von Mises feilhypoteste), avleses i ANSYS Workbench	MPa
$\sigma_p$	Proporsjonalitetsgrense	MPa
$\tau_{lim}$	Avskj\dd{a}rende spenning i limforbindelse	MPa
$\tau_{lim,till}$	Tillatt avskj\dd{a}rende spenning i limforbindelse	MPa
$E_{prod}$	Energi per masse produsert materiale	$\frac{MJ}{Kg}$
$C_d$	Luftmotstandskoeffisient	-
$C_{d,est}$	Estimert luftmotstandskoeffisient for l\dd{o}sning	-
$\lambda$	Slankhetsforhold	-
$n_f$	Sikkerhetsfaktor mot materialflyt	-
$n_b$	Sikkerhetsfaktor mot materialbrudd	-
$n_{lim}$	Sikkerhetsfaktor i limforbindelse	-
$n$	Forhold mellom opptredende ekvivalent spenning og tillatt spenning	-
$e$	Forhold mellom h\dd{o}yde og lengde	-
$\varepsilon$	Faktor for beregning av inngangsverdi for knekk kurve avlesning (avhenger av opplagring og utforming)	-
$k$	Multiplikasjonsfaktor for knekk lengde	-
$\rho$	Inngangsverdi for knekk kurve avlesning	-
$mf_1$	Spesifikk styrke i strekk	-
$mf_2$	Spesifikk styrke i b\dd{o}y	-
$mf_3$	Spesifikk stivhet i strekk	-
$mf_4$	Spesifikk stivhet i b\dd{o}y	-
$mf_5$	Kostnad per spesifikk styrke i strekk	-

Tabell 14: Symboler, med forklaringer og enheter brukt i oppgaven. Forts

Symbol	Forklaring	Enhet [SI]
$mf_6$	Kostnad per spesifikk styrke i bøøy	-
$mf_7$	Kostnad per spesifikk stivhet i strekk	-
$mf_8$	Kostnad per spesifikk stivhet i bøøy	-
$mf_9$	Produksjonsenergi per styrke i strekk	-
$mf_{10}$	Produksjonsenergi per styrke i bøøy	-
$mf_{11}$	Produksjonsenergi per stivhet i strekk	-
$mf_{12}$	Produksjonsenergi per stivhet i bøøy	-
$mf_{13}$	CO <sub>2</sub> utslipp per styrke i strekk	-
$mf_{14}$	CO <sub>2</sub> utslipp per styrke i bøøy	-
$mf_{15}$	CO <sub>2</sub> utslipp per stivhet i strekk	-
$mf_{16}$	CO <sub>2</sub> utslipp per stivhet i bøøy	-
PPM	Pris per massenhet i USD	$\frac{USD}{Kg}$
PPMN	Pris per massenhet i NOK	$\frac{NOK}{Kg}$
HV	Vickers hardhet	-

### 3.1.3 Formler

Tabell 15: Formler benyttet i oppgaven

Betydning/Symbol	Formeluttrykk	Indeks
Luftmotstand	$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_l \cdot C_d \cdot A_{prj} \cdot V_{str}^2$	(1)
Luftmotstandskoeffisient	$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho_l \cdot A_{prj} \cdot V_{str}^2}$	(2)
$mf_1$	$mf_1 = \frac{\sigma_b}{\rho}$	(3)
$mf_2$	$mf_2 = \frac{\sigma_b^{\frac{2}{3}}}{\rho}$	(4)
$mf_3$	$mf_3 = \frac{E}{\rho}$	(5)
$mf_4$	$mf_4 = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho}$	(6)
$mf_5$	$mf_5 = \frac{\sigma_b}{\rho \cdot PPM}$	(7)
$mf_6$	$mf_6 = \frac{\sigma_b^{\frac{2}{3}}}{\rho \cdot PPM}$	(8)



Tabell 16: Formler benyttet i oppgaven. Forts.

Betydning/Symbol	Formeluttrykk	Indeks
$mf_7$	$mf_7 = \frac{E}{\rho \cdot PPM}$	(9)
$mf_8$	$mf_8 = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho \cdot PPM}$	(10)
$mf_9$	$mf_9 = \frac{\sigma_b}{\rho \cdot E_{prod}}$	(11)
$mf_{10}$	$mf_{10} = \frac{\sigma_b^{\frac{2}{3}}}{\rho \cdot E_{prod}}$	(12)
$mf_{11}$	$mf_{11} = \frac{E}{\rho \cdot E_{prod}}$	(13)
$mf_{12}$	$mf_{12} = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho \cdot E_{prod}}$	(14)
$mf_{13}$	$mf_{13} = \frac{\sigma_b}{\rho \cdot m_{CO2}}$	(15)
$mf_{14}$	$mf_{14} = \frac{\sigma_b^{\frac{2}{3}}}{\rho \cdot m_{CO2}}$	(16)
$mf_{15}$	$mf_{15} = \frac{E}{\rho \cdot m_{CO2}}$	(17)
$mf_{16}$	$mf_{16} = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho \cdot m_{CO2}}$	(18)
$A_{proj, est}$	$A_{proj, est} = h_{bm} \cdot b_{bm}$	(19)
$a_x$	$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m_{tot}}$	(20)
$a_y$	$a_y = \frac{\Sigma F_y}{m_{tot}}$	(21)
$a_z$	$a_z = \frac{\Sigma F_z}{m_{tot}}$	(22)
$F_{d, est} = F_{d, xz, est}$	$F_{d, est} = \frac{1}{2} \cdot \rho_l \cdot C_{d, est} \cdot A_{prj, est} \cdot V_{str}^2$	(23)
$F_{d, x, est}$	$F_{d, x, est} = F_{d, est} \cdot \cos \theta$	(24)
$F_{d, z, est}$	$F_{d, z, est} = F_{d, est} \cdot \sin \theta$	(25)
$F_{s, est} = F_{s, xz, est}$	$F_{s, est} = -F_{d, est}$	(26)
$F_{s, x, est}$	$F_{s, x, est} = -F_{d, x, est}$	(27)
$F_{s, z, est}$	$F_{s, z, est} = -F_{d, z, est}$	(28)
$F_{l, x}$	$F_{l, x} = F_l \cdot \sin \theta$	(29)
$F_{l, y}$	$F_{l, y} = F_l \cdot \sin \phi$	(30)
$F_{l, z}$	$F_{l, z} = F_l \cdot \cos \theta / \phi$	(31)
$F_{l, z, eff}$	$F_{l, z, eff} = (F_l \cdot \cos \theta / \phi) - (0,1 \cdot m_{tot} \cdot g)$	(32)
$F_{l, xz} = F_{l, yz}$	$F_l$	(33)
$W_{i+p, x, est}$	$W_{i+p, x, est} = m_{i+p} \cdot a_x$	(34)
$W_{i+p, y, est}$	$W_{i+p, y, est} = m_{i+p} \cdot a_y$	(35)
$W_{i+p, z, est}$	$W_{i+p, z, est} = m_{i+p} \cdot (a_z + g)$	(36)

Tabell 17: Formler benyttet i oppgaven. Forts.

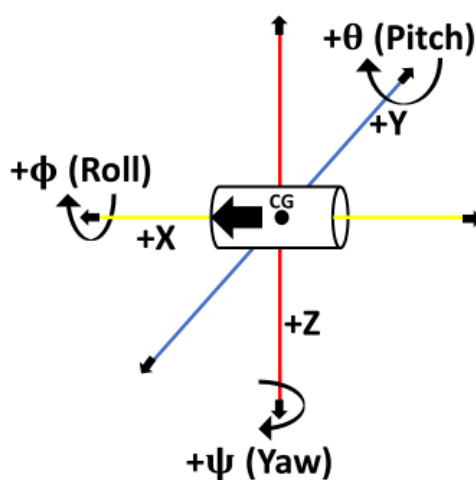
Betydning/Symbol	Formeluttrykk	Indeks
$\sigma_{till}$	Laveste verdi: $\sigma_{till} \leq \frac{\sigma_b}{n_b} \text{ eller } \sigma_{till} \leq \frac{\sigma_f}{n_f}$	(37)
$n$	$n = \frac{\sigma_e}{\sigma_{till}}$	(38)
$W_k$	$W_k = \frac{1}{6} \cdot s^3$	(39)
$W_{n\ddot{o}dv}$	$W_{n\ddot{o}dv} = n \cdot W_k$	(40)
$s$	$s = \sqrt[3]{6 \cdot W_{n\ddot{o}dv}}$	(41)
$m$	$m = \rho \cdot V_{fb} \text{ og } m = \rho \cdot V_{tv} = \rho \cdot A_{tv} \cdot l$	(42)
$e$	$e = \frac{h}{l}$	(43)
$M_3$	$M_3 = (F_z \cdot \frac{3 \cdot x^2}{2 \cdot l \cdot ((2 \cdot e) + 3)}) + (\frac{1}{2} \cdot F_y \cdot h)$	(44)
	og $M_3 = W_k \cdot \sigma_e$	(45)
$A_k$	$A_k = s^2$	(46)
$I_k$	$I_k = \frac{1}{12} \cdot s^4$	(47)
$i$	$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$	(48)
$\sigma_p$	$\sigma_p = 0,8 \cdot \sigma_f$	(49)
Elastisk knekking dersom $\lambda$ :	$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_p}}$	(50)
$p$	$p = \varepsilon \cdot \frac{1}{h}$	(51)
$l_k$	$l_k = k \cdot h$	(52)
$\lambda$	$\lambda = \frac{l_k}{i}$	(53)
$F_k$	$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2}$	(54)
$F_{ktill}$	$F_{ktill} = \frac{F_k}{n_k}$	(55)
$M_{b,maks}$	$M_{b,maks} = \sigma_f \cdot W$	(56)
Interaksjonsformel metode 1	$\frac{F_k}{F_{ktill}} + 1,6 \cdot \frac{M_b}{M_{b,maks}}$	(57)
$R_1 = R_2$	$R_1 = R_2 = F_z \cdot \frac{x}{l}$	(58)
$H_1 = H_2$	$H_1 = H_2 = F_z \cdot \frac{3 \cdot x^2}{2 \cdot h \cdot l \cdot ((2 \cdot e) + 3)}$	(59)

Tabell 18: Formler benyttet i oppgaven. Forts.

Betydning/Symbol	Formeluttrykk	Indeks
$M_3 = M_4$	$M_3 = M_4 = F_z \cdot \frac{3 \cdot x^2}{2 \cdot l \cdot ((2 \cdot e) + 3)}$	(60)
$M_5$	$M_5 = F_z \cdot \frac{x^2 \cdot ((4 \cdot e) + 3)}{2 \cdot l \cdot ((2 \cdot e) + 3)}$	(61)
$\sigma_{hb}$	$\sigma_{hb} = \frac{M_3 / M_5}{W_k}$	(62)
$A_s$	$A_s = \pi \cdot R^2$	(63)
$I_s$	$I_s = \frac{\pi}{4} \cdot R^4$	(64)
$A_{SHS}$	$A_{SHS} = s_y^2 - s_i^2$	(65)
$I_{SHS}$	$I_{SHS} = \frac{1}{12} \cdot (s_y^4 - s_i^4)$	(66)
$s_i$	$s_i = s_y - (2 \cdot t)$	(67)
$W_{SHS}$	$W_{SHS} = \frac{1}{6} \cdot \frac{s_y^4 - s_i^4}{s_y}$	(68)
$A_{lim}$	$A_{lim} = 4 \cdot (l_{OG} \cdot (s_{OG} + (\frac{\pi}{2} \cdot r_{OG})))$	(69)
$\tau_{lim}$	$\tau_{lim, till} = \frac{\tau_{lim}}{n_{lim}}$	(70)
$l_{OG}$	$l_{OG} \geq \frac{n_{lim} \cdot F_{OG}}{4 \cdot \tau_{lim} \cdot (s_{OG} + (\pi \cdot r_{OG}))}$	(71)

### 3.1.4 Koordinatsystemer og rotasjonsakser

Figuren under viser koordinatsystemet som er blitt benyttet i oppgaven. Koordinatsystemet har referansepunkt i legemets tyngdepunkt og har seks frihetsgrader (tre translatoriske akser og tre rotasjonsakser), der positiv rotasjonsretning er definert etter høyrehåndsregelen. Aksesystemets konvensjon er etter luftfartsstandarden DIN 9300 [24].



Figur 13: Koordinatsystem med rotasjonsakser.

## 3.2 Metodebruk

Det er benyttet flere forskjellige produkt og problemløsningsmetoder i denne oppgaven, disse vil bli redegjort for i dette delkapittelet.

### 3.2.1 IPD

Integrated Product Development (IPD) er en produktutviklingsmetodikk som har som formål å optimalisere produktutviklingsprosessen, ved å øke prosessens effektivitet, redusere gjennomføringstiden og å øke læringseffekten i prosessen. Metodikken går ut på å gjennomgående i en produktutviklingsprosess inkorporere flere fagfelt og disipliner som kan være relevante for prosessen og opprette en effektiv informasjonsflyt mellom disse. For å effektivisere informasjonsflyten mellom forskjellige aktører og fagfelt i produktutviklingsprosessen, samt eliminere mulige menneskelige feilkilder legges det vekt på at det i stor grad skal benyttes dataverktøy og at den tilgjengelige informasjonen skal finnes på informasjonsplattformer som er felles for alle aktørene. Metodikken legger også vekt på å involvere fagfelt, disipliner og vurderingshensyn som tradisjonelt ikke har vært en del av produktutviklingsprosessen, som for eksempel psykologi, miljø og bærekraftighet. Det legges også vekt på å effektivisere verdikjeden til produktet; før, etter og gjennom produktets levetid [25].

### 3.2.2 Stuart Pughs seleksjonsmetodikk

Pughs metodikk er et seleksjonsverktøy utviklet av Stuart Pugh på 1980-tallet, og er en seleksjonsmetodikk som skal muliggjøre å foreta mer objektive valg ut ifra subjektive vurderinger. Formålet med metodikken er at man i en seleksjonsprosess der det skal velges et løsningsalternativ ut av flere mulige, skal ende opp med å velge det mest optimale løsningsalternativet ut ifra forhåndsbestemte kriterier. Kriteriene kan enten være uvektede eller vektete, men dersom kriteriene vektetes vil den som utarbeidet kriteriet subjektive oppfatning av kriteriets viktighet og relevans bli tatt mer hensyn til i seleksjonen. Løsningsalternativene vurderes så subjektivt opp mot de forhåndsbestemte kriteriene og blir gitt poeng etter hvor godt løsningen tilfredsstiller kriteriet etter en forhåndsdefinert poengskala (for eksempel -1,0,1). Poengscoren gitt for hvert av kriteriene per løsningsalternativ summeres så opp, og løsningsalternativet med den høyeste poengsummen vil da være den mest optimale løsningen basert på kriteriene. Dersom det benyttes vektete kriterier multipliseres vektsummen per kriterium med poengscoren og summeres på samme måte som beskrevet over [26].

### 3.2.3 Osbournes SCAMPER

SCAMPER er en problemløsnings og optimaliserings teknikk utviklet av Alex Osborne på 1950-tallet. Teknikken kan benyttes til å finne forbedringspotensialer ved eksisterende løsninger, finne nye anvendelsesområder til eksisterende løsninger eller finne på nye løsninger. SCAMPER kan også et nyttig verktøy å bruke dersom en sitter fast et sted i produktutviklingsprosessen, da metoden kan avdekke løsningsalternativer eller nye anvendelsesområder som ikke tidligere er blitt vurdert. Metodikken i SCAMPER går ut på at produktet/ideen/konseptet/problemene vurderes etter en sjekklister som inneholder 7 momenter og ut ifra dette kan mulige løsninger og forbedringspotensialer avdekkes. Disse er listet under [27]:

1. Substitute
2. Combine
3. Adjust
4. Modify
5. Put to other uses
6. Eliminate
7. Reverse (rearrange)

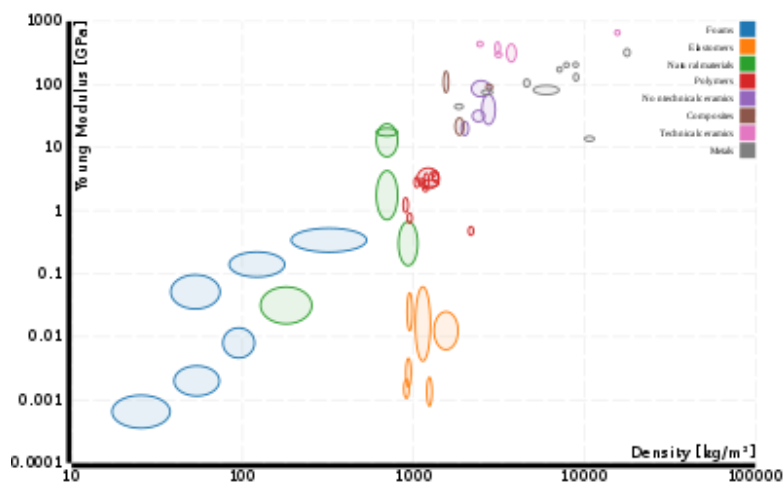
## 3.2.4 Ashbys metode for materialeleksjon

Michael Farries Ashbys metode for materialeleksjon er en metode som skal hjelpe til med å velge ut riktig(e) konstruksjonsmateriale(r) til en fysisk løsning. Metoden består i å først utarbeide en rekke vurderingskriterier, for å så vurdere forskjellige materialer opp mot disse og se hvilke materialer som tilfredsstillter kriteriene best. Seleksjonsprosessen starter med å utarbeide noen initielle vurderingskriterier for å eliminere materialer som er uegnet til applikasjonen. Disse kan for eksempel være materialkostnader, materialeegenskaper, og de faktiske kravene som materialet må tilfredsstillte i den avvente applikasjonen (for eksempel et vektkrav). Videre defineres det flere vurderingskriterier som skal ha til hensikt å rangere de resterende materialer som har tilfredsstillt de initielle kravene. Disse kriteriene kan for eksempel være krav som tar hensyn til hvilke(t) materiale(r) som passer best til de produksjonsmetodene som skal benyttes, men kan også være mer komplekse som for eksempel et egenskapsforhold (styrke til vektforholdet til et materiale), istedenfor en enkelt materialeegenskap.



Figur 14: Metodikken i Michael Farries Ashbys metode for materialeleksjon [28].

En vanlig måte å presentere de forskjellige materialenes tilfredsstillelse av seleksjonskriteriene er å utarbeide et spredningsdiagram med et vurderingskriterium på hver av aksene. Denne type spredningsdiagram kalles Ashby plots og har ofte dobbelt logaritmisk skala.



Figur 15: Dobbeltlogaritmisk Ashby plot med et seleksjonskriterium på hver akse [29].

Ettersom det er et stort mangfold i konstruksjonsmaterialer, kan prosessen med å vurdere mangfoldige materialer opp mot en rekke seleksjonskriterier være svært tidkrevende. Det finnes heldigvis dataprogrammer som bidrar til å gjøre materialutvelgesprosessen mer effektiv; CES EduPack utviklet av Granta Design [30] (som Ashby har deltatt i utvikling av), inneholder en omfattende materialdatabase, der materialene er klassifisert og systematisert. Programmet gjør det raskt og enkelt å opprette Ashby plots for materialeseleksjon. Programmet inneholder også beskrivelser av mange forskjellige produksjonsmetoder, og hvilke materialer som passer å bruke disse på. CES EduPack vil i denne oppgaven sammen med boken om materialutvelgelse som Ashby har skrevet [28] [31], bli brukt til å utføre materialeseleksjon etter Ashbys metode.

### 3.3 Løsningsverktøy

Det er benyttet flere forskjellige løsningsverktøy i denne oppgaven, disse vil bli redegjort for i dette delkapittelet.

Følgende dataverktøy er benyttet i masteroppgaven:

#### **Bilde, tekst og tall behandling:**

- Microsoft Word 2016 er blitt brukt til å skrive denne rapporten.
- Microsoft PowerPoint 2016 er brukt til å lage figurer til rapporten.
- Paint er brukt til å lage figurer til rapporten.
- Autodesk Fusion 360 er blitt benyttet til å lage figurer til rapporten.
- Microsoft Excel 2016 er brukt til å føre timer i prosjektet, samt til utregning av delvektsummer og vektsummer i seleksjonstabellene.
- Wolframalpha er benyttet til å løse likninger av grad 3 og 4 [32].

#### **3D- modellering:**

- CAD programmet Solidworks Rx 2017 er benyttet til 3D modellering, samt for å produsere bilder, sammenstillingstegninger og eksplosjonstegninger.

#### **FEM-analyse:**

- ANSYS Workbench er blitt benyttet til elementanalyse av løsningen.

#### **Materialdata, materialeseleksjon, produksjonsmetoder:**

- CES EduPack 2017, Level 3 og Level 3 Aerospace er benyttet til:
  - MaterialUniverse: For innhenting av materialegenskaper.
  - ProsessUniverse: For å finne informasjon om produksjonsmetoder.

### 3.4 Kvalitetssikring

Følgende tiltak er blitt gjort for å kvalitetssikre rapporten:

#### 3.4.1 Kildebruk

Det er i denne rapporten blitt tilstrebet å benytte mest mulige skriftlige kilder fra fag og pensumlitteratur på det aktuelle feltet. Der det er brukt artikler eller gradsoppgaver som kilder, er det fortrinnsvis benyttet artikler/oppgaver som har et høyt antall siteringer eller er fra velkjente institusjoner. Der det er brukt nettsider som kilder, er det fortrinnsvis benyttet nettsider fra velkjente institusjoner (for eksempel NASA).

## 3.4.2 Håndbøker og standarder

Følgende skriftlige verktøy er benyttet i masteroppgaven:

### Håndbøker:

- Håndboken tekniske tabeller er brukt for formler [33].

### Pensum litteratur:

- Det er benyttet hefte fra undervisningsunderlaget i faget TMP301 for knekkeberegning etter metode 1: forenklet interaksjonsregel [34].

### Fulgte standarder:

- ISO standard 9001 for kvalitetsstyring er fulgt.
- Tekniske tegninger er utarbeidet etter ISO standard 128.

### Eksperttesting:

- Forenkling av ANSYS Workbench beregningsmodell er utført etter anbefaling fra overingeniør Henrik Folke Holmberg.

## 3.4.3 Feilretting

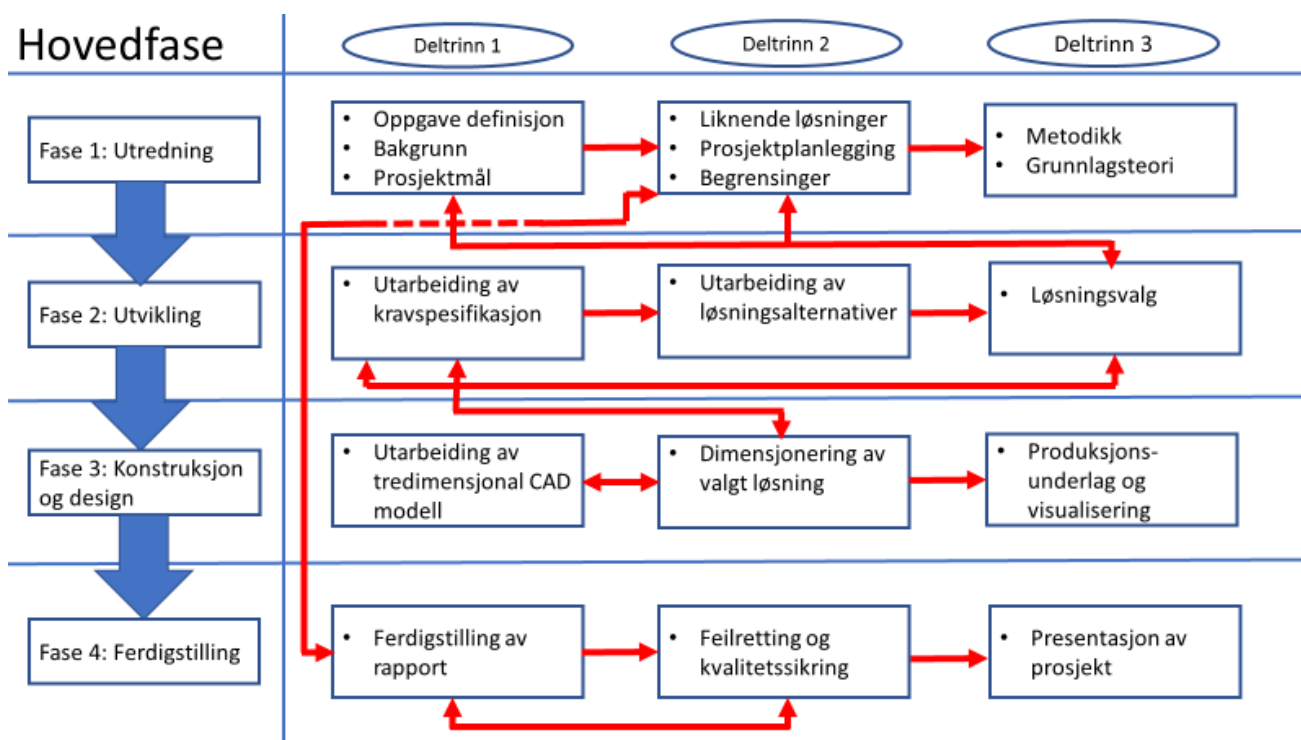
Det er før levering blitt utført en grundig gjennomgang av rapport en for å forsikre at følgende er korrekt:

- Kildesiteringer, kilde nummereringer, figurnummereringer og tabellnummerering
- Skrivefeil og skriftformateringer
- Symboler og former brukt i rapporten stemmer overens med respektive lister i kapittel 3
- Gjennomgang av alle beregninger



## 3.5 Prosesstrinn

Dette delkapittelet inneholder en skjematisk framstilling av utviklingsprosessens forskjellige prosesstrinn og fremgangsmetoden i prosessen. Utviklingsprosessen er blitt delt opp i fire hovedfaser, med tilhørende undertrinn og hovedaktiviteter. De blå pilene viser hvordan de forskjellige hovedfasene henger sammen, mens de røde pilene viser hvordan de forskjellige deltrinnene henger sammen (merk at; det i utviklingsprosessen i praksis vil foretas vurderinger på tvers av de forskjellige deltrinnene kontinuerlig, de røde pilene er kun ment å illustrere de viktigste tilknytningene mellom disse). Flere av deltrinnene er sammenkoblet med toveis røde piler. Dette angir at aktiviteten som blir utført og/eller resultatet i/fra det/de pågående undertrinnet (ene) skal evalueres etter kravene/rammene fastsatt i det/de angitte undertrinnet (ene).



Figur 16: Prosesdiagram med hovedfaser, tilhørende utviklingstrinn og hovedaktiviteter.

## 4 TEORETISK OG TEKNOLOGISK GRUNNLAG

I kapittel 4 vil teori og teknologi relevant for oppgaven bli redegjort for. Kapittelet starter med en gjennomgang av relevant teori, da først en gjennomgang av aerodynamikk slik at grunnlaget for vurderinger av løsningsens aerodynamiske egenskaper kommer på plass. Deretter vil antropometriske faktorer klarlegges slik at grunnlaget for fastsettelse av nødvendig innvendig plass til kravspesifikasjonen kan bestemmes. Til sist vil det redegjøres for relevant konstruksjonsteknologi med fordeler og ulemper for forskjellige konstruksjonsmetoder.

### 4.1 Aerodynamikk

Aerodynamikk er studien av egenskapene til luft i bevegelse, og dens interaksjoner med solide legemer når de beveger seg gjennom den eller den strømmer rundt de. De aerodynamiske egenskapene som vil bli vurdert i seleksjonsprosessen av forskjellige løsningsalternativer for utformingen av chassiset, vil bestå i å vurdere de forskjellige løsningenes luftmotstand. Det vil i dette delkapittel bli kort redegjort for relevant teori om luftmotstand, samt framlagt noen retningslinjer for hvordan løsningen burde utformes for å redusere denne.

Luftmotstand er en kraft som oppstår når et legeme har en relativ bevegelse i forhold til en omliggende luftmasse, og virker i motsatt retning av legemets relative bevegelse. Luftmotstand oppstår primært av to grunner: Formmotstand og overflatefriksjon i grenselaget mellom det solide legemet og luften, begge motstandsformene øker med kvadratet av den relative strømningshastigheten til luftstrømmen.

Formmotstanden (kan også betegnes trykkmotstand) varierer med legemets utforming (projisert frontareal, størrelse og utformingen i strømningsretningen (lengde, form, eventuelle overganger)), og oppstår som et resultat av trykkvariasjoner over legemets overflate, der trykkraftene i et gitt punkt langs overflaten på legemet virker normalt på luftstrømmens retning (se figur 17). Når luftstrømmen treffer et legeme, vil luftpartiklene ha en tendens til å bevege seg langs legemets overflate i parallelle lag uten særlige forstyrrelser mellom lagene, dette kalles attached laminar flow. På ett punkt langs overflaten til legeme vil luftstrømmen adskilles fra grenselaget og gå over til å ikke lengre strømme i parallelle lag, og da med kaotiske forandringer i trykk og strømningshastigheter. Dette kalles detached turbulent flow og er det primære opphavet til trykkvariasjonen over legemet. Punktet dette inntreffer vil variere med de overnevnte grunnene. Legemer der mesteparten av luftmotstanden kommer fra formmotstand kalles blunt bodies.

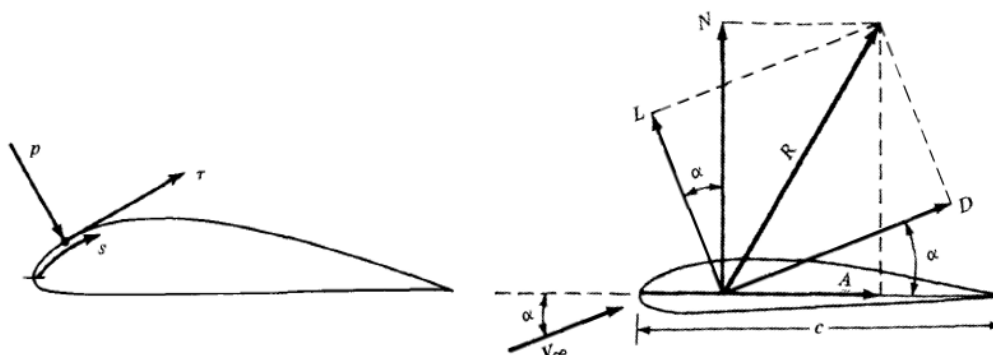
Overflatefriksjonen varierer primært med overflatens ruhet og lengden/overflatearealet der luftstrømmen kan betraktes som en attached laminar flow. Som beskrevet over vil luftstrømmen ha en tendens til å «klebe» seg til legemets overflate, dette skaper friksjon mellom luften og overflaten i grenselaget og gjør at det vil kreves en kraft for å skyve legemet gjennom luften. Motstanden grunnet overflatefriksjonen opptrer som en skjærspenning, som virker tangentielt i forhold til luftstrømmens retning (se figur 17). Legemer der mesteparten av luftmotstanden kommer fra overflate friksjon kalles streamlined bodies [35].

Summen av alle formmotstandskomponentene og motstandskomponentene grunnet overflatefriksjon over den totale overflaten til legemet sin resultantkomponent danner den totale luftmotstandskomponenten (se figur 17), og følgende formel kan benyttes for å regne den ut [35]:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot C_d \cdot A_{Prj} \cdot V_{Str}^2 \quad (1)$$

Der  $C_D$  er luftmotstandskoeffisienten, en dimensjonsløs koeffisient som beskriver legemet motstands egenskaper når det er i relativ bevegelse i forhold til en omliggende luftmasse. Luftmotstandskoeffisienten bestemmes vanligvis ved vindtunelltesting eller ved CFD analyser og er definert ved følgende formel [35]:

$$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho_l \cdot A_{prj} \cdot V_{str}^2} \quad (2)$$



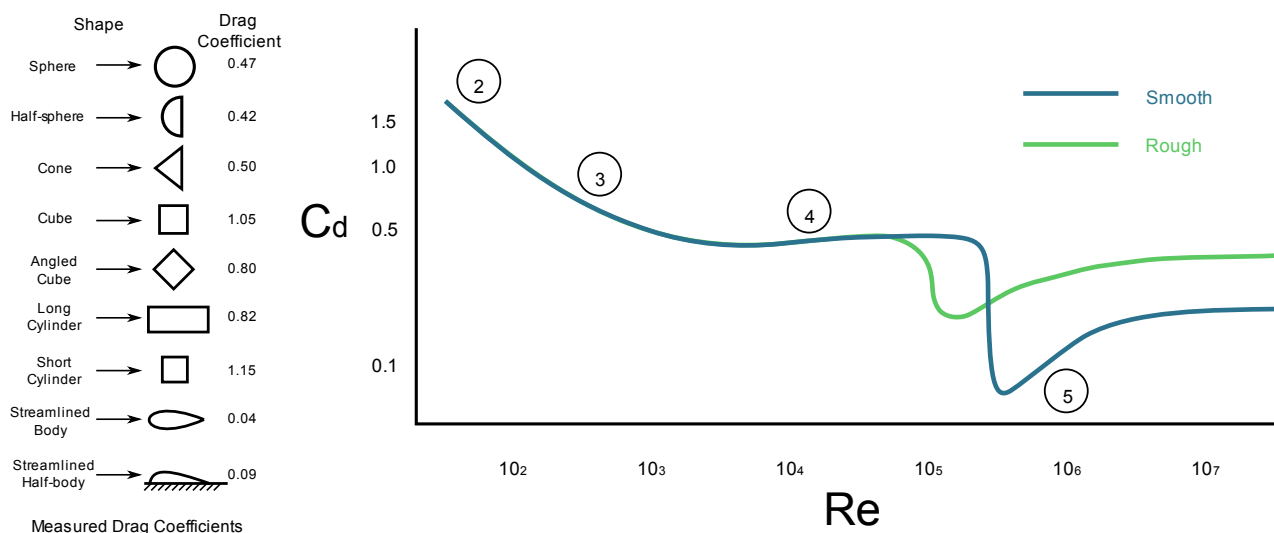
Figur 17: Bildet til venstre viser hvordan formmotstandskomponenten ( $p$ ), og friksjonsmotstandskomponenten ( $\tau$ ) angriper i et gitt punkt langs luftstrømmens bane ( $s$ ), bildet til høyre viser resultanten ( $R$ ) som er resultatanten av summen av alle  $p$  og  $\tau$  komponenter langs ( $s$ ), der  $D$  er luftmotstandskomponenten [35].

Form	Form motstand	Friksjon motstand	
	0%	100%	$Re \ll 1$
	~10%	~90%	$Re \sim 10$
	~90%	~10%	$Re > \sim 90$
	100%	0%	$Re \sim 10^4 - \sim 10^5$
			$Re > \sim 10^5$

Figur 18: Se forklaring under figuren. Til venstre [36], til høyre [37].

**Figur 18, til venstre;** viser luftstrømsoppførsel over forskjellige profiler, og andelen av total luftmotstand som har sitt opphav i enten form eller friksjonsmotstand for den gitte profilen. Som det framkommer av figuren vil luftstrømmen over streamlined bodies klebe til profilen lengre før den går over til å bli turbulent, noe som medfører mindre turbulens og dermed mindre formmotstand enn for blunt bodies. Videre vil også krappe overganger langs en profil føre til at luftstrømmen i grenslaget ved overgangen blir turbulent, noe som øker formmotstanden.

**Figur 18 til høyre;** viser hvordan luftstrømmen over en gitt profil kan variere med den relative hastigheten til luftstrømmen, dette kan være en faktor det er lurt å være bevisst på når man skal bestemme seg for utforming, så man ikke velger en profil med ugunstige egenskaper i de luftstrøms hastighetsområder den skal operere i.



Figur 19: Se forklaring under figuren [38]

**Figur 19, til venstre;** Viser forskjellige profilers luftmotstandskoeffisienter ved en tilsvarende relativ luftstrøms hastighet. Som det framkommer av figuren er et avrundet frontparti det mest gunstige. Videre er profiler som er lengre enn de er høye (slanke, tynne) mer gunstige, helst da med en slak gradvis innsnevring som ender i en spiss. Profiler som er symmetriske om lengdeaksen mer også mer gunstige.

**Figur 19 til høyre;** viser hvordan luftmotstandskoeffisienten varierer med forskjellig grad av overflateruhet på en profil, ved forskjellige relative luftstrømhastigheter. Som det framkommer av figuren vil overflater med lavere overflateruhet ha lavere friksjonsmotstand.

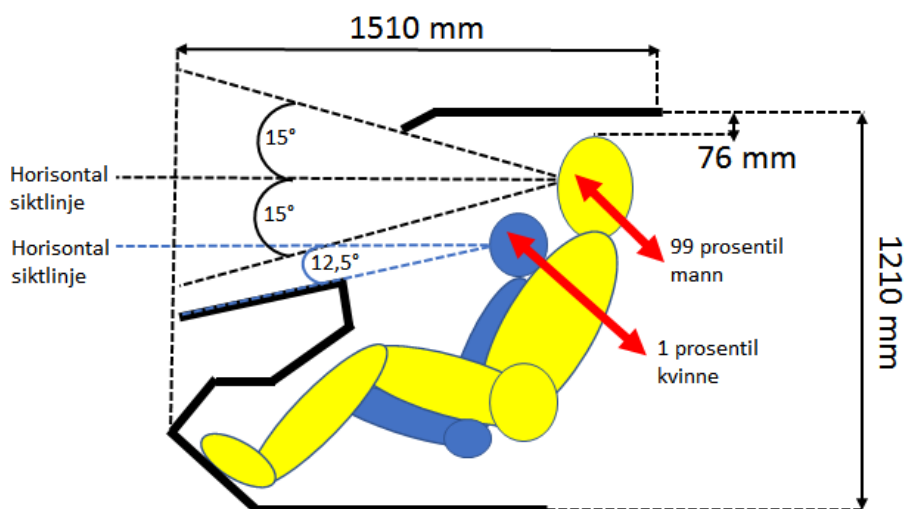
## 4.2 Antropometri

Antropometri er læren om måling av menneskekroppen. Antropometriske mål vil da følgelig være mål på menneskekroppens proporsjoner. Når det skal utvikles løsninger der det skal forekomme en interaksjon mellom mennesker og løsningen, er antropometriske mål noe som man burde, og i mange tilfeller noe man må ta hensyn til. Chassisløsningen som utvikles i denne oppgaven er ikke noe unntak, da den skal kunne huse og brukes av en person. Løsningen må derfor være tilpasset etter antropometriske mål, og følgende må tas hensyn til:

- Løsningen må ha et tilstrekkelig stort innvendig volum, slik at:
  - En person kan huses komfortabelt.
  - En person kan operere anordningen komfortabelt .
- Løsningen må ha tilstrekkelig utsiktsmuligheter.
- Løsningen må ha tilstrekkelige inngangs og utgangsmuligheter.
- Løsningen må være tilstrekkelig sterk, slik at den kan bære designvekten.

Antropometriske mål varierer ofte mye i en populasjon. Det medfører at det i praksis vil være nærmest umulig å designe en løsning slik at den er perfekt tilpasset til hver enkelt person i populasjonen, og at dersom løsningen skal kunne brukes av flest mulige personer i populasjonen, vil det noen ganger være nødvendig å ekskludere ekstremene (for eksempel på grunn av sikkerhet). Vanlig praksis er derfor å sette en øvre og nedre grense for minste og største menneskelige mål løsningen skal være tilpasset til, som da vil si at løsningen skal kunne benyttes av alle de individene i populasjonen som er inkludert i og som ligger innenfor disse grensene. I en normalfordelt populasjon opereres det ofte med prosentiler, disse angir den prosentvise andelen av

populasjonen som ligger over (>50% prosentil) eller under (<50% prosentil) det gitte prosentilet. Dreyfuss anbefaler å designe med hensyn på 1 og 99 prosentilene, som vil si at 98% av populasjon er dekket [39]. Bildet og tabellen under gjør rede for nødvendige antropometriske data for å kunne designe chassisløsningen:

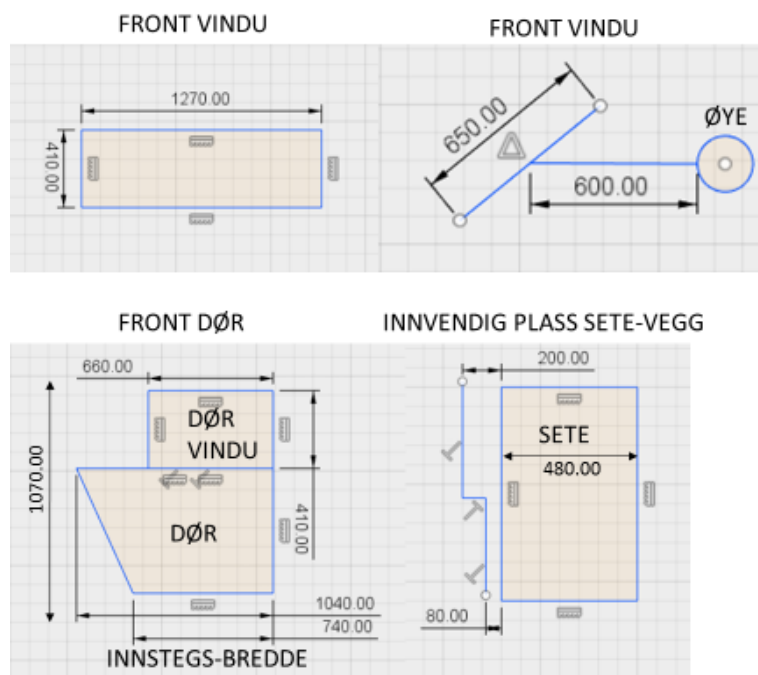


Figur 20: Mål for hvor stort areal en kabin minst må ha for at en 99 prosentil mann skal kunne sitte komfortabelt, samt hvor stor utsikten må være for at en 99 prosentil mann og en 1 prosentil kvinne skal kunne ha optimal utsikt ut av kabinen [39].

Tabell 19: Designverdier for en 99 prosentil mann, og for en nødutgang på fly [39].

Måleparameter	Designverdi
Vekt 99 prosentil mann	111,2 kg
Høyde 99 prosentil mann	1920 mm
Skulderbrede 99 prosentil mann	523 mm
Minste bredde nødutgang fly	560 mm
Foretrukket bredde nødutgang fly	610 mm
Minste høyde nødutgang fly	790 mm
Foretrukket høyde nødutgang fly	815 mm

I tillegg til målene fra Dreyfuss, er det blitt tatt mål på diverse relevante parametere på en BMW E90 (mellomklasse sedan). Bilen har meget behagelige siktforhold, inn og utgangs ergonomi og hva undertegnede oppfatter som tilstrekkelig innvendig plass.



Figur 21: Diverse relevante mål fra en BMW E90.

## 4.3 Konstruksjonsteknologi for aerodyner

Delkapittelet tar for seg forskjellige konstruksjonsmetoder og prinsipper for skrog og strukturelle elementer til aerodyner, samt en kort innføring i terminologi for forskjellige strukturelle elementer som brukes i slike konstruksjoner.

### 4.3.1 Terminologi for strukturelle elementer

Terminologien som brukes til å beskrive forskjellige strukturelle elementer er noe uklar, ettersom forskjellige uttrykk ofte benyttes for å betegne elementer som har en tilsvarende funksjon. Under vil noen av de vanlige begrepene for strukturelle elementer og deres funksjon bli gjort rede for.

#### Horisontale, langsgående strukturelle elementer:

Langsgående strukturelle elementene blir som regel betegnet longerons og stringers. Longerons skiller seg fra stringers ved at de typisk er tykkere og kraftigere enn stringers, og at de som regel har opplagringspunkter på minst to vertikale rammeelementer. Longerons har primært til oppgave å oppta bøyepeningen som påføres konstruksjonen, og å holde de vertikale rammeelementene i posisjon. Stringers er ofte mer tallrike enn longerons og bærer som regel en mindre andel av den strukturelle belastning. Stringers blir primært brukt til å holde vertikale rammeelementer i posisjon og for å danne opplagringspunkter for, samt hjelpe til med stive opp skallplater [40], [41].

#### Vertikale, tverrgående og diagonale strukturelle elementer:

Det benyttes mange forskjellige betegnelser for de vertikale, tverrgående og diagonale elementene, men disse kan generelt deles inn i to kategorier; web members og rammeelementer. Web members har en tilsvarende funksjon og utforming som stringers, med den forskjellen er at orienteringen til elementene enten er vertikal eller diagonal istedenfor langsgående. Rammeelementene går under flere forskjellige betegnelser; bulkheads, frame assemblies, rings og formers er noen av disse. Felles for disse er at de har som funksjon å være formgivende elementer, avsviende elementer og å være opplagringspunkter for langsgående elementer

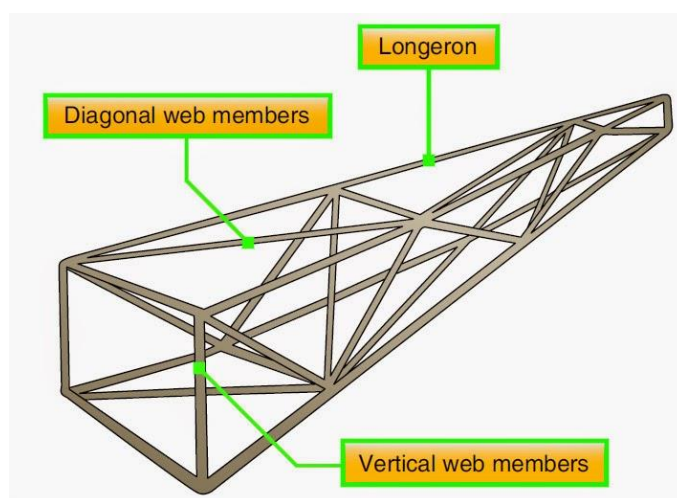
og skallplater. Vertikale rammer plasseres ofte ved gitte intervaller og på de stedene hvor det den strukturelle belastningen er stor. Betegnelsen bulkheads brukes både for å beskrive elementer som har en avgrensende funksjon, men også til å beskrive rammelementer som er av kraftigere konstruksjon, typisk plassert ved punkter der konstruksjonen angripes av store belastninger og/eller konsentrerte krefter [40], [41].

### 4.3.2 Fagverkskonstruksjoner

Fagverkskonstruksjonsprinsippet for aerodyn skrog er et konstruksjonsprinsipp, der en fagverkskonstruksjon bærer hele eller tilnærmet hele den strukturelle belastningen som konstruksjonen utsettes for. Skrogkonstruksjoner av denne typen har vanligvis også en kledning utenpå fagverket. Denne er hovedsakelig til for å bedre skrogkonstruksjonens aerodynamiske egenskaper og for å beskytte og isolere et volum på innsiden av fagverket mot ytre påvirkninger, og er ikke ment å være en bidragende del av den bærende strukturen. Fagverket er som regel bestående av strukturelle elementer som rør, stag og bjelker typisk utført i enten stål eller aluminiumslegeringer, og sammenføyd ved sveising og/eller liming. Konstruksjonsprinsippet var mye anvendt fram til mellomkrigstiden, men brukes i svært lite grad i dag med unntak i noen små og lette fly og helikoptre. I tabellen under er noen av fordelene og ulempene med konstruksjonsmetoden oppgitt [40], [41]:

Tabell 20: Fordeler og ulemper med fagverkskonstruksjoner [40], [41].

Fordeler	Ulemper
Gunstig styrke/vekt forhold og høy konstruksjonsstivhet.	Noe begrensede formgivningsmuligheter.
Enkelhet i produksjon; egner seg blant annet for småskala produksjon.	Dårlige aerodynamiske egenskaper på grunn av begrensede formgivningsmuligheter.
Enkelhet i vedlikehold.	Dårlig innvendig plassutnyttelse på grunn av begrensede formgivningsmuligheter og strukturelle elementer.
Sikkerhet; liten fare for strukturell kollaps ved begrenset skade, ettersom belastning er fordelt over flere elementer.	Kan være vanskelig å oppnå nøyaktige toleranser på grunn av at nøyaktigheten i geometrien til konstruksjonen avhenger av mange individuelle elementer og nøyaktigheten i sammenføyningen mellom disse.



Figur 22: Haleparti bygget med fagverkskonstruksjonsprinsippet, her uten kledning [42].

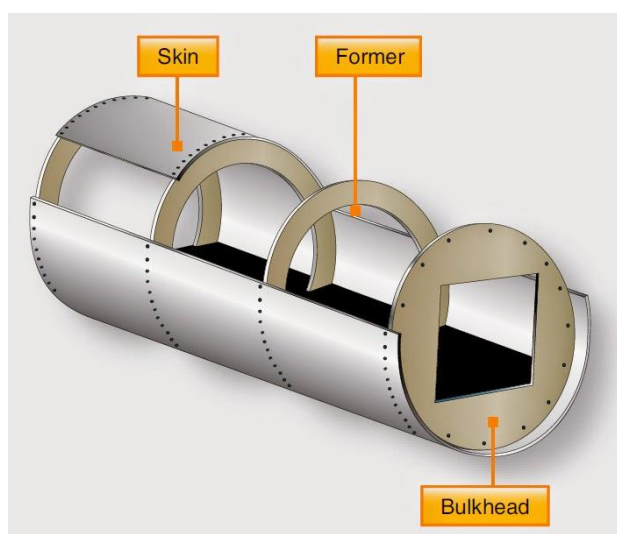


### 4.3.3 Skallkonstruksjoner

Skallkonstruksjonsprinsippet for aerodyn skrog også referert til som monocoque (oversatt; single shell) er et konstruksjonsprinsipp, der et strukturelt skall bærer hele eller tilnærmet hele den strukturelle belastningen som konstruksjonen utsettes for. Skrogkonstruksjoner av denne typen har som regel svært lite internt rammeverk, som da bergenser seg til å kun ha formgivende, sammenbindende og/eller avgrensende (formers og bulkheads) funksjoner. Det kan i tilfeller plasseres inn forsterkende elementer der konstruksjonen angripes av konsentrerte krefter, men klassifisering av konstruksjonstypen blir da noe uklar, ettersom den da i prinsipp også vil kunne betraktes som en forsterket skallkonstruksjon. Rene skallkonstruksjoner benyttes i liten grad i skrog til aerodyner, men kan ofte utgjøre en viss porsjon av en skrogkonstruksjon. I tabellen under er noen av fordelene og ulempene med konstruksjonsmetoden oppgitt [40], [41]:

Tabell 21: Fordeler og ulemper med rene skallkonstruksjoner [40], [41].

Fordeler	Ulemper
Godt styrke/vekt forhold på små og korte konstruksjoner.	Styrke/vekt forhold skaleres dårlig, da spesielt dersom konstruksjon forstørres i lengderetning, skall dårlig på å oppta bøyespenning.
Meget god plassutnyttelse innvendig i skallet.	Lav konstruksjonsstivhet for langstrakte konstruksjoner.
Bærende material plassert langt fra senterakse, gir høyt annet arealmoment.	Krever som oftest en kostbar rigg for presis konstruksjon, egner seg derfor kun for masseproduksjon.
Gode formgivningsmuligheter, medfører potensiale for gode aerodynamiske egenskaper.	Sikkerhet; stor fare for strukturell kollaps dersom lokal deformasjon i skallet forekommer.



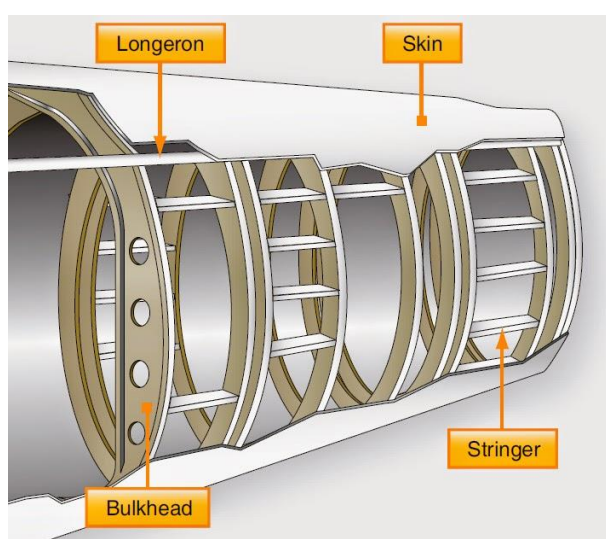
Figur 23: Skrogseksjon konstruert etter monocoque prinsippet [42].

## 4.3.4 Forsterkede skallkonstruksjoner

Forsterket skallkonstruksjonsprinsippet for aerodyn skrog også betegnet som semi-monocoque er et konstruksjonsprinsipp, der et strukturelt skall og et rammeverk deler på å bære den strukturelle belastningen som konstruksjonen utsettes for. Andelen av den strukturelle belastningen som bæres av enten skallet eller rammeverket vil variere fra konstruksjon til konstruksjon, men det er vanlig at bøyepeningen primært bæres av rammeverket. Rammeverket er ofte sammensatt av formgivende, sammenbindende og avgrensende (formers og bulkheads) elementer som i en ren skallkonstruksjon, men det vil som regel også være langsgående avstivende elementer som longerons, stringers og web members. Forsterket skallkonstruksjonsprinsippet er den mest anvendte konstruksjonsmetoden for aerodyn skrog. I tabellen under er noen av fordelene og ulempene med konstruksjonsmetoden oppgitt [40], [41]:

Tabell 22: Fordeler og ulemper med forsterkede skallkonstruksjoner [40], [41].

Fordeler	Ulemper
Gunstig styrke/vekt forhold for store og små konstruksjoner, hele konstruksjonen har bærende funksjon, ikke «bortkastet» vekt.	Krever som oftest en kostbar rigg for presis konstruksjon, egner seg derfor best for masseproduksjon.
Høy konstruksjonsstivhet i forhold til rene skallkonstruksjoner.	
Spenningsfordeling mellom ramme og skall; medfører gjennomsnittlig lavere spenningsnivå i konstruksjonen per vektenhet i forhold til fagverk og rene skallkonstruksjoner.	
God plassutnyttelse innvendig i skallet.	
Relativt mye bærende material plassert langt fra senterakse, gir høyt annet arealmoment.	
Gode formgivningsmuligheter, medfører potensiale for gode aerodynamiske egenskaper.	
Sikkerhet; liten fare for strukturell kollaps ved lokal skade, ettersom belastning er fordelt over flere elementer og mellom ramme og skall.	



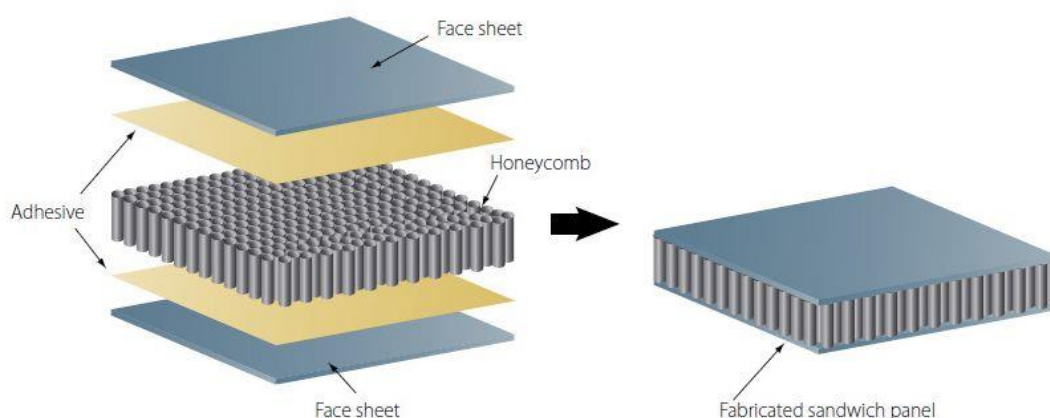
Figur 24: Skrogseksjon konstruert etter semi-monocoque prinsippet [42].

## 4.3.5 Sandwich strukturer

Sandwich strukturer er strukturer bestående av tre lag materiale bundet sammen; et kjernemateriale med to ytterplater bundet til kjernematerialet på hver sin side. Ytterplatene er som regel relativt tynne plater med høy stivhet, og er ofte utført i enten metall eller et komposittmateriale. Kjernematerialet er som regel et relativt tykt, men lett materiale med moderat stivhet, og kan enten være et solid materiale eller en struktur (for eksempel er struktur med heksagonale celler (meget gunstig styrke/vekt forhold) mye anvendt i luftfartsindustrien). Sandwich elementer har høyere bøyestyrke og bøyestivhet sammenliknet med solide elementer med ekvivalent vekt. Dette er fordi en betydelig andel av det bærende materialet (ytterplatene) er plassert i en større avstand fra elementets tyngdepunkt, noe som medfører et høyere annet arealmoment, samtidig som en volumøkning av det lette kjernematerialet ikke medfører en betydelig vektøkning (illustrert i figur 26). Dette gjør at sandwich elementer egner seg godt i applikasjoner der et element skal utsettes for bøyepåkjenning. Spenningsfordelingen i tverrsnittet ved bøyepåkjenning vil være slik at bøyepåkjenningen er null i tyngdepunktsaksen og økende utover i tverrsnittet, og vil ha maksimalverdier i ytterpunktene. Ytterplatene vil da primært oppta bøyepåkjenningene, mens kjernematerialet vil oppta skjærkrefter. Dersom kjernematerialet har en lavere elastisitetsmodul enn ytterplatene (som oftest er dette tilfellet), vil spenningsfordelingen i en bøyepåkjent situasjon bli slik at ytterplatene opptar en enda større andel av bøyepåkjenning. Dette er fordi spenningen som opptrer i et gitt snitt er produktet av materialets elastisitetsmodul og forlengelsen til materialet i dette snittet (dette er illustrert i figur 28). I tabellen under er noen av fordelene og ulempene med sandwich strukturer oppgitt [40], [41]:

Tabell 23: Fordeler og ulemper med sandwich strukturer [40], [41].

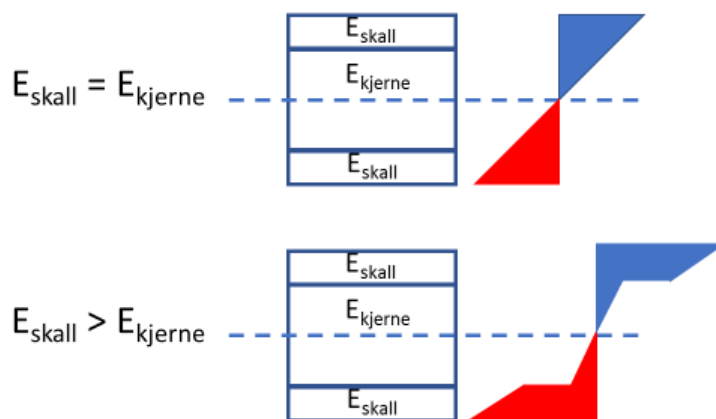
Fordeler	Ulemper
Høy bøyestyrke i forhold til vekt.	Kostbart å produsere.
Høy bøyestivhet i forhold til vekt.	Utfordrende å produsere komplekse former; spesielt der kjernematerialet er en struktur og ikke solid.



Figur 25: Oppbygging til et panel med sandwich struktur, her med honeycomb (heksagonale celler) kjernestruktur [43].

	Solid Material	Core Thickness $t$	Core Thickness $3t$
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

Figur 26: Økingen i bøyestivhet, strekkfasthet ved bøyepåkjenning og vekt ved forskjellige kjernematerialtykkelser med den samme tykkelsen på ytterplatene [44].



Figur 27: Bøyespenningsfordeling over tverrsnittet i en sandwich struktur dersom elastisitetsmodulen til ytterplatene og kjernen er lik, og dersom elastisitetsmodulen til ytterplatene er større enn kjernen [28].

## 5 SPESIFISERING AV LØSNINGEN

Kapittel 5 omhandler utarbeiding av krav og spesifikasjoner som løsningen skal tilfredsstillere. Det vil først bli utført en rangering av løsningens egenskaper, slik at det framkommer hvilke hensyn og vurderinger som skal vektlegges videre i utviklingen av løsningen. Deretter vil det bli utarbeidet en kravspesifikasjon for løsningen.

### 5.1 Rangering av egenskaper

Forskjellige egenskaper ved løsningen er blitt delt inn i 5 hovedkategorier, disse er deretter blitt rangert etter kategoriens viktighet. Videre er hovedkategoriene inndelt i forskjellige underkategorier med tilhørende vurderingshensyn for underkategoriene.

Tabell 24: Rangering av egenskaper for løsningen.

Rangering	Hovedkategori	Underkategori	Noen vurderingshensyn
1	Funksjonalitet og sikkerhet	Antropometri	Nødvendig innvendig volum
			Utsiktsmuligheter
			Inn og utgangsmuligheter
		Vekt	Egenvekt
			Komponenter og systemer
			Nyttelast
		Sikkerhet	Nødvendig styrke ift. påkjenninger
			Nødvendig stivhet ift. påkjenninger
		Stabilitet	Tyngdepunkts plassering
		Plattform tilpasning	Plass/feste til komponenter og systemer
Feste til løftemodul			
2	Produksjonsteknikk	Konstruksjonsprinsipper	Kompleksitet, gjennomførbarhet, styrke, styrke/vekt forhold, stivhet, levetid, miljøpåkjenninger, osv.
		Produksjonsmetoder	
		Elementutforming	
		Sammenføyninger	
		Materialvalg	
		Overflatebehandling	
3	Aerodynamiske egenskaper	Formgivning	
		Overganger mellom ytre klednings elementer	
		Overflatebehandling	
4	Miljøhensyn	Materialvalg	
		Produksjonsmetoder	
		Produksjonssted og transport	
5	Estetikk	Utforming	
		Overganger	
		Kledning	
		Overflatebehandling	

### 5.2 Kravspesifikasjon

Delkapittelet omhandler utarbeidingen av en kravspesifikasjon for løsningen. Utover de absolutte kravene som løsningen skal tilfredsstillere, er det også gitt noen anbefalinger og vurderingshensyn som er viktige å ta hensyn til videre i utviklingsprosessen. Kravspesifikasjonen er gitt i tabellform i siste delkapittel (5.2.4).

## 5.2.1 Antropometriske krav

Det skal i dette delkapittelet utarbeides en kravspesifikasjon, slik at løsningen tilfredsstillende de antropometriske hensynene beskrevet i utredningen i kapittel 4.2. Informasjonen som er brukt til å utarbeide kravspesifikasjonen er den gitt i kapittel 4.2. Utover kravspesifikasjonen som løsningen minimum skal tilfredsstillende, vil det bli gitt en del retningslinjer og vurderingshensyn som er viktige for videre utvikling av løsningen. Det er besluttet på grunnlag av anbefalingen i Dreyfuss at utformingen av løsningen skal tilpasses 1 og 99 prosentilene [39].

### Innvendig volum i løsningen:

#### Krav fra kapittel 4.2:

*“Løsningen må ha et tilstrekkelig stort innvendig volum, slik at en person kan huses, og operere anordningen komfortabelt”*

Her vil de antropometriske målene til en 99 prosentil mann være dimensjonerende. Ut ifra figur 20 kan vi se at kabinen minst må være 1510 mm lang og 1210 mm høy for at en 99 prosentil mann skal kunne sitte komfortabelt. Videre kan man se i tabell 11 at skulderbredden til en 99 prosentil mann er 523mm, dette vil da være minste mulige bredden kabinen kan ha for å huse en 99 prosentil mann. For at løsningen skal kunne opereres komfortabelt av en 99 prosentil mann burde det være en viss klaring på hver side i bredderetningen. Etersom Dreyfuss ikke gir noen retningslinjer på hvor stor denne klaringen burde være, velges det her å basere minimumsspesifikasjonen på målene vist i figur 21, da dette regnes som en komfortabel klaring av undertegnede. Minimumsbredde settes dermed til 700 mm.

*Tabell 25: Minimumsverdier for innvendig volum.*

Parameter	Minimumsverdi [mm]
Lengde	1510
Høyde	1210
Bredde	700

### Utsiktsforhold:

#### Krav fra kapittel 4.2:

*“Løsningen må ha tilstrekkelig utsiktsmuligheter”*

Som det framkommer av figur 20 burde operatøren av løsningen minimum ha 15 graders fri utsikt oppover og nedover fra øyets nøytralakse i framovergående retning. Dette er for at operatøren skal kunne få med seg nødvendig informasjon når løsningen benyttes på veibane. Nødvendig størrelse på utsiktsflaten vil da avhenge av distansen som operatøren er plassert fra flaten, samt hvilken høyde operatørens øyes nøytralakse er plassert i, noe som betyr at både 1 (damer) og 99 (menn) prosentilene må tas hensyn til. Videre burde det være tilstrekkelige utsiktsmuligheter sideveis, slik at det er mulig å se eventuelle kjøretøy og hindringer som befinner seg på sidene av løsningen. Det burde også være utsiktsmuligheter bakover slik at det er mulig for operatøren å se andre kjøretøy som befinner seg bak løsningen, samt slik at operatøren skal kunne ha tilstrekkelig utsyn ved reversering av kjøreretning. For flyveanordninger som tar av og lander vertikal vil det være en fordel med større enn 15 graders fri utsikt nedover, slik at operatøren får en bedre oversikt over hva som befinner seg under løsningen, samt en bedre oversikt over løsnings relative bevegelse i forhold til bakken.

## Inn og utgangs muligheter:

### Krav fra kapittel 4.2:

*“Løsningen må ha tilstrekkelige inngangs og utgangsmuligheter”*

Minimumsdimensjoner for en utgang på en flyveanordning framkommer av tabell 11. Dersom disse minimumsdimensjonene skulle vært brukt som spesifikasjon for løsningen ville inn og utgangs fra løsningen blitt klønete og lite komfortabelt for en 99 prosentil mann. Dreyfuss anbefaler at dersom en person komfortabelt skal kunne bevege seg inn og ut av en åpning fra en lavt sittende posisjon, burde åpningen ha en klaring på minst 140 mm på hver side av det bredeste snittet til personen som skal benytte den. Det er valgt å sette denne anbefalingen som krav til minimumsbredde for åpningen for løsningen. Ettersom Dreyfuss ikke gir noen retningslinjer på hvor høy åpningen burde være, velges det her å basere minimumsspesifikasjonen på målene vist i figur 21, da dette regnes som en komfortabel høyde på åpning for inn og utgang av undertegnede. Minimumshøyde av åpningen settes dermed til 1070 mm.

Tabell 26: Minimumsverdier for åpning til inn og utgang.

Parameter	Minimumsverdi [mm]
Høyde	1070 mm
Bredde	800 mm

## Vekt:

### Krav fra kapittel 4.2:

*“Løsningen må være tilstrekkelig sterk, slik at den minst kan bære designvekten”*

Designvekt for en 99 prosentil mann framkommer av tabell 11 (111,2 kg), følgelig må løsningen være dimensjonert slik at den minimum er sterk nok til å kunne bære designvekten.

### 5.2.2 Andre absolutte krav

I dette delkapittelet skal det utarbeides en kravspesifikasjon som inneholder; vektkrav, krav til plattform integrasjon og sikkerhets krav som løsningen skal tilfredsstillte. Kravene vil basere seg på utredninger utført i tidligere og i pågående masteroppgaver, samt relevante standarder. Utover kravspesifikasjonen som løsningen minimum skal tilfredsstillte, vil det også her bli gitt en del retningslinjer og vurderingshensyn som er viktige for videre utvikling av løsningen

## Vektkrav:

Basert på Andres Thømt sin masteroppgave der den nødvendige løftekraften for Dolphin Sky, forutsatt at løsningens totalvekt ville være mindre eller lik 450 kg ble fastsatt, settes dette som totalvektkravet i denne oppgaven [12]. Videre er flere forskjellige systemer og komponenter blitt designet og deres respektive vekt er gitt i tabellen under:

Tabell 27: Kjente vekter på komponenter/systemer.

Komponent	Vekt [Kg]
Multifuel Gassturbin [15]	5,4
Dampsturbin [17]	1,7
	<b>7,1</b>



Det er også flere forskjellige systemer og komponenter som skal brukes i Dolphin Sky, men som fortsatt ikke er utviklet eller som er under utvikling og derav er ikke deres respektive vekter kartlagt enda. I tabellen under er disse med sine estimerte vekter oppgitt:

Tabell 28: Komponenter/systemer der vekten fortsatt ikke er kartlagt, med deres estimerte vekter.

\*(antagelser gjort om komponentens/systemets vekt, beskrevet under tabellen).

Komponent	Antatt vekt [Kg]
Varmeveksler	2,5
Løftemodul*	100
Interiør**	50
Batteripakke***	25
Øvrig****	10
Drivstoff	40
	<b>227,5</b>

\*): For løftemodulen er det blitt gjort en antagelse om at det skal være innfestet totalt 8 elektriske motorer, der hver motor veier mindre enn 10 kg, og at resterende struktur og thrustere ikke veier mer enn 20 kg i sin helhet.

\*\*): Det er blitt gjort en antagelse om at det skal benyttes lettvekts materialer i interiørløsningen, og at den dermed ikke vil veie mer enn 50 kg.

\*\*\*): Her er det gjort en antagelse om at kraftleveransen i flymodus primært kommer fra gassturbinen, og at det derfor kun må bæres en liten batteripakke på 25 kg av sikkerhetsmessige grunner.

\*\*\*\*): Det er gjort en antagelse om at totalvekten på det eventuelle øvrige materiellet (for eksempel kabler), ikke vil veie mer enn 10 kg.

Gitt de fastslåtte og anslåtte vektene i tabell 19 og 20, samt designvekten til en 99 prosentil mann, vil den øvre grensen for hva chassisløsningen kan veie være 104,2 kg. Det settes dermed et krav om at chassisløsnings totale vekt skal være mindre eller lik 100 kg. Det er viktig å påpeke at det i denne beregningen ikke er gitt rom for å kunne ta med eventuell nyttelast (utover en 99 prosentil mann). Dersom dette skal være mulig vil det med stor sannsynlighet være nødvendig å øke løftkraften. Det er også verdt å påpeke at flere av vekt anslagene muligens er noe lave, som da også vil medføre at løftkraften må økes.

### Plattform integrasjon:

Det skal være mulig å montere og demontere løftemodulen til/fra chassisløsningen. Dette medfører at festepunktet (ene) på chassisløsningen må korrespondere med festepunktet (ene) på løftemodulen, og at plasseringen av disse derfor må koordineres med Tarek, som holder på å utvikle løftemodulen.

### Konstruksjonssikkerhet:

Chassisløsningen må være dimensjonert slik at den tåler påkjenningene den utsettes for på bakken og i luften, uten at:

- Det oppstår varig deformasjoner i strukturen (tilstrekkelig styrke).
- Det oppstår for store midlertidige deformasjoner i strukturen under belastning (tilstrekkelig stivhet).

For flyveanordninger er standarden å benytte en sikkerhetsfaktor på 1 mot materialflyt og 1,5 mot brudd, mot den største belastningen som anordningen vil uttestes for. Å benytte en såpass lav sikkerhetsfaktor gir store fordeler med tanke på løsnings vekt, men forutsetter at belastninger er meget godt kartlagt, materialkvaliteten kan garanteres å være bedre eller som oppgitt, produksjonen og konstruksjon er tilnærmet feilfri, samt at løsningen gjennomgår omfattende testing for å bevise dugeligheten. På grunn av usikkerhet rundt belastninger, potensielle imperfeksjoner i materialer og det faktum at løsningen ikke vil bli testet er det ønskelig med en viss sikkerhetsfaktor mot materialflyt og brudd. NASA/Goddard Space Flight Center anbefaler følgende sikkerhetsfaktor for strukturer som ikke er blitt testet [45]:

- Sikkerhet mot materialflyt på 2 ( $n_f$ )
- Sikkerhet mot materialbrudd på 2,6 ( $n_b$ )

De anbefalt sikkerhetsfaktorene settes som krav til generell konstruksjonssikkerhet, men kan være gjenstand for endring ved individuelle vurderinger. Videre vil sikkerhet mot for eksempel knekking i elementer bli fastsatt for den individuelle situasjonen, da nødvendig sikkerhetsfaktor avhenger av hvilken dimensjoneringsmetode som benyttes.

Strukturen vil bli belastet med følgende laster i luften:

- Luftmotstand (fartsvind, vindkast)
- Løftekraft
- Tyngdekrefter

Strukturen vil bli belastet med følgende laster på bakken:

- Luftmotstand (vindkast)
- Tyngdekrefter

Det ble fastslått av Thømt (gitt at totalvekten på løsningen var 450 kg) at den totale løftekraften minst måtte være 6180 N, og at den maksimale totale løftekraften burde være 8800 N, der løftekraften er likt fordelt på 4 thrusterne, og igjen fordelt likt på to propeller i hver thruster [12]. Det vil bli tatt utgangspunkt i den anbefalte verdien for maksimal løftekraft for dimensjonering av løsningen. Videre vil luftmotstandskreftenes og tyngdekreftenes omfang, plassering og fordeling i strukturen være avhengig av utformingen på løsningen. Det vil i et senere kapittel der løsningens utforming er fastsatt bli foretatt en vurdering på hvilke krefter det må tas hensyn til, og deretter bli utarbeidet forskjellige belastningstilfeller løsningen skal dimensjoneres mot, slik at løsningen tilfredsstiller dimensjoneringskriteriene.

### Størrelse:

Det settes som krav at løsningen skal tilfredsstille størrelseskravene i EU-direktivet 93/93/EØF for typegodkjenning av to og trehjuls motoriserte kjøretøy. Utredning av disse kravene er utført av Jan Fredrik Aasheim sin masteroppgave [5], og er følgende:

Tabell 29: Maksimale ytre dimensjoner for løsningen.

Parameter	Verdi [mm]
Lengde	$\leq 4000$
Bredde	$\leq 2000$
Høyde	$\leq 2500$

## 5.2.3 Øvrige krav og anbefalinger

I dette delkapittelet er det gitt noen anbefalinger og vurderingshensyn som er viktige å ta hensyn til videre i utviklingsprosessen.

### Stabilitet:

Det vil ikke bli satt spesifikke krav til chassisløsningens tyngdepunkt plassering, men det vil være ønskelig at tyngdepunktet i utgangspunktet er plassert følgende:

- I senter av løsningens x-akse.
- I senter av løsningens y-akse.
- Lavest mulig på løsningens z-akse.

Denne plassering vil være den mest gunstige med tanke på stabilitet for både flymodus og eventuell kjøremodus (i luften og på bakken), uavhengig av om løftemodulen plasseres på toppen eller i bunn. Det vil også være en ide å vurdere tyngdepunkt plasseringen til kabinen i sin helhet, det vil si at vekten av diverse komponenter, samt førerens plassering i kabinen tas hensyn til i utformingen av chassiset, slik at tyngdepunkt plasseringen blir optimal.

### Beskyttelse mot miljøpåkjenninger:

Dersom det i konstruksjonen skal benyttes materialer som kan korrodere, burde faren for at korrosjon kan oppstå i disse bli vurdert, og materialene burde beskyttes slik at det er usannsynlig at korrosjon kan oppstå. Videre burde ikke konstruksjonsutformingen være slik at den fører til ansamlinger av fuktighet, vann eller andre korrosive væsker.

## 5.2.4 Oppsummering av krav

Under følger en tabell med en oppsummering av kravene til løsningen:

Tabell 30: Kravspesifikasjon for chassisløsningen.

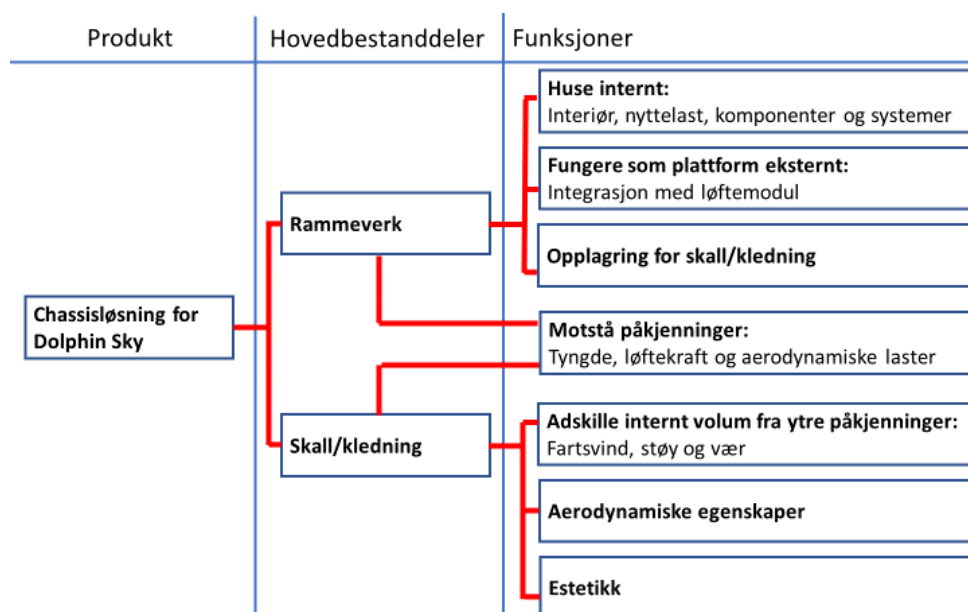
Kravet gjelder for	Parameter	Minimumsverdi	Maksimumsverdi
Løsningens ytre dimensjoner	Lengde [mm]	-	4000
	Bredde [mm]	-	2000
	Høyde [mm]	-	2500
Løsningens indre dimensjoner	Lengde [mm]	1510	-
	Bredde [mm]	700	-
	Høyde [mm]	1210	-
Åpning for inn og utgang	Bredde [mm]	800	-
	Høyde [mm]	1070	-
Egenvekt	Vekt [kg]	-	100
Konstruksjonssikkerhet, $n_f$	Sikkerhetsfaktor	2	-
Konstruksjonssikkerhet, $n_b$	Sikkerhetsfaktor	2,6	-

## 6 LØSNINGSALTERNATIVER

Kapittel 6 omhandler utarbeiding av løsningsalternativer for konstruksjonen. Det er først blitt utført en enkel funksjonsanalyse av konstruksjonen, der konstruksjonen er blitt dekomponert i hovedbestanddeler med deres tilhørende hovedfunksjoner. Det er deretter blitt utarbeidet og framlagt løsningsalternativer med respektive fordeler og ulemper, for de forskjellige løsningsvalgene som skal fattes i neste kapittel.

### 6.1 Funksjonsanalyse

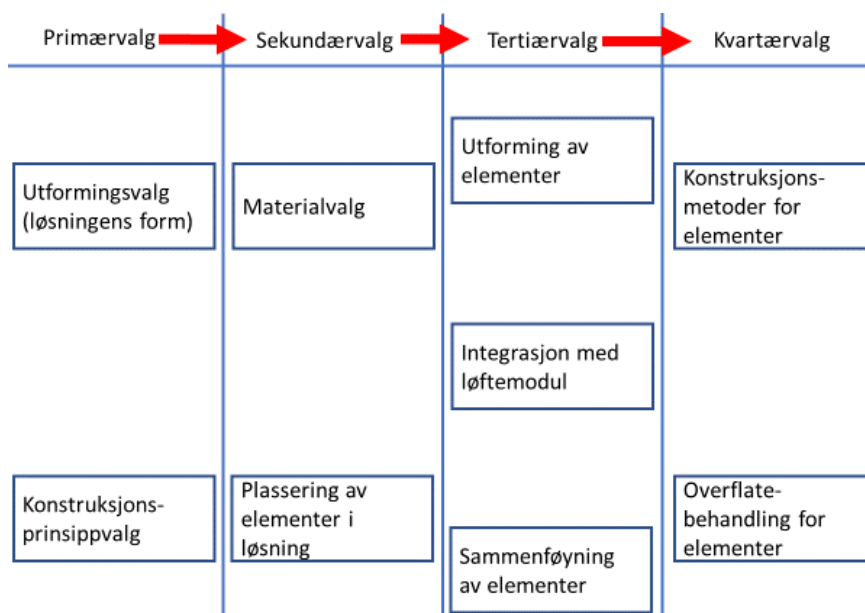
Hensikten med å utføre funksjonsanalysen er å kartlegge de forskjellige løsningsvalgene som må fattes, samt for å bedre kunne bestemme passende seleksjonskriterier for de forskjellige løsningsalternativene. Det er i funksjonsanalysen blitt gjort en antagelse om at skall/kledning vil være en av bestanddelene til den ferdige løsningen, og at skallet/kledningen vil ha en bidragende funksjon i å bære påkjenningene på løsningen. Om dette vil være tilfellet eller ikke er avhengig av hvilket konstruksjonsprinsipp som velges for løsningen.



Figur 28: Funksjonsanalyse for løsningen; løsningen er dekomponert i hovedbestanddeler med tilhørende hovedfunksjoner.

### 6.2 Alternativer for løsningen

Ut ifra funksjonsanalysen er det blitt kartlagt hvilke løsningsvalg som er nødvendig å fatte for løsningen, disse er vist i figur 29. Løsningsvalgene er delt inn i fire forskjellige nivåer, etter rekkefølgen det antatt at valgene burde fattes i. På dette tidspunktet i oppgaven vil det ikke være mulig å foreta løsningsvalg utover sekundærnivået (og da kun materialvalg), dette er fordi det vil være nødvendig å kartlegge belastningssituasjonen bedre før videre valg kan fattes. Løsningsalternativene for primærvalgene vil være på et relativt generelt nivå, dette er fordi den spesifikke utformingen av konstruksjonen vil være avhengig av valgene som gjøres på de senere nivåene. Løsningsalternativene for sekundærvalgene vil også være noe generelle, da det er nødvendig å kartlegge belastningssituasjonen bedre og fordi de vil avhenge av tertiærvalgene. De ulike løsningsalternativene for hvert av løsningsvalgene i primær og sekundærnivået presenteres i hvert sitt underkapittel.

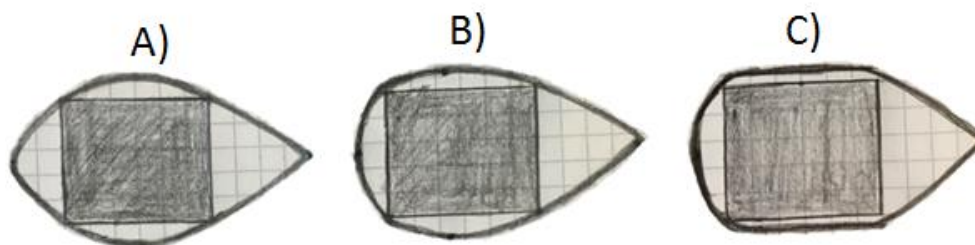


Figur 29: Oversikt over løsningsvalg som må fattes, med antatt rekkefølge.

## 6.2.1 Utformingsalternativer

Under er fem utformingsalternativer med variasjoner av alternativet for løsningen gitt. Den skravert boksen i midten av alternativene representerer det arealet som skal til for å huse en 99 prosentil mann (Merk at; arealet ikke behøver å være et rektangel og at det derfor ikke nødvendigvis gir et helt nøyaktig bilde av plassutnyttelsen for hvert alternativ).

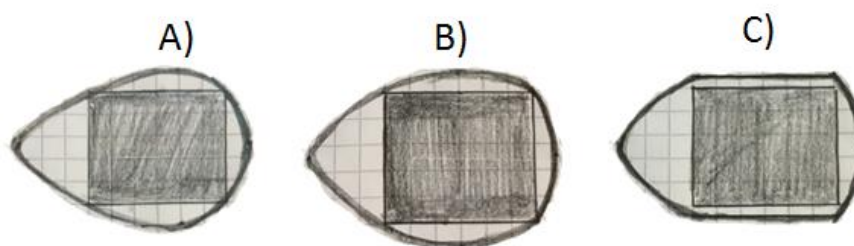
### Utformingsalternativ nummer 1: Dobbeltsymmetrisk dråpeform



Figur 30: Variasjoner av utformingsalternativ nummer 1.

Utformingsalternativet er dråpeformet i både høyde og bredderetningen. Referanse fartsretningen er bevegelse fra høyre til venstre. En av fordelene med dette utformingsalternativet er gode aerodynamiske egenskaper (luftmotstandskoeffisient for ideell dråpeform er 0,05). Ulemper med dette utformingsalternativet, da spesielt variasjon A og B er plassutnyttelsen i forhold til størrelsen (da spesielt i lengderetningen), og muligheter for integrasjon med andre Dolphin Sky moduler. Ulempene i forhold til plattformintegrasjon er mindre for alternativ C, men her vil de aerodynamiske egenskapene ikke være like gode på grunn av de krappe overgangene rundt den skraverte boksen.

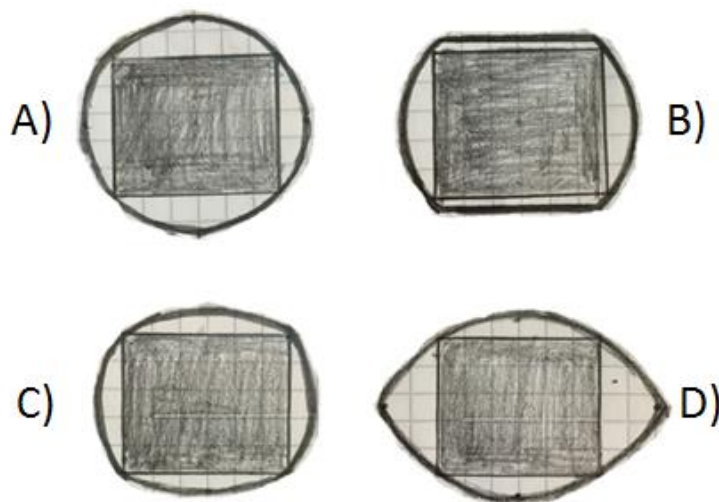
## Utformingsalternativ nummer 2: Dobbelt symmetrisk omvendt dråpeform



Figur 31: Variasjoner av utformingsalternativ nummer 2.

Utformingsalternativet er dråpeformet i både høyde og bredderetningen, men vendt motsatt vei i forhold til alternativ 1 (gitt sammen referanse fartsretning som alternativ 1). Utformingsalternativet har middels gode aerodynamiske egenskaper (luftmotstandskoeffisient for ideell dråpeform i tilsvarende orientering som alternativ 2 er omtrent 0,3 - 0,35). Ulemper for dette alternativet er tilsvarende som for alternativ 1.

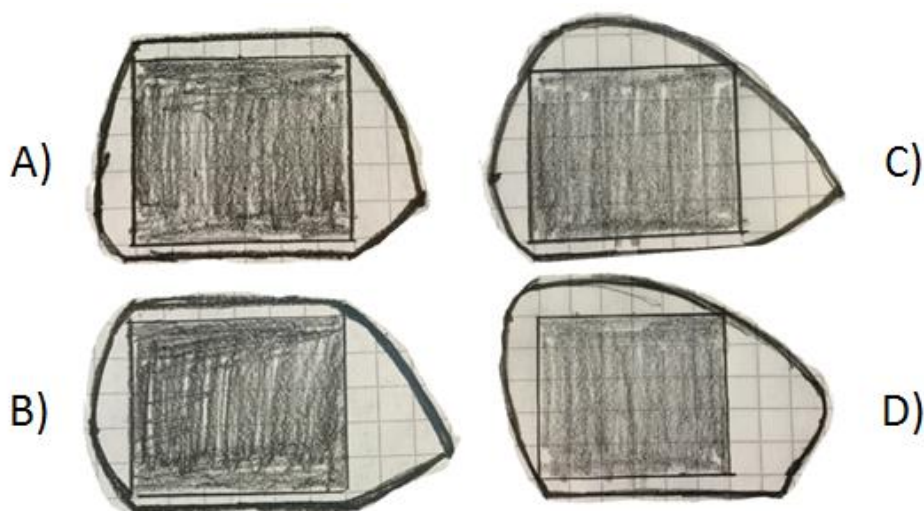
## Utformingsalternativ nummer 3: Sfæriske og elliptiske varianter



Figur 32: Variasjoner av utformingsalternativ nummer 3.

Utformingsalternativet er sfærisk eller elliptisk både i lengde og bredderetningen. Figur 35 viser fire forskjellige variasjoner av alternativ 3. Fordeler med variasjon A, B og C er at de er relativt kompakte i lengderetningen. Utformingsalternativet har de antatt dårligste aerodynamiske egenskapene ut av alle alternativene (luftmotstandskoeffisient for en sfære er omtrent 0,5, for ellipser avhengig av høyde/lengdeforhold, men høyere enn for alternativ 2). Andre ulemper med variasjon A, C og D er plassutnyttelse; for A og C plassutnyttelsen i høyderetning, for D i både høyde og lengderetning. Disse tre variasjonene vil også ha ulempen at de er vanskelige å integrere med andre Dolphin Sky moduler.

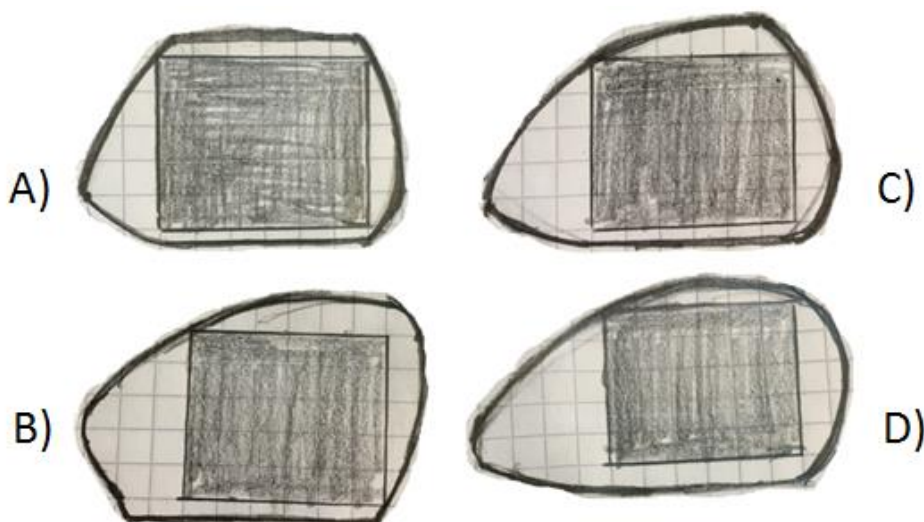
## Utformingsalternativ nummer 4: Ikke symmetrisk dråpeform



Figur 33: Variasjoner av utformingsalternativ nummer 4.

Utformingsalternativet har dråpeform karakteristikk, men er ikke symmetrisk om lengdeaksen. Referanse fartsretning er samme som for alternativ 1 og 2. Utformingsalternativet har relativt gode aerodynamiske egenskaper (ref. dråpeform), men dårligere enn for alternativ 1. Plassutnyttelsen og muligheter for plattform integrasjon vil være bedre enn for alternativ 1, spesielt variasjon A og B, men for disse vil de aerodynamiske egenskapene være noe dårligere.

## Utformingsalternativ nummer 5: Ikke symmetrisk omvendt dråpeform



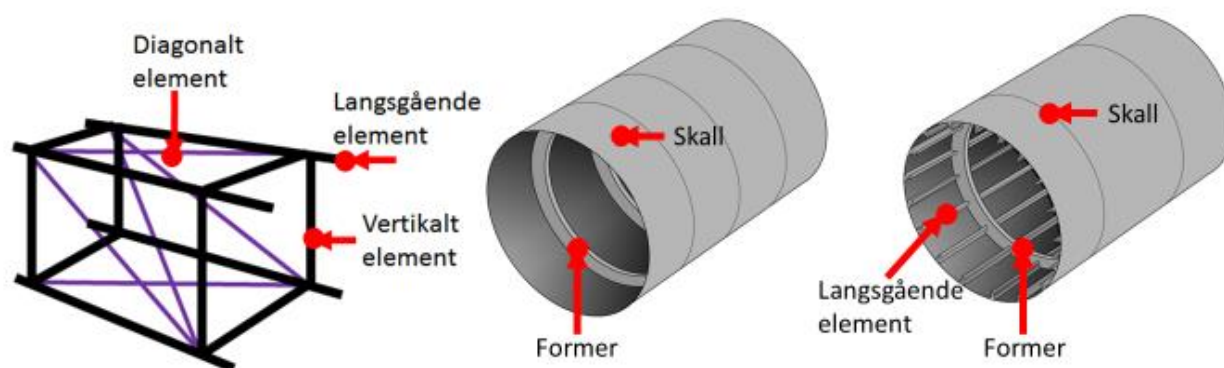
Figur 34: Variasjoner av utformingsalternativ nummer 5.

Utformingsalternativet har omvendt dråpeform karakteristikk, men er ikke symmetrisk om lengdeaksen. Referanse fartsretning er lik som for øvrige alternativer. Utformingsalternativet har middels gode aerodynamiske egenskaper (ref. omvendt dråpeform), men dårligere enn for alternativ 2. Plassutnyttelsen og muligheter for plattform integrasjon vil være svært gode, da spesielt for variasjon A.



## 6.2.2 Konstruksjonsprinsippalternativer

Under er tre konstruksjonsprinsippalternativer for løsningen gitt.



Figur 35: Konstruksjonsprinsippalternativer: TV; fagverkskonstruksjon, M; Skallkonstruksjon [46], TH; Forsterket skallkonstruksjon [46].

Tabellen under gjør rede for noen av fordelene og ulempene ved de forskjellige alternativene (øvrige fordeler og ulemper er gitt i kapittel 4.3):

Tabell 31: Fordeler og ulemper ved forskjellige konstruksjonsprinsipper.

Løsningsalternativ	Fordeler	Ulemper
Fagverkskonstruksjon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativt enkel produksjon og vedlikehold</li> <li>• Liten fare for kollaps</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plassutnyttelse innvendig</li> <li>• Aerodynamiske egenskaper</li> </ul>
Skallkonstruksjon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plassutnyttelse innvendig</li> <li>• Formgivingmuligheter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fare for kollaps</li> <li>• Dyr småskala produksjon</li> </ul>
Forsterket skallkonstruksjon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plassutnyttelse innvendig</li> <li>• Styrke/vekt forhold</li> <li>• Liten fare for kollaps</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dyr småskala produksjon</li> </ul>

## 6.2.3 Innledende vurdering av materialer

Det vil i dette delkapittel bli gjort rede for egenskapene til forskjellige aktuelle konstruksjonsmaterialer, slik at det i neste kapittel kan fattes et tidligvalg av konstruksjonsmateriale for løsningen. Egenskapene som er oppgitt i dette kapittelet vil være generelle materialegenskaper, det vil si at det ikke vil være spesifisert egenskapene til forskjellige legeringer og legeringer av materialet i forskjellige herdetilstander. En detaljert redegjørelse av materialegenskaper og detaljert materialeseleksjon vil bli utført i et senere delkapittel. Materialegenskapene er oppgitt som intervaller, og det vil bli brukt snittverdier av disse intervallene i seleksjonen. Utvalget av materialer som vil bli vurdert er begrenset til materialer som blir benyttet i moderne bil og fly konstruksjoner. Forskjellige materialegenskaper for de aktuelle materialene er oppgitt i tabellene under:



**Merk at;**

- Alle verdiene er hentet fra Ashbys bøker, og er omtrentlige verdier.
- Verdiene er ikke oppdaterte ettersom bøkene er utgitt i henholdsvis 2005 [28] og 2009 [31].

Tabell 32: Materialelegenskaper for aktuelle konstruksjonsmaterialer; densitet, stivhet og styrke [28], [31].

Materiale		$\rho \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$	$E \cdot 10^3 \text{ [MPa]}$	$\sigma_f \text{ [MPa]}$	$\sigma_b \text{ [MPa]}$
Stållegeringer	Høyt karboninnhold	7800 - 7900	200 - 215	400 - 1155	550 - 1640
	Medium karboninnhold		200 - 216	305 - 900	410 - 1200
	Lavt karboninnhold		200 - 215	250 - 395	345 - 580
	Lav legert		201 - 217	400 - 1100	460 - 1200
	Rustfrie	7600 - 8100	189 - 210	170 - 1000	480 - 2240
Aluminiumslegeringer		2500 - 2900	68 - 82	30 - 500	58 - 550
Magnesiumlegeringer		1740 - 1950	42 - 47	70 - 400	185 - 475
Titanlegeringer		4400 - 4800	90 - 120	250 - 1245	300 - 1625
CFRP		1500 - 1600	69 - 150	550 - 1050	550 - 1050

Tabell 33: Materialelegenskaper for aktuelle konstruksjonsmaterialer; miljøfaktorer og robusthet (rangering: A>B>C>D) [28], [31].

Materiale		$E_{\text{prod}} \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} \right]$	$m_{\text{CO}_2} \text{ [Kg]}$	Korrosjons motstand		Slitasje motstand	
				Fersk vann	Salt vann	UV stråling	Mekanisk
Stållegeringer	Høyt karboninnhold	16,4 - 18,2	2,1	B	C	A	A
	Medium karboninnhold	24,3 - 26,9	2,0 - 2,2				
	Lavt karboninnhold	23,4 - 25,8	1,9 - 2,1				
	Lav legert	31,0 - 34,3	1,9 - 2,2				
	Rustfritt	77,2 - 85,3	4,8 - 5,4	A	A	A	B
Aluminiumslegeringer		184 - 203	11,6 - 12,8	A	B	A	C
Magnesiumlegeringer		356 - 394	22,4 - 24,8	A	D	A	C
Titanlegeringer		885 - 945	41,7 - 59,5	A	A	A	C
CFRP		259 - 286	21 - 23	A	A	B	C

Tabell 34: Materialelegenskaper for aktuelle konstruksjonsmaterialer; pris, utmattingsegenskaper og resirkulerbarhet [28], [31].

Materiale		PPM $\left[\frac{\text{USD}}{\text{Kg}}\right]$	$\sigma_d$ [MPa]	Resirkulerbart
Stållegeringer	Høyt karboninnhold	0,3 - 1,1	200 - 700	Ja
	Medium karboninnhold			
	Lavt karboninnhold			
	Lav legert			
	Rustfritt	7,7 - 8,5	175 - 753	
Aluminiumslegeringer		2,5 - 2,8	22 - 160	Ja
Magnesiumlegeringer		4,5 - 5,0	60 - 225	Ja
Titanlegeringer		96,9 - 107,0	589 - 617	Ja
CFRP		40,0 - 44,0	150 - 300	Nei

**Andre materialelegenskaper ved de aktuelle materialene som burde vurderes (formbarhet, sammenføyninger, prosessabilitet og utmatting):**

#### Aluminium:

- Sveising av tynne elementer kan være utfordrende på grunn av det lave smeltepunktet til aluminium.
- Begrenset hvilke legeringer som kan sveises.
- Aluminium har ingen reell utmattingsgrense.
- Gode maskineringssegenskaper.

#### Magnesium:

- Gode maskineringssegenskaper.
- Gode dempningsegenskaper.
- Sveising av tynne elementer er vanskelig.

#### Titan:

- Maskinering av titan er vanskelig og kostbart.
- Titan er vanskelig å støpe.

#### CFRP:

- Elementer formes ved støpning, relativt enkelt å lage komplekse former.
- Maskinering av CFRP er vanskelig.
- Vanskelig å oppdage skader i elementer og reparere skadene.
- Kun stor styrke i fiberretning (er), styrke/vekt forhold svekkes betraktelig dersom elementer er designet for å ha gode styrkeegenskaper i flere forskjellige retninger.

## 6.2.4 Spesifikk vurdering av materialer

Delkapittelet inneholder en redegjørelse av aluminiumslegeringer som er aktuelle å benytte som konstruksjonsmateriale for løsningen. Utvalget er begrenset til legeringer som innehar eller kan oppnå de aller høyeste styrke egenskapene mulig for aluminiumslegeringer. Videre består utvalget av en overvekt av legeringer som er mye anvendt og utbredt i fly og romfartsindustri, da disse antas å være relativt lett tilgjengelig, og fordi det eksisterer relativt store mengder materialdata for disse [47]. Alle legeringene i utvalget er knalegeringer (wrought alloys), da disse (generelt) innehar høyere styrkeegenskaper enn støpelegeringer (cast alloys), og fordi samtlige legeringer med de høyest styrkeegenskaper er knalegeringer [47]. Samtlige legeringer i utvalget er i høystyrkeseriene 2xxx, 7xxx og 8xxx, av de overnevnte grunnene. Forskjellige materialegenskaper for de aktuelle materialene er oppgitt i tabellene under:

Tabell 35: Materialelegenskaper for aktuelle aluminiumslegeringer; densitet, stivhet, styrke, utmattingsegenskaper og hardhet.

Serie AA:	Legeringsbetegnelse	Herdetilstand og behandling	$\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$E \cdot 10^3$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$\sigma_b$ [MPa]	$\sigma_a$ [MPa]	HV
2xxx	2014	T6	2,77 - 2,83	72,0 - 77,0	324 - 440	386 - 490	119 - 133	119 - 133
	2024	T6	2,75 - 2,78	72,0 - 75,7	345 - 381	427 - 472	125 - 147	119 - 150
		T851			386 - 427	434 - 480		
		T36			359 - 397	476 - 526		
2090	T83	2,59 - 2,61	76,0 - 79,9	386 - 483	441 - 531	200 - 220	40 - 126	
7xxx	7050	T7651	2,81 - 2,84	71,0 - 74,6	407 - 490	483 - 552	130 - 150	130 - 150
	7055	T77511	2,85 - 2,91	67,0 - 71,0	541 - 628	567 - 670	312 - 369	166 - 320
	7068	T6511	2,85	73,1	655 - 683	683 - 710	312 - 369	166 - 320
	7075	T6	2,77 - 2,83	69,0 - 76,0	359 - 530	434 - 580	152 - 168	152 - 168
		T6510/1	2,78 - 2,81	72,0 - 75,7	359 - 531	434 - 586	130 - 168	119 - 168
	7150	T77511	2,81 - 2,84	72,0 - 75,7	524 - 579	558 - 617	140 - 165	100 - 160
		T6151				70,0 - 73,6		
7175	T66	2,78 - 2,81	70,0 - 73,6	455 - 524	531 - 593	149 - 169	100 - 166	
8xxx	8090	T851	2,52 - 2,57	80,0 - 84,0	435 - 450	480 - 530	141 - 144	111 - 126
	8091	T6	2,56 - 2,61	77,0 - 81,0	440 - 505	505 - 595	142 - 156	126 - 144

### Betegnelser i tabell 28:

#### Sveisbarhet:

- A = God, kan sveises.
- B = Dårlig, egner se ikke til sveising.
- C = Særdeles dårlig, kan ikke sveises.

## Korrosjonsegenskaper:

Korrosjonsegenskaper oppgis i CES å være tilsvarende for utvalget, med unntak av disposisjon for stress corrotion cracking. Korrosjonsegenskapsrangeringen består da i å rangere legeringene etter hvor disponert de er for stress corrotion cracking, og følgende betegnelser benyttes:

- UM = Under middels disponert.
- M = Middels disponert.
- H = Betydelig disponert.

Tabell 36: Materialelegenskaper for aktuelle aluminiumslegeringer; pris, sveisbarhet og korrosjonsegenskaper.

Serie AA:	Legeringsbetegnelse	Herdetilstand og behandling	PPMN $\left[ \frac{\text{NOK}}{\text{Kg}} \right]$	Sveisbarhet	Korrosjons-Egenskaper
2xxx	2014	T6	17,4 - 18,6	A	H
	2024	T6	17,3 - 18,5	C	UM
		T851			UM
		T36			H
2090	T83	110 - 118	B	M	
7xxx	7050	T7651	32,6 - 34,8	B	M
	7055	T77511	33,0 - 35,1	B	M
	7068	T6511	37,0	B	H
	7075	T6	32,1 - 34,1	B	H
		T6510/1			
	7150	T77511	32,6 - 34,8	B	M
		T6151			H
7175	T66	32,1 - 34,1	B	H	
8xxx	8090	T851	112 - 119	A	H
	8091	T6	114 - 122	A	H

## Merk at;

- Alle verdier for de forskjellige legeringene er hentet fra CES EduPack (med unntak av legering 7068):
  - Det må tas forbehold om at verdiene ikke er oppdaterte (da spesielt pris estimatene).
  - Det må tas forbehold om at noen av verdiene er estimater (da spesielt pris).
  - Mange av materialelegenskapene er oppgitt i intervaller, og det er ikke kjent om de gjennomsnittlige verdiene av intervallene er de mest representative for legeringen. Det vil i noen aspekter av seleksjonen bli antatt dette.
- Verdier for legering 7068 er hentet fra et datablad fra en aluminiumsprodusent, og finnes i vedlegg:
  - Det må tas forbehold om at kilden ikke er nøytral.
  - Det må tas forbehold om at spesifikasjonen for legeringen kan variere noe mellom forskjellige produsenter.
  - Noen verdier for denne legeringen er blitt estimert, ettersom de ikke var mulig å oppdrive. Estimaten er gjort slik at egenskapene er satt tilsvarende den legeringen i samme serie med de nærmeste styrkeegenskapene.

## 7 LØSNINGSVALG

I kapittel 7 blir de løsningsvalgene som det er mulig å ta på dette tidspunktet i oppgaven fattet. Det er først blitt gjort rede for seleksjonsmetodikken som er blitt benyttet. Deretter er det blitt utarbeidet seleksjonskriterier for de forskjellige løsningsvalgene, løsningsalternativene er så blitt vurdert opp mot disse og det er blitt foretatt løsningsvalg for konstruksjonen.

### 7.1 Seleksjonsmatrise

For hvert løsningsvalg som skal fattes, blir følgende seleksjonsprosess gjennomført: Det utarbeides først M relevante vurderingskriterier for løsningsvalget, antallet kan variere fra løsningsvalg til løsningsvalg. Deretter blir hvert av vurderingskriteriene 1 til M gitt en vektning P, der P er mindre enn 1 og summen av alle P er lik 1. Vektingen vil være en subjektiv vurdering av vurderingskriteriets viktighet, slik at kriterier som anses som viktigere har en større betydning i utvelgelsen. Løsningsalternativene 1 til N vurderes så opp mot vurderingskriteriene 1 til M og gis poeng X etter hvor godt løsningsalternativet tilfredsstillende vurderingskriteriet. Poengskalaen fungerer slik at den høyeste poengsummen som er mulig å oppnå samsvarer med antallet løsningsalternativ N, og poengene som tildeles hvert løsningsalternativ samsvarer med løsningsalternativets relative rangering i forhold til de andre løsningsalternativene. Vektingen P per vurderingskriterium multipliseres så med poeng X gitt vurderingskriteriet per løsningsalternativ, slik at man får summen Y. Deretter summeres alle Y per løsningsalternativ, skal at man får den vektete summen Z. Løsningsalternativene blir så rangert fra 1 til A, der den høyeste rangeringen gis til løsningsalternativet med den høyeste vektete summen, 1. Løsningsalternativet med den høyeste rangeringen vil da være det alternativet som er mest gunstig å velge ut ifra de vurderingskriteriene som er blitt definert. Tabell 29 viser seleksjonsmatrisen som vil bli benyttet i seleksjonen.

**Merk at;** den gitte poengsummen for et løsningsalternativ ikke nødvendigvis indikerer i hvilken grad løsningsalternativet tilfredsstillende kriteriet, eller tilfredstillingsgraden i forhold til de andre løsningsalternativene, dette er fordi poengene fordeles som en rangering. Grunnen til at poengsystemet er utført slik, er fordi det for mange av vurderingskriteriene er svært vanskelig å presist kvantifisere et løsningsalternativs tilfredsstillelsesgrad av kriteriet, og tilfredsstillelsesgraden i forhold til de andre løsningsalternativene.

Tabell 37: Mal for seleksjonsmatrise for utvelgelse av løsninger.

Kriterier	Vekting	Løsningsalternativ 1		Løsningsalternativ N	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum
Kriterie 1	P	X	Y	X	Y
Kriterie M	P	X	Y	X	Y
<b>Vektet sum</b>		Z		Z	
<b>Rangering</b>		A		A	
<b>Valgt løsning</b>		J/N		J/N	

## 7.2 Løsningsvalg

Seleksjonsporsessene for de ulike løsningsvalgene er presentert i hvert sitt underkapittel.

### 7.2.1 Utformingsalternativer

I tabell 30 er seleksjonskriteriene med kriteriets vektning, samt en forklaring av kriteriet gitt. I tabell 31 er vurderingen av løsningsalternativene, med det valgte løsningsalternativet gitt.

Tabell 38: Seleksjonskriterier med vektning og forklaring for utformingsprinsipp seleksjon

Kriterier	Vekting	Forklaring
Aerodynamikk	0,15	Utformingsalternativets aerodynamiske egenskaper. Høyere poeng gis for (antatt) lavere luftmotstandskoeffisient.
Plassutnyttelse	0,30	Plassutnyttelsen (fritt nyttig rom, for eksempel benplass) i utformingsalternativet i forhold til utformingsalternativets størrelse. Høyere poeng gis for bedre plassutnyttelse i forhold til størrelse.
Plattform integrasjon	0,25	Hvor enkelt er det å integrere utformingsalternativet med andre Dolphin Sky moduler, systemer og komponenter. Høyere poeng gis for bedre muligheter for plattform integrasjon.
Estetikk	0,10	Subjektiv vurdering av utformingsalternativets estetikk. Høyere poeng gis for bedre estetikk.
Kompleksitet	0,20	Hvor kompleks er utformingsalternativets form, og hvor komplekst er det å integrere en chassisløsning i formen. Høyere poeng gis for lavere kompleksitet.

Tabell 39: Seleksjonsmatrise for utvelgelse av utformingsprinsipp.

Kriterier	Vekting	Symmetrisk dråpeform		Symmetrisk omvendt dråpeform		Sfære og ellipse		Ikke symmetrisk dråpeform		Ikke symmetrisk omvendt dråpeform	
		Poeng	Sum	Poeng	Sum	Poeng	Sum	Poeng	Sum	Poeng	Sum
<b>Aerodynamikk</b>	0,15	5	0,75	3	0,45	1	0,15	4	0,60	2	0,30
<b>Plassutnyttelse</b>	0,30	1	0,30	2	0,60	3	0,90	4	1,20	5	1,50
<b>Integrasjon</b>	0,25	3	0,75	3	0,75	4	1,00	5	1,25	5	1,25
<b>Estetikk</b>	0,10	5	0,50	4	0,40	1	0,10	2	0,20	3	0,30
<b>Kompleksitet</b>	0,20	3	0,60	3	0,60	4	0,80	5	1,00	5	1,00
<b>Vektet sum</b>		<b>2,90</b>		<b>2,80</b>		<b>2,95</b>		<b>4,25</b>		<b>4,35</b>	
<b>Rangering</b>		<b>4</b>		<b>5</b>		<b>3</b>		<b>2</b>		<b>1</b>	
<b>Valgt løsning</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Ja</b>	

#### Kommentar:

Som det framkommer av tabell 31 ble utformingsprinsippet ikke symmetrisk omvendt dråpeform valgt som utformingsprinsipp for løsningen.

## 7.2.2 Konstruksjonsprinsippalternativer

I tabell 32 er seleksjonskriteriene med kriteriets (ene) vektning, samt en forklaring av kriteriet (ene) gitt. I tabell 33 er vurderingen av løsningsalternativene, med det valgte løsningsalternativet gitt.

Tabell 40: Seleksjonskriterier med vektning og forklaring for konstruksjonsprinsipp seleksjon.

Kriterier	Delkriterier	Vektning	Forklaring
Kompleksitet		0,15	Hvor komplekst vil det være å dimensjonere, produsere og vedlikeholde konstruksjonsprinsippalternativet. Høyere poeng gis for lavere kompleksitet.
Effektivitet	Plassutnyttelse	0,15	Plassutnyttelsen (fritt nyttig rom) innvendig i konstruksjonsprinsippalternativet. Høyere poeng gis for bedre plassutnyttelse.
	Styrke/vekt forhold	0,25	Styrke/vekt forhold til konstruksjonsprinsippalternativet. Høyere poeng gis for høyere styrke/vekt forhold.
	Åpninger	0,10	Hvor enkelt er det å lage åpninger til inn og utgang og utsikt i konstruksjonsprinsippalternativet. Høyere poeng gis for enkelhet i å kunne lage åpninger.
Formbarhet	Formbarhet	0,05	Hvor enkelt er det å oppnå en bestemt form med konstruksjonsprinsippalternativet. Høyere poeng gis for høyere formabilitet.
	Aerodynamikk	0,05	Konstruksjonsprinsippalternativets grunnleggende aerodynamiske egenskaper. Høyere poeng gis for bedre aerodynamiske egenskaper.
Sikkerhet		0,15	Konstruksjonsprinsippalternativets evne til å motstå lokale skader uten kollaps. Høyere poeng gis for høyere sikkerhet.
Plattform integrasjon		0,10	Hvor enkelt er det å integrere utformingsalternativet med andre Dolphin Sky moduler, systemer og komponenter. Høyere poeng gis for bedre muligheter for plattform integrasjon.

Tabell 41: Seleksjonsmatrise for utvelgelse av konstruksjonsprinsipp.

Kriterier	Delkriterier	Vekting	Fagverk		Skall		Forsterket skall	
			Poeng	Sum	Poeng	Sum	Poeng	Sum
Kompleksitet		0,15	3	0,45	2	0,30	1	0,15
Effektivitet	Plassutnyttelse	0,15	1	0,15	3	0,45	2	0,30
	Styrke/vekt	0,25	2	0,50	1	0,25	3	0,75
	Åpninger	0,10	2	0,20	1	0,10	3	0,30
Formbarhet	Formbarhet	0,05	1	0,05	3	0,15	2	0,10
	Aerodynamikk	0,05	2	0,10	3	0,15	3	0,15
Sikkerhet		0,15	2	0,30	1	0,15	3	0,45
Integrasjon		0,10	2	0,20	2	0,20	3	0,30
<b>Vektet sum</b>			<b>1,95</b>		<b>1,75</b>		<b>2,50</b>	
<b>Rangering</b>			<b>3</b>		<b>2</b>		<b>1</b>	
<b>Valgt løsning</b>			<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Ja</b>	

### Kommentar:

Som det framkommer av tabell 33 ble konstruksjonsprinsippet forsterket skallkonstruksjon vurdert til å være det mest hensiktsmessige konstruksjonsprinsippet for løsningen. På grunn av begrensede ressurser (tidsmessig og med tanke på undertegnede erfaring og ferdigheter med slike konstruksjoner), vil det videre i oppgaven vektlegges å utvikle den interne rammestrukturen i konstruksjonen. Rammestrukturen dimensjoneres da slik at den tilfredsstiller kravspesifikasjonen uavhengig av skall/kledning.

### 7.2.3 Innledende seleksjon av materialer

I den innledende seleksjonen vil det kun bli valgt ett konstruksjonsmateriale. Og vurderingshensynene gjelder kun rammeverket. Grunnen til dette er fordi det er besluttet at oppgaven primært skal ta for seg utviklingen av rammeverket. Videre vil det å velge et konstruksjonsmateriale forenkle blant annet; beregninger, utforming av elementer, valg av sammenføyningsmetoder og valg av produksjonsmetoder. Det innledende valget av konstruksjonsmateriale vil være gjenstand for forandring, dersom materialvalget viser seg å være ugunstig eller at ikke er mulig å oppfylle kravspesifikasjonen. I tabell 35 er seleksjonskriteriene med kriteriets (ene) vekting, samt en forklaring av kriteriet (ene) gitt. I tabell 38 er det valgte løsningsalternativet gitt.

Tabell 42: Gjennomsnittsverdier fra egenskapsintervallene for materialer benyttet i seleksjon av konstruksjonsmateriale.

Materiale	$\rho$ $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right]$	$E \cdot 10^3$ [MPa]	$\sigma_b$ [MPa]	$\sigma_d$ [MPa]	PPM $\left[\frac{\text{USD}}{\text{Kg}}\right]$	$E_{\text{prod}}$ $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{Kg}}\right]$	$m_{\text{CO}_2}$ [Kg]
St	7850	209	993	450	0,7	25	2,1
RSt	7850	200	1360	464	8,1	81	5,1
Al	2700	75	304	91	2,7	194	12,2
Mg	1845	45	330	143	4,8	375	23,6
Ti	4600	105	963	603	102	915	50,6
CFRP	1550	110	800	225	42	273	22



Tabell 43: Seleksjonskriterier med vekting og forklaring for konstruksjonsmateriale seleksjon.

Kriterier	Delkriterier	Vekting	Forklaring
<b>Materialeffektivitet</b>	<b>mf<sub>1</sub>(3)</b>	0,125	Se kapittel 3.1.2 og 3.1.3 for definisjon og beskrivelse av materialeffektivitetsfaktorer. Større verdi av materialeffektivitetsfaktorer gir høyere poeng.
	<b>mf<sub>2</sub>(4)</b>	0,125	
	<b>mf<sub>3</sub>(5)</b>	0,075	
	<b>mf<sub>4</sub>(6)</b>	0,075	
	<b>mf<sub>5</sub>(7)</b>	0,025	
	<b>mf<sub>6</sub>(8)</b>	0,025	
	<b>mf<sub>7</sub>(9)</b>	0,025	
	<b>mf<sub>8</sub>(10)</b>	0,025	
	<b>mf<sub>9</sub>(11)</b>	0,0025	
	<b>mf<sub>10</sub>(12)</b>	0,0025	
	<b>mf<sub>11</sub>(13)</b>	0,0025	
	<b>mf<sub>12</sub>(14)</b>	0,0025	
	<b>mf<sub>13</sub>(15)</b>	0,0025	
	<b>mf<sub>14</sub>(16)</b>	0,0025	
	<b>mf<sub>15</sub>(17)</b>	0,0025	
	<b>mf<sub>16</sub>(18)</b>	0,0025	
<b>PE: Produksjonseffektivitet</b>	<b>FO: Formbarhet</b>	0,045	Hvor enkelt er det å forme et element utført i det aktuelle materialet til den ønskede formen. Høyere poeng gis for høyere formbarhet.
	<b>PR: Prosessabilitet</b>	0,045	Hvor stor fleksibilitet er det i hvilke produksjonsprosesser som kan benyttes for å bearbeide materialet, og hvor enkelt er det å sammenføre elementer av materialet. Høyere poeng gis for høyere prosessabilitet.
<b>MR: Materialrobusthet</b>	<b>KR: Korrosjonsbestandighet</b>	0,0375	Materialets evne til å motstå korrosjon uten påført korrosjonsbeskyttelse. Høyere poeng gis for høyere korrosjonsbestandighet.
	<b>UT: Utmattingsfasthet</b>	0,045	Materialets utmattingsfasthet. Høyere poeng gis for høyere utmattingsfasthet.
	<b>SL: Slitasjemotstand</b>	0,0375	Materialets evne til å motstå slitasje fra mekaniskbelastning og miljølaster. Høyere poeng gis for høyere slitasjemotstand.
<b>KO: Kompleksitet</b>		0,25	Hvor vanskelig er det å dimensjonere en konstruksjon dersom det aktuelle materialet benyttes. Hvor mye data finnes for materialet. Og hvor tilgjengelig er materialet. Høyere poeng gis for lavere kompleksitet.
<b>RE: Resirkulerbarhet</b>		0,02	Kan materialet resirkuleres og hvor stor grad av materialet blir resirkulert. Høyere poeng gis for høyere grad av resirkulerbarhet.

Tabell 44: Seleksjonsmatrise for utvelgelse av konstruksjonsmateriale, materialeffektivitet (V = Vekting, VDS = Vektet delsum P = Poeng, S = Sum).

Materialeffektivitet													
	V	St		RSt		Al		Mg		Ti		CFRP	
		P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S
mf <sub>1</sub> (3)	0,125	2	0,25	3	0,375	1	0,125	4	0,5	5	0,625	6	0,75
mf <sub>2</sub> (4)	0,125	1	0,125	2	0,25	3	0,375	5	0,625	4	0,5	6	0,75
mf <sub>3</sub> (5)	0,075	4	0,3	3	0,225	5	0,375	2	0,15	1	0,075	6	0,45
mf <sub>4</sub> (6)	0,075	2	0,15	1	0,075	4	0,3	5	0,375	3	0,225	6	0,45
mf <sub>5</sub> (7)	0,025	6	0,15	3	0,075	5	0,125	4	0,1	1	0,025	2	0,05
mf <sub>6</sub> (8)	0,025	6	0,15	3	0,075	5	0,125	4	0,1	1	0,025	2	0,05
mf <sub>7</sub> (9)	0,025	6	0,15	3	0,075	5	0,125	4	0,1	1	0,025	2	0,05
mf <sub>8</sub> (10)	0,025	6	0,15	3	0,075	5	0,125	4	0,1	1	0,025	2	0,05
mf <sub>9</sub> (11)	0,0025	6	0,015	5	0,0125	3	0,0075	2	0,005	1	0,0025	4	0,01
mf <sub>10</sub> (12)	0,0025	6	0,015	4	0,01	3	0,0075	2	0,005	1	0,0025	5	0,0125
mf <sub>11</sub> (13)	0,0025	6	0,015	5	0,0125	4	0,01	3	0,0075	2	0,005	1	0,0025
mf <sub>12</sub> (14)	0,0025	6	0,015	4	0,01	3	0,0075	2	0,005	1	0,0025	5	0,0125
mf <sub>13</sub> (15)	0,0025	6	0,015	5	0,0125	3	0,0075	2	0,005	1	0,0025	4	0,01
mf <sub>14</sub> (16)	0,0025	6	0,015	5	0,0125	3	0,0075	2	0,005	1	0,0025	4	0,01
mf <sub>15</sub> (17)	0,0025	6	0,015	5	0,0125	3	0,0075	2	0,005	1	0,0025	4	0,01
mf <sub>16</sub> (18)	0,0025	6	0,015	5	0,0125	3	0,0075	2	0,005	1	0,0025	4	0,01
<b>VDS</b>	<b>0,52</b>	<b>1,55</b>		<b>1,32</b>		<b>1,74</b>		<b>2,09</b>		<b>1,55</b>		<b>2,68</b>	

Tabell 45: Seleksjonsmatrise for utvelgelse av konstruksjonsmateriale, Øvrige kriterier (V = Vekting, VDS = Vektet delsum P = Poeng, S = Sum, KR = Kriterier, DKR = Delkriterier).

Øvrige Kriterier														
KR	DKR	V	St		RSt		Al		Mg		Ti		CFRP	
			P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S
PE	FO	0,045	4	0,18	3	0,135	5	0,225	5	0,225	2	0,09	6	0,27
	PR	0,045	6	0,27	6	0,27	5	0,225	5	0,225	4	0,18	4	0,18
MR	KR	0,0375	4	0,15	6	0,225	5	0,1875	4	0,15	6	0,225	6	0,225
	UT	0,045	4	0,18	5	0,225	1	0,045	2	0,09	6	0,27	3	0,135
	SL	0,0375	6	0,225	5	0,1875	4	0,15	4	0,15	4	0,15	3	0,1125
KO		0,25	6	1,5	6	1,5	6	1,5	3	0,75	3	0,75	2	0,5
RE		0,02	5	0,1	4	0,08	6	0,12	2	0,04	3	0,06	1	0,02
<b>VDS</b>		<b>0,48</b>	<b>2,61</b>		<b>2,62</b>		<b>2,45</b>		<b>1,63</b>		<b>1,73</b>		<b>1,44</b>	

Tabell 46: Oppsummering av seleksjonsmatriser for utvelgelse av konstruksjonsmateriale med summering av vektete delsummer (V = Vekting, VDS = Vektet delsum P = Poeng, S = Sum).

Kriterier	V	St	RSt	Al	Mg	Ti	CFRP
		VDS	VDS	VDS	VDS	VDS	VDS
Material effektivitet	0,52	1,545	1,32	1,7375	2,0925	1,5475	2,6775
Øvrige Kriterier	0,48	2,605	2,6225	2,4525	1,63	1,725	1,4425
<b>Vektet sum</b>		<b>4,15</b>	<b>3,94</b>	<b>4,19</b>	<b>3,72</b>	<b>3,27</b>	<b>4,12</b>
<b>Rangering</b>		<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>
<b>Valgt løsning</b>		<b>Nei</b>	<b>Nei</b>	<b>Ja</b>	<b>Nei</b>	<b>Nei</b>	<b>Nei</b>

## Kommentar:

Som det framkommer av tabell 38 ble det i den innledende materialeseleksjonen besluttet at, konstruksjonsmaterialet for løsningen skal være en aluminiumslegering. I påfølgende delkapittel vil det bli foretatt et mer spesifikt materialvalg, der det vil bli spesifisert hvilken aluminiumslegering som skal benyttes, samt den aktuelle legeringens herdetilstand og behandling.

### 7.2.4 Spesifikk seleksjon av materialer

Det vil kun bli valgt en aluminiumslegering for rammeverk. Dette er av tilsvarende grunner som oppgitt for den innledende materialeseleksjon. Valget av legering vil være gjenstand for forandring, dersom valget viser seg å være ugunstig eller at ikke er mulig å oppfylle kravspesifikasjonen med det fattede valget. Det er ikke benyttet relative seleksjonskriterier (tilsvarende materialfaktorene i forrige delkapittel) i denne seleksjonsprosessen, ettersom densitetsvariasjonen i utvalget er liten. Videre er det benyttet gjennomsnittsverdier av legeringsegenskapsintervallene (delkapittel 6.2.4), med unntak av for styrke og hardhetsegenskapene ( $\sigma_f$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_d$  og HV) for de forskjellige legeringene. Her er den laveste verdien i det aktuelle intervallet er benyttet, ettersom det er denne verdien som benyttes i dimensjoneringen. I seleksjonstabellene er det kun oppgitt poengscoren for den legeringsvariasjonen (herdetilstand og behandling) per legering som har den beste scoren.

I tabell 39 er seleksjonskriteriene med kriteriets (ene) vekting, samt en forklaring av kriteriet (ene) gitt. I tabell 40 er verdiene benyttet i seleksjonene oppgitt. I tabell 40 og 41 er vurderingen av løsningsalternativene, med det valgte løsningsalternativet gitt.

Tabell 47: Seleksjonskriterier med vekting og forklaring for legerings seleksjon.

Kriterier	Vekting	Forklaring
$\rho$	0,03	Legeringens densitet; Høyere poeng gis for lavere densitet.
E	0,20	Legeringens elastisitetsmodul (stivhet); Høyere poeng gis for høyere stivhet.
$\sigma_f$	0,20	Legeringens flytegrense; Høyere poeng gis for høyere flytegrense.
$\sigma_b$	0,20	Legeringens bruddgrense; Høyere poeng gis for høyere bruddgrense.
$\sigma_d$	0,05	Legeringens utmattingsgrense; Høyere poeng gis for høyere utmattingsgrense.
HV	0,01	Legeringens Vickers hardhet; Høyere poeng gis for høyere Vickers hardhet.
PPMN	0,15	Legeringens pris i NOK per kg av legeringen; Høyere poeng gis for lavere pris per kg.
Sveisbarhet	0,05	Legeringens sveisbarhet; Høyere poeng gis for høyere grad av sveisbarhet.
Korrosjonsegenskaper	0,01	Legeringens korrosjonsegenskaper; Høyere poeng gis for lavere grad av disposisjon for stress corrosion cracking.
Tilgjengelighet	0,1	Legeringens antatte tilgjengelighet og tilgjengeligheten på informasjon om legeringen; Høyere poeng gis for høyere tilgjengelighet.

Tabell 48: Verdier fra egenskapsintervallene for materialer benyttet i seleksjon av legering. Forkortelser: LEG=Legering, HT/BH=Herdetilstand og behandling, SVE=Sveisbarhet, KE=Korrosjonsegenskaper.

Serie AA:	LEG	HT/BH	$\rho \cdot 10^3$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$E \cdot 10^3$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$\sigma_b$ [Mpa]	$\sigma_d$ [Mpa]	HV	PPMN [NOK/Kg]	SVE	KE
2xxx	2014	T6	2,8	74,5	324	386	119	119	18	A	H
	2024	T6	2,765	73,85	345	427	125	119	17,9	C	UM
		T851			386	434					UM
		T36			359	476					H
2090	T83	2,6	77,95	386	441	200	40	114	B	M	
7xxx	7050	T7651	2,825	72,8	407	483	130	130	33,7	B	M
	7055	T77511	2,88	69	541	567	312	166	34,1	B	M
	7068	T6511	2,85	73,1	655	683	312	166	37,0	B	H
	7075	T6	2,8	72,5	359	434	152	152	33,1	B	H
		T6510/1	2,795	73,85	359	434	130	119			
	7150	T77511	2,825	73,85	524	558	140	100	33,7	B	M
		T6151				71,8					579
7175	T66	2,795	71,8	455	531	149	100	33,1	B	H	
8xxx	8090	T851	2,545	82,0	435	480	141	111	115,5	A	H
	8091	T6	2,585	79	440	505	142	126	118	A	H

Tabell 49: Seleksjonsmatrise for utvelgelse av legering del 1/2 (7xxx legeringer). Forkortelser: V = Vekting, P = Poeng, S = Sum, LEG=Legering, HT/BH=Herdetilstand og behandling, SVE=Sveisbarhet, KE=Korrosjonsegenskaper, TILGJ=Tilgjengelighet, VS=Vektet sum, RANG=Rangering, VLØ=Valgt løsning.

Kriterier	V	7050		7055		7068		7075		7150		7175	
		P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S
$\rho$	0,03	4	1	2	1	3	0,7	6	1	4	1	7	1
$E \cdot 10^3$	0,20	4	0,12	2	0,06	5	0,09	6	0,18	7	0,12	3	0,21
$\sigma_f$	0,20	5	0,8	10	0,4	11	1	4	1,2	9	1,4	8	0,6
$\sigma_b$	0,20	6	1	9	2	11	2,2	2	0,8	10	1,8	8	1,6
$\sigma_d$	0,05	4	1,2	11	1,8	11	2,2	9	0,4	5	2	8	1,6
HV	0,01	9	0,2	11	0,55	11	0,55	10	0,45	5	0,25	5	0,4
PR	0,15	8	0,09	7	0,11	6	0,11	9	0,1	8	0,05	9	0,05
SV	0,05	10	1,2	10	1,05	10	0,9	10	1,35	10	1,2	10	1,35
KORR	0,01	10	0,5	10	0,5	9	0,5	9	0,5	10	0,5	9	0,5
TILGJ	0,1	10	0,1	10	0,1	7	0,09	10	0,09	10	0,1	10	0,09
<b>VS</b>		<b>6,21</b>		<b>7,57</b>		<b>8,34</b>		<b>6,07</b>		<b>8,42</b>		<b>7,40</b>	
<b>RANG</b>		<b>8</b>		<b>4</b>		<b>2</b>		<b>9</b>		<b>1</b>		<b>3</b>	
<b>VLØ</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Ja</b>		<b>Nei</b>	

Tabell 50: Seleksjonsmatrise for utvelgelse av legering del 2/2 (2xxx og 8xxx legeringer). Forkortelser: V = Vekting, P = Poeng, S = Sum, LEG=Legering, HT/BH=Herdetilstand og behandling, SVE=Sveisbarhet, KE=Korrosjonsegenskaper, TILGJ=Tilgjengelighet, VS=Vektet sum, RANG=Rangering, VLØ=Valgt løsning.

Kriterier	V	2014		2024		2090		8090		8091	
		P	S	P	S	P	S	P	S	P	S
$\rho$	0,03	5	1,1	8	1,1	9	0,8	11	0,7	10	0,7
E	0,20	8	0,15	7	0,24	9	0,27	11	0,33	10	0,3
$\sigma_f$	0,20	1	1,6	2	1,4	3	1,8	6	2,2	7	2
$\sigma_b$	0,20	1	0,2	4	0,4	3	0,6	5	1,2	7	1,4
$\sigma_d$	0,05	2	0,2	3	0,8	10	0,6	6	1	7	1,4
HV	0,01	7	0,1	7	0,15	4	0,5	6	0,3	8	0,35
PPMN	0,15	10	0,07	11	0,07	5	0,04	4	0,06	3	0,08
SVE	0,05	11	1,5	9	1,65	10	0,75	11	0,6	11	0,45
KE	0,01	9	0,55	11	0,45	10	0,5	9	0,55	9	0,55
TILGJ	0,1	11	0,09	11	0,11	8	0,1	7	0,09	7	0,09
<b>VS</b>		<b>5,56</b>		<b>6,37</b>		<b>5,96</b>		<b>7,03</b>		<b>7,32</b>	
<b>RANG</b>		<b>11</b>		<b>7</b>		<b>10</b>		<b>6</b>		<b>5</b>	
<b>VLØ</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>	

## Kommentar:

Som det framkommer av tabell 41 ble det besluttet at; aluminiumslegering 7150 skal benyttes som konstruksjonsmateriale. Det vil for denne legeringen være to valgmuligheter med tanke på herdetilstand og etterbehandling: T77511 og T6151, der T77511 har noe høyere stivhet og noe bedre korrosjonsegenskaper, mens T6151 har noe høyere dimensjoneringsverdi for bruddgrense. Det besluttes her å benytte legeringsvarianten med den høyeste bruddgrensen (T6151). Ytterligere spesifikasjoner for legering AA7150-T6151 (for eksempel legeringens karakteristiske kjemisk komposisjon, herdeprosesser og behandling, miljøfaktorer, med mer), trekkes inn der de relevante for oppgaven, ellers vil det komplette databladet for legeringen (fra CES EduPack) være å finne i vedlegg.

## 7.3 Oppsummering av løsningsvalg

Under følger en oppsummering i tabellform av løsningsvalgene som er blitt tatt i kapittel 7.

Tabell 51: Oppsummering av løsningsvalg tatt i kapittel 7.

Område	Løsningsvalg
Utforming	Ikke symmetrisk omvendt dråpeform
Konstruksjonsprinsipp	Forsterket skallkonstruksjon
Innledende materialeseleksjon	Aluminiumslegering
Legeringsseleksjon	AA7150-T6151

## 8 GRUNNLAGSBEREGNINGER

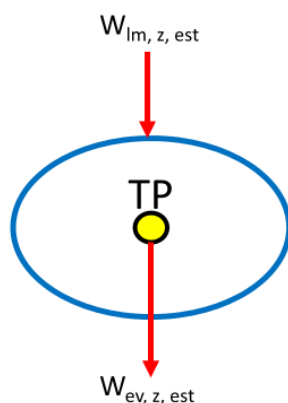
Kapittel 8 redegjør for den innledende dimensjoneringen av chassisløsningen. Det innledende dimensjoneringsarbeidet har som formål å fastsette et veiledende grunnlag for videre design og konstruksjon av løsningen. Det vil først bli utført en kartlegging av belastningene som løsningen utsettes for på bakken og i luften. Det vil deretter bli utført en tidligvurdering av plasseringen av konstruksjonselementer i løsningen, der vurderingen baserer seg på kravspesifikasjonen og kartleggingen av kreftene som virker på konstruksjonen. Ut ifra dette skal det utarbeides en forenklet beregningsmodell og relevante belastningstilfeller, kraftfordelingen i beregningsmodellen skal deretter kartlegges og beregningsmodellen skal dimensjoneres opp mot belastningstilfellene.

### 8.1 Tidlig vurdering av brukspåkjenninger

Chassisløsningen vil under drift utsettes for både mekaniske laster og miljølaste, der sistnevnte ikke vil bli vurdert i dette kapitlet. De mekaniske lastene vil opptre som både statiske og dynamiske belastninger. De statiske belastningene som virker på løsningen er hovedsakelig tyngdelaster og har sitt opphav i chassisets egenvekt, vekten til interiøret og diverse systemer, vekten av føreren og vekten til løftemodulen. De dynamiske belastningene vil oppstå som følge av blant annet variasjoner i løftekraft, vibrasjoner, variasjon i framdriftskrefter, variasjoner i løsningsvekten, luftmotstandskrefter, vindkast og akselerasjonskrefter. De dynamiske belastningene medfører at løsningen vil være utsatt for utmatting. Det vil i dette kapitlet kun bli vurdert statiske belastningstilfeller, der det benyttes estimerte maksimalverdier av dynamiske laster til statisk dimensjonering av løsningen. Det vil til slutt i kapitlet bli sett på gjeldene regelverk for dimensjonering av rotordrevne luftfartøy.

#### 8.1.1 Tidligvurderinger og forutsetninger, bakkelaster

Figuren under viser en overordnet oversikt over lastene løsningen vil bli utsatt for på når den står på bakken. Under figuren er en forklaring til figuren, med en redegjørelse av de antagelsene som vil bli gjort i dimensjoneringen.



Figur 36: Overordnet oversikt, bakkelaster.

Resultanten til egentyngdene ( $W_{ev, z, est}$ ) virker i løsningens tyngdepunkt, og plasseringen av dette vil avhenge av de forskjellige massenes plassering inne i løsningen. Hvor og hvordan egentyngdekraftene angriper og deres omfang vil avhenge av massenes plassering i løsningen og opplagringen av disse. Løftemodulens tyngde ( $W_{lm, z, est}$ ) antas å være fordelt likt over løftemodulens opplagringspunkter, som vil bli bestemt senere i kapittel 8. Det vil være gunstig om resultanten til løftemodulens tyngde virker langs løsningens tyngdepunktakse, da dette medfører bedre stabilitet og at det ikke oppstår globale momenter på

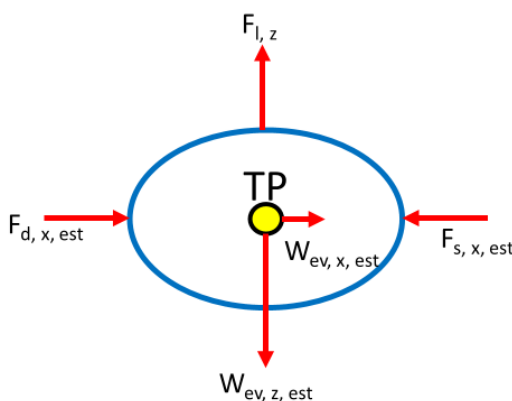
konstruksjonen. Det vil ikke bli vurdert laster som oppstår som følge av forflytning av løsningen eller laster som oppstår som følge av vindkast.

## 8.1.2 Tidligvurdering og forutsetninger, luftlast

Figurene under viser en overordnet oversikt over lastene løsningen vil bli utsatt for når den er i luften. Under hver av figurene er det gitt en forklaring til figuren, med redegjørelser av de antagelsene som vil bli gjort i dimensjoneringen. Det vil ikke bli vurdert laster som oppstår som følge av vindkast eller turbulens, da disse enten regnes som neglisjerbare eller for vanskelige og tidkrevende å kartlegge. Videre vil det ikke bli vurdert spesifikke laster som oppstår ved rotasjon om Z-aksen (YAW), da manøvreren er antatt å bli gjennomført ved lave hastigheter og med en relativt lav gjennomføringshastighet, slik at; luftmotstandskreftene som virker mot rotasjonen er neglisjerbare, og at torsjonsspenningene som oppstår som følge av akselerasjonskreftene og luftmotstandskreftene som virker mot bevegelsen er neglisjerbare. Videre er flere av luftmotstandskreftene som oppstår ved manøvrering og akselerasjon blitt neglisjert, dette begrunnes med (sammen med begrunnelsen gitt for det spesifikke tilfellet), at kreftene antas å være tilnærmet jevnt fordelt over arealene de virker på; noe som betyr at kraften per snitt vil være lav.

### Krefter ved plan flyvning

Plan flyvning defineres her som flyvning der løsningen kun beveger seg translatorisk i X-aksen og Z-aksen (2 frihetsgrader).



Figur 37: Overordnet oversikt, laster ved plan flyvning.

Den totale løftekraften ( $F_{l,z}$ ) antas å være fordelt likt over løftemodulens opplagringspunkter, og virker i positiv eller negativ Z-retning. Løftekraften antas å kunne variere mellom -8800 N og 8800 N, der løftekraftens minimumsverdi for å holde løsningen svevende er 4856 N ( $F_{l,z,eff} = W_{ev,z,est}$ ). Luftmotstandskrefter som oppstår grunnet hastighet i Z-retning og som virker i motsatt retning av den vertikale bevegelsen velges å ses bort ifra, da disse er antatt å være små og derfor neglisjerbare, og fordi løftemodulens utforming ikke er kjent. Løftekraften antas å ha en effektivverdi ( $F_{l,z,eff}$ ), der løftekraften reduseres med 10 prosent av løsningens totale egentyngde ved null akselerasjon, grunnet parasitt motstand [12]. Effektivverdien av løftekraften benyttes kun for å beregne kraften det kreves for å holde løsningen svevende. Det vil være gunstig om resultanten til den totale løftekraften virker langs løsningens tyngdepunktakse, da dette medfører bedre stabilitet under flyvning og at det ikke oppstår globale momenter på konstruksjonen.

Den estimerte luftmotstanden ( $F_{d,x,est}$ ) antas å være jevnt fordelt over løsningens projiserte frontareal, og vil bli påsatt dersom den ikke finnes neglisjerbar, beregningsmodellen som en jevnt fordelt last på elementene som befinner seg lengst fram i positiv retning langs modellens X-akse. Det projiserte frontarealet settes lik

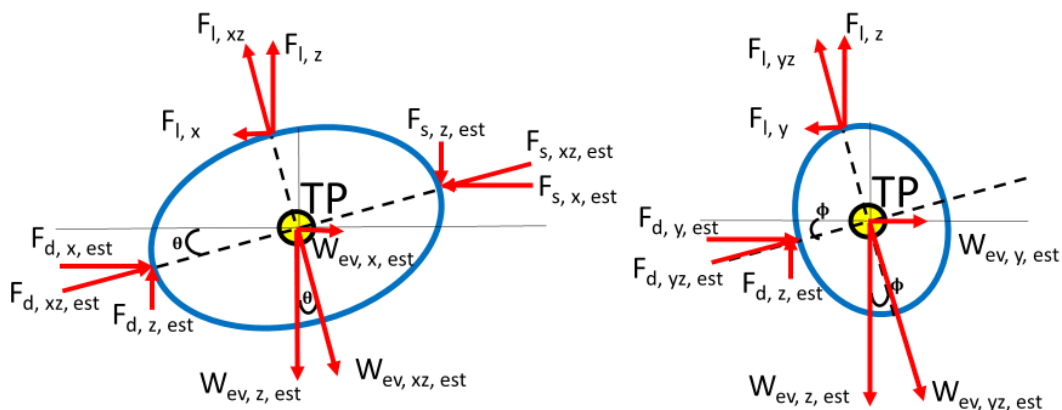


arealet til en boks med tilsvarende bredde og høyde som de største man finner på løsningen i luftstrømmens bevegelsesretning. Luftmotstandskoeffisienten antas å være 0,4 (se kapittel 6). Maksimalverdien til luftmotstanden settes som den verdien luftmotstandskraften har ved en relativ luftstrømhastighet på 100 km/t. Den maksimale estimerte skyvekraften ( $F_{s, x, est}$ ) settes som like stor, men motsatt rettet av den maksimale luftmotstandskraften. Plasseringen av skyvekraften er på dette tidspunktet ukjent, men den vil i dimensjoneringen, dersom den ikke finnes neglisjerbar, bli påsatt som en jevnt fordelt last på elementene som befinner seg lengst bak i beregningsmodellen i negativ retning langs modellens X-akse. Den maksimale horisontale akselerasjonen løsningen kan oppnå antas å være akselerasjonen som forekommer når hastigheten til løsningen er null og skyvekraften er maksimal.

På samme måte som for bakkellastene virker resultanten til egentyngdene ( $W_{ev, xz, est}$ ) i løsningens tyngdepunkt, og plasseringen av dette vil avhenge av de forskjellige massenes plassering inne i løsningen. Egentyngde komponentene vil variere i omfang etter løsnings akselerasjon, der den horisontale og/eller vertikale akselerasjonen legges til tyngdeakselerasjonen (for negativ vertikal akselerasjon trekkes akselerasjonskomponenten fra tyngdeakselerasjonskomponenten, da denne er motsatt rettet).

### Krefter ved ikke plan flyvning

Ikke plan flyvning defineres som translatorisk bevegelse om X, Y og Z-aksene og rotasjonsbevegelse om X og Y-aksene (5 frihetsgrader). Hvordan manøvreringen av Dolphin Sky skal foregå er på dette tidspunktet ikke fullstendig kartlagt. Det er blitt besluttet at thrusterenes løftkraft ikke skal vektoriseres for å skape framdrift eller bidra til manøvreringen av Dolphin Sky. Følgelig blir det antatt at løftkraftkomponentene alltid vil virke rett oppover eller nedover relativt til løsningen. Det er videre antatt at den primære skyvekraften til framdrift av løsningen vil komme fra en annen kilde enn løftemodulen, som er plassert bak i løsningen, denne er på figurene betegnet  $F_s$ . En vanlig måte for å gjennomføre manøvrering på i droner er å variere turtallet til et visst antall av propellene og dermed de respektive thrusterenes løftkraft, der resultatet av løftkraftvariasjonen er at løsningen vil rotere om en eller flere av rotasjonsaksene. Rotasjonen vil foregå slik at løsningen på den siden med mindre løftkraft roterer nedover fra løsningens horisontallinje, mens løsningen på siden med større løftkraft roterer oppover fra horisontallinjen, om en av løsningens rotasjonsakser. Variasjonen i løftkraft som kreves for å gjennomføre rotasjonen antas å være relativt liten, og effekten av variasjonen antas derfor å være neglisjerbar. Det vil derfor bli gjort den forenklingen i kartleggingen av krefter, at løftkraften er lik på alle thrusterene under de forskjellige manøvrene. Det er ukjent om PITCH og ROLL manøvrene skal benyttes for å skape framdrift og for å styre Dolphin Sky. Det er heller ikke kjent hvor store de maksimale rotasjonsvinklene for de ulike manøvrene skal være. Etter rådgivning fra veileder er det satt en begrensning på at rotasjonsvinkelen ved manøvrering ikke skal overskride 15 grader, da veileder mente det ville være ubehagelig for fører av løsningen dersom rotasjonsvinkelen var større enn dette. Det vil i dimensjoneringen bli sett på både PITCH og ROLL manøvrere med maksimalt vinkelutslag. For å gjøre kartleggingsarbeidet av laster mindre komplisert, vil det kun bli sett på rene PITCH eller rene ROLL tilfeller, og ikke kombinasjoner av disse.



Figur 38: Overordnet oversikt, laster ved pitch og roll manøvrer: TV; viser laster som oppstår ved negativ pitch manøvrer, TH; viser laster som oppstår ved positiv roll manøvrer, i tillegg vil det virke luftmotstandskrefter og skyvekrefter langs roll-aksen dersom løsninger er i bevegelse langs denne, samt egenvektkrefter langs den samme akse dersom løsningen akselererer.

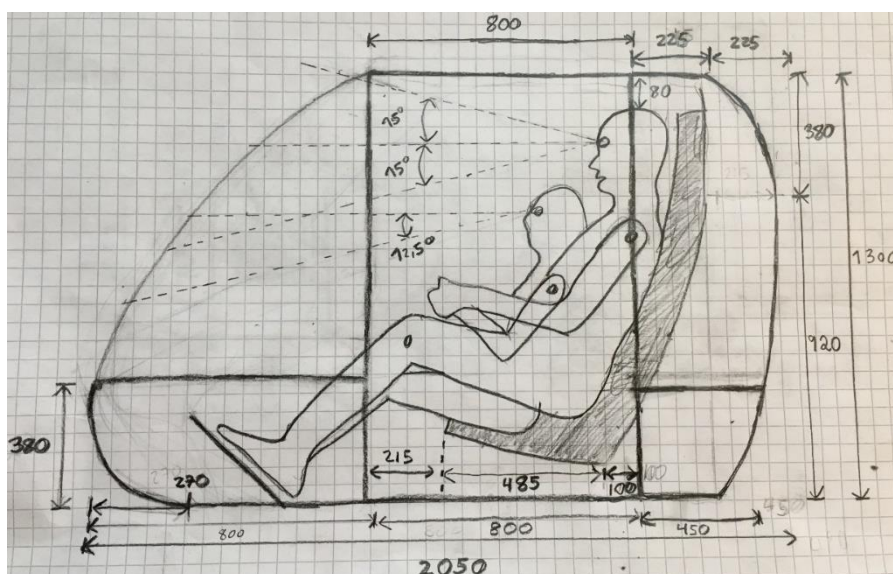
Forklaringen til figur 38 vil bestå i å redegjøre for forskjeller og modifikasjoner ovenfor det som er gjeldene for plan flyvning. Som vist i figuren virker resultatene til lastene i de samme punktene som ved plan flyvning, men får som følge av rotasjonsvinkelen om horisontalaksene, horisontale og vertikale komponenter. Komponentenes størrelse finnes ved å benytte Pytagoras teorem. Maksimalverdiene for resultatene til luftmotstandskreften, skyvekraften og løftkraften settes lik maksimalverdiene som ble bestemt for plan flyvning. På grunn av at kreftene får horisontale og vertikale komponenter vil løftkraftens minimumsverdi for å holde løsningen svevende måtte være større enn for plan flyvning. Den maksimale vertikale akselerasjonen som er mulig å oppnå ved maksimal løftkraft vil da følgelig også være lavere. Det er ikke kjent hvilken vinkelhastighet og vinkelakselerasjon manøvrerne vil bli gjennomført med. Det antas at vinkelhastigheten og vinkelakselerasjonen ved gjennomføring av PITCH og ROLL manøvrer vil være relativt lav, og at luftmotstanden som virker mot bevegelsen, samt treghetskreftene som oppstår grunnet vinkelakselerasjonen derfor er neglisjerbare. Videre er det blitt besluttet å se bort ifra luftmotstanden som motvirker løsningens translatoriske bevegelse i Y og Z-aksen under ROLL manøvreren, da det antatt at den translatoriske hastigheten i disse vil være relativt lav.

## 8.2 Tidligvurdering av plassering av laster og elementer

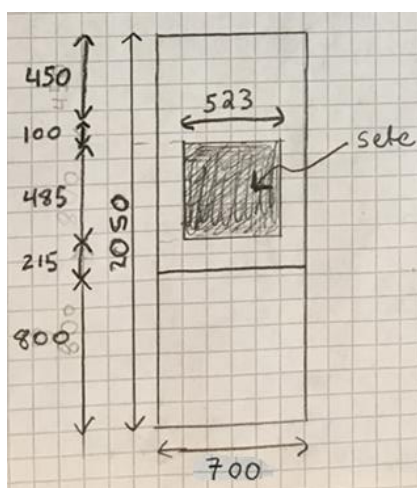
Delkapittelet tar for seg tidligvurderingen av plasseringen av elementer og laster i løsningen. Det vil bli først bli utarbeidet et helhetlig forslag for plassering av elementer, forslaget vil deretter bli forenklet og det vil bli utarbeidet en beregningsmodell som skal brukes til tidlig dimensjoneringen av løsningen.

### 8.2.1 Foreslått plassering av elementer

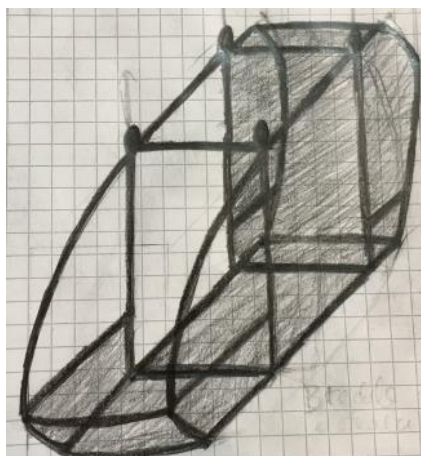
Figurene under viser et forslag til plassering av elementer i løsningen, i figur 39 er det tegnet inn en 99 prosentil mann og en 1 prosentil kvinne. Løsningsforslaget tilfredsstiller de antropometriske kravene til plass, utsikt og inngangs og utgangsmuligheter. Det er også lagt inn ekstra plass foran og bak i løsningen, slik at det skal være plass til diverse komponenter og systemer, samt interiøret.



Figur 39: Forslag til plassering av elementer med sittende 99 prosentil mann og 1 prosentil kvinne tegnet inn, sett fra siden, med dimensjoner i mm.

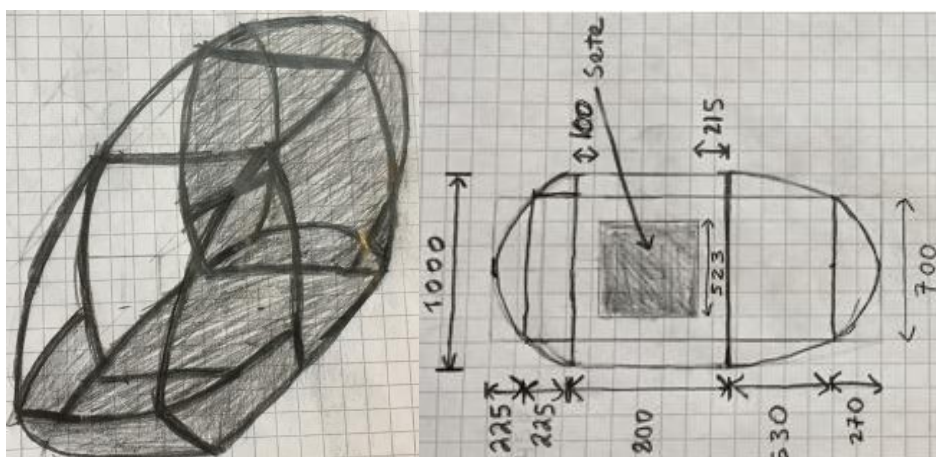


Figur 40: Dimensjonene til løsningsforslaget sett ovenfra i mm, her med den minste bredden løsningen kan ha for å tilfredsstille kravspesifikasjonen.

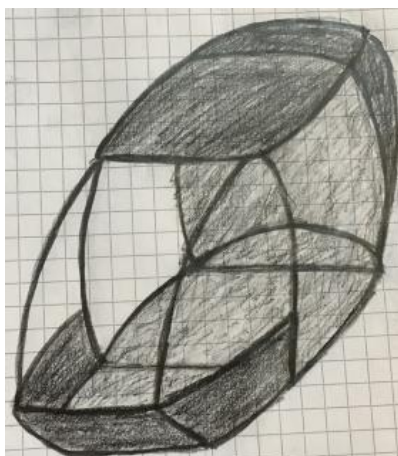


Figur 41: Tredimensjonal framstilling av løsningsforslaget med alle elementer synlig, her med den minste bredden løsningen kan ha for å tilfredsstille kravspesifikasjonen..

På grunn av uvissheter rundt hvor stor plass interiøret kommer til å ta i bredderetningen, er det usikkert om løsningen vil tilfredsstille plasskravene i kravspesifikasjonen med minimumsbredde målene. Det er også gjort en vurdering av løsningens aerodynamiske og estetiske egenskaper med utformingen vist i figur 41. Det er funnet at det vil være hensiktsmessig å øke løsningens bredde noe for å sikre at det vil være tilstrekkelig innvendig plass til fører med interiøret satt inn, nøyaktige breddemål fastsettes i et senere kapittel (da vil kanskje også interiør utformingen og dimensjonene være kjent). Videre kan løsningens aerodynamiske og estetiske egenskaper bedres ved å for eksempel benytte krumme elementer slik at løsningens profil i YZ-planet blir noe mer sylindrisk, og noe mer avrundet i XY-Planet i forhold til forslaget vist i figur 41. Det blitt utarbeidet et modifisert løsningsforslag, der løsningens bredde er økt. I det modifiserte løsningsforslaget er bredden blitt satt til å minimums breddemål i løsningens bunn og toppflate, og til maksimalt 1000 mm et sted mellom topp og bunnplaten. Det er på dette tidspunktet ikke bestemt hvorvidt elementene skal være krumme eller om krumningen skal gjøres med den ytre kledningen (beslutningen vil avhenge av blant annet materialvalg og sammenføyningsvalg), men figur 42 og 43 viser en mulig løsning der elementene er krumme.



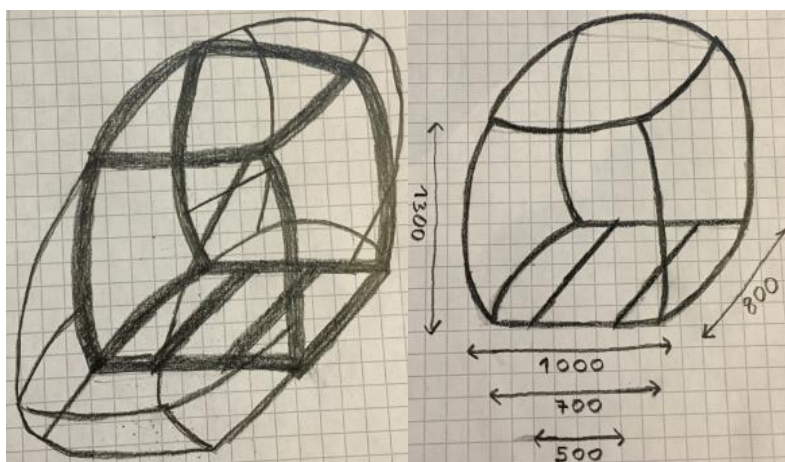
Figur 42: Modifisert løsningsforslag: TV; Tredimensjonal framstilling av løsningsforslaget med alle elementer synlig. TH; Dimensjonene til løsningsforslaget sett ovenfra i mm.



Figur 43: Tredimensjonal framstilling av det modifiserte løsningsforslaget.

## 8.2.2 Beregningsmodell for sikkerhetsstruktur

Ut ifra det modifiserte løsningsforslaget for plassering av elementer er det blitt utarbeidet forenklet beregningsmodell. Hensikten med beregningsmodellen er å gjøre kartleggingen av krefter og dimensjoneringen av løsningen mindre kompleks, samt gjøre det lettere å modifisere plasseringen av elementer dersom denne skulle vise seg å være ugunstig. Beregningsmodellen omfatter den delen av løsningsforslaget der det er antatt at de største belastningene vil oppstå. Innenfor beregningsmodellen skal blant annet fører sete plasseres, som er antatt å være et av de tyngste elementene i interiøret. Følgelig vil førerens tyngde også virke innenfor beregningsmodellen. I beregningsmodellen er det blitt lagt inn to longerons i bunnflaten, disse er til opplagring av fører sete. Det er også tiltenkt at løftemodulen skal innfrestes innenfor toppflatearealet til beregningsmodellen, løftemodulen er også en av elementene med høyest estimert vekt. Figur 44 viser beregningsmodellens plassering i løsningen og modellens dimensjoner.

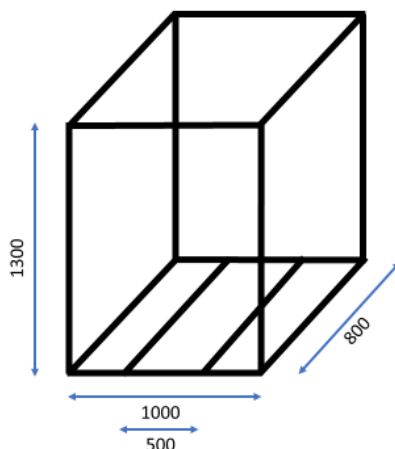


Figur 44: TV; Plasseringen av beregningsmodellen i løsningsforslaget, TH; Beregningsmodellen med foreslåtte dimensjoner i mm.

Ettersom det på dette tidspunktet er usikkert om de vertikale konstruksjonselementene skal krummes, samt for å forenkle dimensjoneringsarbeidet ytterligere, er det blitt utarbeidet en forenklet beregningsmodell der de vertikale elementene er rette. Forenklingen medfører at det ikke vil oppstå momenter i de vertikale elementene grunnet trykk og strekk krefter. Effekten av dette vil bli tatt hensyn til i dimensjoneringen av den ferdig modellerte løsningen, dersom det skal benyttes krumme elementer. I den forenklete



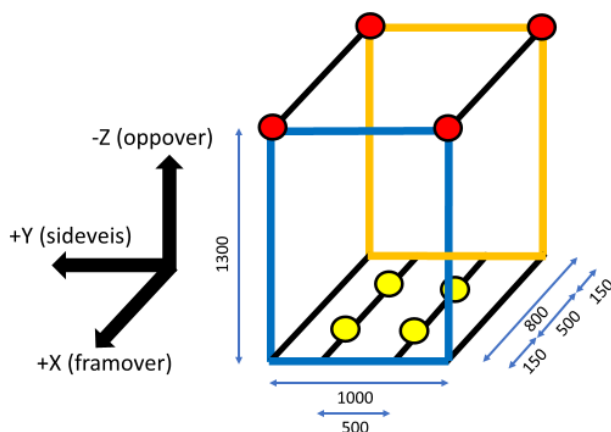
beregningsmodellen er avstanden mellom de vertikale elementene i bredderetning satt til den maksimale antatte avstanden mellom disse fra løsningsforslaget. Alle elementene i beregningsmodellen har samme tverrsnitt og stivhet, (EI). Elementene som den forenklete beregningsmodellen omfatter vil videre i oppgaven også bli omtalt som sikkerhetsstrukturen.



Figur 45: Forenklet beregningsmodell med rette vertikale elementer, påsatt dimensjoner i mm.

### 8.2.3 Plassering av laster i forenklet beregningsmodell

Figuren under viser hvordan de forskjellige lastene plasseres på den forenklete beregningsmodellen.



Figur 46: Plassering av laster på den forenklete beregningsmodellen, påsatt dimensjoner i mm.

#### Forklaring til figur 46:

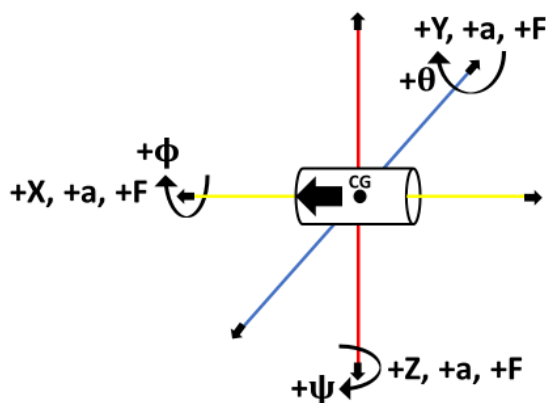
Lastene blir plassert på følgende måte på den forenklete beregningsmodellen:

- Beregningsmodellen opplagres i de røde sirklene.
- Lastene fra interiør (sete), og fører påsettes den forenklete beregningsmodellen i de gule sirklene (opplagringspunkter for sete) som punktlaster.
- Luftmotstandskrefter påsettes eventuelt den forenklete beregningsmodellen som en jevnt fordelt last over det blå rektangelet, med retning i -X-retningen.
- Skyvekrefter påsettes eventuelt den forenklete beregningsmodellen som en jevnt fordelt last over det oransje rektangelet, med retning i +X-retningen.
- Konstruksjonsegenvekt påsettes den forenklete beregningsmodellen i konstruksjonens tyngdepunkt.

- Akselerasjoner påsettes den forenklede beregningsmodellen i konstruksjonens tyngdepunkt.

## 8.3 Kartlegging av maksimale laster i sikkerhetsstruktur

Delkapitlet tar for seg kartleggingen av maksimale laster i forskjellige anvendelses situasjoner. Ut ifra kartleggingen skal det i neste delkapittel utarbeides belastningstilfeller, som den forenklede beregningsmodellen (sikkerhetsstrukturen) skal dimensjoneres etter. Figuren under viser fortegnskonvensjonen for translasjon, rotasjon, akselerasjon og kraft.



Figur 47: Fortegnskonvensjon for translasjon, rotasjon, akselerasjon og kraft.

### 8.3.1 Forutsetninger

I tabellene under er det oppgitt verdier for forskjellige parametere som vil bli benyttet til å kartlegge maksimale laster, samt til utarbeiding av belastningstilfeller. Over tabellene er formlene som er benyttet til å beregne de forskjellige verdiene oppgitt (definisjonen av disse finnes i kapittel 3.1.2). Videre er den maksimale positive akselerasjonen i Z-retning satt til 1,5 gange tyngdeakselerasjonen\*. Det er svært usannsynlig at Dolphin Sky vil utsettes for en så stor positiv akselerasjon, men det velges her allikevel å bruke denne verdien for å legge inn ekstra sikkerhet, slik at det tas høyde for:

- Dersom det må utføres en svært rask nedstigning for å unngå en hindring.
- Dersom gasspådragskontrollen ved et uhell settes til fullt negativt utslag (hvis det er mulig (for eksempel hvis det ikke er lagt inn begrensinger i utslag i pådragskontrollen)).
- For å ta hensyn til et landingstilfelle som er noe hardere enn det Dolphin Sky er beregnet for (for eksempel ved en nødlanding, eller i tilfeller der det forekommer plutselig kraftige vindkast under landing).

\*):

Øvrige krefter og akselerasjoner er utregnet på grunnlag av maksimale verdier for løftekraft. Maksimal løftekraft er brukt til å regne ut X og Y-komponentene til akselerasjonen og tyngdekrefter grunnet nyttelast og interiør.

#### Formler:

$$A_{proj,est} = h_{bm} \cdot b_{bm} \quad (19)$$

Tabell 52: Forutsetninger for kartlegging av laster.

Parameter	Formel/Referanse	Verdi
$m_{tot}$	-	450,00 Kg
$m_{i+p}$	-	161,20 Kg
$h_{bm}$	-	1,30 m
$b_{bm}$	-	1,00 m
$A_{proj, est}$	<b>(19)</b>	1,30 m <sup>2</sup>
$V_{str}$	-	100,00 $\frac{m}{s}$
$\rho_L^*$	[33]	1,293 $\frac{Kg}{m^3}$
$C_{d, est}$	-	0,40
$g$	-	9,81 $\frac{m}{s^2}$

\*) Luftdensitet ved 273 grader kelvin.

**Formler:**

$$F_{d, est} = \frac{1}{2} \cdot \rho_l \cdot C_{d, est} \cdot A_{prj, est} \cdot V_{str}^2 \quad (23)$$

$$F_{d, x, est} = F_{d, est} \cdot \cos \theta \quad (24)$$

$$F_{d, z, est} = F_{d, est} \cdot \sin \theta \quad (25)$$

$$F_{s, est} = - F_{d, est} \quad (26)$$

$$F_{s, x, est} = - F_{d, x, est} \quad (27)$$

$$F_{s, z, est} = - F_{d, z, est} \quad (28)$$

$$F_l = F_{l, xz} = F_{l, xy} \quad (33)$$

$$F_{l, x} = F_l \cdot \sin \theta \quad (29)$$

$$F_{l, y} = F_l \cdot \sin \phi \quad (30)$$

$$F_{l, z} = F_l \cdot \cos \theta / \phi \quad (31)$$

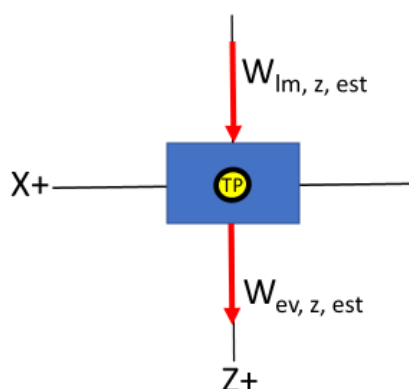


Tabell 53: Forutsetninger for kartlegging av laster, utregnede krefter.

Parameter	Formel/Referanse	Minimumsverdi [N]	Maksimumsverdi [N]
$F_{d, est} = F_{d, xz, est}$	(23)	- 259,36	0
$F_{d, x, est}$	(24)	- 250,56	0
$F_{d, z, est}$	(25)	- 67,14	67,14
$F_{s, est} = F_{s, xz, est}$	(26)	0	259,36
$F_{s, x, est}$	(27)	0	250,56
$F_{s, z, est}$	(28)	- 67,14	67,14
$F_l = F_{l, xz} = F_{l, yz}$	(33)	- 8800,00	8800,0
$F_{l, x}$	(29)	- 2277,61	2277,61
$F_{l, y}$	(30)	- 2277,61	2277,61
$F_{l, z}$	(31)	- 8500,15	8500,15

### 8.3.2 Bakkelaster

Figur 48 viser lastene som virker på løsningen på bakken. Under figuren er det oppgitt beregningsformlene for de forskjellige lastene (på bakken er  $a_z = 0$ ). I tabellen under beregningsformlene er kreftene som virker på løsningen oppgitt.



Figur 48: Laster som virker på løsningen på bakken.

**Formler:**

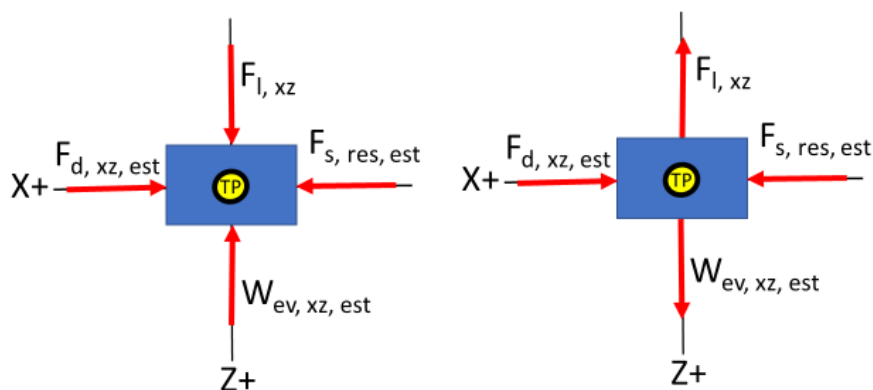
$$W_{i+p,z,est} = m_{i+p} \cdot (a_z + g) \quad (36)$$

Tabell 54: Laster på løsningen på bakken.

Parameter	Formel/Referanse	Verdi [N]
$W_{i+p, z, est}$	(36)	1581,37

## 8.3.3 Laster ved plan flyvning

Figur 49 viser lastene som virker på løsningen ved plan flyvning. Under figuren er det oppgitt beregningsformlene for de forskjellige lastene. I tabellen under beregningsformlene er maksimale og minimale verdier av akselerasjonskomponentene oppgitt, samt betingelsene for når disse inntreffer.



Figur 49: Laster som virker på løsningen ved plan flyvning.

**Formler:**

$$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m_{tot}} \quad (20)$$

$$a_z = \frac{\Sigma F_z}{m_{tot}} \quad (22)$$

$$W_{i+p,x,est} = m_{i+p} \cdot a_x \quad (34)$$

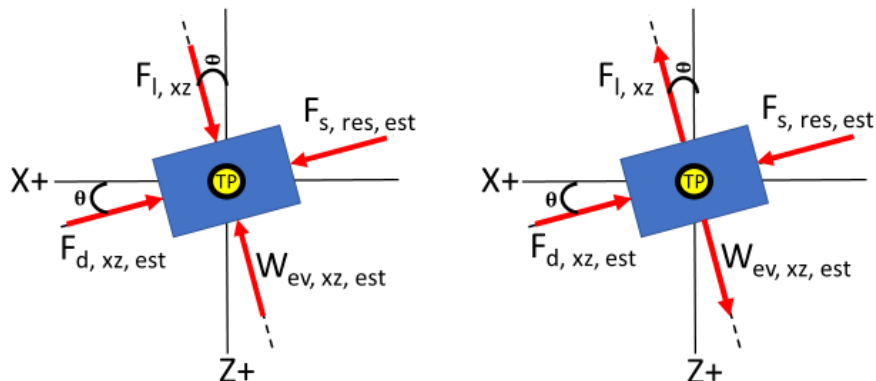
$$W_{i+p,z,est} = m_{i+p} \cdot (a_z + g) \quad (36)$$

Tabell 55: Maksimal og minimalverdier av akselerasjonskomponenter.

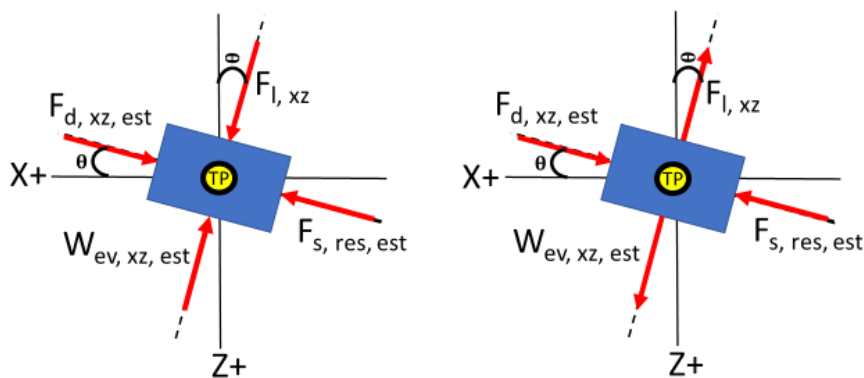
Parameter	Formel/ Referanse	Minimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved minimumsverdi	Maksimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved maksimumsverdi
$a_x$	(21)	- 0,58	$F_d = \min$ $F_s = 0$	0,58	$F_d = 0$ $F_s = \text{maks}$
$a_z$	(23)	- 9,75	$F_l = \min$	14,72	$F_l = \text{maks}$ (teoretisk)

## 8.3.4 Laster ved PITCH manøver

Figur 50 og 51 viser lastene som virker på løsningen ved en PITCH manøver. Under figuren er det oppgitt beregningsformlene for de forskjellige lastene. I tabellen under beregningsformlene er maksimale og minimale verdier av akselerasjonskomponentene oppgitt, samt betingelsene for når disse inntreffer (Utregning av krefter vil bli utført dersom tilfellet benyttes som belastningstilfelle).



Figur 50: Laster som virker på løsningen ved PITCH manøver på - 15 grader.



Figur 51: Laster som virker på løsningen ved PITCH manøver på + 15 grader..

**Formler:**

$$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m_{tot}} \quad (20)$$

$$a_z = \frac{\Sigma F_z}{m_{tot}} \quad (22)$$

$$W_{i+p,x,est} = m_{i+p} \cdot a_x \quad (34)$$

$$W_{i+p,z,est} = m_{i+p} \cdot (a_z + g) \quad (36)$$

Tabell 56: Maksimal og minimalverdier av akselerasjonskomponenter ved PITCH manøver, - 15 grader.

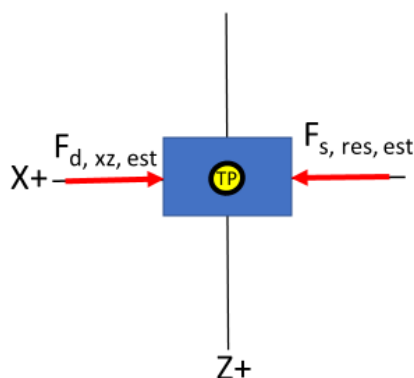
Parameter	Formel/ Referanse	Minimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved minimumsverdi	Maksimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved maksimumsverdi
$a_x$	<b>(20)</b>	-5,62	$F_l = \text{maks}$ $F_d = \text{min}$ $F_s = 0$	5,62	$F_l = \text{min}$ $F_d = 0$ $F_s = \text{maks}$
$a_z$	<b>(22)</b>	- 9,23	$F_l = \text{min}$ $F_d = \text{min}$ $F_s = 0$	14,72	$F_l = \text{maks}$ (teoretisk) $F_d = 0$ $F_s = \text{maks}$

Tabell 57: Maksimal og minimalverdier av akselerasjonskomponenter ved PITCH manøver, + 15 grader.

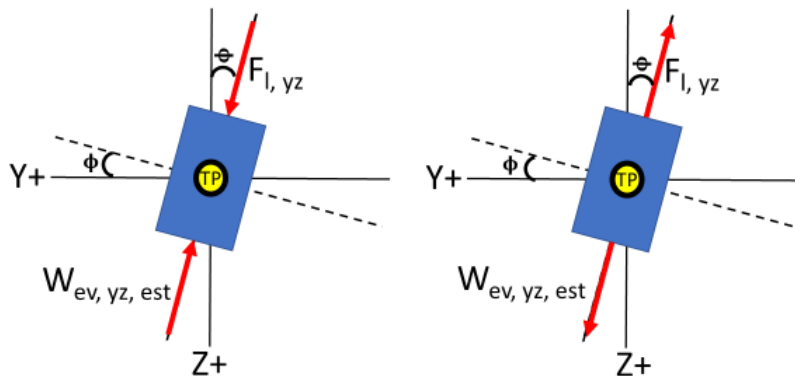
Parameter	Formel/ Referanse	Minimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved minimumsverdi	Maksimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved maksimumsverdi
$a_x$	<b>(21)</b>	-5,62	$F_l = \text{min}$ $F_d = \text{min}$ $F_s = 0$	5,62	$F_l = \text{maks}$ $F_d = 0$ $F_s = \text{maks}$
$a_z$	<b>(23)</b>	- 9,23	$F_l = \text{min}$ $F_d = 0$ $F_s = \text{maks}$	14,72	$F_l = \text{maks}$ (teoretisk) $F_d = \text{min}$ $F_s = 0$

### 8.3.5 Laster ved ROLL manøver

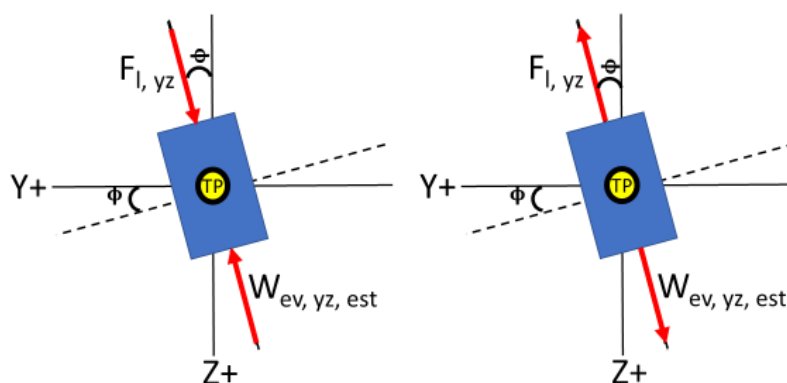
Figur 52, 53 og 53 viser lastene som virker på løsningen ved en ROLL manøver. Under figuren er det oppgitt beregningsformlene for de forskjellige lastene. I tabellen under beregningsformlene er maksimale og minimale verdier av akselerasjonskomponentene oppgitt, samt betingelsene for når disse inntreffer (Utregning av krefter vil bli utført dersom tilfellet benyttes som belastningstilfelle).



Figur 52: Laster som virker på løsningen i XZ-planet ved ROLL manøver på  $\pm 15$  grader.



Figur 53: Laster som virker på løsningen i YZ-planet ved ROLL manøver på - 15 grader.



Figur 54: Laster som virker på løsningen i YZ-planet ved ROLL manøver på + 15 grader.

### Formler:

$$a_x = \frac{\Sigma F_x}{m_{tot}} \quad (20)$$

$$a_y = \frac{\Sigma F_y}{m_{tot}} \quad (21)$$

$$a_z = \frac{\Sigma F_z}{m_{tot}} \quad (22)$$

$$W_{i+p,x,est} = m_{i+p} \cdot a_x \quad (34)$$

$$W_{i+p,y,est} = m_{i+p} \cdot a_y \quad (35)$$

$$W_{i+p,z,est} = m_{i+p} \cdot (a_z + g) \quad (36)$$

Tabell 58: Maksimal og minimalverdier av akselerasjonskomponenter ved PITCH manøver, - 15 grader.

Parameter	Formel/ Referanse	Minimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved minimumsverdi	Maksimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved maksimumsverdi
$a_x$	(20)	- 0,58	$F_d = \min$ $F_s = 0$	0,58	$F_d = 0$ $F_s = \text{maks}$
$a_y$	(21)	- 5,06	$F_I = \min$	5,06	$F_I = \text{maks}$
$a_z$	(22)	- 9,08	$F_I = \min$	14,72	$F_I = \text{maks}$ (teoretisk)

Tabell 59: Maksimal og minimalverdier av akselerasjonskomponenter ved PITCH manøver, + 15 grader.

Parameter	Formel/ Referanse	Minimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved minimumsverdi	Maksimumsverdi $\frac{m}{s^2}$	Betingelser ved maksimumsverdi
$a_x$	(20)	- 0,58	$F_d = \min$ $F_s = 0$	0,58	$F_d = 0$ $F_s = \text{maks}$
$a_y$	(21)	- 5,06	$F_I = \text{maks}$	5,06	$F_I = \min$
$a_z$	(22)	- 9,08	$F_I = \min$	14,72	$F_I = \text{maks}$ (teoretisk)

## 8.4 Belastningstilfeller

Delkapittel redegjør for belastningstilfellene den forenklete beregningsmodellen (sikkerhetsstrukturen) skal dimensjoneres etter. Det er blitt utarbeidet to belastningstilfeller benevnt nummer 1 og nummer 2:

- I belastningstilfelle nummer 1 påsettes den maksimale akselerasjonen som kan forekomme; i negativ Z-retning, positiv Y-retning og positiv X-retning.
- I belastningstilfelle nummer 2 påsettes den maksimale akselerasjonen som kan forekomme; i positiv Z-retning (maksimal positiv akselerasjon), positiv Y-retning og positiv X-retning.

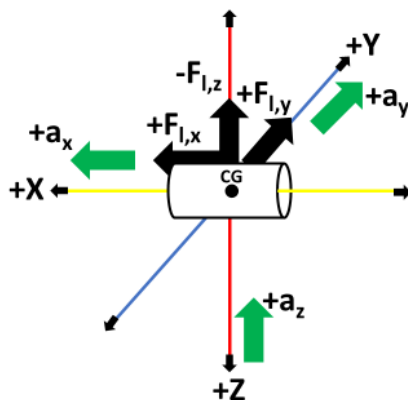
Gitt forutsetningene for de ulike anvendelsene kan ikke kombinasjonene av maksimale akselerasjoner og laster i belastningstilfellene forekomme samtidig, det er allikevel besluttet å benytte disse fordi:

- Det er blitt sett bort ifra noen laster (blant annet luftmotstand).
- Utførelsen av manøvrering av Dolphin Sky fortsatt ikke er fullstendig kartlagt.
- Kartleggingen av krefter er ikke fullstendig.

Ettersom opplagringspunktene for lastene er symmetriske om XZ-planet, vil ikke retningen til akselerasjonskomponenter spille noen rolle, det er derfor besluttet at X og Y komponenten skal virke i positiv retning i belastningstilfellene. Det er besluttet å se bort ifra skyvekraften og kreftene som oppstår grunnet luftmotstand, da disse er små i forhold til tyngdelastene, og at de er antatt å virke som jevnt fordelte laster over relativt store arealer. Videre er det antatt at landingen av Dolphin Sky vil foregå med lav hastighet, slik at kreftene som oppstår som resultat av landingen er ubetydelige i forhold til manøvreringslastene, og derfor kan neglisjeres i dimensjoneringen.

## 8.4.1 Belastningstilfelle nummer 1

Figuren under viser lastene som virker på løsningen i belastningstilfelle nummer 1, med de resulterende akselerasjonsretningene. Under figuren er det gitt en tabell (52) med de eksterne kreftenes og akselerasjonenes størrelse og retning. Til sist er det gitt en tabell (53) med utregnede interne tyngdekrefter.



Figur 55: Laster som virker på løsningen og akselerasjonsretninger i belastningstilfelle nummer 1.

Tabell 60: Påsatte eksterne krefter og akselerasjonskomponenter for belastningstilfelle 1.

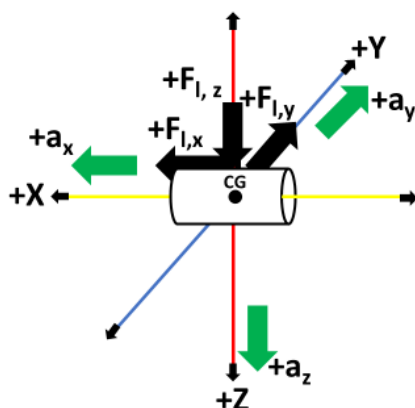
Parameter	Verdi
$F_{l,x}$	2528,17 N
$F_{l,y}$	2277,61 N
$F_{l,z}$	- 8800,00 N
$a_x$	$5,62 \frac{m}{s^2}$
$a_y$	$5,06 \frac{m}{s^2}$
$a_z$	$- 9,75 \frac{m}{s^2}$

Tabell 61: Utregnede tyngdekrefter for belastningstilfelle 1.

Parameter	Formel/Referanse	Verdi
$W_{i+p,x,est}$	(34)	- 905,62 N
$W_{i+p,y,est}$	(35)	- 815,83 N
$W_{i+p,z,est}$	(36)	3152,43 N

## 8.4.2 Belastningstilfelle nummer 2

Figuren under viser lastene som virker på løsningen i belastningstilfelle nummer 2, med de resulterende akselerasjonsretningene. Under figuren er det gitt en tabell (46) med de eksterne kreftenes og akselerasjonenes størrelse og retning. Til sist er det gitt en tabell (47) med utregnede interne tyngdekrefter.



Figur 56: Laster som virker på løsningen og akselerasjonsretninger i belastningstilfelle nummer 2.

Tabell 62: Påsatte eksterne krefter og akselerasjonskomponenter for belastningstilfelle 2.

Parameter	Verdi
$F_{l,x}$	2528,17 N
$F_{l,y}$	2277,61 N
$F_{l,z}$	8800,00 N
$a_x$	$5,62 \frac{m}{s^2}$
$a_y$	$5,06 \frac{m}{s^2}$
$a_z$	$14,72 \frac{m}{s^2}$

Tabell 63: Utregnede tyngdekrefter for belastningstilfelle 2.

Parameter	Formel/Referanse	Verdi
$W_{i+p,x,est}$	(34)	- 905,62 N
$W_{i+p,y,est}$	(45)	- 815,83 N
$W_{i+p,z,est}$	(46)	- 790,69 N

## 8.5 Tidlig dimensjonering

Kapittelet tar for seg dimensjonering av den forenklete beregningsmodellen (sikkerhetsstrukturen), der hensikten med dimensjonering er å danne grunnlaget for den videre utviklingen av løsningen. Det vil først bli kort redegjort for gjeldene regneverk for dimensjonering av rotordrevne luftfartøy. Deretter fremlegges de forutsetningene og antakelsene som er gjort i dimensjoneringen. Videre blir beregningsmodell og analyse oppsettet i ANSYS redegjort for. Resultatene av analysene blir deretter framlagt og løsningen blir deretter dimensjonerte basert på analyse resultatene og resultater fra håndberegninger. Til slutt i kapittelet blir ANSYS resultatene verifisert med håndberegninger.



## 8.5.1 Kort om gjeldene regelverk for sertifisering av rotordrevne luftfartøy

Sertifisering av rotordrevne luftfartøy i EU og USA er dekket i henholdsvis EASA (EU) standard CS 27 og FAA (USA) standard FAR 27.

**Dimensjoneringskarvet for manøver laster (avsnitt 27.377) er likt i begge standardene og lyder som følger [48], [49]:**

Det rotordrevne luftfartøyet må være designet slik at det tåler:

- a) En positiv manøver lastfaktor på 3,5 og en negativ manøver lastfaktor på -1,0.

Eller:

- b) En positiv manøver lastfaktor ikke mindre enn 2,0 og en negativ manøver lastfaktor på ikke større enn -0,5.

For hvilket:

- 1) Sannsynligheten for at lastfaktoren overskrides er vist ved analyse og testing å være ekstremt liten.

Og:

- 2) At lastverdiene er passende for enhver fartøysvekt mellom maksimal og minimal designvekt.

**Videre er kravet til sikkerhetsfaktor mot manøver laster for rotordrevne luftfartøy gitt i avsnitt 27.303 i begge standardene og lyder som følger [48], [49]:**

- Luftfartøyet skal dimensjoneres med en sikkerhetsfaktor som er større eller lik 1 mot flyt og større eller lik 1,5 mot brudd, ved de maksimale manøver lastene multiplisert med lastfaktoren.

### **Begrunnelse for at løsningen ikke dimensjoneres etter FAR/CS 27:**

Lastfaktoren i belastningstilfellene kan regnes ut ved å dividere den totale løftekraftresultanten på løsnings egyptyngde ved null akselerasjon: Lastfaktoren blir da omtrentlig +2,69 og -0,69. Lastfaktoren er noe lavere enn kravet som settes i FAR/CS 27 standarden, men det velges altså her, allikevel å dimensjonere løsningen etter belastningstilfellene, av følgende grunner:

- Dimensjoneringen av løsningen utføres med en betydelig høyere sikkerhetsfaktor mot både flyt og brudd, enn det som er spesifisert i standardene.
- Belastningstilfellene antas å være konservative ettersom belastningen i disse er betydelig høyere enn det som ble funnet sannsynlig at inntreffer i kartleggingen (dette oppfyller riktignok ikke karvet om påvisning ved analyse og testing).
- Kravene fra de aktuelle standardene er ment å ivareta sikkerheten i fartøy som beveger seg hurtigere og som kan forta betydelig mer voldsomme manøvrere enn Dolphin Sky.

## 8.5.2 Forutsetninger og begrensinger for dimensjonering

Delkapittelet tar for seg noen av forutsetningene og bestemmelsene som er gjort for dimensjoneringen.

### Dimensjonerende spenningsnivå:

Dimensjonerende spenningsnivå i konstruksjonen vil være laveste verdi av formel (37):

$$\sigma_{till} \leq \frac{\sigma_b}{n_b} \text{ eller } \sigma_{till} \leq \frac{\sigma_f}{n_f} \quad (37)$$

$$\sigma_{till} \leq \frac{\sigma_b}{n_b} = \frac{579}{2,6} = 222,69 \text{ MPa} \quad (37)$$

$$\sigma_{till} \leq \frac{\sigma_f}{n_f} = \frac{524}{2,0} = 262,00 \text{ MPa} \quad (37)$$

Bruddgrensen vil etter de fastsatte sikkerhetsfaktorene for flyt og brudd, være den dimensjonerende faktoren.

Setter dimensjoneringsverdi for spenning til;  $\sigma_{till} \leq 220 \text{ MPa}$

### Knekking:

Det er benyttet metode 1, forenklet interaksjonsregel for å dimensjonere løsningen mot knekking. Videre er sikkerhetsfaktoren mot knekking ( $n_k$ ) satt til 3, ettersom dette blir anbefalt for metoden [34]. Metoden benyttes ettersom den er svært konservativ (på konservativ side i forhold til EC3).

### Feilhypoteser (dimensjonerende spenning)/spennings avlesning i ANSYS:

Den maksimale opptredenen spenningen som avleses i ANSYS for det aktuelle belastningstilfellet, og som vil bli benyttet som dimensjoneringsverdien er Von Mises spenningen (også benevnt equivalent stress i ANSYS). Grunnen til at denne parameteren benyttes ovenfor andre spenninger og feilhypoteser, er fordi den generelt gir det nærmeste anslaget for sannsynlig dimensjonerende spenning i duktile materialer, som det er antatt at det valgte konstruksjonsmaterialet vil oppføre seg som.

### Materialegenskaper i ANSYS:

Materialegenskapene for det valgte konstruksjonsmaterialet er lagt inn manuelt i Workbench, med følgende forbehold:

- Bruddgrensen under trykkspenning er ikke oppgitt i materialdataen for den aktuelle legering i CES EduPack (ifølge CES EduPack er denne lik eller svært lite avvikende fra bruddgrensen under strekkspenning), denne er derfor satt tilsvarende bruddgrensen under strekkspenning.
- Det er ikke mulig å legge inn elastisitetsmodulen for skjær og trykkspenning (shear og bulk modulus), dersom den generelle elastisitetsmodulen og poissontallet for legeringen skal legges inn, disse blir da regnet ut automatisk av Workbench basert på de andre innlagte parameterne. Med de innlagte verdiene for elastisitetsmodul og poissontall, er verdiene for shear og bulk modulus noe overestimert i forhold til det som er oppgitt i CES databladet for materialet.

## Nedbøyning:

Det vil ikke bli satt noen grenseverdi eller bli dimensjonert mot en grenseverdi for nedbøyning i denne dimensjoneringen. Dette vil eventuelt bli utført på et senere tidspunkt da den endelige tverrsnittutformingen er fastsatt..

## Tverrsnittutforming:

Alle elementene vil i denne dimensjonering ha samme tverrsnitt, og tverrsnittdimensjonen bestemmes ut ifra det mest belastede tverrsnittet. Videre er alle tverrsnittene solide og kvadratiske, dette for å forenkle modelleringen og dimensjoneringen. Eventuell optimalisering av tverrsnitt i forhold til dominerende belastingsretning, utforming (selve tverrsnittet og elementutforming) og forsterkning av tverrsnittet for avstivning og vekt optimalisering blir foretatt i et senere kapittel.

### 8.5.3 Oppsett for ANSYS Workbench beregningsmodeller

Delkapittelet redegjør for oppsettet i de to beregningsmodellene, som skal benyttes i dimensjoneringen av løsningen.

Det er blitt utarbeidet to modeller i ANSYS:

- Den ene består av linebodies, der linjenes plassering korresponderer med spesifikasjonene for den forenklede beregningsmodellen. Det er deretter blitt utformet et solid kvadratisk tverrsnitt, som er påsatt alle linjene, slik at linjene går gjennom tverrsnittets senterakse. Denne modellen gir ikke spennings resultater, men benyttes for å hente ut følgende resultater:
  - Ettersom opplagring og kraftpåføring er direkte på linjene (senteraksen til elementer), vil modellen gi resultater for opplagerkrefter og aksielle krefter som er mer sammenfallende med en den todimensjonale modellen som benyttes i verifiseringen.
  - Videre vil ikke den andre modellen som benyttes i dimensjonering gi resultater for aksielle krefter. Disse er nyttige for å verifisere at korrekt knekklast er benyttet i knekkebergningen.
- Den andre modellen er utarbeidet i Solidworks og deretter importert til Workbench. De forskjellige elementene i modellen er plassert slik at deres senterakser sammenfaller med spesifikasjonen for den forenklede beregningsmodellen. Tverrsnittene til elementene for denne modellen er tilsvarende som for linebody modellen. Det ble testet om forskjellige opplagrings og lastpåføringsmetoder ville medføre variasjoner av betydning i resultatene:
  - Opplagring: her ble variasjonen i resultater kartlagt for opplagring i en overflate kontra opplagring i punkter på elementenes senterakser. Variasjonen viste seg å være svært liten og derfor ubetydelig (marginalt høyere spenningsverdi for overflateopplagring). Det ble her valgt å bruke varianten med overflateopplagring ettersom denne er en bedre representasjon av slik den virkelige applikasjonen vil være, samt at dette er et konservativt valg.
  - Lastpåføring: her ble det undersøkt om det ville være noen variasjon i resultatene dersom lastene fra interiør og fører ble påsatt som punktlaster eller som laster fordelt over en linje. Det ble ikke funnet noen særlig variasjon i resultatene. Det ble valgt at lasten påføres som punktlaster, ettersom dette ga en litt høyere maksimal spenningsverdi, og derfor er et konservativt valg.

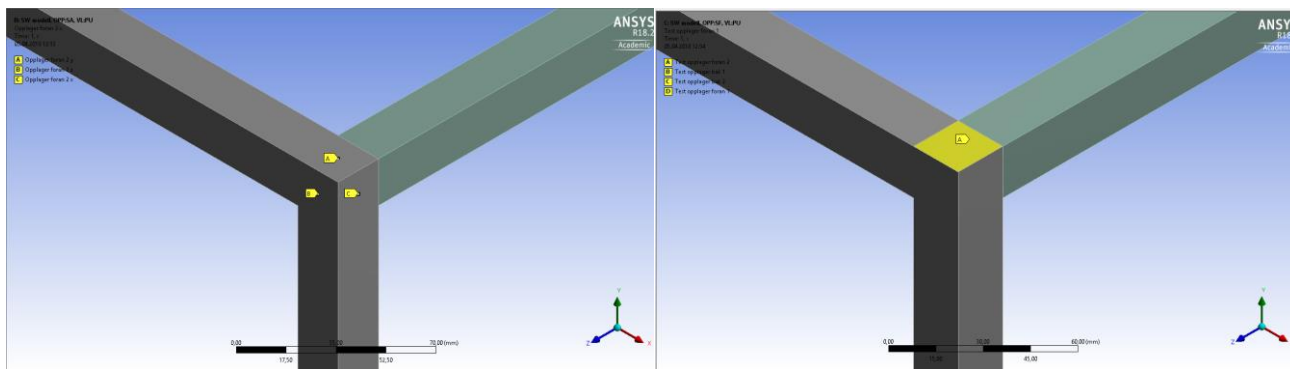
Begge modellene er opplagret i de fire angitte punktene med følgende grensebetingelser:

- Låst for translasjon i alle translatoriske akser og fri for rotasjon om alle rotasjonsakser (tre frihetsgrader).

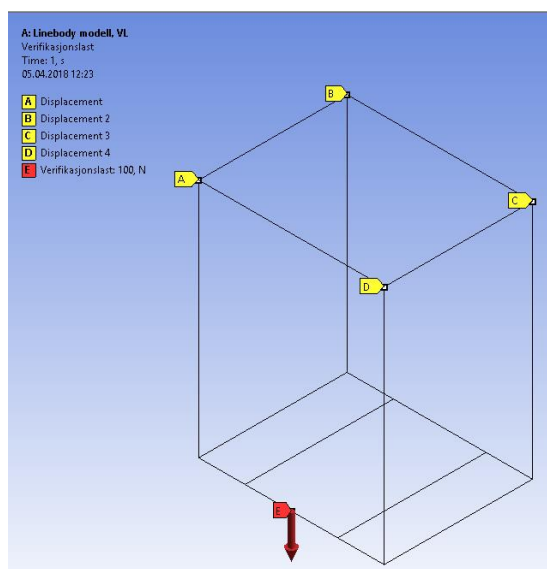
Meshet for begge modellene er automatisk generert, og satt til den minste elementstørrelsesverdien som ANSYS analysen tillater (uten å overskride antall tilgjengelige noder og elementer). Elementstørrelsen er ikke forfinet i knutepunktene. For linebody modellen betyr dette en elementstørrelse på 1 mm og for Solidworks importen betyr dette en elementstørrelse på 7 mm.

De påfølgende figurene viser opplagringen, samt lastpåføring for verifiseringstilfellet og for belastningstilfellene. I verifikasjonstilfellet er en last på 100 N påsatt som vist i figur 58, lastpåføringen er slik for å gjøre verifikasjonen så enkel som mulig. Som det framkommer av figurene er tyngdeakselerasjon, samt de respektive maksimale akselerasjonene for tilfellet påsatt i modellens tyngdepunkt, dette skal ta hensyn til løsningsens egenvekt. Videre er lastene fra interiøret og fører påsatt som punktlaster i de anviste punktene. Verdier for laster og akselerasjoner er oppgitt i kraftkartleggingskapittelet og i figurene.

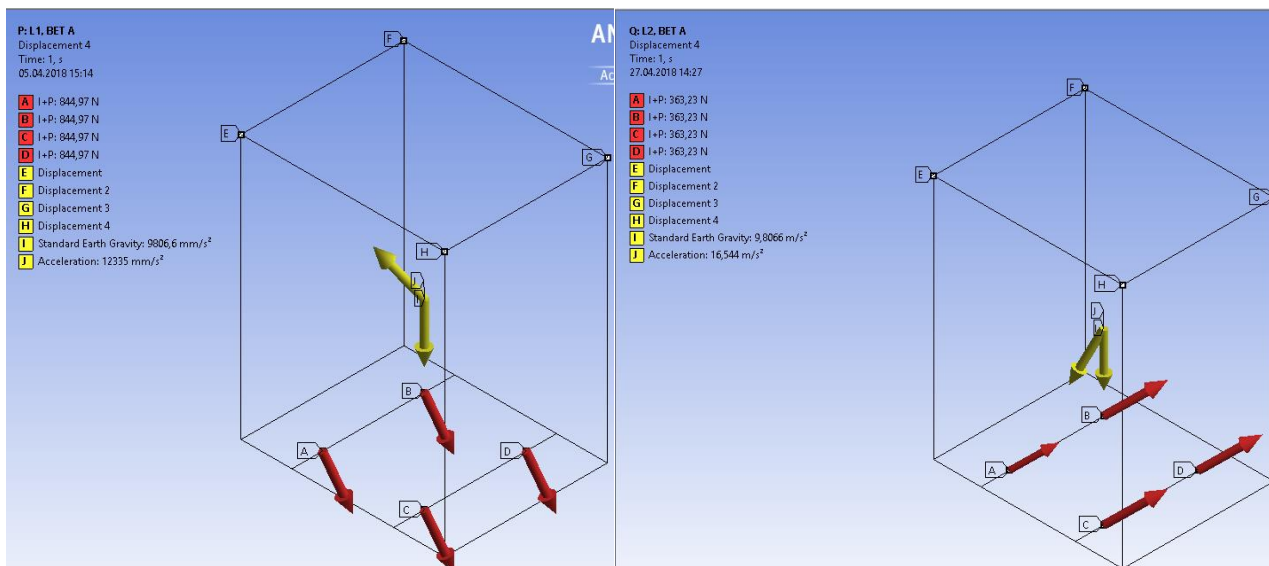
Som utgangspunkt for dimensjoneringen er tverrsnittdimensjonen for begge modellene satt til 20 x 20 mm.



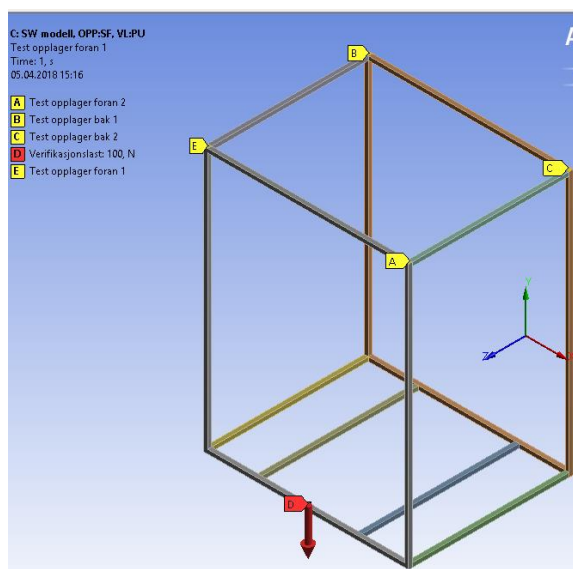
Figur 57: De forskjellige opplagringsmetodene for ett opplager, som ble testet ut for den Solidworks importerte modellen. TV: opplagring i elementets senterakse, TH: opplagring i det vertikale elementets overflate.



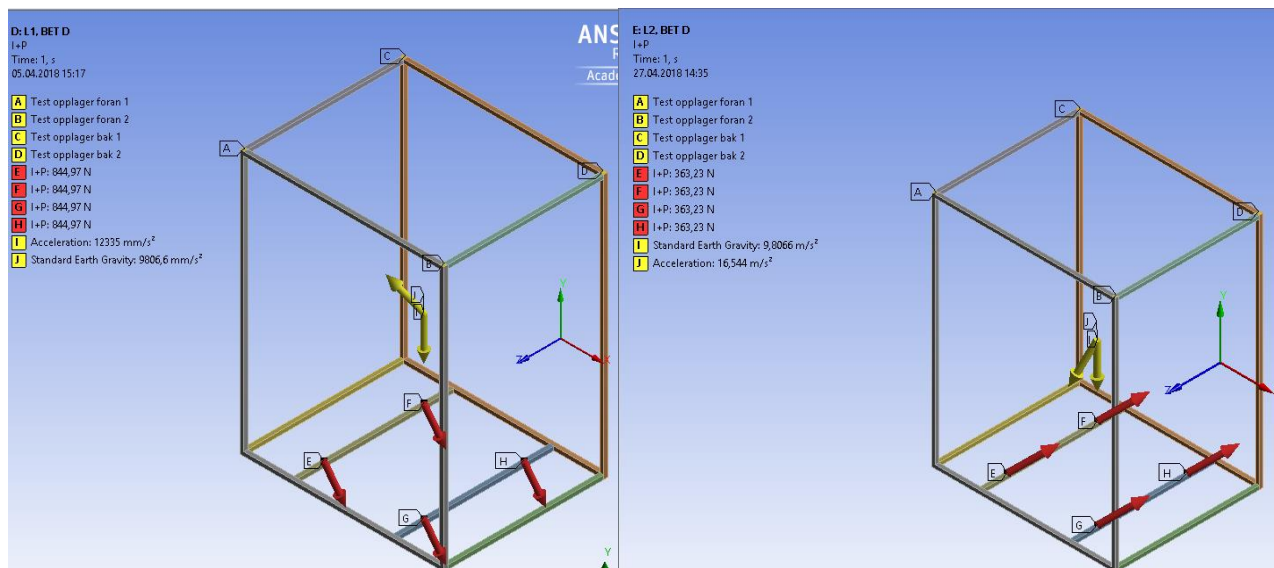
Figur 58: Opplagring og lastpåføring for linebody modellen i verifikasjonstilfellet.



Figur 59: Opplagring og lastpåføring for linebody modellen i de to belastningstilfellene. TV: belastningstilfelle 1, TH: belastningstilfelle 2.



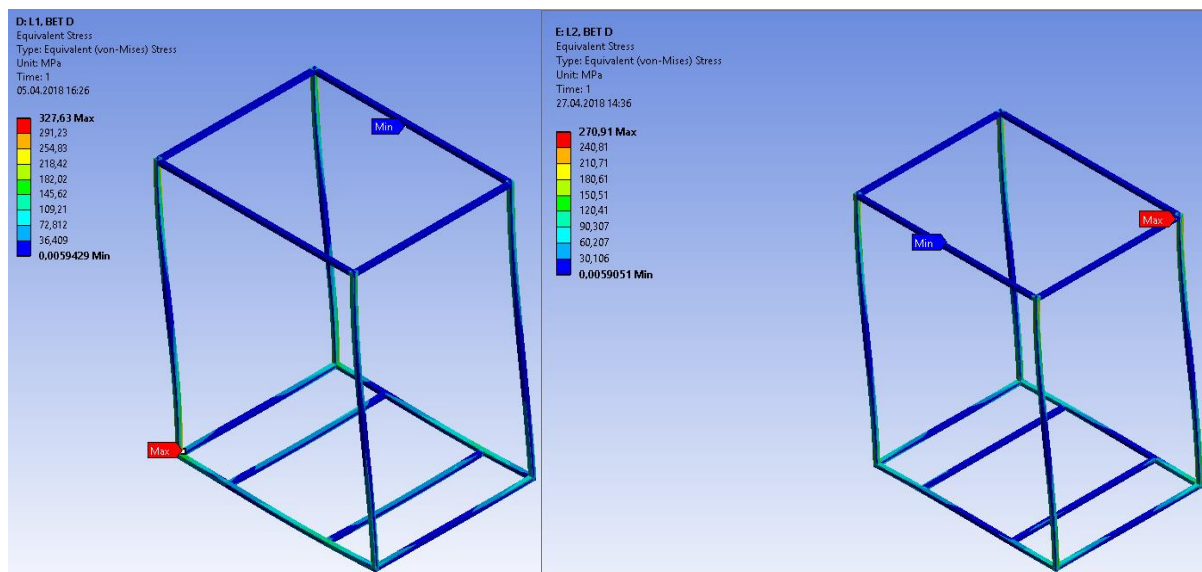
Figur 60: Opplagring og lastpåføring for den Solidworks importerte modellen i verifikasjonstilfellet.



Figur 61: Opplagring og lastpåføring for den Solidworks importerte modellen i de to belastningstilfellene. TV: belastningstilfelle 1, TH: belastningstilfelle 2.

## 8.5.4 Resultater av analyse og dimensjonering mot statisk brudd

Delkapittelet tar for seg resultatene fra ANSYS Workbench analysen i begge belastningstilfellene, og dimensjoneringen av disse mot statisk brudd. Resultatet av dimensjonering vil også bli verifisert med en ny analyse utført ANSYS på en modell med de fastsatte nødvendige dimensjonene funnet i dimensjoneringen.



Figur 62: Omfang og lokasjon for maksimal og minimal opptredende ekvivalent spenning i respektive lasttilfeller. TV: Belastningstilfelle 1(maksverdi = 327,63 MPa), TH: Belastningstilfelle 2 (Maksverdi = 270,91 MPa).

Som det framkommer av figur 62, vil belastningstilfelle nummer 1 være det dimensjonerende tilfellet. Den maksimale ekvivalente spenningen som forekommer i dette tilfellet er omtrent 330 MPa. Den opptredende spenningen er altså høyere enn den maksimalt tillatte spenningen, noe som betyr at tverrsnittdimensjonen til elementene må økes.

## Utrekning av nødvendig tverrsnittmodul:

$$\sigma_{till} \leq 220 \text{ MPa}$$

$$\sigma_e = 330 \text{ MPa}$$

Det antas her at forholdet mellom spenning og tverrsnittmodul  $n$ , er direkte proporsjonalt, og at nødvendig tverrsnittmodul derfor kan finnes ved å multiplisere forholdet  $n$  med tverrsnittmodulen som medfører spenning  $\sigma_e$ .

$$n = \frac{\sigma_e}{\sigma_{till}} = \frac{330}{220} = 1,5 \quad (38)$$

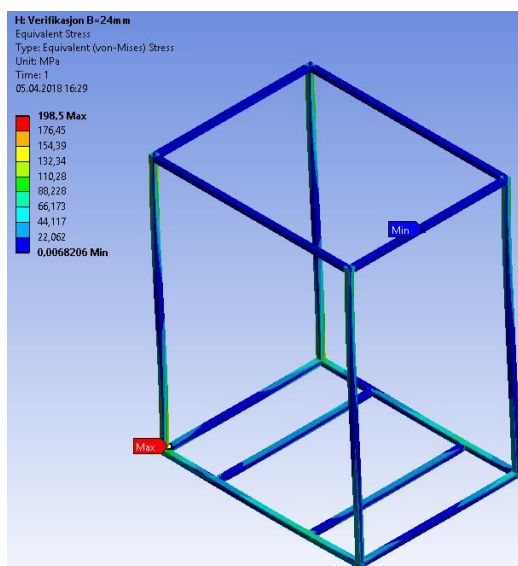
$$W_k = \frac{1}{6} \cdot s^3 \quad (39)$$

$$W_{n\ddot{o}dv} = n \cdot W_k = 1,5 \cdot \frac{1}{6} \cdot 20^3 = \mathbf{2000 \text{ mm}^3} \quad (40)$$

N\ddot{o}dvendig sidekantlengde for et kvadratisk tverrsnitt  $s$ , vil da v\ddot{a}re f\dd{o}lgende:

$$s = \sqrt[3]{6 \cdot W_{n\ddot{o}dv}} = \sqrt[3]{6 \cdot 2000} = 22,89 \text{ mm} \approx \mathbf{23 \text{ mm}} \quad (41)$$

Som verifikasjon p\dd{a} denne beregningen er det utarbeidet en ny modell i SolidWorks, der sidekantene i tverrsnittet er satt til 24 mm (her er det valgt \dd{a} benytte sidekanter p\dd{a} 24 mm istedenfor 23 mm ettersom det er enklere \dd{a} f\dd{a} modellen riktig med tanke p\dd{a} senterakser og lastplassering). Modellen er laget etter samme metode som den tidligere modellen, der senteraksene til elementene sammenfaller med den forenklede beregningsmodellens dimensjoner. Modellen er deretter blitt importert til ANSYS Workbench og p\dd{a}f\dd{o}rt laster p\dd{a} samme m\dd{a}te som den f\dd{o}rste SolidWorks importerte modellen. Resultatet er framlagt i p\dd{a}f\dd{o}lgende figur:



Figur 63: Omfang og lokasjon for minimal og maksimal opptredende ekvivalent spenning (Maks = 198,5 MPa).



Som det framkommer av figur 63, viser ANSYS analysen at den maksimale opptrendene ekvivalente spenningen med det modifiserte tverrsnittet er under den tillatte spenningen ( $\sigma_e \approx 200 \text{ MPa}$ ).

### Massebergingen modifisert SolidWorks modell:

ANSYS beregner det totale volumet av modellen til å være:

$$V_{fb} = 0,007984 \text{ m}^3$$

$$\rho = 2825 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Massen til modellen blir da følgende:

$$m = \rho \cdot V_{fb} = 22,55 \text{ Kg} \approx \mathbf{22,6 \text{ Kg}} \quad (42)$$

### 8.5.5 Dimensjonering mot knekking

Der er blitt utført to kontroller mot knekking; ANSYS analyse (Eigenvalue Buckling) for begge belastningstilfeller, og en håndberging for belastningstilfelle 2 (da dette ble funnet å være det mest kritiske og derfor det dimensjonerende tilfellet). Grunnen til det utføres en håndberging i tillegg til ANSYS analysen, er fordi ANSYS analysen ikke hensyn til interaksjon mellom moment og trykkraft.

#### ANSYS resultater:

I knekkeanalysen kartlegges automatisk de to mest kritiske knekke modusene, og det oppgis en lastfaktor som representerer faktoren modellens påsatte laster må ganges med for at konstruksjonen skal knekke i den aktuelle modusen. Dette betyr at så lenge lastfaktoren ikke er en fraksjon av 1 (for eksempel 0,2, 0,7, ..., Osv.), vil ikke konstruksjonen knekke. En negativ lastfaktor betyr at det ikke finnes noen positiv faktor for den aktuelle modusen som kan multipliseres med lasten, som medfører at konstruksjonen kan knekke, men at dersom lastene påføres motsatt vei og ganges med faktoren vil konstruksjon kunne knekke. Lastfaktorverdien kan dermed ses på som sikkerhetsfaktoren mot knekking.

For belastningssituasjon 1 ble det ikke avdekket noen positive lastfaktorer. Det kjørt en analyse som kartla de ti mest kritiske modusene. Det kan dermed konkluderes ut ifra analyse resultatene med at konstruksjonen er trygg mot knekking i belastningssituasjon nummer 1. For belastningssituasjon 2 ble det kjørt en analyse som kartla de ti mest kritiske modusene. I den mest kritiske modusen var lastfaktoren oppgitt til 25,813, noe som betyr at sikkerhetsfaktoren mot knekking er mer enn tilstrekkelig (krav om sikkerhetsfaktor på 3).

#### Knekke beregning (håndberegning) etter metode 1:

Følgende ble gjort for å kartlegge det mest knekkutsatte elementet i modellen:

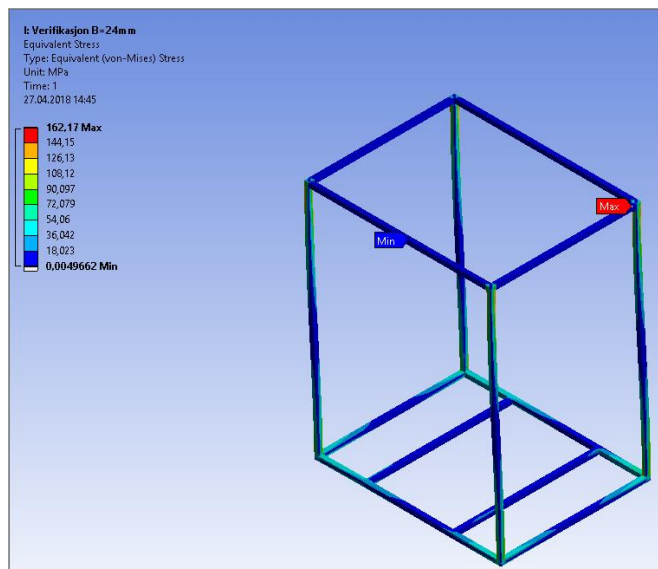
Alle elementer i linebody modellen ble sjekket i begge belastningssituasjoner med verktøyet Probe, for å kartlegge hvor den maksimale trykkraften vil oppstå. Det viste seg at maksimal trykkraft oppstår i belastningssituasjon 2, i det vertikale elementet bakerst til venstre i modellen (vist i figur 65). Videre ble det sjekket hvor den maksimale spenningsverdien i belastningssituasjon 2 oppstår. Det viste seg at denne også opptrer i samme element (helt på toppen av elementet) som den maksimale trykkraften (vist i figur 64). Dette vil da være det mest knekkutsatte elementet av følgende grunner:

- Det er det lengste elementet i modellen (har størst knekk lengde).
- Det er belastet med den største trykkraften.

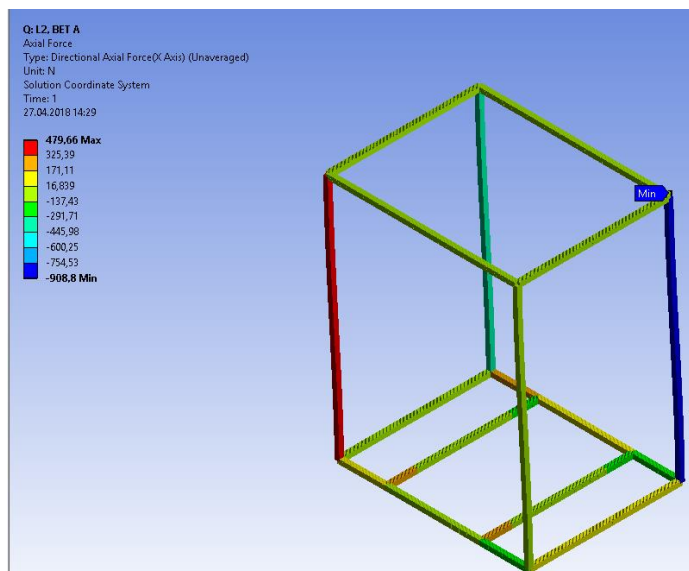


- Det er belastet med det største momentet.

Det ble først utført en håndberging etter metode 1 der sidekantdimensjonen ble satt til 23 mm (dimensjoneringsverdi mot statisk brudd). Dette viste seg og ikke være tilstrekkelig, ettersom interaksjonssummen ble større enn 1. Deretter ble en ny håndberging utført med sidekantdimensjon på 24mm, der resultatet var at interaksjonssummen ble lavere enn 1. Beregning er lagt fram i dette delkapittelet [34].



Figur 64: Omfang og lokasjon av maksimalt opptredende ekvivalent spenning i den SolidWorks importerte modellen med modifisert tverrsnitt (Maksverdi = 162,17 MPa).



Figur 65: Omfang og lokasjon av maksimalt opptredende trykkraft i linebody modellen (Maksverdi = 908,8 N).

Avlesning av største ekvivalente spenning og trykkraft fra ANSYS:

$$\sigma_e = 162,17 \text{ MPa}$$

$$F = 908,8 \text{ N}$$

Dersom vi regner ut korresponderende moment for sidekantdimensjon 24 mm i figur 64 får vi:

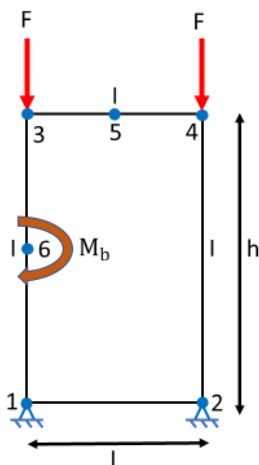
$$M_3 = W_k \cdot \sigma_e = 373640 \text{ Nmm} \quad (45)$$

Setter følgende verdier for knekkebergingen:

$$M_b = 373640 \text{ Nmm}$$

$$F = 910 \text{ N}$$

Knekkberging etter metode 1:



Figur 66: To dimensjonal beregningsmodell for knekkberging etter metode 1.

Diverse parametere for kvadratisk tverrsnitt med sidekantdimensjon 24 mm:

$$A_k = s^2 = 576 \text{ mm}^2 \quad (46)$$

$$W_k = \frac{1}{6} \cdot s^3 = 2304 \text{ mm}^3 \quad (39)$$

$$I_k = \frac{1}{12} \cdot s^4 = 27648 \text{ mm}^4 \quad (47)$$

$$i = \sqrt{\frac{I_k}{A_k}} = 6,93 \text{ mm} \quad (48)$$

$$\sigma_p = 0,8 \cdot \sigma_f = 419,2 \text{ MPa} \quad (49)$$

Knekkingen vil være elastisk dersom:

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_p}} = 41,11 \quad (53)$$

$$\varepsilon = 0,5$$

$$p = \varepsilon \cdot \frac{l}{h} = 0,4 \quad (51)$$

Leser av omtrentlig k verdi for rammen på knekk lengdekurve e:

$$k = 1,3$$

$$l_k = k \cdot h = 1690 \text{ mm} \quad (52)$$

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = 243,87 \rightarrow \text{Elastisk knekking} \quad (53)$$

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_k}{l_k^2} = 6859,85 \text{ N} \quad (54)$$

$$F_{k\text{till}} = \frac{F_k}{n_k} = 2286,62 \text{ N} \quad (55)$$

$$M_{b,\text{maks}} = \sigma_f \cdot W_k = 1207296 \text{ Nmm} \quad (56)$$

Krav for tilstrekkelig sikkerhet mot knekking:

$$\frac{F_k}{F_{k\text{till}}} + 1,6 \cdot \frac{M_b}{M_{b,\text{maks}}} \leq 1 \quad (57)$$

Regner ut interaksjonssummen for tilfellet:

$$\frac{F_k}{F_{k\text{till}}} + 1,6 \cdot \frac{M_b}{M_{b,\text{maks}}} \approx \mathbf{0,89} \quad (57)$$

Konklusjon:

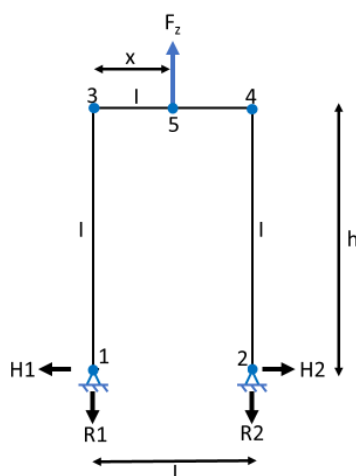
Under de gitte forutsetningene er konstruksjonen sikker mot knekking etter metode 1.

## 8.5.6 Verifikasjon av ANSYS modeller

Delkapittelet tar for seg verifikasjonen av modellene brukt i ANSYS. Det vil her bli utført to verifikasjoner:

- Verifikasjon 1: ANSYS resultatene for verifikasjonstilfellet verifiseres ved:
  - Sammenlikning av opplagerkrefter med linebody modell.
  - Sammenlikning av lokasjon og omfang av maksimalt bøyemoment i linebody modell.
  - Sammenlikning av lokasjon og omfang av maksimal opptredende ekvivalent spenning i SolidWorks importert modell.
- Verifikasjon 2: ANSYS resultatene for belastningstilfelle 1 verifiseres ved:
  - Sammenlikning av lokasjon og omfang av maksimal opptredende ekvivalent spenning i SolidWorks importert modell.

### Verifikasjon 1:



Figur 67: Todimensjonal beregningsmodell for verifikasjon av verifikasjonstilfellet.

Verifikasjonslasten settes til følgende:

$$F_z = 100 \text{ N}$$

Dimensjonene til den todimensjonale beregningsmodellen settes i henhold til den forenklaede beregningsmodellen, og er følgende:

$$x = 500 \text{ mm}$$

$$l = 1000 \text{ mm}$$

$$b = 1300 \text{ mm}$$

$$e = \frac{h}{l} = 1,3 \quad (43)$$

Regner ut krefter og momenter:

$$R_1 = R_2 = F_z \cdot \frac{x}{l} = 50 \text{ N} \quad (58)$$

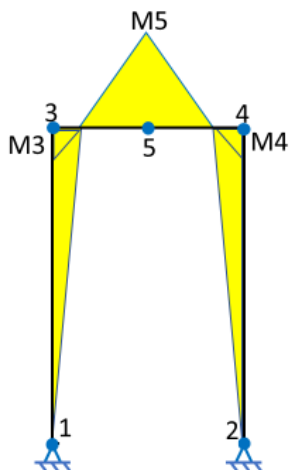
$$H_1 = H_2 = F_z \cdot \frac{3 \cdot x^2}{2 \cdot h \cdot l \cdot ((2 \cdot e) + 3)} = 5,15 \text{ N} \quad (59)$$

$$M_3 = M_4 = F_z \cdot \frac{3 \cdot x^2}{2 \cdot l \cdot ((2 \cdot e) + 3)} = 6696,43 \text{ Nmm} \quad (60)$$

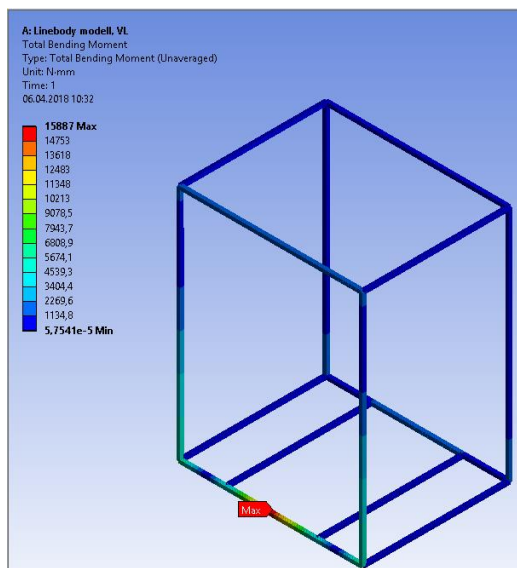
$$M_5 = F_z \cdot \frac{x^2 \cdot ((4 \cdot e) + 3)}{2 \cdot l \cdot ((2 \cdot e) + 3)} = 18303,57 \text{ Nmm} \quad (61)$$

$$W_k = 1333,33 \text{ mm}^3 \quad (s = 20 \text{ mm}) \quad (39)$$

$$\sigma_{hb} = \frac{M_5}{W_k} = 13,73 \text{ MPa} \quad (62)$$



Figur 68: Momentdiagram for den todimensjonal beregningsmodell i verifikasjonstilfellet.

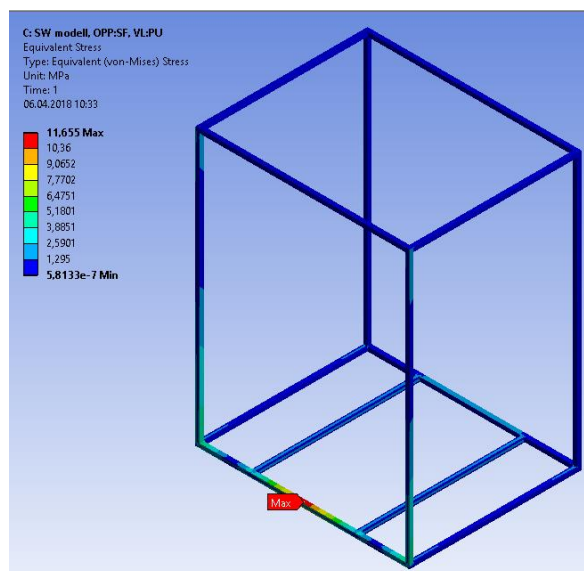


Figur 69: Lokasjon og omfang av maksimalt bøyemoment i linebody modellen i verifikasjonstilfellet (maksverdi = 15887 Nmm).

Opplagerkrefter i linebody modellen for de fremste opplagrene (lengst fram i Z-retning i ANSYS modellen):

$$R_1 = R_2 = 50 \text{ N i } +Y\text{-retning i ANSYS modell (-Z-retning etter koordinatsystemet til den forenklet beregningsmodellen).}$$

$$H_1 = H_2 = 5,5 \text{ N i } \pm X\text{-retning i ANSYS modell } (\pm Y\text{-retning etter koordinatsystemet til den forenklet beregningsmodellen).}$$



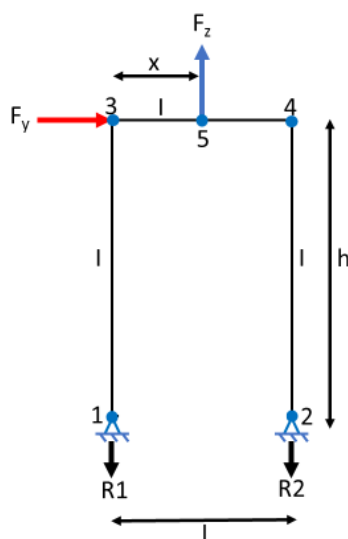
Figur 70: Lokasjon og omfang av maksimal ekvivalent spenning i Solidworks importert modell i verifikasjonstilfellet (maksverdi = 11,655 MPa).

## Konklusjon verifikasjon 1:

- Opplagerkreftene regnet ut i håndberegningen er svært like som de verdiene som er hentet ut ifra analysen av linebody modellen og den Solidworks importerte modellen.
- Resultatene for plassering og omfang maksimalt bøyemomentet er relativt like mellom håndberegningen og linebody modellen (figur 68 og figur 69).
- Maksimal spenningsverdi avviker relativt lite mellom håndberegningen og ANSYS modellen (figur 70) og oppstår på samme sted som i håndberegningen.

Det kan dermed konkluderes med at ANSYS modellen gir pålitelige resultater.

## Verifikasjon 2:



Figur 71: Todimensjonal beregningsmodell for verifikasjon av belastningstilfelle 1.

$$F_y = \frac{W_i + p, y, est}{2} \approx 408 \text{ N}$$

$$F_z = \frac{W_i + p, z, est}{2} \approx 1576 \text{ N}$$

Dimensjonene til den todimensjonale beregningsmodellen settes i henhold til den forenklete beregningsmodellen, og er følgende:

$$x = 500 \text{ mm}$$

$$l = 1000 \text{ mm}$$

$$h = 1300 \text{ mm}$$

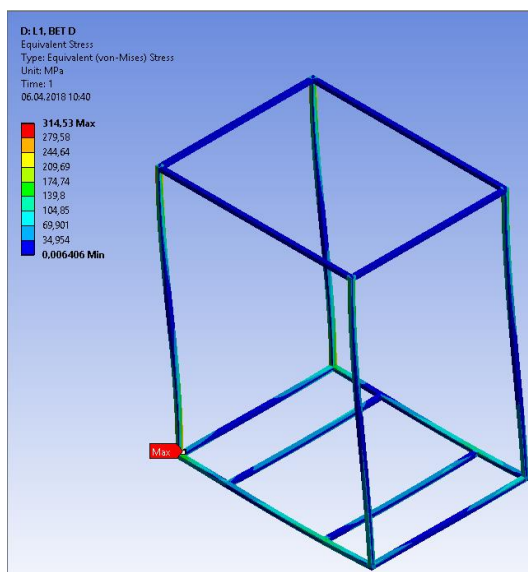
$$e = \frac{h}{l} = 1,3 \quad (43)$$

Regner ut det største momentet:

$$M_3 = (F_z \cdot \frac{3 \cdot x^2}{2 \cdot l \cdot ((2 \cdot e) + 3)}) + (\frac{1}{2} \cdot F_y \cdot h) = 370735,71 \text{ Nmm} \quad (44)$$

$$W_k = 1333,33 \text{ mm}^3 \quad (s = 20 \text{ mm}) \quad (39)$$

$$\sigma_{hb} = \frac{M_3}{W_k} = 278,05 \text{ MPa} \quad (62)$$



Figur 72: Lokasjon og omfang av maksimal ekvivalent spenning i Solidworks importert modell i belastningstilfelle 1, uten konstruksjonsegenvekts laster (maksverdi = 314,53 MPa).

Konklusjon verifikasjon 2:

- Maksimal spenningsverdi avviker relativt lite (ca. 13 %) mellom håndberegningen og ANSYS modellen (figur 72), og oppstår på samme sted som i håndberegningen.

Det kan dermed konkluderes med at ANSYS modellen gir pålitelige resultater.

### Konklusjon verifikasjon:

Resultatene av verifikasjon 1 og 2 viser at resultatene fra begge modellene benyttet i dimensjoneringen er pålitelige.



## 8.6 Tverrsnittutforming

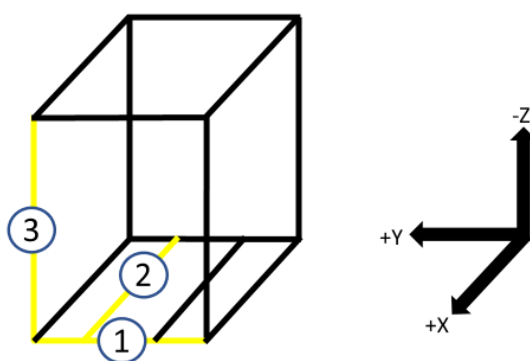
Kapittelet tar for seg seleksjon av tverrsnittutforming for løsningsens ramme elementer. Det er besluttet at det skal velges en tverrsnittutforming for samtlige elementer i løsningen, der tverrsnittdimensjonen er bestemt ut ifra det høyest belastede tverrsnittet. Det primære seleksjonskriteriet for tverrsnittutforming vil være forholdet mellom annet arealmoment/motstandsmoment og areal, det vil si tverrsnittets evne til å motstå bøyepåkjenning per vektenhet. Som det framkommer av formelen under vil det gunstig med et lavest mulig areal.

$$m = \rho \cdot V_{tv} = \rho \cdot A_{tv} \cdot l \quad (42)$$

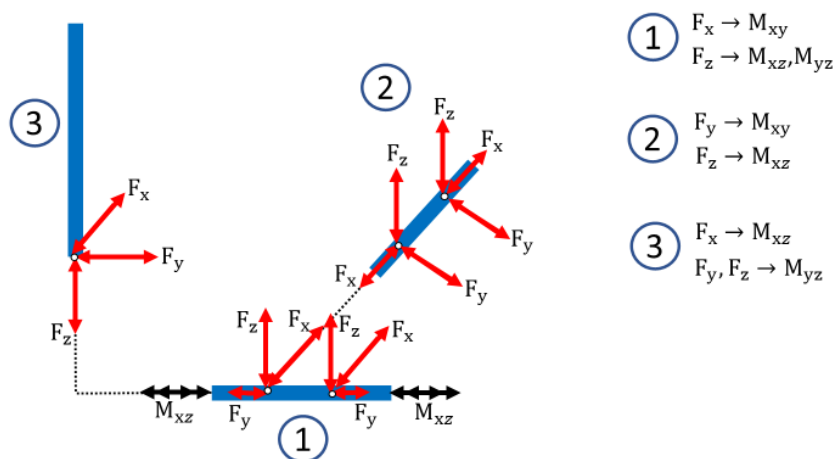
### 8.6.1 Belastningsretninger for tverrsnittet

I figur 73 er de mest belastede elementene i den forenklete beregningsmodellen (funnet ved ANSYS analysen), uthevet og nummerert. Videre er det for de aktuelle elementene blitt kartlagt i hvilket/hvilke plan det vil virke kraftkomponenter og momenter, og i hvilke plan det vil oppstå momentbelastning som følge av de ulike kraftkomponentene (figur 74 (merk at; figur 74 mest sannsynlig ikke er en fullstendig oversikt over alle krefter og momenter som virker i de ulike elementene)). Som det framkommer av figur 74 vil hver av de kartlagte elementene være bøyebelastet hovedsakelig, men minst i to plan. Omfanget av belastningen i de forskjellige planene er ikke kjent. Dette medfører at følgende seleksjon av tverrsnittutforming kan utføres:

For en bøyesitasjon der belastningen kun forekommer i ett plan ville det vært hensiktsmessig å velge enten en I/H profil eller en kanal profil (se figur 75), da disse vil være mest effektive per areal til å motstå bøyebelastning. Ettersom belastningen forekommer i flere plan og de overnevnte tverrsnittutformingene hovedsakelig kun innehar motstandsevne i et plan, vil disse ikke være aktuelle for løsningen. Videre vil det ikke bli sett på rektangulære eller kvadratiske hulprofiler der flenstykkelsen er ulik i forskjellige akser, dette er fordi omfanget av belastningen i de forskjellige planene er ikke kjent. Det vil videre i seleksjonen bli sett på solide og hule, kvadratiske og sirkulære tverrsnittutforminger.

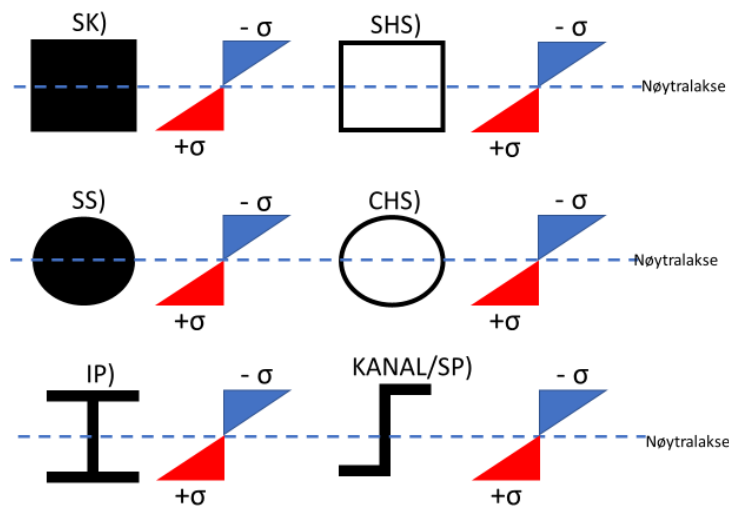


Figur 73: De høyest belastede elementene i konstruksjonen er uthevet i gult og nummerert.



Figur 74: Kraft og momentkomponentene som virker på de mest belastede elementene, og i hvilket plan det vil oppstå momentbelastning som følge av disse.

## 8.6.2 Videre vurdering av tverrsnittutforming



Figur 75: Spenningsfordeling i forskjellige aktuelle tverrsnitt ved bøyepåkjenning i ett plan (merk at; bøyespenningsfordelingen i realiteten vil ha en «fasong» som likner mer på den vist i kapittel 4.3.5, da spesielt for de hule, I/H og kanalprofilene av de samme grunnene som oppgis der).

Som det framkommer av figur 75, fordeles bøyespenningen inhomogent i tverrsnittene, der materialet lokalisert lengst unna nøytralaksen bærer mesteparten av bøyebelastningen. Dette medfører følgende:

- For bøyepåkjenning i primært ett og to plan, vil kvadratiske tverrsnitt være mer effektive per vektenhet til å motstå bøyepåkjenning enn sirkulære, ettersom det er mer materiale i snittene der bøyepåkjenningen er størst.
- Og; De hule profilene vil være mer effektive per vektenhet enn de solide, ettersom materialet hovedsakelig er plassert i de snittene der bøyepåkjenningen er betydelig (se også her forklaring i kapittel 4.3.5).

Det besluttes derfor på bakgrunn av de overnevnte grunnene at tverrsnittet skal være en kvadratisk hul profil (SHS). En annen viktig fordel med firkantede profiler vil være at innfestningen av skall elementer er enklere. Tverrsnittvalgene på henholdsvis kvadratisk profil og SHS profil begrunnes også matematisk:

Matematisk bevis for valg av kvadratisk tverrsnitt over sirkulært:

$$A_s = \pi \cdot R^2 \quad (63)$$

$$A_k = s^2 \quad (46)$$

$$I_s = \frac{\pi}{4} \cdot R^4 \quad (64)$$

$$I_k = \frac{1}{12} \cdot s^4 \quad (47)$$

$$A_k = A_s \rightarrow R = \frac{s}{\sqrt{\pi}} \quad (46)(63)$$

$$I_s = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{s}{\sqrt{\pi}}\right)^4 = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot s^4 \quad (64)$$

Her ser vi at for en vilkårlig s er:

$$I_s < I_k$$

Matematisk bevis for valg av SHS over solid kvadratisk tverrsnitt:

$$A_k = s^2 \quad (46)$$

$$A_{SHS} = s_y^2 - s_i^2 \quad (65)$$

$$I_k = \frac{1}{12} \cdot s^4 \quad (47)$$

$$I_{SHS} = \frac{1}{12} \cdot (s_y^4 - s_i^4) \quad (66)$$

Hvis vi for eksempel setter:

$$s_i = \frac{1}{2} \cdot s_y \quad (67)$$

$$A_{SHS} = A_K \rightarrow s_y = \frac{s}{\sqrt{1 - \frac{1}{4}}} \quad (65)$$

$$I_{SHS} = \frac{1}{12} \cdot \left( \left( \frac{s}{\sqrt{1 - \frac{1}{4}}} \right)^4 - \left( \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{s}{\sqrt{1 - \frac{1}{4}}} \right) \right)^4 \right) \approx \frac{5}{36} \cdot s^4 \quad (66)$$

Her ser vi at for en vilkårlig s er:

$$I_k < I_{SHS}$$

Og at; desto lavere godstykkelse er,

$$s_i = (s_y - 2 \cdot t) \quad (67)$$

Desto bedre blir forholdet mellom A og I/W.

### 8.6.3 Spesifisering av SHS tverrsnittet

Det er primære seleksjonskriteriet for tverrsnittutformingen er forholdet mellom A og I/W, av den grunn burde godstykkelsen i SHS tverrsnittet være så lav som det er praktisk og sikkerhetsmessig mulig. En ulempe med lukkede profiler er at det eksisterer en risiko for at korrosive medier kan samles inne i profilen og føre til korrosjon. Dersom godstykkelsen er svært lav vil dette faktumet kunne medføre at elementet kan bli betydelig svekket og står i fare for å kollapse i løpet av relativt kort tid. Videre vil en svært lav godstykkelse også gjøre at elementer er mer utsatte for kollaps, dersom elementet får hakk i seg grunnet lokale støtbelastninger. En annen viktig faktor å vurdere når en skal bestemme godstykkelsen, er hvilke sammenføyingsmetoder som det er ønskelig å ha mulighet til å benytte. Aluminium kan være utfordrende å sveise grunnet materialets lave smeltepunkt, og risikoen for gjennombrenning av godset vil være høyere når godstykkelsen er lav. Det er ikke blitt funnet noen konkret grenseverdi for minimums godstykkelse ved sammenføyning av SHS profiler i aluminium, men basert på minimumsverdien for godstykkelse ved sammenføyninger av hulprofiler i stål gitt i standard fra International Institute of Welding, settes godstykkelsen til 2,5 mm (ISO standard oppgir 1,5 som minimumsverdi for samme tilfelle, men her er det besluttet å bruke retningslinjene fra IIW standarden ettersom aluminium er mer utfordrende enn stål å sveise ved lave godstykkelser). I tillegg er 2,5 mm godstykkelse en mer standardisert godstykkelse for SHS profiler, slik at det finnes flere valgmuligheter med tanke på sidekantdimensjon, og at tilgjengeligheten på profiler muligens er bedre.

Da tykkelsen er bestemt kan nødvendig sidekantdimensjon regnes ut. SHS profilen må minimum tilfredsstillende følgende:

$$W_{SHS} \geq 2304 \text{ mm}^3 \quad (68)$$

$$I_{SHS} \geq 27648 \text{ mm}^4 \quad (66)$$

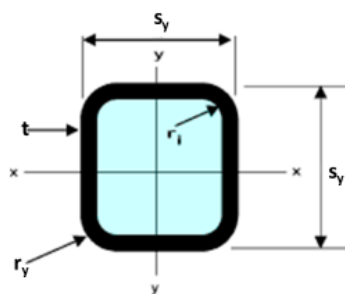
Løser likninger for nødvendig sidekantdimensjon i Wolfram Alpha [32]:

$$W_{SHS} = \frac{1}{6} \cdot \frac{s_y^4 - s_i^4}{s_y} = \frac{1}{6} \cdot \frac{s_y^4 - (s_y - (2 \cdot t))^4}{s_y} \geq 2304 \text{ mm}^3 \rightarrow s_y \approx \mathbf{29,85 \text{ mm}} \quad (68)$$

$$I_{SHS} = \frac{1}{12} \cdot (s_y^4 - s_i^4) = \frac{1}{12} \cdot (s_y^4 - (s_y - (2 \cdot t))^4) \Rightarrow s_y \approx \mathbf{27,92 \text{ mm}} \quad (66)$$

Det er hensiktsmessig velge en SHS dimensjon som er standardisert (produsent har ekstruderingsformen), slik at nye ekstruderingsformer ikke nødvendigvis må utarbeides. En svært nærliggende standard SHS aluminiums profil dimensjon hos SAPA/HYDRO-Extrusions er 30 x 2,5 (produkt/tverrsnitt nummer 2052552), (øvrige tverrsnitt data er i vedlegg). Videre er SHS profilen avrundet i kantene med radius lik 0,6 mm, slik at risikoen for at det oppstår spenningskonsentrasjoner i kantene senkes. Eventuell avstiving av tverrsnittet horisontalt, vertikalt, diagonalt, kombinasjoner av disse eller samtlige av disse, vil gjøres i et senere kapittel dersom det finnes nødvendig. Avstivere vil gjøre at profilen blir tyngre, samt er mer komplekst å produsere (nye ekstruderingsformer må da utarbeides), og det finnes hvorvidt undertegnede bekjent ingen standard SHS profiler i aluminium med tilsvarende utforming og dimensjoner med dette.

I figuren og tabellen under er det valgte SHS tverrsnittets utforming og dimensjoner oppgitt:



Figur 76: Tverrsnittutformingen SHS profil, med betegnelser [50].

Tabell 64: Tverrsnitts data for ekstrudert SHS profil.

$s_y$ [mm]	$t$ [mm]	$r_y$ [mm]	$r_i$ [mm]	$A_{SHS}$ [mm <sup>2</sup> ]	$W_{SHS}$ [mm <sup>3</sup> ]	$I_{SHS}$ [mm <sup>4</sup> ]
30	2,5	0,6	0,6	275	2328	34919

Som det framkommer av tabell 54 tilfredsstillende ikke den valgte SHS profilen med radius tverrsnittmodul kravet. Ettersom neste større standardiserte tverrsnitt størrelse hos SAPA/HYDRO er ganske mye større, og dette vil medføre overdimensjonering og vektøkning, testes det valgte tverrsnittet mot knekking etter metode 1 for å sjekke om det allikevel kan benyttes. Øvrige verdier i beregningen er tilsvarende som beregningen i kapittel 8.5.5.

$$A_{SHS} = 275 \text{ mm}^2 \quad (65)$$

$$W_{SHS} = 2328 \text{ mm}^3 \quad (68)$$

$$I_{SHS} = 34919 \text{ mm}^4 \quad (66)$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{SHS}}{A_{SHS}}} = 11,27 \text{ mm} \quad (48)$$

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = 149,98 \rightarrow \text{Elastisk knekking} \quad (53)$$

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{SHS}}{l_k^2} = 8663,88 \text{ N} \quad (54)$$

$$F_{ktill} = \frac{F_k}{n_k} = 2887,96 \text{ N} \quad (55)$$

$$M_{b,maks} = \sigma_f \cdot W_{SHS} = 1219872 \text{ Nmm} \quad (56)$$

Krav for tilstrekkelig sikkerhet mot knekking:

$$\frac{F_k}{F_{ktill}} + 1,6 \cdot \frac{M_b}{M_{b,maks}} \leq 1 \quad (57)$$

Regner ut interaksjonssummen for tilfellet:

$$\frac{F_k}{F_{ktill}} + 1,6 \cdot \frac{M_b}{M_{b,maks}} \approx \mathbf{0,81} \quad (57)$$

Konklusjon:

Her ser vi at den valgte profilen holder mot knekking ettersom interaksjonssummen er mindre enn 1.

## 8.7 Elementsammenføring

Kapittelet tar for seg seleksjon av elementsammenføyningsmetode, utforming av knutepunkter og dimensjonering av elementsammenføyninger. Det vil være nødvendig å fastsette sammenføyningsmetoden, knutepunktutformingen, samt dimensjonere elementforbindelsene før en helhetlig CAD modell kan utarbeides. Det er besluttet at det skal velges ett sammenføyningsprinsipp for samtlige elementer i løsningen. Elementsammenføyningene dimensjoneres etter belastningen som forekommer i det mest belastede knutepunktet.

Det vil med de tidligere fattede løsningsvalgene eksistere det to alternativer for elementsammenføyningsmetode:

- Sveising
- Liming

Videre følger begrunnelsen for at sveising ikke er blitt valgt som sammenføyningsmetode, samt seleksjon av knutepunktutforming og dimensjonering av elementforbindelsene.

Merk at; Innfesting med bolter og/eller nagler er ikke blitt tatt med som et alternativ. Dette er fordi sammenføring med denne metoden ikke medfører noen gevinst i form av lavere kompleksitet ovenfor lim, ettersom det uansett måtte bli utformet knutepunktoverganger. Videre ville det måtte blitt laget hull i profilene i ved knutepunktene som hadde medført en svekkelse av det aktuelle snittet. Beregningene som er utført måtte også blitt gjort på nytt ettersom momentoverføringen i forbindelsene ville vært forskjellig.

### 8.7.1 Sveising

Det vil innledningsvis bli kort redegjort for noen generelle fordeler og ulemper med sveising som sammenføyningsmetode:

#### Fordeler:

- Svært utbredt sammenføyningsmetode:
  - Stor tilgjengelighet av kompetanse (kan blant annet utføres på NMBU sitt verksted).
  - Godt kartlagt: Beregningsmetoder, standarder, osv.
- Kostnader:
  - Sveiseutstyr (MIG/TIG) er ikke særlig kostbart.
  - Forbindelsesmateriale er ikke særlig kostbart.
- Effektivitet:
  - Forbindelser kan inneha svært stor styrke.
  - Lite ekstra vekt tilføres konstruksjonen.
  - Profiler sveises direkte på hverandre, behøver ikke kompleks knutepunktutforming.

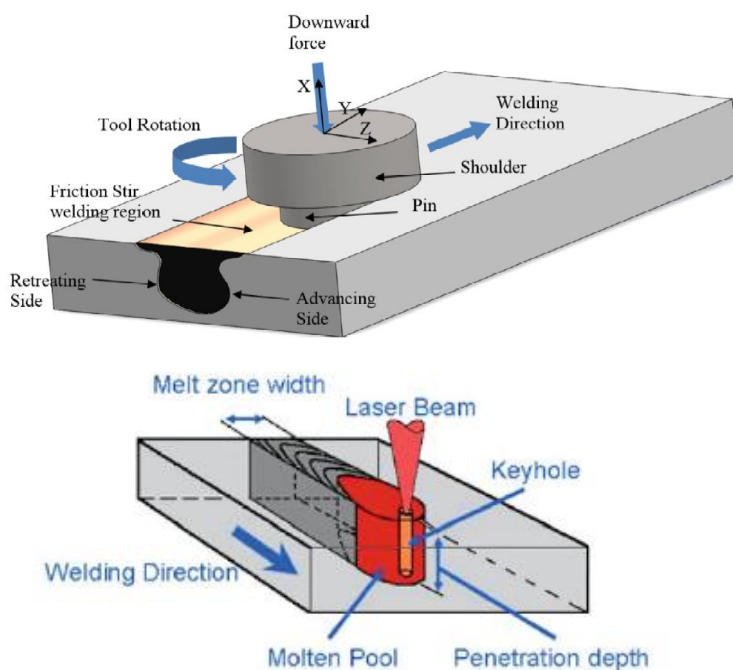
#### Ulemper:

- Begrenset hvilke aluminiumslegeringer som kan sveises.
- Gjennombrenning av gods er en risiko for tynne aluminiums emner.
- Forbindelsene kan være utsatt for utmatting ettersom:
  - Det kan forekomme feil, urenheter, ufullstendig sammensveising og ujevnheter i sveisen (kan medføre svake punkter og spenningskonsentrasjoner).
  - Området rundt sveisen svekkes også noe grunnet varmepåvirkning.

På grunn av de mange fordelene med sveiste forbindelser, da spesielt kompleksitet og vekt aspektet, kunne det vært hensiktsmessig å benytte dette som sammenføyningsmetode for løsningen, men det vil av følgende grunner ikke bli brukt sveising i elementforbindelsene til løsningen:

Aluminiumslegeringer der kobber er et av legeringselementene er svært dårlig egnet for sammenføring med additive fusjonsbaserte sveisemetoder som MIG og TIG. Sveisemetodene har av den grunn blitt vurdert som uegnet for denne applikasjonen. Videre er det blitt sett på noen ikke additive sveise metoder; Sveisemetodene FSW [51] og LBW [52] kan benyttes på kobberholdige aluminiumslegeringer, men disse er også vurdert som uegnet for applikasjonen ettersom:

- Begge teknologiene er i utviklingsfasen (har blitt industrialisert i noen få applikasjoner), det eksisterer derfor lite standardisering og det måtte mest sannsynlig blitt utført omfattende testing av sammenføyningene for å verifisere dugeligheten.
- Begge teknologiene har liten utbredelse, og det vil derfor være vanskelig å finne noen som kan utføre jobben.
- FSW er en lisensiert teknologi.
- Sveisemaskinene for begge teknologiene er i utgangspunktet svært kostbare, i tillegg måtte også mest sannsynlig maskinene blitt spesialbygget for applikasjonen.
- Det forekommer en materialsvekkelse i sveisesømmen og område rundt denne (HAZ). Effekten av denne er dårlig kartlagt. Grunnet materialsvekkelsen måtte eventuelt profilstørrelsen til elementene blitt økt, og det måtte blitt utført testing for å verifisere at sammenføyningen holder grunnet usikkerheten rundt svekkelsesgraden.
- Som det framkommer av figur 77, er FSW lite egnet for sammenføring av L-forbindelser, grunnet verktøygeometrien. Sveisemetoden etterlater også en defekt i sluttet av sveisesømmen når verktøyet forlater godeset.



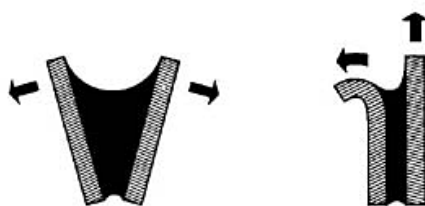
Figur 77: Sveiseprinsippet for sveisemetodene FSW og LBW. Øverst: FSW [51], Nederst: LBW [52].



Det besluttes derfor at liming skal benyttes som sammenføyningsmetode for sammenføyning av elementer. De påfølgende delkapitlene tar for seg utformingen av knutepunkter og dimensjonering av knutepunktforbindelsene.

## 8.7.2 Knutepunktutforming

Overflatearealet på SHS profilene gir ikke et tilstrekkelig lim overflateareal for å kunne motstå belastningen i det mest belastede knutepunktet. Limte forbindelser har meget lav motstand mot kløyving og skrelling. Skrelling kan forekomme når grunnmaterialet (her aluminiumslegeringen), deformeres som vist i figur 78. Kløyving kan forekomme når kreftene som virker på forbindelsen ikke er gjent fordelt, men er konsentrert i enden av forbindelsen (vist i figur 78). Lim forbindelser i løsnings knutepunkter antas å være utsatt for både skrelling og kløyving. Det må derfor utformes overganger/sammenkoblingspunkter for knutepunktene mellom profilene, slik at lim overflatearealet til forbindelsen er tilstrekkelig, samt at overgangene er utformet slik at de lim forbindelsene ikke er i fare for å skrelles eller kløyves.



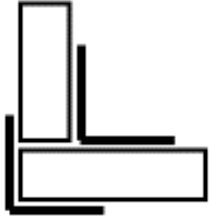

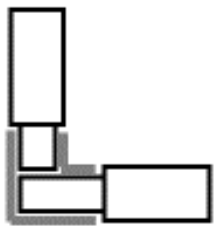
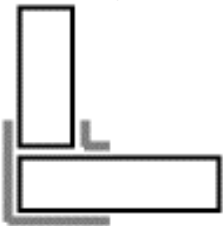
Figur 78: Kløyving og skrelling i limte forbindelser. Til venstre: Kløyving, Til høyre: Skrelling [53]

Det vil kun bli valgt en overgangsutforming for alle knutepunktene. Dette er fordi:

- Belastningssituasjonen i knutepunktene er kompleks, og er ikke tilstrekkelig kartlagt.
- En overgangsutforming medfører lavere produksjonskompleksitet.
- Dimensjonering og modelleringsarbeidet blir mindre komplekst.

I tabell 57 er overgangsutformingsalternativene gitt, med noen fordeler og ulemper for hvert av alternativene. I tabell 58 er seleksjonskriteriene med kriteriets vektning, samt en forklaring av kriteriet gitt. I tabell 59 er vurderingen av løsningsalternativene, med det valgte løsningsalternativet gitt.

Tabell 65: Seleksjonsalternativer for overgangsutforming i knutepunkter, med noen fordeler og ulemper for hvert alternativ.

Knutepunktutforming	Forklaring	Fordeler	Ulemper
<b>A)</b> 	Tilpassede plater og L formede profiler limes på SHS profilene i knutepunktene	Lav kompleksitet: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Produksjon</li> <li>• Lette å tilpasse</li> </ul>	Styrke: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lavere lim areal</li> <li>• Lim forbindelse har mindre støtte i belastningsretninger</li> </ul>
		Lite tillegg i vekt	Tar opp mer plass enn innvendige varianter B og C.
			Lim forbindelsen er mer eksponert for ytre påvirkninger enn B, C og D.
<b>B)</b> 	Solid overgang tilpasses slik at overgangen passer på innsiden av SHS profil	Styrke i knutepunktet	Tillegg i vekt i forhold til øvrige variant A og C (Og kanskje D)
		Estetikk	Høyere kompleksitet enn variant A.
		Ingen ytre plass økning i knutepunkt	
<b>C)</b> 	SHS profil dimensjon varieres slik at profilen passer på innsiden av den hule overgangen i knutepunktet	Estetikk	Lavere lim areal enn variant D
		Lite tillegg i vekt	Overgangen har lavere styrke enn variant B og D
		Ingen ytre plass økning i knutepunkt	SHS profilens dimensjon må varieres i knutepunktet
			Mer kompleks å produsere enn A og B.
<b>D)</b> 	Overgangen er laget slik at SHS profilene får plass på innsiden av overgangen	Større styrke i knutepunktet enn variant C	Større tillegg i vekt enn A og C
		Større lim areal enn øvrige varianter	Estetikk
			Tar opp mer plass enn B og C
			Mer kompleks å produsere enn A og B.

Tabell 66: Seleksjonskriterier for overgangsutforming med vekting og forklaring.

Kriterier	Vekting	Forklaring
Styrke	0,15	Hvor mye økt styrke i et knutepunkt vil det aktuelle overgangsalternativet gi relativt til de andre alternativene. Høyere poeng is for høyere styrke.
Støtte	0,20	Hvor mye oppstøttes lim forbindelsen ved det aktuelle overgangsalternativet relativt til de andre alternativene. Høyere poeng is for høyere grad av støtte.
Lim areal	0,20	Hvor stort er lim arealet ved det aktuelle overgangsalternativet relativt til de andre alternativene. Høyere poeng gis for større lim areal.
Plass	0,05	Hvor mye plass opptar overgangsalternativet relativt til de andre alternativene. Høyere poeng gis for mindre plass opptagelse.
Vekt	0,05	Hvor mye ekstra vekt vil det aktuelle overgangsalternativet medføre relativt til de andre alternativene. Høyere poeng gis for mindre tillegg av vekt.
Estetikk	0,05	En subjektiv vurdering av løsningens estetiske egenskaper dersom det aktuelle overgangsalternativet blir valgt, relativt til de andre alternativene. Høyere poeng gis for bedre estetikk.
Kompleksitet	0,15	Hvor komplisert vil det være å dimensjonere, modellere og produsere det aktuelle overgangsalternativet relativt til de andre alternativene. Høyere poeng gis for lavere kompleksitet.
Tilpasning og fleksibilitet	0,15	Hvor enkelt vil det være å implementere det aktuelle overgangsalternativet for samtlige knutepunkter i løsningen relativt til de andre alternativene. Høyere poeng gis for større grad av fleksibilitet.

Tabell 67: Seleksjonsmatrise for utvelgelse av overgangsutforming. Forkortelser: V = Vekting, P = Poeng, S = Sum, VS=Vektet sum, RANG=Rangering, VLØ=Valgt løsning.

Kriterier	V	Alternativ A: Tilpassede plater og profiler		Alternativ B: Solid overgang		Alternativ C: SHS profil dimensjon varieres		Alternativ D: Overgang passer over SHS profilen	
		P	S	P	S	P	S	P	S
<b>Styrke</b>	0,15	1	0,15	4	0,6	2	0,3	3	0,45
<b>Støtte</b>	0,20	3	0,6	4	0,8	4	0,8	4	0,8
<b>Lim areal</b>	0,20	2	0,4	3	0,6	3	0,6	4	0,8
<b>Plass</b>	0,05	3	0,15	4	0,2	4	0,2	2	0,1
<b>Vekt</b>	0,05	3	0,15	1	0,05	4	0,2	2	0,1
<b>Estetikk</b>	0,05	2	0,15	4	0,2	4	0,2	3	0,15
<b>Kompleksitet</b>	0,15	4	0,6	3	0,45	1	0,15	2	0,3
<b>Tilpasning og fleksibilitet</b>	0,15	4	0,6	3	0,45	3	0,45	3	0,45
<b>VS</b>		<b>2,75</b>		<b>3,35</b>		<b>2,90</b>		<b>3,15</b>	
<b>RANG</b>		<b>4</b>		<b>1</b>		<b>3</b>		<b>2</b>	
<b>VLØ</b>		<b>Nei</b>		<b>Ja</b>		<b>Nei</b>		<b>Nei</b>	

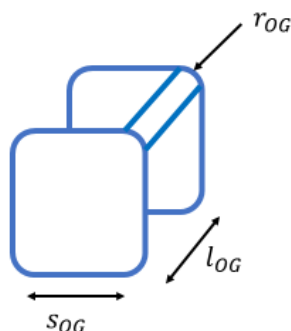
## Kommentar til tabell:

Her ble overgangsutformings alternativ B; solid overgang valgt som overgangsutforming i knutepunktene.

### 8.7.3 Dimensjonering av lim forbindelsen

Delkapittelet redegjør for forutsetningene og antakelsene som er gjort i dimensjonering av lim forbindelsen, samt dimensjoneringen av forbindelsen. Følgende forutsetninger og antakelser er gjort i dimensjoneringen:

#### Lim forbindelsens overflateareal:



Figur 79: Overgangens utstikkende dels geometri, med betegnelser.

Lim arealet settes lik:

$$A_{lim} = 4 \cdot (l_{OG} \cdot (s_{OG} + (\frac{\pi}{2} \cdot r_{OG}))) \quad (69)$$

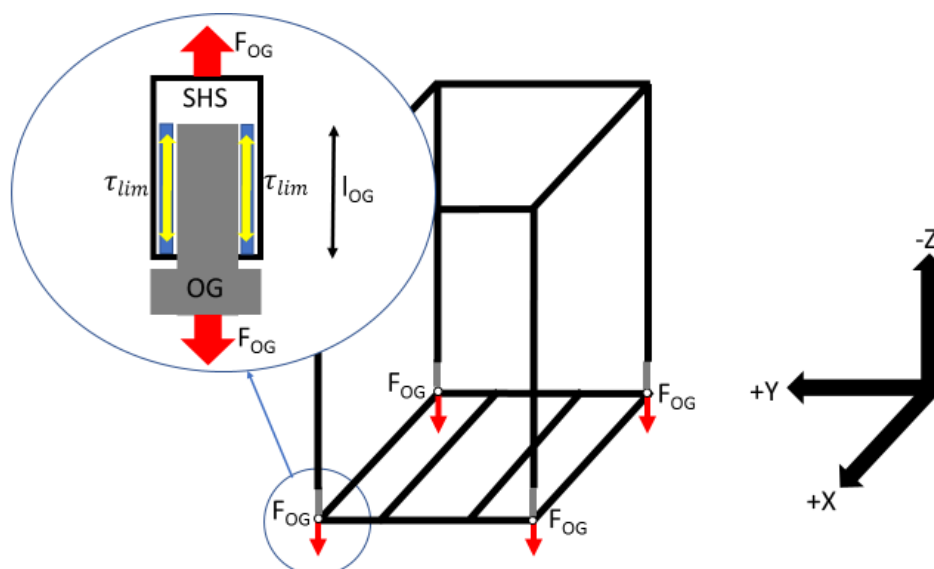
Merk at; I den virkelige applikasjonen vil tverrsnittarealet til SHS profilen,  $A_{SHS}$  limes inn mot basen til overgangen, slik at denne forbindelsen også er med på å bære belastningene.

#### Belastningssitasjon:

Det er antatt følgende om belastningssitasjonen for et vilkårlig knutepunkt i løsningen:

- Klaringen mellom og stivheten til, overgangen og SHS profilen er henholdsvis meget liten og meget stor, slik at strekk og trykkspenninger ikke må overføres av forbindelsen.
- Spenningen som oppstår i forbindelsen antas å være jevnt fordelt, og/eller det antas at klaringen mellom overgangen og profilen er så liten at kløving ikke kan finne sted.
- Stivheten til overgang og SHS profil er så stor at det ikke eksisterer noen fare for at det kan oppstå skrelling.
- Elastisitetsmodulen til limet er så mye lavere enn elastisitetsmodulen til aluminiumslegeringen, at det oppstår lite til ingen bøyespennning i limet.

Med de gitte antakelsene vil dimensjoneringen bestå i å regne ut nødvendig overlapp mellom overgangen og SHS profilen, slik at skjærfastheten til limet ikke overskrides. Det er antatt at den største avskjærende kraften  $F_{OG}$  oppstår i ett eller flere av knutepunktene, enten øverst eller nederst på de vertikale elementene. Beslutningssituasjonen er illustrert i figur 80.



Figur 80: Lokasjon for antatt dimensjonerende knutepunkt, med belastningstilfellet det skal dimensjoners mot.

Grunnet usikkerheten rundt belastningssituasjonen i knutepunktene og antakelser gjort om lim forbindelsen, utarbeides det et svært konservativt belastningstilfelle:

Kraften  $F_{OG}$  settes lik den største avskjærende kraften som oppstår dersom den maksimale løftekraften er påsatt, samtidig som løsningen holdes igjen i bunnflaten.

$$F_{OG} = \frac{8800}{4} = 2200 \text{ N}$$

### Dimensjonering av forbindelsen:

Dimensjoneringsverdi for skjærfasthet til limet settes til (verdi hentet fra egenskapsdata for mye anvendt lim for sammenføring av metaller, JB Weld) (produktdatabladet til limet er å finne i vedlegg):

$$\tau_{lim} = 7,2 \text{ MPa}$$

Sikkerhetsfaktor i forbindelsen settes til:

$$n_{lim} = 5$$

Tillatt skjærspenning i forbindelsen blir da:

$$\tau_{lim,till} = \frac{\tau_{lim}}{n_{lim}} \tag{70}$$

Regner ut minsteverdi for overlapp mellom overgang og SHS profil:

$$l_{OG} \geq \frac{n_{lim} \cdot F_{OG}}{4 \cdot \tau_{lim} \cdot \left( s_{OG} + \left( \frac{\pi}{2} \cdot r_{OG} \right) \right)} \geq \frac{5 \cdot 2200}{4 \cdot 7,2 \cdot \left( 23,8 + \left( \frac{\pi}{2} \cdot 0,6 \right) \right)} \geq 15,44 \text{ mm} \tag{71}$$

## 9 ARKITEKTUR OG SPESIFIKASJONER

Kapittel 9 inneholder visualiseringer av og spesifikasjonene til løsningen. Det vil innledningsvis i kapittel bli gjort rede for beslutninger og forbehold som er fattet i utformingsprosessen. Videre presenteres overgangsutformingene, samt sammenstillings og eksplosjonstegninger av sikkerhetsstrukturen. Det er også blitt utarbeidet et løsningsforslag for utformingen av fremre og bakre chassiselementer, basert på utformingsvalget fattet i kapittel 6. Løsningsforslagene er kun illustrative, da elementsammenføyningene i løsningsforslagene ikke er blitt vurdert. Sist i kapittel presenteres spesifikasjonene for løsningen, med og uten løsningsforslaget for fremre og bakre chassiselementer.

### 9.1 Utformingsbeslutninger

Under følger en kort redegjørelse av beslutningene som ble fattet i utformingsprosessen.

#### 9.1.1 Elementutforming

Det er besluttet at alle elementene i sikkerhetsstrukturen skal være uten krumning. Eventuell avrunding av løsningen for å bedre de aerodynamiske egenskapene kan gjøres ved formgivende skall/kledningsplater. Beslutningen er fattet av følgende grunner:

- Ekstruderte profiler av det valgte konstruksjonsmateriale egner seg dårlig for mekanisk deformering.
- Det finnes ingen standardiserte ekstruderte profiler i korrekt dimensjon med korrekt krumning.
- Krumningen til elementene i knutepunktene med den valgte sammenføyningemetoden og overgangsutformingen blir meget krapp.
- Dersom elementene skulle krummes måtte krumningen vært svært nøyaktighet for at elementene skulle passet sammen.
- Mindre fare for knekking i vertikale elementer, ettersom det ikke oppstår momenter i elementene grunnet krefter i Z-retning.

#### 9.1.2 Dimensjoner

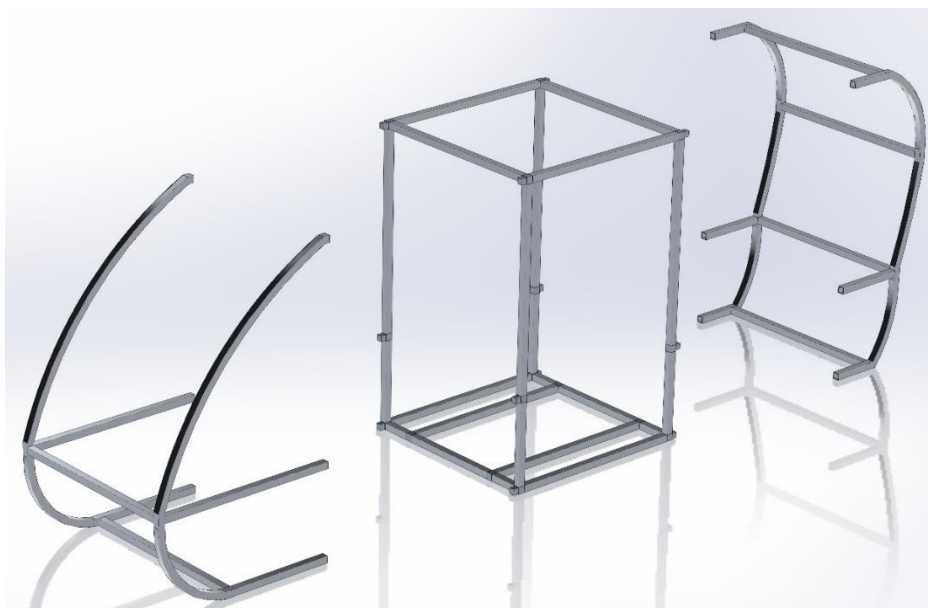
Det ble diskutert litt rundt løsningens nødvendige bredde i delkapittel 8.2, og funnet at bredden burde være noe større enn minimumsdimensjonen som ble satt i kravspesifikasjonen for å ta hensyn til interiøret. Det er blitt besluttet å sette den interne bredden i løsningen til 800 mm. Den interne høyden til løsningen er satt til 1300 mm, slik at løsningen oppfyller kravet om 15 graders utsiktswinkel fra kravspesifikasjonen. Lengden av åpningen i løsningens side settes til 800 mm, slik at løsningen oppfyller kravet om inn og utgangsmuligheter fra kravspesifikasjonen. Løsningens ytre og indre dimensjoner blir da følgende:

Tabell 68: Sikkerhetsstrukturens innvendige og utvendige mål.

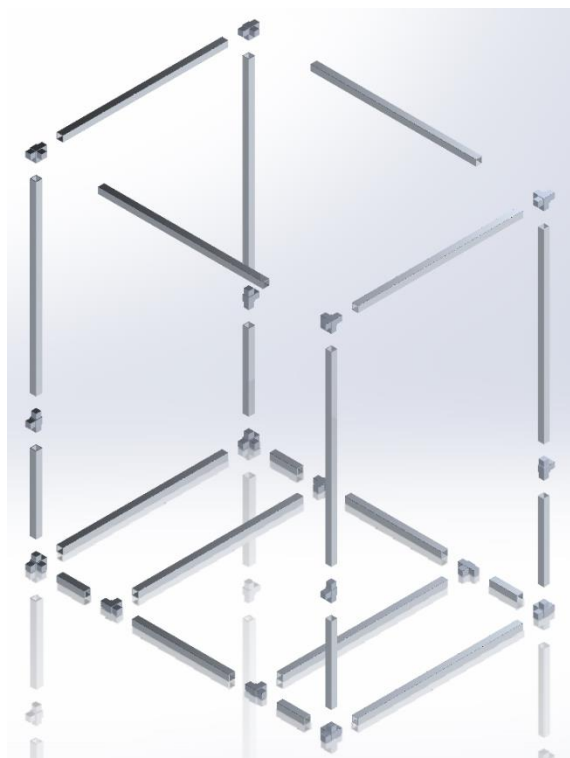
Parameter	Innvendig mål [mm]	Utvendig mål [mm]
Bredde	800	860
Lengde	800	860
Høyde	1300	1360

## 9.2 Eksplosjonstegninger

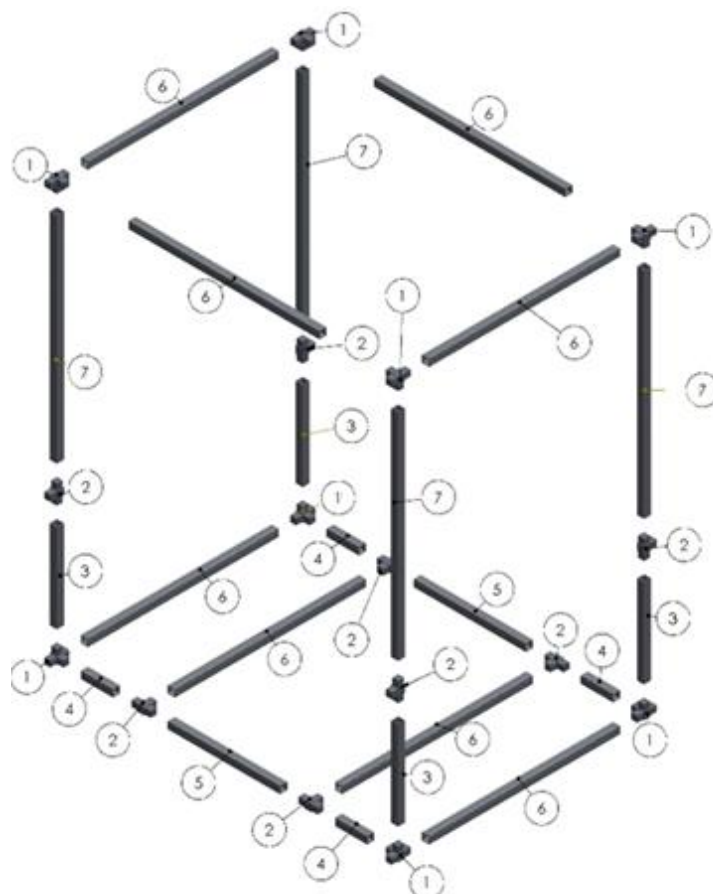
Figurene under viser eksplosjonstegninger av løsningen med og uten fremre og bakre chassis-elementer.



*Figur 81: Eksplosjonstegningen viser hvordan løsningsforslaget for fremre og bakre chassis-elementer kan festes til sikkerhetsstrukturen, isometrisk visning.*



*Figur 82: Eksplosjonstegningen viser hvordan de forskjellige elementene i sikkerhetsstrukturen er festet sammen, isometrisk visning.*



Figur 83: Eksplosjonstegningen viser hvordan de forskjellige elementene i sikkerhetsstrukturen er festet sammen. Elementene er nummerert. Isometrisk visning.

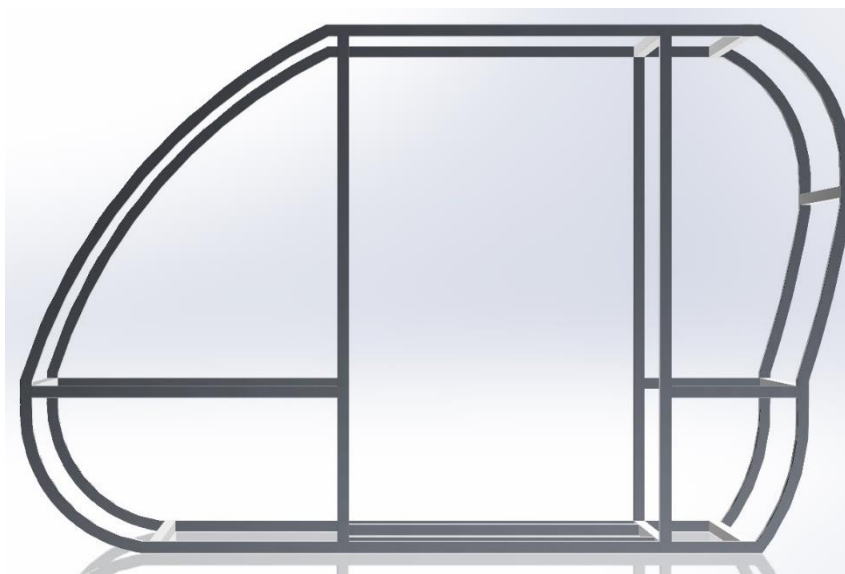
Tabell 69: Oversikt over sikkerhetsstrukturens bestanddeler.

Element nummer	Element betegnelse	Material betegnelse	Antall
1	4 vei overgang	AA-7150-T6151	8
2	3 vei overgang	AA-7150-T6151	8
3	Profil 370mm	AA-7150-T6151	4
4	Profil 135mm	AA-7150-T6151	4
5	Profil 470mm	AA-7150-T6151	2
6	Profil 800mm	AA-7150-T6151	8
7	Profil 900mm	AA-7150-T6151	4

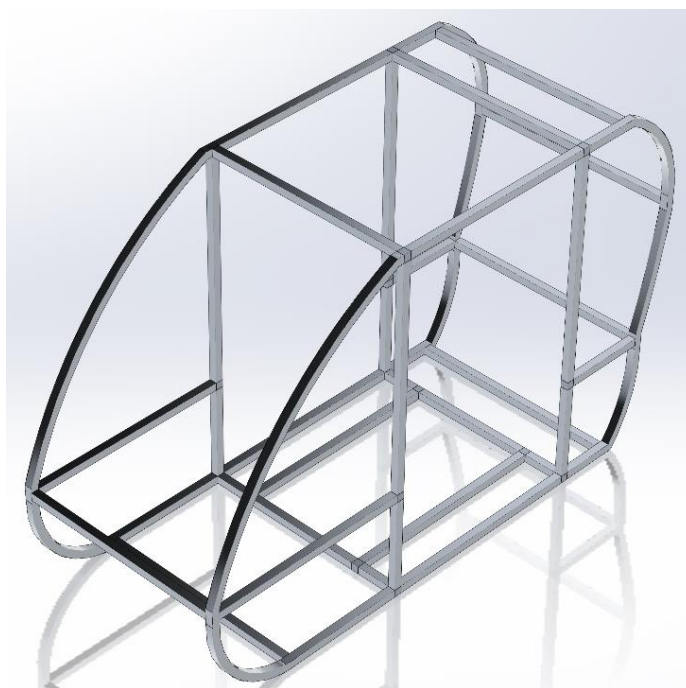


## 9.3 Sammenstillingstegninger

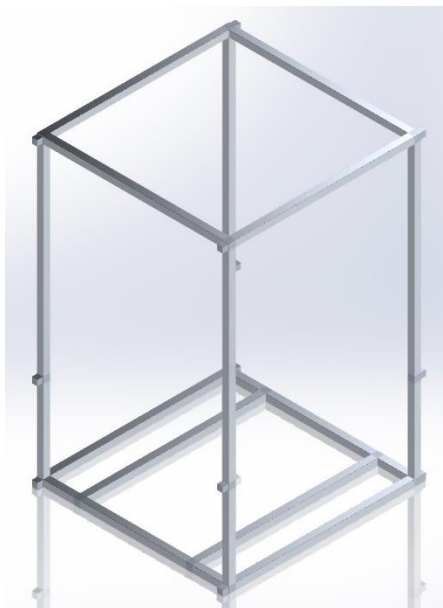
Figurene under viser sammenstillingstegninger av løsningen med og uten fremre og bakre chassis-elementer.



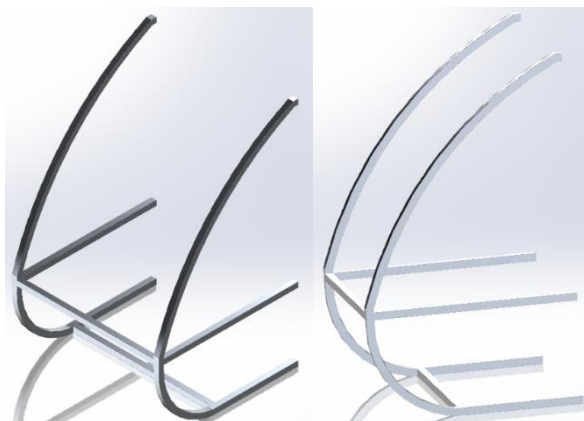
Figur 84: Sikkerhetsstruktur med løsningsforslag for fremre og bakre chassis-elementer innfestet, sett fra siden.



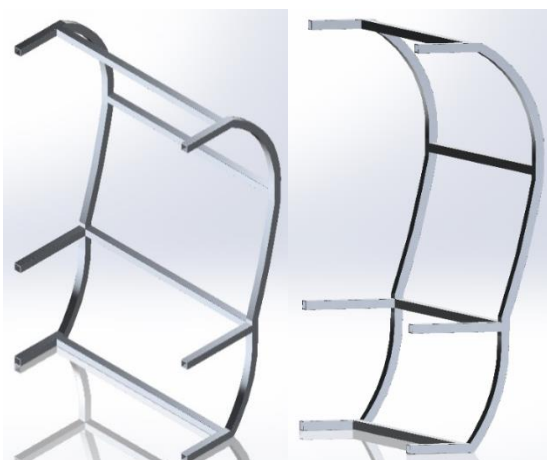
Figur 85: Sikkerhetsstruktur med løsningsforslag for fremre og bakre chassis-elementer innfestet, isometrisk visning.



Figur 86: Sikkerhedsstruktur, isometrisk visning.



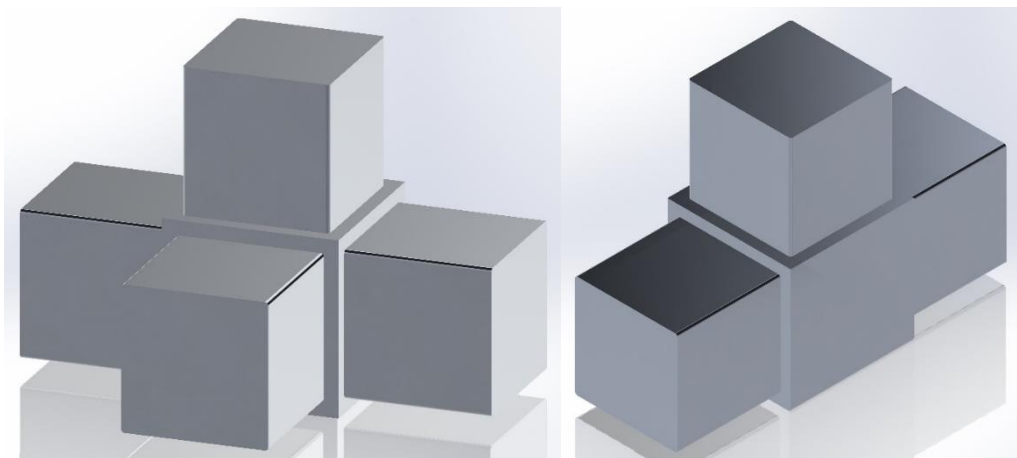
Figur 87: Løsningsforslag for fremre chassiselement, isometrisk og skråstilt visning.



Figur 88: Løsningsforslag for bakre chassiselement, isometrisk og skråstilt visning.

## 9.4 Overgangsutforming

Det er blitt utformet to forskjellige overganger, en til innfestning av fire elementer og en til innfestning av tre elementer. Overgangsutformingene er vist i figuren under:



Figur 89: Overgangsutforming. TV: 4-veis overgang til innfestning av 4 elementer, TH: 3-veis overgang til innfestning av 3 elementer.

## 9.5 Spesifikasjoner

Spesifikasjonene til løsningen med og uten fremre og bakre chassis-elementer er gitt i tabellene under.

Tabell 70: Sikkerhetsstrukturens spesifikasjoner.

Parameter	Innvendig mål	Utvendig mål
Bredde	800 mm	860 mm
Lengde	800 mm	860 mm
Høyde	1300 mm	1360 mm
Vekt [est. SW]	13,78 Kg	
Vekt [est. WB]	13,76 Kg	

Tabell 71: Spesifikasjoner for sikkerhetsstrukturen med fremre og bakre chassis-elementer.

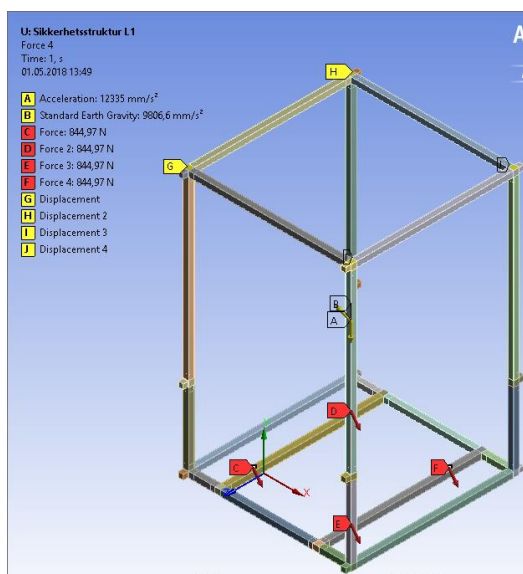
Parameter	Mål
Bredde	860 mm
Lengde	2140 mm
Høyde	1360 mm
Vekt [est. SW]	25,84 Kg
Vekt [est. WB]	25,79 Kg

## 10 FEM VERIFISERING AV UTBEIDET LØSNING

Kapittelet tar for seg FEM verifisering av det utarbeidede løsningsforslaget for sikkerhetsstrukturen. Det vil først kort redegjøres for oppsettet til beregningsmodellen. Deretter redegjøres det for mesh innstillingene benyttet i analysen. Til slutt i kapittelet blir resultatene av analysen presentert og gjennomgått.

### 10.1 Oppsett beregningsmodell

Oppsettet for beregningsmodellen er tilsvarende det som ble benyttet i FEM analysen av den forenklete beregningsmodellen i grunnlagberegningene (oppsettet for analysen vil ikke bli gjennomgått i detalj ettersom dette allerede er gjort i kapittel 8.5.3). Det utarbeidede løsningsforslaget for sikkerhetsstrukturen er først blitt importert fra SolidWorks til ANSYS Workbench. Deretter er laster og opplagring påført på tilsvarende måte som for den forenklete beregningsmodellen, dette er vis i figuren under. Ettersom oppsettet allerede er verifisert i et tidligere kapittel, blir dette ikke utført her.



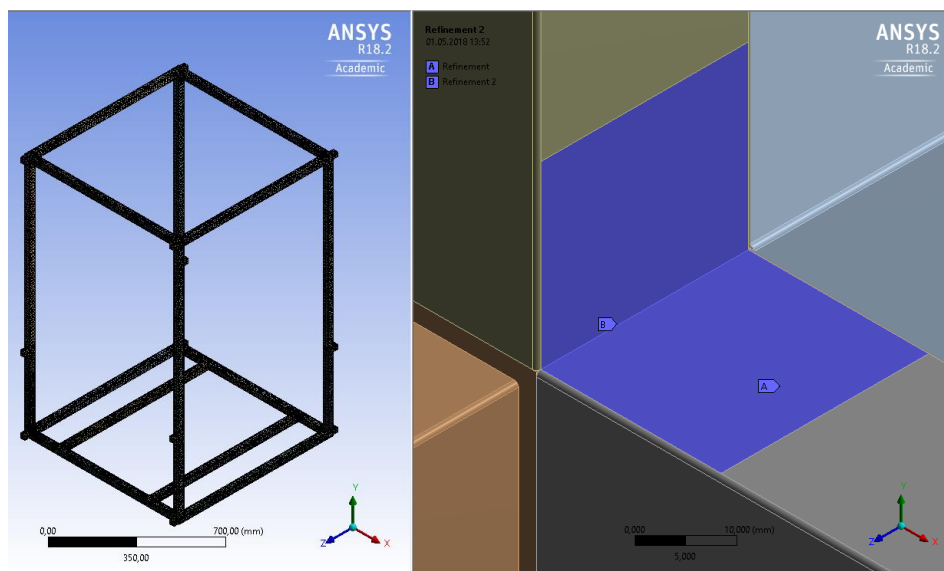
Figur 90: Lastpåføring og opplagring av sikkerhetsstrukturen i ANSYS Workbench.

#### Merk at:

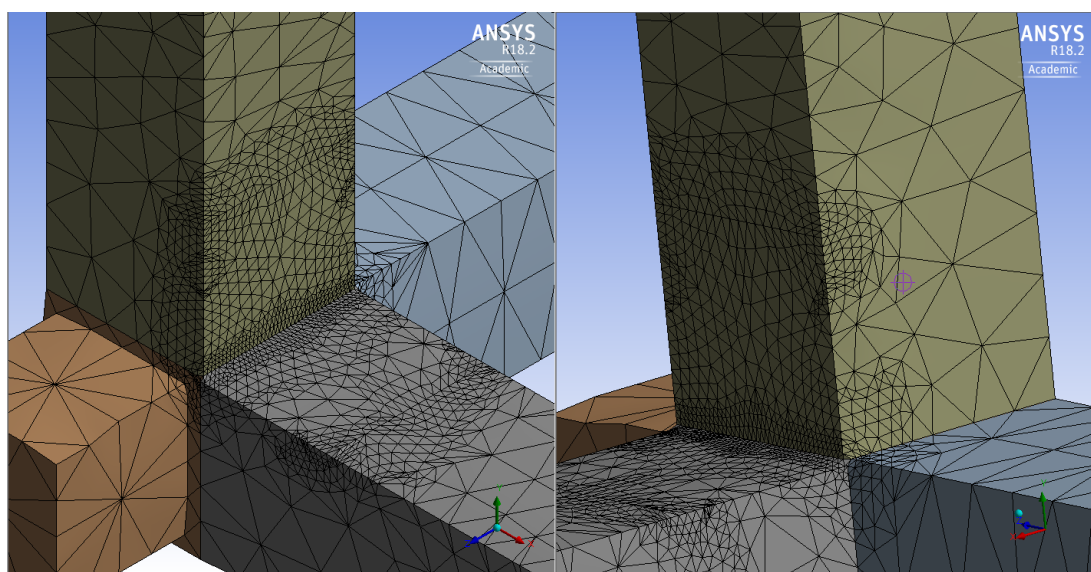
Den globale element densiteten i meshet vil være begrenset på grunn av at antallet tilgjengelige elementer i studentversjonen av ANSYS Workbench er begrenset. Ved lave mesh densiteter kan det oppstå spenningskonsentrasjoner i radiuser. Dette ble observert innledningsvis, der det oppsto en lokal spenningskonsentrasjon i en av radiusen på en av overgangene. Overgangen var lokalisert slik at det med relativ sikkerhet kan fastslås at den svært høye opptredende spenningen i punktet, er grunnet en singularitet i meshet (overgangen befant seg i et lite belastet snitt). For å unngå dette problemet er modellen betraktet som en del i analysen, dette gjør at det ikke oppstår spenningskonsentrasjoner i overgangen der radiusen til overgangene møter den indre radiusen til profilen. Merk at med den benyttede mesh densiteten forenkles profilene slik at radiusene ikke er tatt med.

## 10.2 Mesh

Ettersom modellen er ganske stor er den generelle meshdensiteten for løsningen er relativt lav, vist i figur 91 (elementstørrelse satt til maksimalt 7 mm). Meshet er så blitt forfinet til den høyeste mulige forfiningsverdien som analysen tillater, i området der det er antatt at den høyeste spenningen vil oppstå, og i den spisse overgangen mellom den horisontale tverrgående og vertikale profilen (samme område som funnet i kapittel 8.5.4), dette er vist i figur 91, resultatet av forfiningen er vist i figur 92.



Figur 91: TV: Meshet for modell, TH: Viser overflatene der meshet er blitt forfinet.



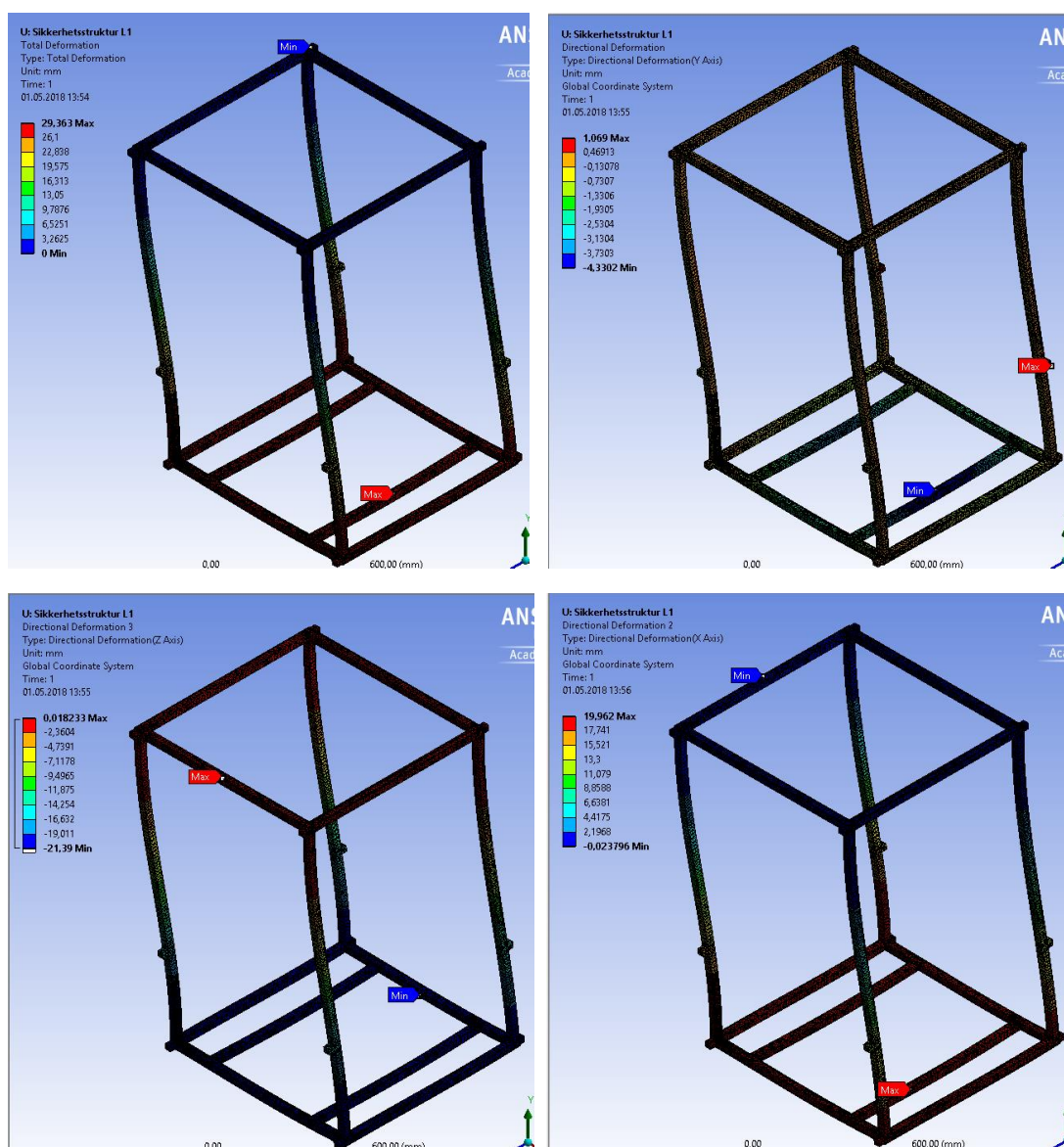
Figur 92: Resultatet av forfining av mesh i det aktuelle området.

## 10.3 Resultater

Det er kun blitt kjørt analyse for belastningstilfelle nummer 1, i dimensjoneringen mot statisk brudd, ettersom det er funnet å være det dimensjonerende tilfellet. Det vil også bli utført en knekkingsberegning i belastningssituasjon 2, da dette er det dimensjonerende tilfellet for knekking.

## 10.3.1 Nedbøyning

Det er ikke satt noe absolutt krav til maksimal deformasjon i konstruksjonen, resultatene fra analysen vil allikevel bli framlagt og det vil bli foreslått eventuelle tiltak for å redusere deformasjonen, dersom denne viser seg å være svært stor.



Figur 93: Deformasjonsresultater for løsningen. ØTV: Total deformasjon (maks = 29,4 mm), ØTH: Deformasjon i Z-retning (maks = 1 mm, min = 4 mm), NTV: Deformasjon i X-retning (min = 21,4 mm), NTH: Deformasjon Y-retning (maks = 20 mm).

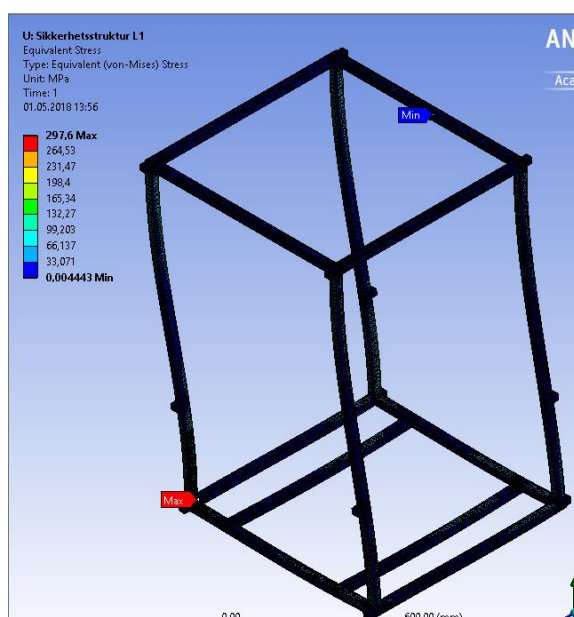
### Resultat diskusjon og konklusjon:

Den totale deformasjonen anses som relativt liten i forhold til konstruksjonens totale størrelse, og det vil derfor ikke bli gjort noen tiltak for å minske den i denne oppgaven. Deformasjonen vil også mest sannsynlig bli betydelig lavere i den ferdigstilt løsningen, da skallet/kledningen sannsynligvis vil ha betydelig avstivende effekt.

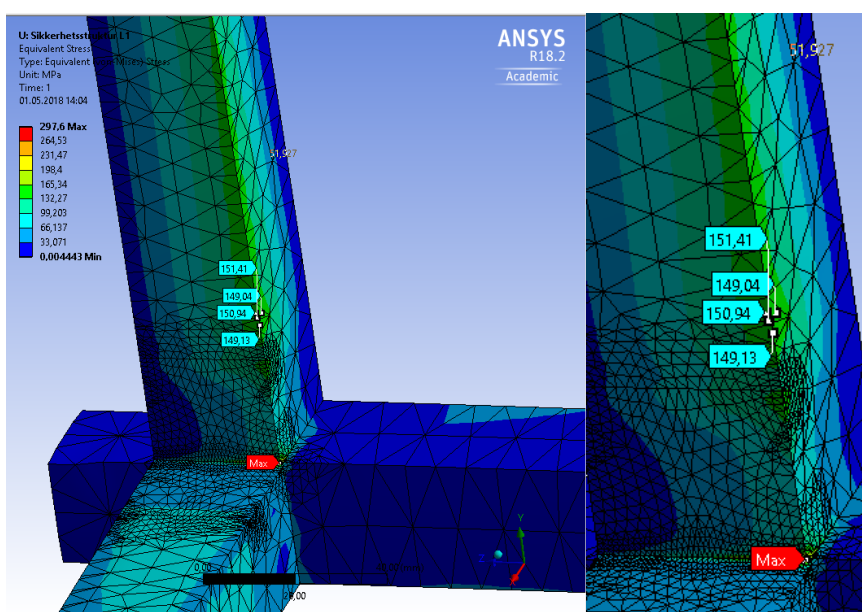


## 10.3.2 Spenning

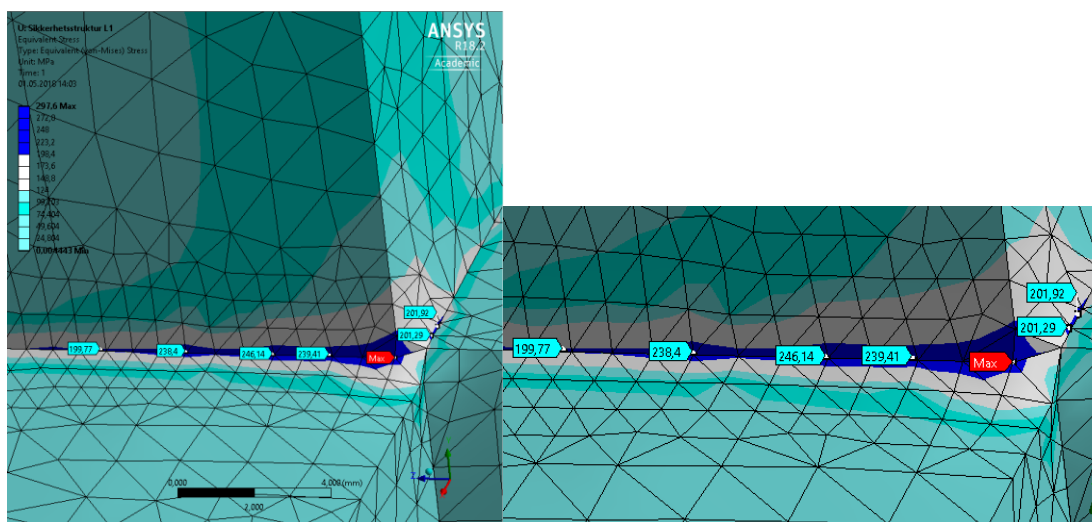
Spenningsfordeling i konstruksjonen er framlagt i de påfølgende figurene. Under figurene er de framlagte resultatene diskutert, og ut ifra dette er det vurdert om løsningsforslaget er tilstrekkelig dimensjonert mot statisk brudd.



Figur 94: Ekvivalent spenningsfordeling i sikkerhetsstrukturen, med lokasjon for maksimal og minimal opptredende spenning markert (maks = 297,6 MPa).



Figur 95: Ekvivalent spenningsfordeling i det høyest belastede området på konstruksjonen. Her med den maksimale spenningen markert. Videre er spenningsverdier i profiloverflaten rett forbi overgangens slutt markert.



Figur 96: Ekvivalent spenningsfordeling i overgangen mellom overgang og profiler i det høyest belastede område. Her med spenningsverdier i og omliggende overgangen markert.

## Resultat diskusjon og konklusjon:

Det er benyttet verktøyet probe for å sjekke spenningsnivået rundt om på konstruksjonen, og det er funnet at de maksimale spenningene opptrer i det samme område som i den tidligere utførte analysen for belastningstilfelle 1 på den forenklete beregningsmodellen (grunnlagsberginger).

Figur 96 viser at det nest mest belastede området er i ytterflaten i radiusen på den vertikale profilen rett etter punktet der overgangen tar slutt. Plasseringen virker sannsynlig ettersom belastningen i snittet vil være nær maksimal (avtagende fra krysningpunktet mellom vertikal og horisontal profil), mens godstykkelsen er betydelig redusert etter overgangens slutt.

De markerte spenningsverdiene viser at spenningen i dette området er under den tillatte spenningsverdien for konstruksjonen (det prøvd med forskjellige mesh forfinings grader, og funnet at spenningsresultatet konvergerer på omtrent 150 MPa (vist i figur 96)).

Videre er plasseringene av maksimalt opptredende spenning i overgangene mellom den fremre vertikale profilen og langsgående og tverrgående profil.

Spenningen vil i to svært begrensede områder være noe høyere enn den tillatte spenningen for konstruksjonen. Det er allikevel bestemt å godkjenne utformingen av følgende grunner:

- Overgangen mellom profilene er i virkeligheten ikke like spiss (alle kanter skal også avrundes).
- Spenningens opterer kun på et svært begrenset område (liten utbredelse).
- Den maksimale spenningen er under materialets flytegrense med god margin.

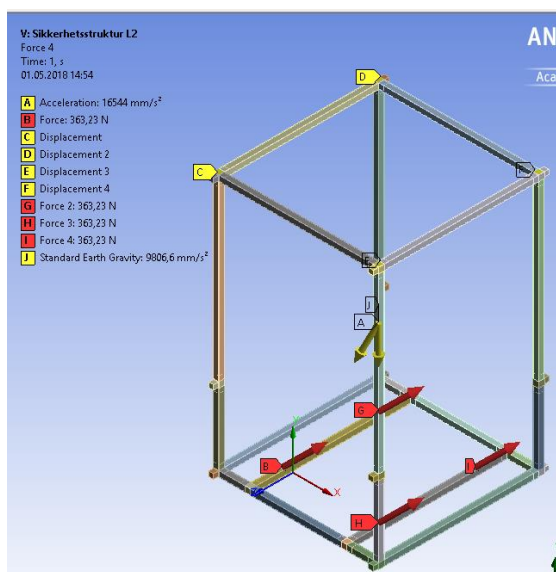
### 10.3.3 Knekking

Ettersom trykkraften som virker i de bakre vertikale elementet vil være noe større i sikkerhetsstruktur modellen enn i den forenklete beregningsmodellen i belastningssituasjon nummer 2, er det nødvendig å utføre en ny knekkebergening. Sikkerhetsstrukturen er blitt kontrollert mot knekking i belastningssituasjon nummer 2 i ANSYS og ved metode 1. Oppsettet i ANSYS til sikkerhetsstrukturmodellen i lastsituasjon nummer 2 er tilsvarende som for den forenklete beregningsmodellen (kapittel 8.5.3). Her er det blitt benyttet det fineste globale meshet som analysen tillater (7 mm).

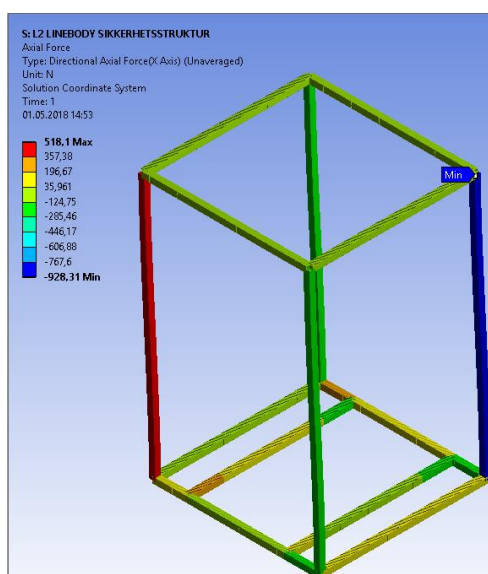


Maksimal spenningsverdi oppstår på omtrent den samme plassen som for den forenklede beregningsmodellen (og tilsvarende som for situasjon 1, rett etter overgangens endepunkt). Det er for lastsituasjon 2 besluttet å ikke forfine meshet ytterligere slik som det ble gjort i belastningssituasjon nummer 1, ettersom spenningskonsentrasjonene som mest sannsynlig kommer til å oppstå:

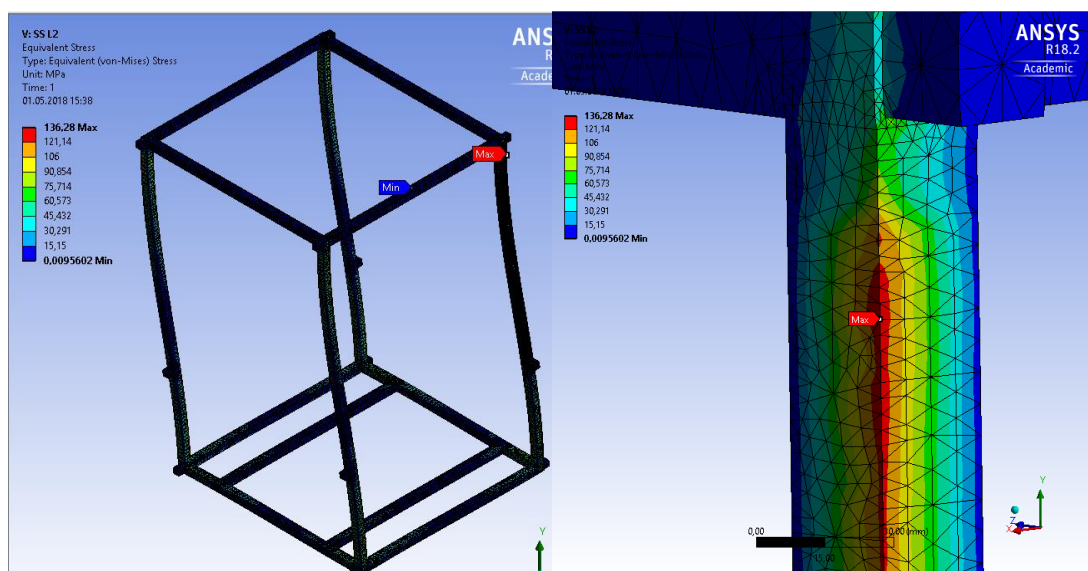
- Mest sannsynlig vil være svært lokale (sannsynligvis samme omfang som for lastsituasjon nummer 1), og derfor ikke være relevante for knekkingen.
- Mest sannsynlig ikke vil oppstå i virkeligheten, grunnet mindre spissitet i overgangene.



Figur 97: Opplagring og lastpåføring i belastningssituasjon for sikkerhetsstrukturen.



Figur 98: Omfang og lokasjon for største trykkraft i linebody modell med sikkerhetsstrukturens dimensjoner. Merk at; overganger er ikke tatt med i linebody modellen (maks = 928,31 N).



Figur 99: Plassering og omfang av maksimal opptredende ekvivalent spenning i belastningssituasjon 2 for sikkerhetsstrukturen (maks = 136,28 N).

### Resultat knekkanalyse ANSYS:

For belastningssituasjon 2 ble det kjørt en analyse som kartla de ti mest kritiske modusene. I den mest kritiske modusen var lastfaktoren oppgitt til 33,908, noe som betyr at sikkerhetsfaktoren mot knekking er mer enn tilstrekkelig (krav om sikkerhetsfaktor på 3).

### Knekkeberging etter metode 1:

Benytter sammen beregningsmodell som i kapittel 8.5.5, med tverrsnitts verdier fra SHS tverrsnittet.

Avleser trykkraft og spenning fra ANSYS modeller, og regner ut maksimalt bøyemomentverdi:

$$M_3 \approx 317260 \text{ Nmm} \quad (45)$$

$$F \approx 930 \text{ N}$$

$$h = 1330 \text{ mm}$$

Regner ut ny inngangsverdi for knekk lengdekurve e:

$$p = \varepsilon \cdot \frac{l}{h} = 0,3 \quad (51)$$

Leser av omtrentlig k verdi for rammen på knekk lengdekurve e:

$$k = 1,25$$

$$l_k = k \cdot h = 1662,5 \text{ mm} \quad (52)$$

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = 147,54 \rightarrow \text{Elastisk knekking} \quad (53)$$

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{SHS}}{l_k^2} = 8952,88 \text{ N} \quad (54)$$

$$F_{k\text{till}} = \frac{F_k}{n_k} = 2984,29 \text{ N} \quad (55)$$

Krav for tilstrekkelig sikkerhet mot knekking:

$$\frac{F_k}{F_{k\text{till}}} + 1,6 \cdot \frac{M_b}{M_{b,\text{maks}}} \leq 1 \quad (62)$$

Regner ut interaksjonssummen for tilfellet:

$$\frac{F_k}{F_{k\text{till}}} + 1,6 \cdot \frac{M_b}{M_{b,\text{maks}}} \approx \mathbf{0,73} \quad (63)$$

### Konklusjon:

Sikkerhetsstrukturen er trygg mot knekking, ettersom interaksjonssummen er lavere enn 1.

## 11 FRAMSTILLING AV LØSNING

Kapitlet inneholder produksjonsanvisninger for framstilling av en prototype av sikkerhetsstrukturen. Det vil først bli redegjort for hvilke produksjonsmetoder som skal benyttes for å framstille løsningsens ulike elementer. Deretter gis anvisninger for sammenstilling av elementer til komplett prototype. Det er også blitt utført et grovt kostnadsestimat for framstilling av prototypen.

### 11.1 Produksjonsmetoder for elementer

Delkapittel redegjør for produksjonsmetodene som skal benyttes for de ulike elementene ved produksjon av en prototype.

#### 11.1.1 Produksjonsanvisninger for ekstruderte profiler

Ekstruderte SHS profiler med spesifisert standard tverrsnitt av legering AA-7150-T6151 bestilles fra leverandør (\*), (\*\*), (\*\*\*). Profilene bestilles enten ferdig kuttet til spesifiserte lengder eller i standard ekstruderingslengder avhengig av hva som er mest hensiktsmessig med tanke på pris og tilgjengelighet. Minimumslengden av ekstrudert profil som må bestilles vil være den totale lengden av samtlige profiler, som er 12960 mm (\*\*\*\*). Bestillingslisten for standard profiler er gitt i tabell 64 (figur 83 gir en oversikt over plasseringen av de ulike elementene):

*Tabell 72: Oversikt over kvantum av forskjellige lengder av ekstruderte profiler som behøves for produksjon av en prototype.*

Element nummer (nummerering i sammenstillingstegninger)	Element betegnelse (profil xxx mm)	Material betegnelse	Antall	Lengde [mm]
3	Profil 370mm	AA-7150-T6151	4	370
4	Profil 135mm	AA-7150-T6151	4	135
5	Profil 470mm	AA-7150-T6151	2	470
6	Profil 800mm	AA-7150-T6151	8	800
7	Profil 900mm	AA-7150-T6151	4	900
				<b>12960</b>

\*):

Fortrinnsvis benyttes SAPA/HYDRO-Extrusions som leverandør, ettersom det valgte standardtverrsnittet er fra deres katalog, og det er undertegnede ikke bekjent hvorvidt dette finnes i andre leverandørers standard sortiment. Andre leverandører kan benyttes dersom det er ønskelig, dersom et ekvivalent tverrsnitt finnes i deres standard sortiment.

\*\*):

Profilene må mest sannsynlig spesialbestilles ettersom den aktuelle legeringen ikke finnes i SAPA/HYDRO-Extrusions (eller øvrige leverandører) sitt sortiment per mai 2018.

\*\*\*):

7xxx legeringer kan være utfordrende å ekstrudere grunnet de (generelt) høye styrkeegenskapene (dette begrenser tverrsnittgeometrikompleksiteten). Det er antatt at dette ikke vil være et problem for den aktuelle tverrsnittutforming, ettersom tverrsnittet ikke er særlig komplekst. Det er også antatt at ekstruderingsformen for det valgte standard tverrsnittet, kan benyttes for den spesifiserte legeringen, slik at det ikke må utarbeides nye ekstruderingsformer.

\*\*\*\*):

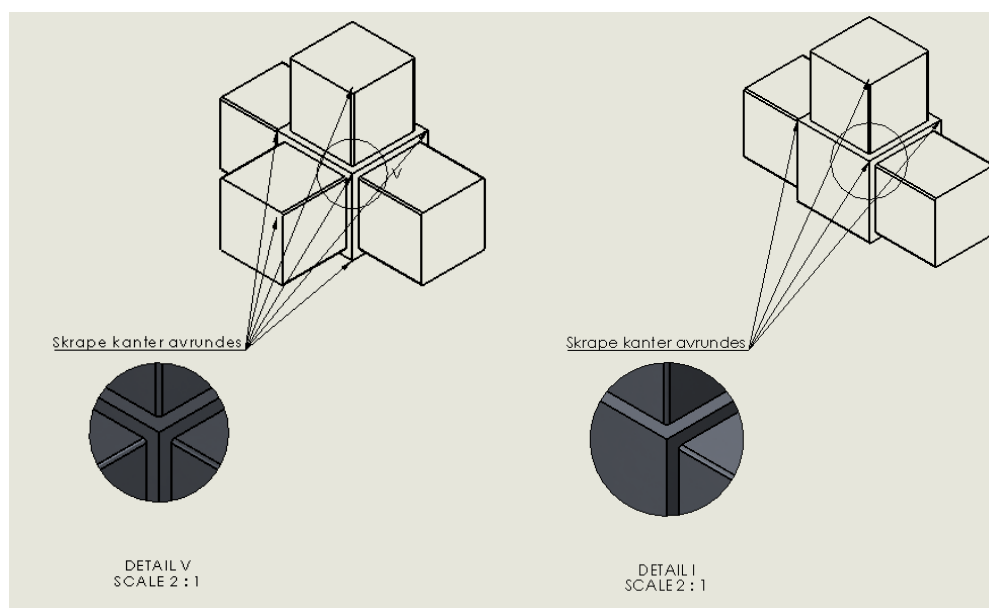
Merk at; det her ikke er vurdert mulig svinn og plassutnyttelse på standard ekstruderingslengder ved kapping.

## 11.1.2 Produksjonsanvisninger for knutepunktoverganger

Spesifisert antall aluminiumsblokker av legering AA-7150-T6151 med minimum spesifiserte dimensjoner bestilles fra leverandør. Overganger maskineres deretter ut av aluminiumsblokkene til angitte spesifikasjoner for 3 og 4 veis overganger. De spisse overgangene angitt i figur 101, avrundes slik at det ikke er fare for at det oppstår spenningskonsentrasjoner. Bestillingslisten for materiale til utarbeiding av overganger er gitt i tabell 62.

Tabell 73: Oversikt over kvantum av overganger som behøves for produksjon av en prototype.

Element nummer (nummerering i sammenstillingstegninger)	Element betegnelse	Material betegnelse	Antall	Materialvolum per overgang (l x b x h) [mm]
1	4 vei overgang	AA-7150-T6151	8	80 x 55 x 55
2	3 vei overgang	AA-7150-T6151	8	80 x 30 x 55
			<b>16</b>	



Figur 100: Angir aktuelle kanter som skal avrundes. TV: Aktuelle kanter på 4-vei overgang, TH: Aktuelle kanter på 3-vei overgang.

## 11.2 Sammenstilling av elementer

Delkapittel redegjør for forberedelsene som skal gjøres før sammenstillingen av elementene og prosessen med sammenstilling av elementer til ferdigstilt prototype.

### 11.2.1 Forberedelser av elementer til liming

Samtlige overflater der det skal påføres lim forberedes på følgende måte (\*):

- Overflatene bearbeides med grovt sandpapir eller fil, for å fjerne oksidsjikt og for å danne en struktur som epoksyen lettere kan binde seg til.
- Overflatene rengjøres deretter med et sterkt vaskemiddel, fortrinnsvis med avfettende egenskaper, slik at de er fri for eventuelle forurensninger og/eller korrosjon.

Øvrig spesifikasjoner og anvisninger for forberedelser til liming med 2 komponent epoxylimet JB-Weld finnes i produktdatablad i vedlegg.

\*):

Gjelder følgende overflatearealer:

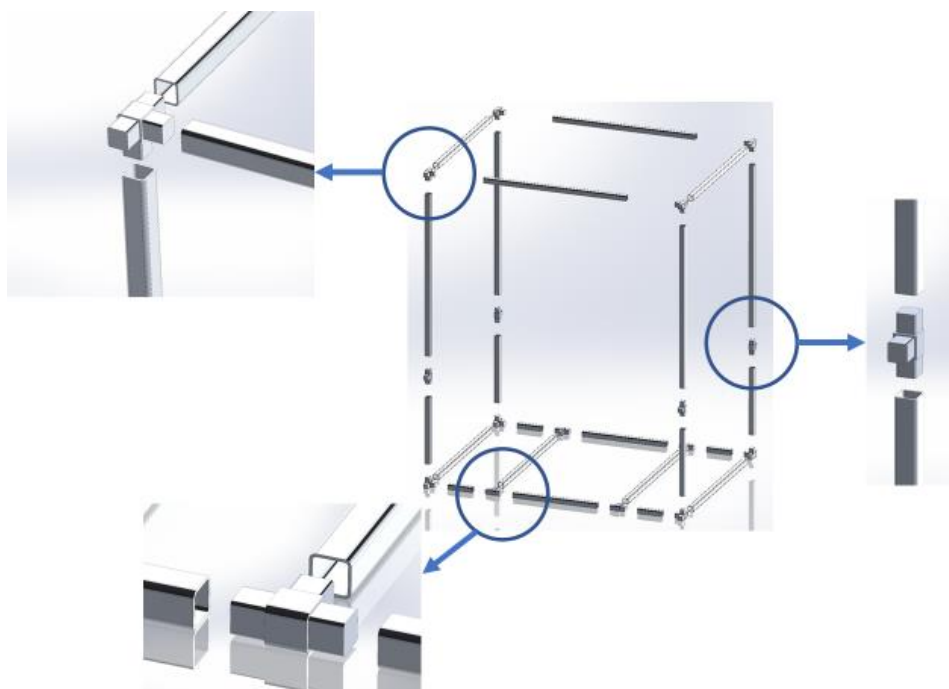
- Innvendig i ekstruderte profil, der overganger skal føres inn (overlapp mellom profil og overgang).
- Side (tverrsnitts) arealet til profilen som ligger inntil overgangen.
- Overflaten til overgangens plugg som skal føres inn i profil.

### 11.2.2 Sammenstilling av elementer

Til lim sammenføyningene benyttes 2 komponent epoxylim (fortrinnsvis JB-weld), eller ekvivalent epoxy lim som medfører at, limforbindelsen tilfredsstiller dimensjoneringskriteriet.

- Limet mikses etter anvisninger på pakkevedlegget, og må påføres innen 15-30 min etter sammenblanding av komponentene er påstartet.
- Limet påføres lim overflatene på overgangen med minimum 25 mikrometers tykkelse.
- Limet har en setningstid 4-6 timer i romtemperatur (se pakningsvedlegg for setningstider ved andre temperaturer), og er fullherdet etter 15-24 timer.
- Klamping er ikke nødvendig med mindre forbindelser er utsatt for fraskillende krefter. Når limet har satt seg kan eventuelle klamper fjernes, men forbindelsene skal ikke belastes med eventuell dritsitasjon for limet er fullherdet.

Se figur 101 for oversikt over de forskjellige typene av knutepunkt som skal sammenføyas. Merk at; alle sammenføyninger mellom profiler og overganger skal limes, og ikke bare de som er angitt i figuren.



Figur 101: Eksplosjonstegningen viser de tre forskjellige knutepunkttypene i sikkerhetsstrukturen isometrisk visning

Øvrig spesifikasjoner og anvisninger for liming med 2 komponent epoxylimet JB-Weld finnes i produktdatablad i vedlegg.

**NB:**

Det refereres til pakningsvedlegget for anvisninger for alle trinn i forberedelses og sammenstillingsprosessen, pakningsvedlegget skal følges for å sikre at forbindelsene tilfredsstillende angitte spesifikasjoner for limet. HMS datablad for limet kan lastes ned ved behov på: [54].

### 11.2.3 Overflatebehandling

Løsningen trenger ikke å overflatebehandles ettersom den ikke vil være eksponert for ytre miljøpåvirkninger grunnet klednings/skall. Løsningen vil heller ikke eksponert for syrer i den tiltenkte applikasjonen. Det er ikke fare for oppsamling av væske inne i profiler ettersom limet danner en vanntett hinne mellom overgang og profil.

## 11.3 Kostnadsestimat for utvikling og framstilling av prototype

Kostnadsberegningene gitt i tabellene under gjelder for framstilling av en prototype av sikkerhetsstrukturen, og er grove estimater.

### 11.3.1 Konseptutviklingskostnader

Tabell 66 oppgir estimerte kostnader knyttet til konseptutvikling for løsningen.

Tabell 74: Kostnadsestimat for framstilling av prototype produktutviklingskostnader.

Aktivitet	Kapiteler	Antall timer	Pris per time NOK	Sum NOK
Utredning	1 – 4	250	650	162500
Konseptutvikling	5 – 7	180	650	117000
Dimensjonering	8, 10	350	650	227500
Modellering	9	100	650	65000
Produksjon	11	20	650	13000
		<b>900</b>		<b>585000</b>

#### Kommentar til tabell 63:

- Kostnader knyttet til diverse programvare benyttet i oppgaven er ikke medregnet.
- Kostnader knyttet til diverse faglitteratur benyttet i oppgaven er ikke medregnet.
- Tidsestimater for de forskjellige aktivitetene er omtrentlige verdier.
- Timeantallene er estimert per 2. mai. Eventuelle tillegg i endelig timeantall på de forskjellige aktivitetene grunnet eksempelvis korreksjoner og/eller tillegg blir ikke medregnet.
- Rapportskriving er ikke satt opp som en egen aktivitet, da det er omfattet i alle de gitte aktivitetene (med forbehold at andelen rapportskriving har variert ved de forskjellige aktivitetene).
- Standard timesats for nyutdannet ingeniør med mastergrad er benyttet for å anslå kostnader.

### 11.3.2 Materialkostnader

Tabell 64 oppgir estimerte materialkostnader knyttet til framstilling av løsningsprototypen.

Tabell 75: Grovt kostnadsestimat for materialer.

Komponent	Minimum kvantum	Sum NOK
Ekstruderte standard profiler	13 m	1050
Materiale til framstilling av overganger	8,5 kg	290
2 komponent epoksyylim	1 tube (2oz)	50
		<b>1390</b>

#### Kommentar til tabell 64:

Ekstruderte profiler:

Det var svært vanskelig å finne noe konkret anslag på kostnadene for de ekstruderte profilene, ettersom priser for ekstruderte profiler nærmest aldri er oppgitt på nett (kan kun innhentes ved forespørsel), og spesielt ikke for en så lite utbredt legering som den som er valgt. I kostnadsestimeringen er det benyttet priser fra [55], dette medfører at prisanslaget gjøres med følgende forbehold:



- Pris estimatet er ved tilnærmet minimal nødvendig lengde av ekstrudert profil kjøpt inn (14 m totalt, 2 m ekstruderingslengde per profil). Det er altså ikke tatt hensyn til svinn eller plassutnyttelse.
- Fraktkostnader er ikke medregnet i kostnadsestimatet, og kan utgjøre en betydelig andel av de totale materialkostnadene.
- Dimensjonen og utformingen på tverrsnittet til profilen som er benyttet i estimatet er ikke helt tilsvarende som for den som skal benyttes i prototypen.
- Profilen er av en svært utbredt 6xxx legering, og det er derfor meget sannsynlig at prisen for en tilsvarende profil i spesifisert legering vil være høyere.

## Overganger:

Overgangs pris er estimert med å multiplisere minimumsvolumet av materiale nødvendig (minimum blokkvolum) for å kunne fremstille overganger, med gjennomsnittlig prisestimat for spesifisert legering (hentet fra CES EduPack). Dette medfører at prisanslaget gjøres med følgende forbehold:

- Det er usikkert om det er mulig å kjøpe inn aluminiumsblokker i de gitte dimensjonene.
- Prisen for legeringen er et estimat, og er mest sannsynlig utdatert.
- Den gjennomsnittlige verdien av prisestimatet for legeringen som er benyttet i kostnadsestimatet, er ikke nødvendigvis den mest representative i det oppgitte prisintervallet for legeringen fra CES EduPack.

## 2 komponent epoksy lim:

Prisen for lim er estimert på følgende måte:

- Først er det totale limoverflatearealet regnet ut.
- Deretter er det totale limoverflatenarealet multiplisert med minimums anbefalt limsjikte tykkelses verdi for epoksy lim hentet fra CES EduPack. Dette gir da minimums volum av lim som må kjøpes inn.
- Kostnadsestimatet for lim er basert på prisen for JB-Weld, funnet på [56].

Dette medfører at prisanslaget gjøres med følgende forbehold:

- Den benyttede verdien for minimums anbefalt limsjikte tykkelses (25  $\mu\text{m}$ ), er mest sannsynlig lavere enn det som i virkeligheten er mulig å få til ved påføring for hånd. Dette medfører at estimatet for nødvendig volum av lim mest sannsynlig er for lavt.
- Det vil mest sannsynlig forkomme svinn, noe som det ikke er tatt hensyn til.
- Limet føres hvorvidt undertegnede bekjent ikke av noen norske forhandlere. Fraktkostnader knyttet til bestilling av lim fra utlandet er ikke medregnet i kostnadsestimatet.

## Annet:

Det er antatt at annet utstyr nødvendig for framstilling av prototype er tilgjengelig på NMBU sitt verksted, dette omfatter:

- Vaskemiddel til rengjøring av limflater.
- Fil og/eller sandpapir til bearbeiding av limflater.
- Klamper til eventuell fastholdelse av elementer før limet har satt seg.

## 11.3.3 Produksjonskostnader

Tabell 65 oppgir estimerte produksjonskostnader knyttet til framstilling av løsningsprototypen.

Tabell 76: Grovt kostnadsestimat for framstilling av prototype produktutviklingskostnader.

Aktivitet	Antall timer	Pris per time NOK	Sum NOK dersom maks antall timer
Maskinering	≤ 50	1200	≤ 60000
Kutting	≤ 10	650	≤ 6500
Forberedelser	≤ 25	650	≤ 16250
Sammenstilling	≤ 10	650	≤ 6500
			<b>89250</b>

### Kommentar til tabell 65:

- Maskinerings kostnader og kostnader knyttet til kutting av profiler er basert på et estimat utført av en ekspert på området, fra en tidligere masteroppgave (estimater er gitt av verkstedsjef ved REALTEK Bjørn Brenna) [15].
- Øvrige timesatser for forberedelser og sammenstilling av løsningen er satt til standard timesats for nyutdannet ingeniør med mastergrad.
- Tidsanslagene gitt i tabell 68 er svært grove, og er basert på verdier benyttet tidligere masteroppgaver.

## 11.3.4 Estimerte totalkostnader for fremstilling av prototype

Tabell 69 oppgir estimerte delsummer og totalkostnaden for framstilling av løsningsprototypen. Den prosentvise andelen av totalkostnaden hver av delsummene utgjør er også oppgitt.

Tabell 77: Grovt kostnadsestimat av totalkostnader ved produksjon av en prototype.

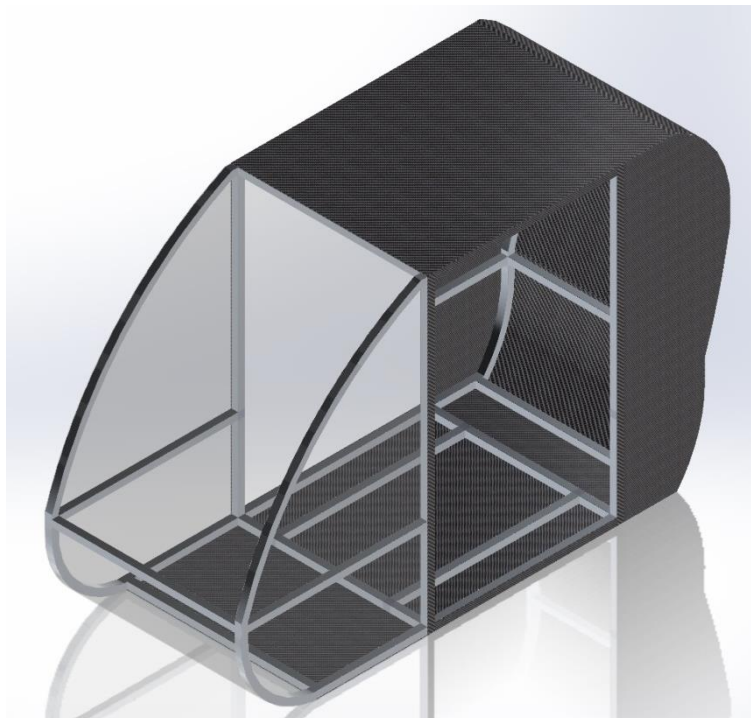
Aktivitet	Sum NOK	Andel %
Produktutvikling	585000	86,58
Materialkostnader	1390	0,21
Produksjon	89250	13,21
	<b>675640</b>	

### Kommentar til tabell 66:

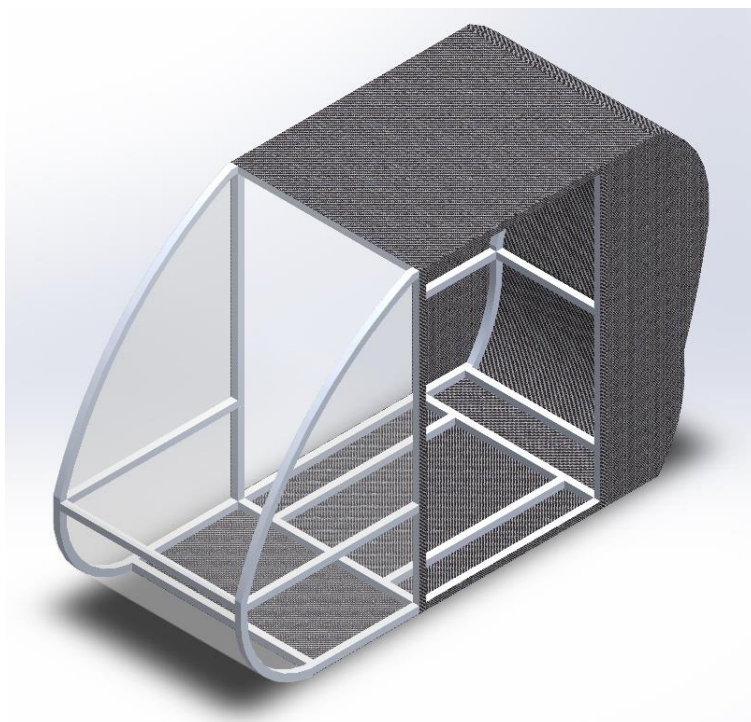
Av tabell 66 kan vi se at den totale kostnaden for framstilling av en løsningsprototype er estimert til omtrent 675640 NOK. Gitt forbeholdene for de ulike estimerte delsummene er det sannsynlig at totalsummen vil være noe høyere i virkeligheten. Men fordi usikkerhetene i kostnadsestimatet primært ligger i delsummene som utgjør en mindre vesentlig andel av totalkostnaden, er det antatt at kostnadsanslaget gir en relativt god indikasjon på hva det vil koste å framstille løsningsprototypen. (Dette kan også ikke være tilfellet dersom de virkelige kostnadene for materiale og produksjon variere svært mye fra det som er blitt estimert. Men det regnes som lite sannsynlig at anslagene er opptil flere størrelsesordener feil).

## 12 PRESENTASJON AV LØNING

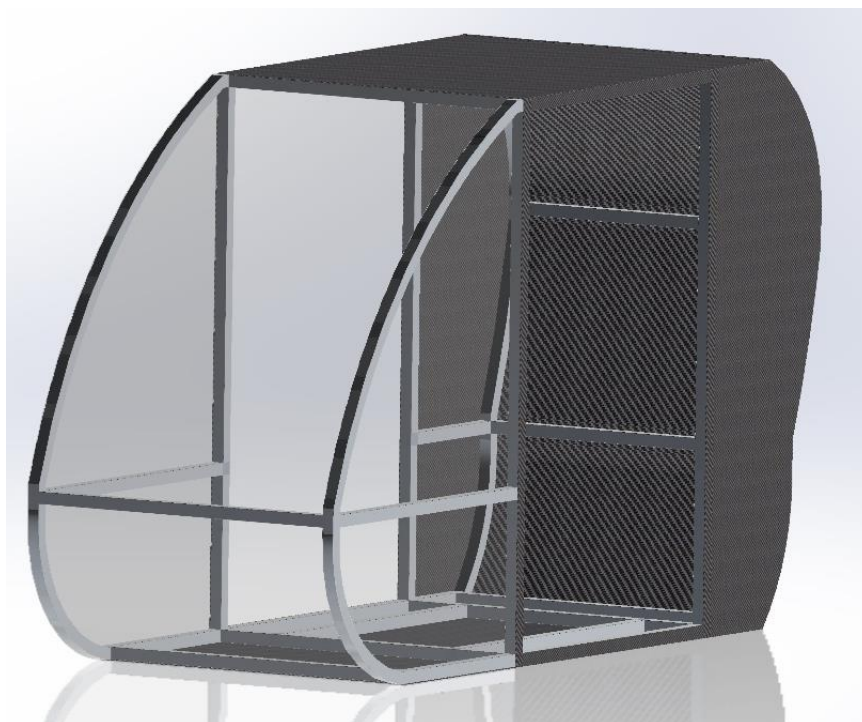
Kapittelet inneholder en fremvisning av et løsningsforslag med løsningsforslaget for den komplette rammen påsatt kledning, for å illustrere hvordan den fremtidige utførelsen av Dolphin Sky kan komme til å se ut. Rammen er påsatt skallplater i karbonfiberutførelse, og dekningsplater i glass på fremre del.



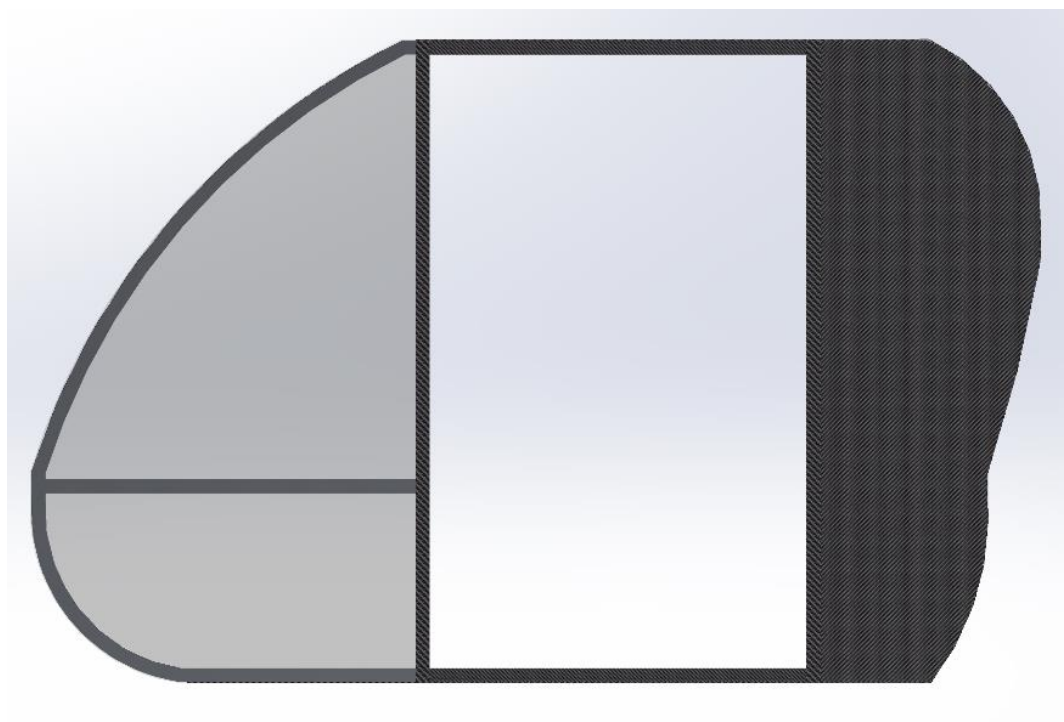
Figur 102: Løsningsforslag for komplett ramme påsatt kledningsplater, isometrisk visning.



Figur 103: Løsningsforslag for komplett ramme påsatt kledningsplater, isometrisk visning.



Figur 104: Løsningsforslag for komplett ramme påsatt kledningsplater, skråstilt visning.



Figur 105: Løsningsforslag for komplett ramme påsatt kledningsplater, sett fra siden.

## 13 PROSESSEVALUERING

Kapittelet omhandler evaluering av arbeidsprosessen og de oppnådde resultatene i mastergradsarbeidet. Det er også framlagt forbedringspotensialer for designet av løsningen.

### 13.1 Evaluering av arbeidsprosessen

Under er en evaluering med forslag til forbedringspotensialer for et utvalg av aspektene i arbeidsprosessen framlagt.

#### Planmessighet:

- Undertegnede vurdering av arbeidsprosessen er at den er blitt gjennomført med en relativt høy grad av planmessighet. Tidsbruk og arbeidsmengde har gjennomgående prosessen vært relativt konsistent. Prosjektplanen som ble utarbeidet innledningsvis i oppgaven, produktutviklings og beregningsmetodikkene, samt løsningsvalgsekkefølgen som ble utarbeidet i funksjonsanalysen er i stor grad blitt fulgt. De overordnede målsettingene for prosjektet er også blitt møtt.
- Prosjektets omfang ble allikevel noe underestimert, og det er måttet blitt lagt til begrensninger for omfanget av oppgavens berøringsområder og detaljnivået til disse undervis i oppgaven, slik at den kunne gjennomføres innenfor tidsrammene. Et mulig forbedringspotensial kunne muligens vært utforme flere og tydeligere begrensninger for prosjektet tidligere i prosessen. Men det vil som regel være utfordrende å gjøre dette, ettersom informasjonen som behøves for å fastsette fornuftige prosjektrammer som regel ikke framkommer før man kommet et stykke ut i oppgaven.

#### Kvalitetssikring:

- Det må erkjennes at det hadde vært lurt å avslutte utviklingen av løsningen på et noe tidligere tidspunkt, slik at det hadde vært mer tid til finpussing og ferdigstilling av rapporten. Noen kapiteler i rapporten, da spesielt kapittel 8 bærer preg av litt for langtekkelige og lite konkrete utredninger.
- Det hadde også vært hensiktsmessig å benytte seg mer av eksperttesting, slik at beslutningene og antakelsene gjort undervis i prosjektet kunne verifiseres. Dette gjelder spesielt for de aspektene av prosjektet der undertegnede kunnskaper er noe manglende, og det samtidig er benyttet kilder av lav kvalitet, eksempelvis i produksjons og kostnads vurderingene i kapittel 11. Men dette var det ikke tid til å gjennomføre.
- Videre kunne det ha vært hensiktsmessig å i større grad basere kravspesifikasjonen på krav fra standarder, eksempelvis FAR/CS-27 og EU-direktivet 93/93/EØF i, slik at løsningen kan sertifiseres etter disse. Utredning av standarder er svært tidkrevende, og har derfor ikke blitt gjort.

#### Seleksjonsmetodikk:

- Oppgaven ble funnet å ikke la seg løse med den valgte konstruksjonsmetoden innenfor tidsrammen, og oppgavens omfang ble derfor begrenset til å omhandle utviklingen av den interne rammen i den forsterkede skallkonstruksjonen. De forskjellige alternativenes gjennomførbarhet burde derfor blitt undersøkt bedre, og disse burde også blitt vurdert etter et gjennomførbarhetskriterium.
- I seleksjon av konstruksjonsmateriale burde kanskje sveisbarhetskriteriet vært vektet høyere, ettersom valget av konstruksjonsmateriale endte opp med å begrense mulighetene for valg av sammenføyningsmetode. Videre ble det antatt at den valgte legeringen var lettere tilgjengelig enn det som faktisk er tilfellet. Dette burde definitivt vært undersøkt bedre.
- Poengsystemet benyttet i seleksjonen er basert på tildeling av poeng etter en relativ rangering. Systemet har en svakhet ved at store forskjeller i egenskaper mellom alternativer ikke fanges spesielt



godt opp, spesielt dersom alternativer ligger nærme hverandre i rangeringen, men at egenskapene allikevel er svært forskjellige. Samtidig kan også det forekomme for store utslag i poengutdelingen i forhold de faktiske forskjellene i egenskaper for alternativene, dersom alternativer ligger langt fra på rangeringen, men egenskapene allikevel er ganske like. Effekten av sistnevnte er blitt forsøkt neglisjert ved at alternativer med ganske like egenskaper er rangert likt. Et mulig forbedringspotensial i poengsystemet hadde vært å tildele alternativene poeng etter alternativets faktiske egenskaper relativt til de andre alternativene, da hadde forskjellene i egenskapene mellom alternativer blitt fanget bedre opp. Dette er altså ikke gjort, ettersom det i mange tilfeller er svært vanskelig og tidkrevende å kvantifisere den relative differansen mellom alternativer.

- Det burde også blitt vurdert flere forskjellige lim varianter for limforbindelsene etter Pughs seleksjonsmetodikk, men tiden strakk dessverre ikke til det.
- Det er blitt antatt at de valgte ekstruderte profilene kan bestilles fra leverandør, det burde her blitt kontaktet en leverandør for å høre om dette er tilfelle, men det var det dessverre ikke tid til å gjennomføre.

## Beregninger og modellering:

- Det ble gjort mange forenklinger i kartlegging av krefter og utarbeiding av belastningstilfeller. Dette er fordi belastningssituasjonen for løsningen er meget kompleks og det faktum at Dolphin Sky konseptet er i et relativt tidlig utviklingstrinn, slik at mange nødvendige parametere fremdeles er ukjente og at det har derfor måttet blitt gjort antakelser om disse. Det hadde vært her vært hensiktsmessig å benytte eksperttesting for å verifisere at antagelsene og forenklingene som er utført er fornuftige. Men dette ble det dessverre ikke tid til å gjøre.
- Det ble brukt mye tid på å finne ut av hva som var et fornuftig oppsett for ANSYS analysen i grunnlagsbergene, videre ble det også brukt mye tid på å finne ut av hvordan modellen skulle forenkles slik at den kunne verifiseres. Her burde på et tidligere tidspunkt blitt kontaktet en ekspert slik at det ikke ble brukt så mye tid på det.
- Det er også blitt gjort forenklinger i lim forbindelses dimensjonering, her burde også en ekspert blitt kontaktet for å verifisere at antakelsene er fornuftige.

## Plattform integrasjon:

- Et av målene for oppgaven var at løsningen skulle kunne integreres i Dolphin Sky plattformen. Dette omfattet både allerede utviklede løsninger, men også løsninger som skulle utvikles parallelt med dette prosjektet. Her må det erkjennes at det kanskje kunne vært avsatt mer tid til å koordinere med pågående oppgaver, samt gjøre en mer nøyaktig utredning av eksisterende løsninger. Det har vært utfordrende å finne ut av hva som det måtte bli tatt hensyn til, ettersom mange av løsningene som er tiltenkt å skulle benyttes i plattformen ikke er utviklet eller er på et tidlig utviklingsstadium, og at spesifikasjonene og ønsket plassering av disse i plattformen derfor ikke er kjent. Det har av den grunn blitt gjort mange antakelser, samt at en god del hensyn som kanskje vil kunne påvirke løsningsutformingen ikke er blitt vurdert. I tillegg vil koordineringen være avhengig av at oppgavene det skal koordineres med er på stadium der de aktuelle løsningenes rammer til en viss grad er kjent. På grunn av dette ikke var tilfellet før helt mot slutten av prosjektet, ble blant annet festepunktene til løftmodulen ikke utformet. Det er dog underveis, koordinert hvor plassering av disse vil være, slik at det skal være lagt opp til at chassiset og løftmodulen skal kunne festes sammen. Det hadde også vært gunstig om det hadde blitt tid til å lage en felles helhetlig 3d modell med interiør og løftmodul festet/innsatt i chassiset.

## 13.2 Mulige designforbedringer

Under er det framlagt forslag til mulige designforbedringer/designrevisjoner.

### Konstruksjon:

- Utvikling av en forsterket skallkonstruksjon vil medføre høyere konstruksjonsstivhet- og stryke.
- Det eksisterer muligheter for avstiving av sikkerhetsstrukturen i øvre del og bakre del av sideåpningen. Dette kan utføres uten tap av inn og utgangsergonomi, og vil medføre en høyere konstruksjonsstivhet. Avstivingen muliggjør kanskje en global profildimensjon reduksjon.

### Profilutforming:

- Profilutformingen kan varieres slik at profil dimensjonen er tilpasset belastningen gjennomgående langs profilen. Dersom dette gjøres kan det ikke brukes standard profiler.
- Profilstørrelsen kan tilpasses det høyeste belastede snittet for den enkelte profil. Dette vil medføre en vektreduksjon, men samtidig også at det må utarbeides og fremstilles flere ulike overgangsutforminger.

### Tverrsnittutforming:

- Tverrsnittutformingen kan optimeres med tanke på belastningsomfanget om forskjellige plan, dette kan gjøres både globalt og per profil.
- Tverrsnittene kan avstives internt enten med avstivere og/eller med fyllmateriale (eksempelvis skum). Dette vil medføre at profilenes bøyemotstand økes, og det vil da kanskje være mulig å redusere profildimensjonen.

### Sammenføyninger:

- Uthuling av overganger vil medføre en vektreduksjon, men samtidig øke fremstillingskompleksiteten.
- Mulighetene for å fremstille overgangene i lite belastede knutepunkter ved støpning kan vurderes.
- En utredning av forskjellige lim kan kanskje avdekke mer gunstige varianter en det som er valgt. Dersom dette er tilfellet vil overlappen mellom overganger og profiler kunne reduseres og dermed også vekten.
- Overlappen mellom overgangene og profilene kan reduseres i mindre belastede knutepunkter.

### Legeringsvalg:

- Legeringsvalget burde revurderes og følgende hensyn burde bli gitt vektlagt høyere:
  - Legerings utbredelse og tilgjengelighet, fortrinnsvis burde legeringen være tilgjengelig i Norge.
  - Tilgjengelighet på ekstruderte profiler i den aktuelle legeringen.
  - Legeringens sveisbarhet.
  - Legerings prosessabilitet.
- Det burde undersøkes om det er mulig å oppnå en vektreduksjon dersom det velges en sveisbar legering, og sveising velges som sammenføyingsmetode.
- Det kan benyttes aluminiumslegeringer med lavere fasthetsparametere i mindre belastede deler av konstruksjonen. Dette kan medføre at materialkostnadene for framstilling av løsningen reduseres, og at det kan benyttes sveising som sammenføyingsmetode, slik at det ikke behøves overganger mellom profilene i knutepunktene. Dette vil da kunne medføre en vektreduksjon og lavere fremstillingskompleksitet.

## 14 KONKLUSJON

Kapittel inneholder en vurdering av prosjektets måloppnåelse, en presentasjon av de oppnådde resultatene med det utarbeidede løsningsforslagets spesifikasjoner, samt anbefalinger og anvisninger for videre arbeid på prosjektet.

### 14.1 Oppnåelse av målsettinger

Gjennom dette prosjektet er det utredet, utviklet og designet et løsningsforslag for en lettvekts chassisløsning for person og varetransportdronekonseptet Dolphin Sky som tilfredsstillende kravspesifikasjonen.

Dette er gjort gjennom å først utføre utredninger av tidligere arbeid utført på Dolphin konseptet og lignende drone løsninger. Deretter er det utarbeidet en prosjektplan og satt begrensninger for oppgaven.

Metodebruken er så redegjort for. Relevant grunnlagsteori og konstruksjonsteknologi for aerodynamer er deretter blitt redegjort for. Det er så blitt utarbeidet en kravspesifikasjon for løsningen. Det ble deretter utarbeidet løsningsalternativer for de forskjellige løsningsvalgene, og det ble benyttet angitt seleksjonsmetodikk for å fatte disse.

Etter at seleksjonsdelen var gjennomført ble det utført grunnlagsberegninger og foretatt tidlig dimensjonering av en forenklet beregningsmodell. Neste utviklingstrinn i prosessen var å utarbeide en 3 dimensjonal modell av løsningen med alle løsningsvalgene implementert. Modellen ble deretter verifisert med en FEM analyse. Produksjonsmetoder for elementløsninger og helhetsløsningen er så redegjort for og det er utført en kostnadsestimering for framstilling av en prototype. Det er også utarbeidet en masterrapport som redegjør for alle trinn i prosessen herunder beregninger, tekniske tegninger og anvisninger. Rapporten danner grunnlaget for det videre arbeid med konseptet.

### 14.2 Resultater og spesifikasjoner

Spesifikasjoner og egenskaper for det utarbeidede løsningsforslaget er følgende:

#### **Bruksbetingelser:**

Løsningen er designet slik at den kan anvendes av personer som er større eller lik en 1 prosentil kvinne og mindre eller lik en 99 prosentil mann. Øvre begrensninger for førerens vekt og høyde er henholdsvis 111,2 Kg og 1920 mm.

#### **Dimensjoner og vekt:**

Sikkerhetsstrukturen og løsningsforslaget for den komplette rammen er begge utført i aluminiumslegering AA-7150-T6151, og har en estimert vekt på henholdsvis 13,8 og 25,8 Kg. Sikkerhetsstrukturen har utvendige mål på 860 mm for henholdsvis lengde og bredde, og er 1360 mm høy, og innvendige mål på 800 mm for henholdsvis lengde og bredde, og er 1300 mm høy. Løsningsforslaget for den komplette rammen er utvendig 2140 mm lang, 860 mm bred og 1360 mm høy.

#### **Fremstillingsprosess og bestanddeler:**

Sikkerhetsstrukturen består av totalt 38 deler:

- 22 stk. ekstruderte profiler av ulike lengder med standardisert hult kvadratisk tverrsnitt
- 16 stk. knutepunktoverganger med to ulike overgangsutforminger (8 stk. per utforming)

Profilene bestilles fra leverandør i standardiserte lengder eller ferdig kuttet til. Profilene kuttet til spesifiserte lengder dersom nødvendig. Overgangene maskineres ut av aluminiumblokker. Profilene og overgangene,



klargjøres med nedpussing og rengjøring av overlappsområder og sammenføres med 2 komponent epoksy limet JB-Weld, eller ekvivalent lim.

## **Fremstillingskostnad:**

Den totale kostnaden for framstilling av en prototype er blitt estimert til 675640 NOK.

## **Sikkerhetsfaktorer og deformasjon:**

Alle elementer og forbindelser er dimensjonert for å tåle belastningen i det høyeste belastede snittet. Laveste sikkerhetsfaktorer i konstruksjonen er 3,9 ; 3,5 ; over 3 ; 33,9 og 8 mot henholdsvis statisk brudd, materialflyt, knekking (metode 1), knekking (ANSYS) og avskjæring i lim forbindelsene. Dimensjoneringen av løsningen er utført med vekten av en 99 prosentil mann innsatt i et sete på 50 kg i konstruksjonen. Belastningstilfellene som er benyttet i dimensjoneringen er ekvivalente med en lastfaktor på henholdsvis +2,26 og -0,69. Maksimal deformasjon i konstruksjonen er 29,4 mm ved maksimal belastning.

## **Øvrig:**

- Det valgte utføringsprinsippet vil med optimalisert aerodynamikk ha en estimert luftmotstandskoeffisient på 0,4.
- Plasseringen til de fire festepunktene for løftemodulen er tiltenkt å være på overgangene på toppen av sikkerhetsstrukturens vertikale elementer. Plasseringen av festepunktene er blitt koordinert med oppgaveinnehaver av løftemoduloppgaven.
- Det er lagt inn bjelker i gulvet til innfesting av fører sete og øvrig interiør.

## 14.3 Videre arbeid

Anbefalinger for videre arbeid med prosjektet er inndelt i forbedring av den utarbeidde løsningen og videreutvikling av konseptet. På grunn av mastergradsarbeidets tids og ressursbegrensninger eksisterer det mange usikkerhetsmomenter og forbedringspotensialer ved det utarbeidede løsningsforslaget, disse vil bli adressert i delkapittel 14.3.1. Det er også mye arbeid som gjenstår før konseptet kan realiseres, dette vil bli adressert i delkapittel 14.3.2.

### 14.3.1 Forbedring av utarbeidet løsning

Det anbefales at følgende videre arbeid utføres:

#### **Verifisering og optimering av limforbindelser:**

- Belastningssituasjonen i forbindelsene bør kartlegges bedre, da både statiske og dynamiske laster, og forbindelsen bør dimensjoneres uten forenklinger og antakelser. Som minimum bør antakelser og forenklinger utført etterses av ekspert, samt at punkt 2 utføres.
- Det bør utarbeides en modell av forbindelsen, og dugeligheten bør testes mot både statiske og dynamiske laster. Testing med dynamiske laster er spesielt viktig, ettersom limets egenskaper under disse ikke er kjent.
- Det bør utføres en grundig utredning for å etablere om det finnes mer gunstige limalternativer.
- Det bør vurderes å fastsette den nødvendige overlapp lengden i limforbindelsene etter den aktuelle belastningen i den individuelle forbindelsen. Her vil det være mulig å gjøre vektbesparelser.

## Materiallegenskaper:

- Det bør innhentes manglende egenskaper for materialer der egenskaper er estimert.
- Det bør innhentes oppdatert prisinformasjon for materialer, da disse estimerte verdier, samt at estimatene sannsynligvis er utdaterte.

## Ferdigstilling av komplett ramme:

- Fremre og bakre chassis elementer bør utvikles. Fortrinnsvis benyttes løsningsforslagene gitt i rapporten som grunnlag. Masterrapporten fra kapittel 4 og utover anbefales å bli brukt som mal for utviklingsprosess.
- Den komplette rammen bør verifiseres, her kan kapittel 8 og 10 benyttes som mal.

## Profil og materialvalg:

- Det bør etableres om ekstruderte profiler av spesifisert legering med spesifisert tverrsnittutforming er mulig å innhente fra leverandør. Prisanslag bør i så fall anskaffes.
- Dersom det ikke er mulig å oppdrive aktuelle profiler, bør legeringsvalget endres. Legering 7075-T6 og 2024-T8 er mulige alternativer. Astrup As leverer ekstruderte profiler i angitte legeringsalternativer, men det er ikke kjent spesifisert tverrsnittutforming finnes i Astrup sitt sortiment. Dersom legeringen skal endres, kan det være hensiktsmessig å se på muligheten for å velge en sveisbar legering. Her kan legering 2014 vurderes (merk at; Legeringens tilgjengelighet ikke er kjent, ei heller hvorvidt det finnes ekstruderte profiler i legeringen). Ellers, dersom en sveisbar legering er ønsket kan legeringer i 6000-serien vurderes, disse er lett tilgjengelige og utvalget av ekstruderte profiler er stort.

## Plattformintegrasjon:

- Det bør utarbeides innfestningspunkter til løftemodul med plassering på angitte steder. Punktene bør ha vibrasjonsdempning.
- Det bør utarbeides innfestningspunkter for sete og øvrig interiør, innfestningspunktene bør være plassert på angitt steder.
- Det burde utarbeides innfestningspunkter for diverse systemer og komponenter som er tiltenkt å skulle benyttes i Dolphin Sky.

## Kartlegging av krefter og dimensjonering:

- Manøvreringsparametere for Dolphin Sky bør fastsettes. Belastningssituasjonen på og i konstruksjonen kartlegges deretter i sin helhet, da både statiske og dynamisk laster. Belastningstilfeller bør utarbeides med færre antakelser og forenklinger enn utført. Som minimum bør antakelser og forenklingene utført etterses av ekspert.
- Det bør utføres en utmattingsvurdering av konstruksjonen, minimum av sikkerhetsstrukturen.

## Produksjon og kostnadsvurderinger:

- Tidsestimater og produksjonsmetoder for framstilling av elementer og sammenstilling av prototype bør vurderes av en ekspert, slik at nøyaktigheten til disse forbedres.

## Strukturoptimering:

Anbefalinger for strukturoptimering omfatter kun tiltak som muliggjør bruk av standard ekstruderte profiler. Øvrige strukturoptimeringsmuligheter er angitt i kapittel 13.2.

- Mulighetene for vekt og materialkostnadsreduksjon ved følgende metoder bør vurderes:
  - Avstiving av tverrsnitt med internt fyllmateriale.
  - Avpassing av profildimensjon etter høyest belastet snitt per profil.
  - Optimering av tverrsnittutforming etter belastningsretning globalt og/eller per profil (eksempelvis rektangulær profilutforming).
  - Uthuling av overganger. For mindre belastede knutepunkter kan også støpning vurderes som framstillingsprosess for overgangene.
  - Vurdere muligheten for og gunstigheten av avstivning av sikkerhetsstrukturen i nedre og øvre del av sideåpningen. Muliggjør kanskje en reduksjon i profildimensjon.
  - Aluminiumslegeringer med lavere fasthetsparametere kan benyttes i mindre belastede deler. Her kan det vurderes å benytte en sveisbar legering (færre overganger må fremstilles).
  - FEM verifiseringer fastslo at det var en vesentlig margin mellom maksimal ekvivalent spenning i profiler og tillatt spenning. Det bør undersøkes om det er mulig å redusere profildimensjonen.
  - Dimensjonerende parameter for profilene var knekking i belastningssituasjon 2. Metode 1 er svært konservativ, og det bør vurderes å benytte en mindre konservativ metode, slik at profil dimensjonen kan reduseres.

### 14.3.2 Videreutvikling av konseptet

For videreutvikling av chassisløsningen anbefales det at følgende arbeid utføres:

#### **Utvikling av en forsterket skallkonstruksjon:**

Utredningen av konstruksjonsteknologi fastslo at forsterkede skallkonstruksjoner har et bedre styrke/vekt og stivhet/vekt forhold under bøyebelastning enn rene rammekonstruksjoner. Det anbefales derfor at det utvikles en forsterket skallkonstruksjon med utgangspunkt i løsningsforslaget fra prosjektet. Under er det gitt noen områder som må kartlegges:

- Utformingen av skallet. Det ble foreslått at løsningsens aerodynamiske egenskaper kunne forbedres ved å benytte bøyde skallplater for å avrunde løsningen. Det bør undersøkes om dette lar seg gjøre. Videre ble det ikke utført CFD-analyse av rammeløsningen, da det ikke var tid til å utarbeide kledning, eller utføre analysen. Det bør foretas CFD-analyse av den forsterket skallkonstruksjonen.
- Innfesting av skallet til rammen.
- Vurdering av skallmateriale ikke utført i prosjektet. Dette bør gjøres dersom løsningen videreutvikles til en forsterket skallkonstruksjon.

#### **Tyngdepunkt plassering:**

- Tyngdepunkt plasseringen til fullt utstyrt og lastet løsningen bør fastsettes. Dette er ikke utført i prosjektet, ettersom førerretets og øvrige komponenters plassering er ukjent. Påvirkningen fra samtlige, samt løftemodul bør vurderes. For at løsningen skal være anvendbar for personer innenfor designkravet må sannsynligvis seteanordningen være justerbar i høyde og lengderetning. Påvirkningen fra dette bør kartlegges.

#### **Plattform integrasjon:**

- Løsningen er utviklet som en drone, og innfesting til en mulig kjøremodul er ikke vurdert. Det bør utarbeides innfestingspunkter til understell/kjøremodul.

**Sertifisering av løsning:**

- Det bør vurderes å designe løsningen etter standardene FAR/CS-27 og EU-Direktiv 93/93/EØF slik at løsningen kan sertifiseres som henholdsvis trehjuls kjøretøy og normal kategori rotorfartøy.

**Øvrige anbefalinger for videre arbeid:**

- Vurdering av sikkerhet ved kollisjon.
- Lyd og støyisolering av konstruksjon.

## 15 Referanser

Alle skriftlige kilder og nettkilder benyttet i rapporten er oppgitt i dette kapittelet.

### 15.1 Skiftelige kilder

- [1] A. Brevik og L. T. Lundheim, «Dolphin: formkonsept for trike,» REALTEK, NMBU, 2008.
- [2] K. Roca, «Dolphin Family, Del A: Utvikling av eksteriørdesign for lettvektskjøretøy,» REALTEK, NMBU, 2011.
- [3] L. Østby, «Dolphin Family, Del A: utvikling av eksteriørløsning for 3 hjuls kjøretøy,» REALTEK, NMBU, 2010.
- [4] M. Ottesen, «Dolphin Family, Del B: utvikling av interiørløsning for 3 hjuls kjøretøy,» REALTEK, NMBU, 2010.
- [5] J.-F. Aasheim, «Dolphin Family, Del C: Utvikling av ramme og hjuloppheng 3 hjuls kjøretøy,» REALTEK, NMBU, 2011.
- [6] C. F. Leandersson, «Dolphin Family, Del D: Konseptualisering og design av overchassis for trehjuls lettvektskjøretøy,» REALTEK, NMBU, 2012.
- [7] M. A. Rashid, «Dolphin Duo 1+1: Utvikling av interiørdesign for lettvektskjøretøy,» REALTEK, NMBU, 2012.
- [8] J. H. Hanssen, «Dolphin Duo 1+1: Utvikling av hjuloppheng for lettvektskjøretøy,» REALTEK, NMBU, 2014.
- [9] T. Skaar-Olsen, «Utvikling av eksteriørdesign og førerergonomiske løsninger for Dolphin Expression 2.0,» REALTEK, NMBU, 2015.
- [10] K. Ø. Rummelhoff, «Dolphin Sky, Del A: Utvikling av integrert design- og helhetskonsept for sveveløsning,» REALTEK, NMBU, 2016.
- [11] K. E. Røsandnes, «Dolphin Sky, Del B: Utredning av systemkonsept, sikkerhet, produksjon, markedsnisjer og økonomi,» REALTEK, NMBU, 2016.
- [12] A. C. Thømt, «Utredning, dimensjonering og utvikling av testoppsett for thrusterfunksjon til persondrone,» REALTEK, NMBU, 2017.
- [13] T. El-Gewely, «Dolphin Sky: Utredning og utvikling av sammenfoldbart propell- og thrustersystem,» NMBU/REALTEK, NMBU, 2018.
- [14] I. S. Birkelund, «Utforming av førerkupe og førerplass for dolphinkonseptet,» REALTEK/NMBU, NMBU, 2018.
- [15] A. M. Thue og P. Sundquist, «Utvikling, dimensjonering og Konstruksjon av multifuel gassturbinmotor (multifuel turbinmotorkonsept),» REALTEK, NMBU, 2012.
- [16] S. E. Finnøy, «Waste heat recovery system for the dolphin concept car,» REALTEK, NMBU, 2014.

- [17] V. G. Henriksen, «Utvikling, dimensjonering og konstruksjon av dampturbinløsning for Dolphin-Konseptet,» REALTEK, NMBU, 2016.
- [25] E. B. Magrab, Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process, Second Edition (Environmental & Energy Engineering), 2 red., CRC Press, 2009, p. 304.
- [26] S. Pugh, Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering, Addison-Wesley, 1991, p. 296.
- [27] B. Eberle, Scamper: Creative Games and Activities for Imagination Development, Prufrock Press, Inc., 2008, p. 96.
- [28] M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, 3 red., Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2005, p. 599.
- [31] M. F. Ashby, Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice, Elsevier Inc., 2009, p. 375.
- [33] J. Johannessen, Tekniske Tabeller, 2 red., Cappelen, 2002, p. 158.
- [34] G. Terjesen, Globale knekkeberegninger uten standard, NMBU: NMBU/REALTEK, 2017, p. 26.
- [35] J. John D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, 3 red., McGraw-Hill, 2001, p. 892.
- [39] H. Dreyfuss, The Measure of Man: Human Factors in Design, 2 red., Whitney Library of Design, 1967, p. 54.
- [40] J. Cutler og J. Liber, Understanding Aircraft Structures, Wiley-Blackwell, 2006, p. 224.
- [47] P. Rambabu, N. E. Prasad, V. Kutumbarao og R. Wanhill, «Aluminium Alloys for Aerospace,» i Aerospace Materials and Material Technologies, Springer, 2017, p. 25.

## 15.2 Nettkilder

- [18] Ehang, «Ehang 184, spesifikasjoner,» [Internett]. Available: [www.ehang.com](http://www.ehang.com). [Funnet Januar 2018].
- [19] Dronerush, «Taxidrone, Dubai,» [Internett]. Available: [www.dronerush.com](http://www.dronerush.com). [Funnet Januar 2018].
- [20] Workhorse, «SureFly, spesifikasjoner,» [Internett]. Available: [www.workhorse.com](http://www.workhorse.com). [Funnet Januar 2018].
- [21] Workhorse, «Newsroom, godkjenning for testflyvining,» [Internett]. Available: [www.workhorse.com](http://www.workhorse.com). [Funnet Januar 2018].
- [22] Airbus, «Pop.Up,» [Internett]. Available: [www.airbus-xo.com](http://www.airbus-xo.com).
- [23] AeroMobil, «AeroMobil v4.0,» [Internett]. Available: [www.aeromobil.com](http://www.aeromobil.com). [Funnet Januar 2018].
- [24] NASA, «Airplane Rotations,» [Internett]. Available: [www.grc.nasa.gov](http://www.grc.nasa.gov). [Funnet Januar 2018].
- [29] Wikipedia, «Material Selection,» [Internett]. Available: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). [Funnet Januar 2018].

- [30] Granta, «CES EduPack,» [Internett]. Available: [www.grantadesign.com/](http://www.grantadesign.com/). [Funnet Januar 2018].
- [32] WolframAlpha, [Internett]. Available: [www.wolframalpha.com](http://www.wolframalpha.com). [Funnet April 2018].
- [36] Wikipedia, «Drag,» [Internett]. Available: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). [Funnet Februar 2018].
- [37] Wikipedia, «Reynolds Number,» [Internett]. Available: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). [Funnet Februar 2018].
- [38] Wikipedia, «Drag Coefficient,» [Internett]. Available: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). [Funnet Februar 2018].
- [41] FAA, «Airframe Handbook,» [Internett]. Available: [www.faa.gov](http://www.faa.gov). [Funnet Februar 2018].
- [42] Okigihan, «Fixed Wing Aircraft Fuselage,» [Internett]. Available: [www.okigihan.blogspot.no](http://www.okigihan.blogspot.no). [Funnet Februar 2018].
- [43] Stressebook, «Solid metal versus sandwich panels,» [Internett]. Available: [www.stressebook.com](http://www.stressebook.com). [Funnet Februar 2018].
- [44] Admatis, «Material Science,» [Internett]. Available: [www.admatis.com](http://www.admatis.com). [Funnet Februar 2018].
- [45] NASA, «Sikkerhetsfaktor for utestede skrogkonstruksjoner,» [Internett]. Available: [www.ntrs.nasa.gov](http://www.ntrs.nasa.gov). [Funnet Februar 2018].
- [46] Wikipedia, «Airframe,» [Internett]. Available: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). [Funnet Februar 2018].
- [48] e-CFR, «PART 27 - AIRWORTHINESS STANDARDS: NORMAL CATEGORY ROTORCRAFT,» [Internett]. Available: [www.ecfr.gov](http://www.ecfr.gov). [Funnet Mars 2018].
- [49] EASA, «CS-27,» [Internett]. Available: [www.easa.europa.eu](http://www.easa.europa.eu). [Funnet Februar 2018].
- [50] ROYMECH, «SHS profil,» [Internett]. Available: [www.roymech.co.uk](http://www.roymech.co.uk). [Funnet April 2018].
- [51] IPME, «Friction Stir Welding,» [Internett]. Available: [www.ipme.ru/e-journals/RAMS](http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS). [Funnet April 2018].
- [52] Google, «Utdrag fra boken: Structural Connections for Lightweight Metallic Structures av Pedro M.G.P. Moreira, Lucas F. M. da Silva, Paulo M.S.T. de Castro, side 53-56,» [Internett]. Available: [books.google.no/books](http://books.google.no/books). [Funnet April 2018].
- [53] H. Johansen, «Materialteknologi, Sammenføyning,» [Internett]. Available: [www.ansatt.hig.no](http://www.ansatt.hig.no). [Funnet April 2018].
- [54] JB Weld, «Technical Data Sheets,» [Internett]. Available: [www.jb-weld.co.uk](http://www.jb-weld.co.uk). [Funnet Mai 2018].
- [55] Ebay, «SHS, 262765590236,» [Internett]. Available: [www.ebay.co.uk](http://www.ebay.co.uk). [Funnet Mai 2018].
- [56] Amazon, «J-B-Weld, 82655,» [Internett]. Available: [www.amazon.com](http://www.amazon.com). [Funnet Mai 2018].

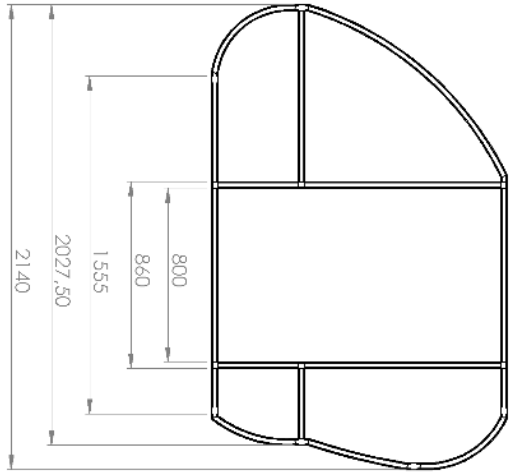
## 16 VEDLEGG

### INNHALDSFORTEGNELSE VEDLEGG

SAMMENSTILLINGSTEGNING LØSNINGSFORSLAG TIL KOMPLETT RAMME .....	Side:	A
SAMMENSTILLINGSTEGNING SIKKERHETSSTRUKTUR .....	Side:	B
EKSPLOSJONSTEGNING SIKKERHETSSTRUKTUR .....	Side:	C
KONSTRUKSJONTEGNING 4 VEI OVERGANG .....	Side:	D
KONSTRUKSJONTEGNING 3 VEI OVERGANG .....	Side:	E
DATABLAD AA-7150-T6151 .....	Side:	F - J
PRODUKTDATABLAD AA-7068 .....	Side:	K - L
UTDRAG FRA STANDARDPROFIL KATALOG HYDRO .....	Side:	M
PRODUKTDATABLAD JB-WELD .....	Side:	N - O
DATABLAD EPOXY LIM .....	Side:	P - R
FORMLER FOR STATISK UBESTEMTE RAMMER .....	Side:	S



# SAMMENSTILLINGSTEGNING LØSNINGSFORSLAG TIL KOMPLETT RAMME



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	4 vei overgang	AA-71 50-16151	8
2	3 vei overgang	AA-71 50-16151	8
3	Profil 370mm	AA-71 50-16151	4
4	Profil 135mm	AA-71 50-16151	4
5	Profil 470mm	AA-71 50-16151	2
6	Profil 800mm	AA-71 50-16151	8
7	Profil 900 mm	AA-71 50-16151	4
8	foran sammenstilling		1
9	bak sammenstilling		1

Date:	23.04.18	Kontrollert av:	L.A.M.M	Produkt:		Målestokk:	1:20	<b>NMBU</b> Forberedt av: Forberedt av:
-------	----------	-----------------	---------	----------	--	------------	------	---

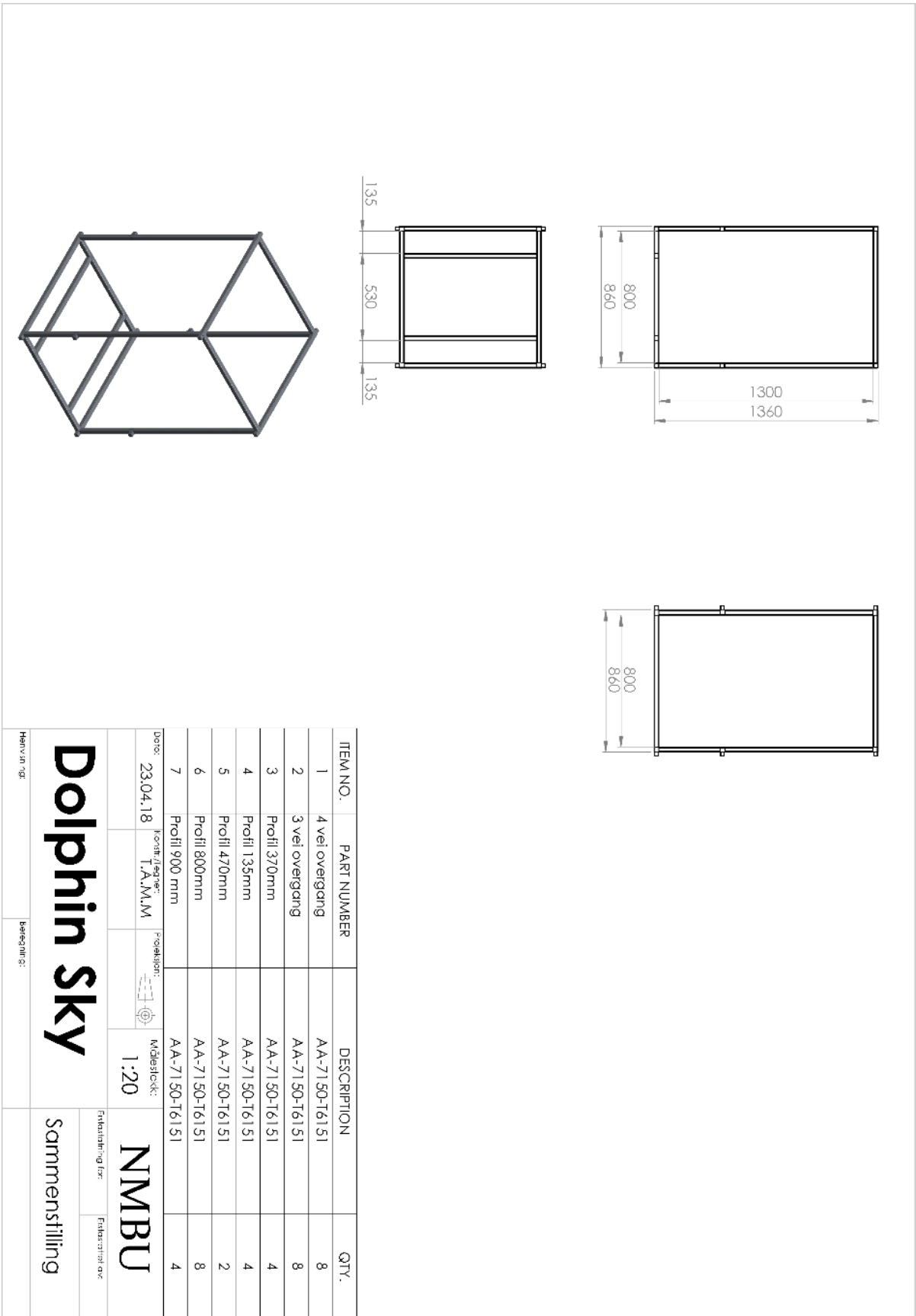
# Dolphin Sky

Sammenstilling

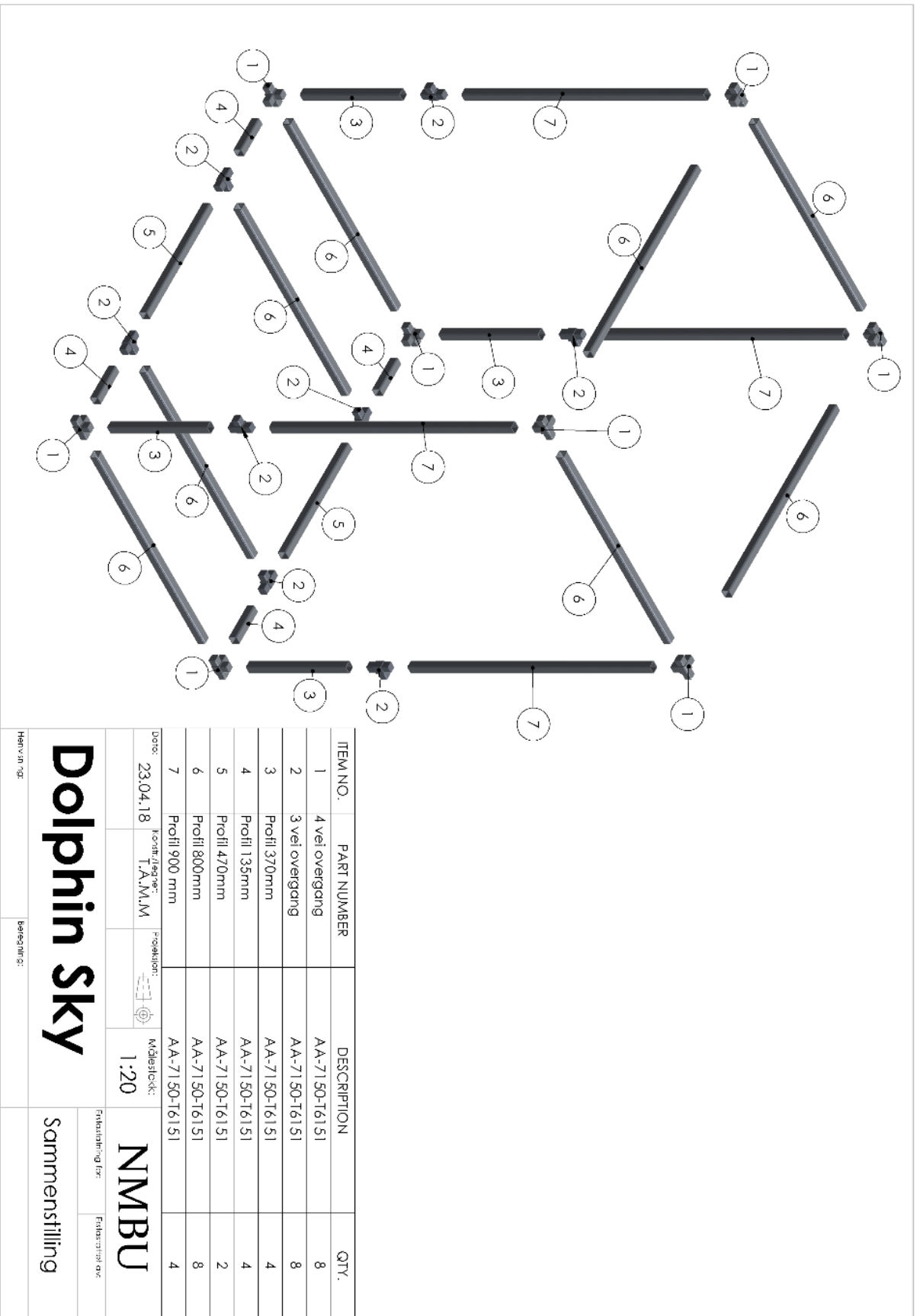
Hver in '00:

Beregnet:


# SAMMENSTILLINGSTEGNING SIKKERHETSSTRUKTUR



# EKSPLOSJONSTEGNING SIKKERHETSSTRUKTUR



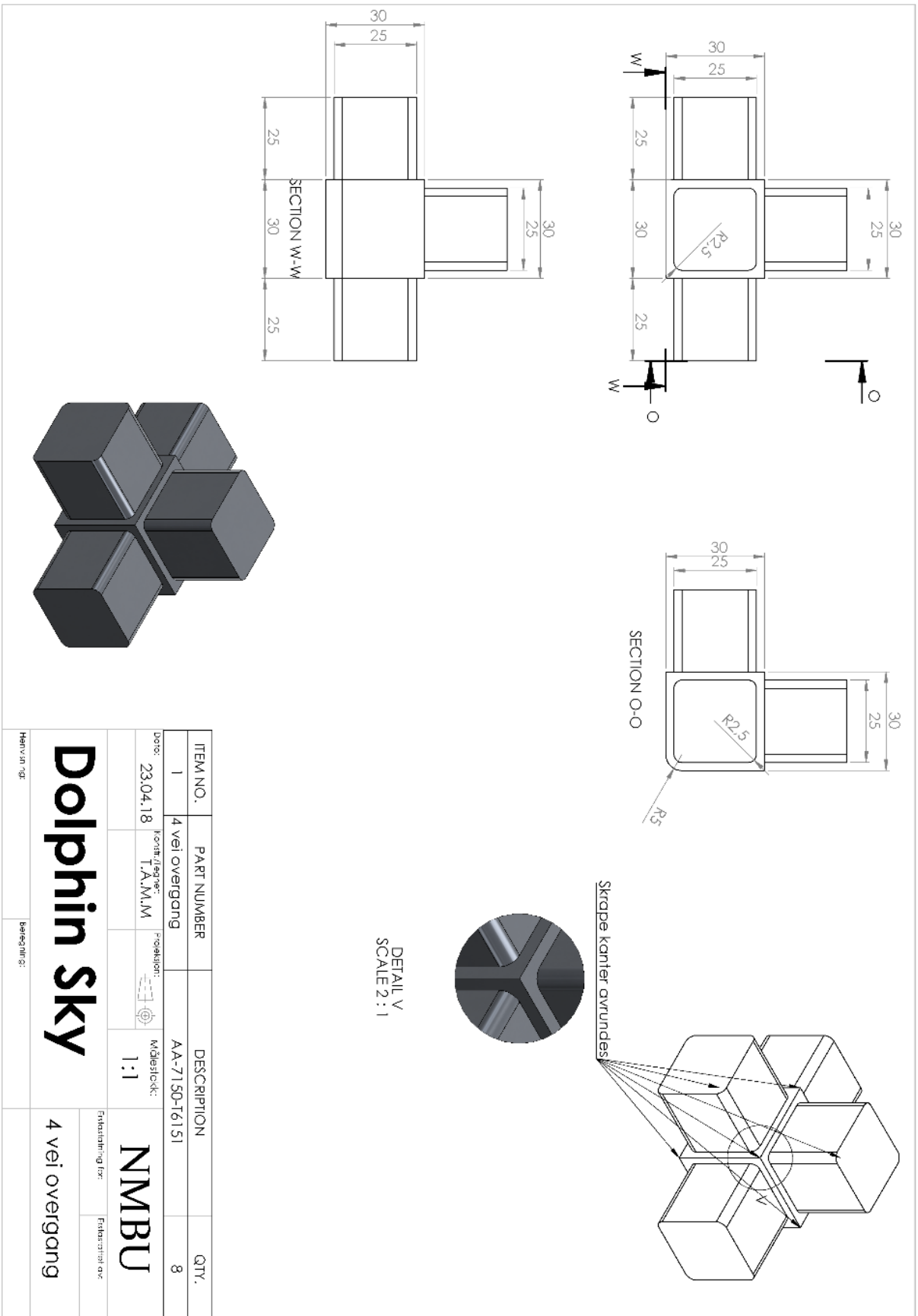
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	4 vei overgang	AA-71 50-161 51	8
2	3 vei overgang	AA-71 50-161 51	8
3	Profil 370mm	AA-71 50-161 51	4
4	Profil 135mm	AA-71 50-161 51	4
5	Profil 470mm	AA-71 50-161 51	2
6	Profil 800mm	AA-71 50-161 51	8
7	Profil 900 mm	AA-71 50-161 51	4

Dato: 23.04.18  
 Forfatter/tegner: T.A.M.M  
 Prosjekt:   
 Målestokk: 1:20

<h1>Dolphin Sky</h1>	Planlagt/ing fse:	<h1>NMBU</h1>
	Sammenstilling	

Hent ut fra:      Beskrivelse:

# KONSTRUKSJONTEGNING 4 VEI OVERGANG



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	4 vei overgang	AA-7150-16151	8

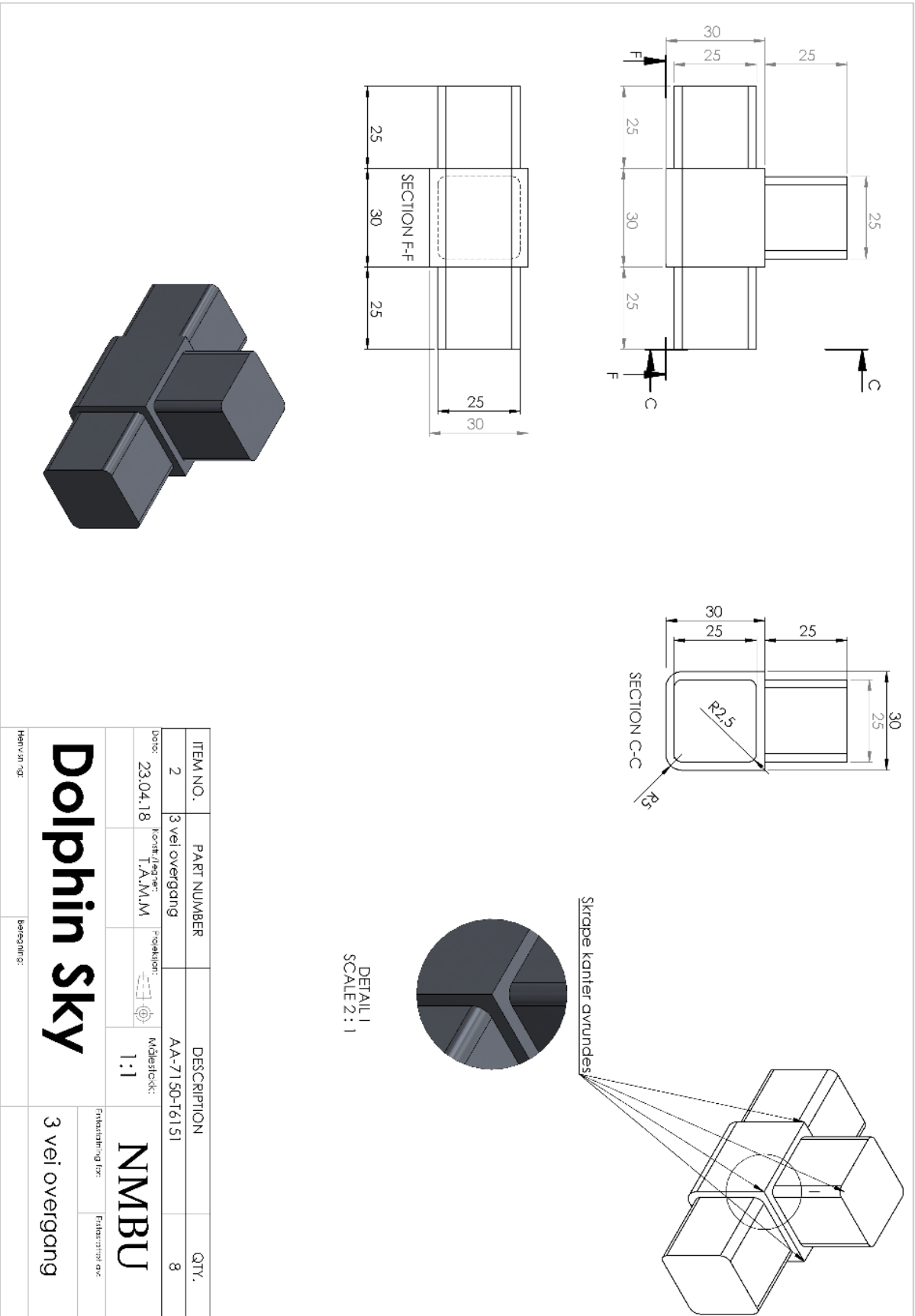
  

Date: 23.04.18	kontrolleret: T.A.M.M	Produkt:	Målestokk: 1:1
Følgende for: NMBU			Følgende av:

Herunder er:	besørges:	<b>Dolphin Sky</b>	4 vei overgang
--------------	-----------	--------------------	----------------

# KONSTRUKSJONTEGNING 3 VEI OVERGANG



Item NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
2	3 vei overgang	AA-7150-161 S1	8
Dato: 23.04.18    Forfatter/tegner: T.A.M.M    Prosjekt:     Målestokk: 1:1			
Havn: <b>Dolphin Sky</b>		Prosjektleder: <b>NMBU</b>	
Beskrivelse: 3 vei overgang		Prosjektleder: <b>NMBU</b>	

## DATABLAD AA-7150-T6151

### General information

#### Designation (i)

7150, wrought

Condition	(i)	T6151 (Solution heat-treated and artificially aged)
UNS number	(i)	A97075
EN name	(i)	EN AW-7150 (EN AW-Al Zn6CuMgZr)

#### Typical uses (i)

General engineering; aerospace engineering - airframes etc; containers and packaging.

### Composition overview

#### Compositional summary (i)

Al87-90 / Zn5.9-6.9 / Mg2-2.7 / Cu1.9-2.5 / Zr0.08-0.15 (impurities: Fe<0.15, Si<0.12, Mn<0.1, Ti<0.06, Cr<0.04, Other<0.15)

Material family	(i)	Metal (non-ferrous)
Base material	(i)	Al (Aluminum)

#### Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al (aluminum)	(i)	* 87,1	-	90,1	%
Cr (chromium)	(i)	0	-	0,04	%
Cu (copper)	(i)	1,9	-	2,5	%
Fe (iron)	(i)	0	-	0,15	%
Mg (magnesium)	(i)	2	-	2,7	%
Mn (manganese)	(i)	0	-	0,1	%
Si (silicon)	(i)	0	-	0,12	%
Ti (titanium)	(i)	0	-	0,06	%
Zn (zinc)	(i)	5,9	-	6,9	%
Zr (zirconium)	(i)	0,08	-	0,15	%
Other	(i)	0	-	0,15	%

### Price

Price	(i)	* 32,6	-	34,7	NOK/kg
Price per unit volume	(i)	* 9,13e4	-	9,81e4	NOK/m <sup>3</sup>

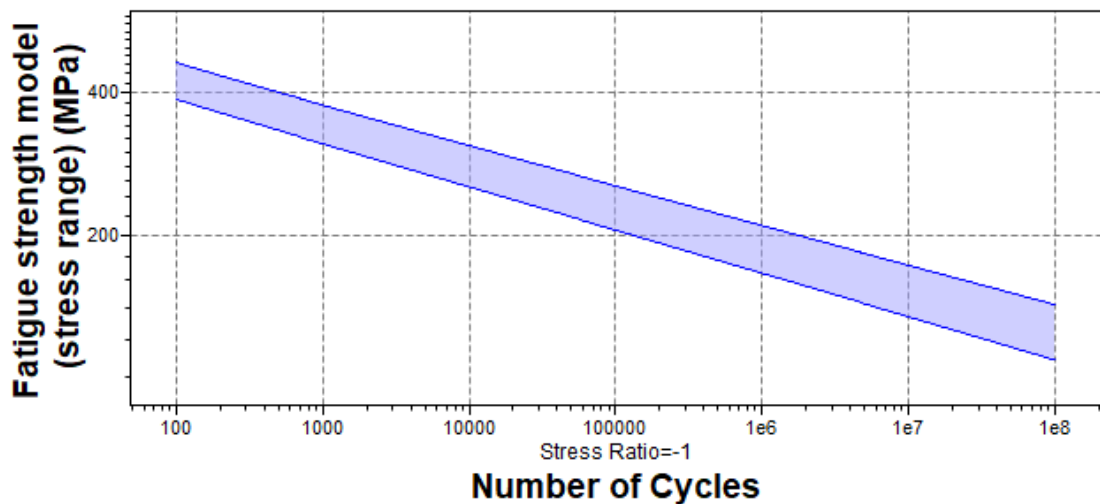
### Physical properties

Density	(i)	2,81e3	-	2,84e3	kg/m <sup>3</sup>
---------	-----	--------	---	--------	-------------------

## Mechanical properties

Young's modulus	(i)	70	-	73,6	GPa
Yield strength (elastic limit)	(i)	524	-	579	MPa
Tensile strength	(i)	579	-	640	MPa
Elongation	(i)	9	-	10,5	% strain
Compressive strength	(i)	* 517	-	572	MPa
Flexural modulus	(i)	* 70	-	73,6	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	524	-	579	MPa
Shear modulus	(i)	27	-	28,4	GPa
Bulk modulus	(i)	69	-	72,5	GPa
Poisson's ratio	(i)	0,33	-	0,343	
Shape factor	(i)	13			
Hardness - Vickers	(i)	* 100	-	160	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	(i)	* 140	-	165	MPa
Fatigue strength model (stress range)	(i)	* 232	-	286	MPa

[Parameters:](#) Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 2,5e4cycles



Mechanical loss coefficient (tan delta)	(i)	* 1e-4	-	0,002	
---	-----	--------	---	-------	--

## Impact & fracture properties

Fracture toughness	(i)	* 25	-	45	MPa.m <sup>0.5</sup>
--------------------	-----	------	---	----	----------------------

### Thermal properties

Melting point	(i)	* 480	- 630	°C
Maximum service temperature	(i)	80	- 100	°C
Minimum service temperature	(i)	-273		°C
Thermal conductivity	(i)	150	- 163	W/m.°C
Specific heat capacity	(i)	960	- 999	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	(i)	23,5	- 24,7	µstrain/°C
Latent heat of fusion	(i)	384	- 393	kJ/kg

### Electrical properties

Electrical resistivity	(i)	* 4,8	- 5,2	µhm.cm
Galvanic potential	(i)	* -0,78	- -0,7	V

### Magnetic properties

Magnetic type	(i)	Non-magnetic
---------------	-----	--------------

### Optical properties

Transparency	(i)	Opaque
--------------	-----	--------

### Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	(i)	No
-----------------------------------	-----	----

### Processing properties

Metal casting	(i)	Unsuitable
Metal cold forming	(i)	Limited use
Metal hot forming	(i)	Limited use
Metal press forming	(i)	Acceptable
Metal deep drawing	(i)	Limited use
Machining speed	(i)	70,1 m/min
Weldability	(i)	Poor
Notes		Preheating is not required, post weld heat treatment is required



## Durability

Water (fresh)	ⓘ	Excellent
Water (salt)	ⓘ	Acceptable
Weak acids	ⓘ	Excellent
Strong acids	ⓘ	Excellent
Weak alkalis	ⓘ	Acceptable
Strong alkalis	ⓘ	Unacceptable
Organic solvents	ⓘ	Excellent
Oxidation at 500C	ⓘ	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	ⓘ	Excellent
Galling resistance (adhesive wear)	ⓘ	Limited use

### Notes

Aluminum alloys perform poorly when self-mated but can be processed without galling when mated with steels.

Flammability	ⓘ	Non-flammable
--------------	---	---------------

## Corrosion resistance of metals

Stress corrosion cracking	ⓘ	Highly susceptible
---------------------------	---	--------------------

Note  
Rated in chloride; Other susceptible environments: Halide, water

## Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	ⓘ	* 182	- 201	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	ⓘ	* 12,4	- 13,7	kg/kg
Water usage	ⓘ	* 1,07e3	- 1,18e3	l/kg

## Processing energy, CO2 footprint & water

Rough rolling, forging energy	ⓘ	* 12,5	- 13,8	MJ/kg
Rough rolling, forging CO2	ⓘ	* 0,936	- 1,03	kg/kg
Rough rolling, forging water	ⓘ	* 6,88	- 10,3	l/kg
Extrusion, foil rolling energy	ⓘ	* 24,7	- 27,3	MJ/kg
Extrusion, foil rolling CO2	ⓘ	* 1,85	- 2,04	kg/kg
Extrusion, foil rolling water	ⓘ	* 12,1	- 18,1	l/kg
Wire drawing energy	ⓘ	* 91,7	- 101	MJ/kg
Wire drawing CO2	ⓘ	* 6,88	- 7,6	kg/kg
Wire drawing water	ⓘ	* 34,6	- 51,9	l/kg
Metal powder forming energy	ⓘ	* 21,2	- 23,4	MJ/kg
Metal powder forming CO2	ⓘ	* 1,69	- 1,87	kg/kg
Metal powder forming water	ⓘ	* 23,1	- 34,6	l/kg
Vaporization energy	ⓘ	* 1,55e4	- 1,71e4	MJ/kg
Vaporization CO2	ⓘ	* 1,16e3	- 1,28e3	kg/kg
Vaporization water	ⓘ	* 6,46e3	- 9,69e3	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	ⓘ	* 2,3	- 2,55	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	ⓘ	* 0,173	- 0,191	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	ⓘ	* 18,8	- 20,7	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	ⓘ	* 1,41	- 1,56	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	ⓘ	* 37,1	- 41	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	ⓘ	* 2,78	- 3,07	kg/kg
Non-conventional machining energy (per unit wt removed)	ⓘ	* 155	- 171	MJ/kg
Non-conventional machining CO2 (per unit wt removed)	ⓘ	* 11,6	- 12,8	kg/kg

## Recycling and end of life

Recycle	ⓘ	✓		
Embodied energy, recycling	ⓘ	* 31,3	- 34,6	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	ⓘ	* 2,46	- 2,72	kg/kg
Recycle fraction in current supply	ⓘ	40,5	- 44,7	%
Downcycle	ⓘ	✓		
Combust for energy recovery	ⓘ	✗		
Landfill	ⓘ	✓		
Biodegrade	ⓘ	✗		

## Notes

### Standards with similar compositions ⓘ

- Europe:  
EN AW-7150 to CEN EN 573-3
- USA:  
7150, UNS A97150

## 7068 Aluminium Alloy

### Technical Datasheet



An Aluminium Alloy with the Strength of Steel

Service. Quality. Value.

#### Typical Applications

Connecting rods, Autosport gearbox actuators, Automobile shock absorbers, Fuel pumps for racing engines, Rocker arms for racing engines, Motorcycle gears, Racing motorcycle chain tensioners, Bearing caps in high performance engines, Autosport wheel components, Prosthetic limbs, Ordnance, 25mm Sabot, Load cells, Hydraulic valve components, High pressure solenoid, Mountain climbing equipment, Tent, ski and backpack rods Survival rifles, Flexible shaft coupling, Snowmobile engine shaft, Quick disconnects for fluid conveying devices.

#### Product Description

7068 alloy provides the highest mechanical strength of all aluminium alloys and matching that of certain steels. This outstanding alloy combines a yield strength of up to 700 MPa (up to over 30% greater than that of 7075 alloy) and good ductility with corrosion resistance similar to 7075 and other features beneficial to high performance component/equipment designers. Developed in the mid 1990's, 7068 alloy was designed as a higher strength alternative to 7075 for ordnance applications. The highly attractive overall combination of mechanical properties (retained at elevated temperatures better than 7075) and other important characteristics of 7068 have resulted in the widespread specification of the alloy to markedly reduce the weight/cross section or significantly increase the strength of critical components in diverse market sectors.

#### Technical Description

7068 alloy is a 7000 series aluminium-zinc alloy registered with the US Aluminium Association and produced to AMS 4331 (chemical composition and mechanical properties) and AMS 2772 (heat treatment). 7068 alloy 'A' and 'B' tensile data and fatigue properties have been ratified for inclusion in MIL Handbook 5 / MMPDS. The standard supply temper condition is T6511. For applications requiring greater resistance to stress corrosion cracking the T76511 condition is available to order.

#### Weldability

In common with other 7000 series aluminium alloys, 7068 alloy can only be welded with great care. This form of joining is not usually employed. If welding is contemplated please consult our Technical Sales Dept.

#### Product Attributes

Very high tensile, high compressive, bearing & shear strength

Good retention of strength at elevated temperature

Good fatigue strength

Corrosion resistance similar to 7075

High thermal conductivity

Good machinability

Dimensional stability

Good anodising response

Low tendency to peripheral coarse grain (PCG)

#### Customer Benefits

Ability to reduce weight /increase strength of aluminium alloy components or substitute steel or titanium alloy

Alloy can be successfully employed up to 200°C

Suitable for cyclic loading, eg: IC engines

7068 can replace 7075 with far greater strength

Good heat dissipation

Reduced machining time

Complex, close tolerance machining possible

Good engineering surfaces can be produced

Good cosmetic anodised finish possible

#### Anodising

7068 alloy responds well to all the different standard anodising techniques. It is generally similar in behaviour to 7075 but in hard anodising 7068 alloy tends to form a more abrasion resistant surface.

#### Machinability

The machinability of 7068 alloy is good and is similar to that of 7075.

#### Corrosion Resistance

The corrosion resistance of 7068 alloy is similar to that of 7075.

**General Resistance**  
T6511 & T76511 Rated C based on relative rating A to E in decreasing order of merit after exposure to sodium chloride solution by intermittent spraying or immersion.

**Stress Corrosion Cracking**  
T6511 Rated C  
T76511 Rated B  
Relative rating A to D based on service experience and laboratory tests of specimens exposed to 3.5% sodium chloride alternate immersion test.

# 7068 Aluminium Alloy



An Aluminium Alloy with the Strength of Steel

Service. Quality. Value.

## Chemical Composition (weight %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Others (ea)	Others (total)
Min.			1.6		2.2		7.3		0.05		
Max	0.12	0.15	2.4	0.10	3.0	0.05	8.3	0.10	0.15	0.05	0.15

## Minimum Mechanical Properties (Extruded Bar)

Temper	Section (in)	UTS (MPa)	YTS (MPa)	Elongation (%)
T6 / T6511	0.250 - 3.000	683	655	5
T6 / T6511	3.001 - 6.500	648	621	5
T76 / T76511	0.250 - 3.000	593	552	7

## Typical Mechanical Properties

Extruded Bar T6511	UTS (MPa)	YTS (MPa)	Elongation (%)	Brinell Hardness
L Direction	710	683	9	190
LT Direction	645	603	7	-
Forging T6				
L Direction	628	524	10	160

## Typical Physical Properties

Density at 20°C		2.85 kg/dm <sup>3</sup>
Melting Range		476 - 635°C
Specific Thermal Capacity at 100°C		1050 J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Mean Coefficient of Thermal Expansion ( 20 - 100°C )		23.4 10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup>
Thermal Conductivity at 20°C		190 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Electrical Conductivity at 20°C	T6511	31 % IACS
	T76511	39 % IACS
Young's Modulus		73.1 GPa

## Comparative Minimum Data for Various Aluminium Alloy Extrusions

	7068 T6511	7150 T6511	7075 T6511	2014A T6511	2618A T6
	0.25" - 3.00"	0.80" - 2.40"	0.50" - 3.00"	1.00" - 3.00"	0.40" - 4.00"
UTS (MPa)	683	615	559	480	420
YTS (MPa)	655	580	496	440	340
Elongation (%)	5	8	7	7	7

## Technical Assistance

Our knowledgeable staff backed up by our resident team of qualified metallurgists and engineers, will be pleased to assist further on any technical topic.

[www.smithmetal.com](http://www.smithmetal.com)

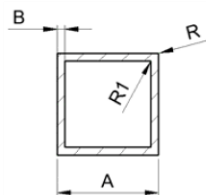
[sales@smithmetal.com](mailto:sales@smithmetal.com)

Biggleswade 01767 604 604	Birmingham 01889 576 117	Bristol 0117 971 2800	Chelmsford 01245 466 664	Gateshead 0191 469 5428	Horsham 01403 261 981	Leeds 0113 307 5167
London 020 7241 2430	Manchester 0161 794 8650	Nottingham 0115 925 4801	Norwich 01603 789 878	Redruth 01209 315 512	Verwood 01202 824 347	General 0845 527 3331



All information in our data sheet is based on approximate testing and is stated to the best of our knowledge and belief. It is presented apart from contractual obligations and does not constitute any guarantee of properties or of processing or application possibilities in individual cases. Our warranties and liabilities are stated exclusively in our terms of trading. © Smiths Metal Centres 2017

# UTDRAG FRA STANDARDPROFIL KATALOG HYDRO



las medidas generales, si no recibimos ninguna información adicional, el suministro se hará de acuerdo a las dimensiones mostradas en el catálogo y no se aceptarán reclamaciones.

[Volver al Índice](#)

DIMENSIONES (mm)										REFERENCIA	PLANTA DE EXTRUSIÓN					PESO (kg/m)	PERÍMETRO (mm)			TOL.	OBSERVACIONES
A	B	C	D	E	R	R1	R2	R3	NAV		LS **	AV *	PNT	LR	EXT.		INT.	TOTAL			
15,0	1,50				0,60	0,60				2050469	SI				0,220	60	48	108			
	1,00				0,25	0,25				Q.25			SI		0,162	63	55	118	C/TOL		
	1,05				0,30	0,30				TC43034			SI		0,170	64	56	120			
16,0	1,25				0,60	0,60				2038963	SI				0,199	63	53	116			
	1,30				0,30	0,30				E551620	SI				0,206	64	54	118			
	1,50				0,30	0,50				E551575	SI				0,235	64	52	116			
	1,50				0,30	0,50				Q.44			SI		0,235	64	51	115			
	1,50				0,30	0,30				TC43035			SI		0,235	64	52	116			
19,0	1,50				0,30	0,30				Q.01			SI		0,284	76	63	139			
19,1	1,63				0,50	0,50				TC43089			SI		0,307	77	64	141			
	1,05				0,30	0,30				TC43001			SI		0,215	80	72	152			
	1,30				0,30	0,30				E551598	SI				0,263	80	70	150			
20,0	1,30				0,30	0,30				Q.29			SI		0,263	80	69	149			
	1,30				0,60	0,60				2053512	SI				0,264	79	69	148			
	1,30				0,30	0,30				TC43002			SI	SI	0,263	80	70	150			
	1,50				0,30	0,30				Q.18			SI		0,300	80	67	147			
	1,50				0,30	0,50				E555056	SI				0,300	80	68	148	C/TOL		
	1,50				2,50	1,00				Q.55			SI		0,288	76	66	142			
	1,50				0,30	0,30				TC43003			SI	SI	0,300	80	68	148			
	2,00				0,30	0,30				E-500489			SI		0,389	80	64	144	C/TOL		
	2,00				0,30	0,30				Q.02			SI		0,389	80	63	143			
	2,00				0,30	0,50				E555054	SI				0,389	80	64	144	C/TOL		
	2,00				0,60	0,80				2050122	SI				0,391	79	63	142			
	22,0	2,00				0,30	0,30				TC43005			SI		0,389	80	64	144		
2,50					0,30	0,30				TC43008			SI		0,473	80	60	140			
3,00					0,25	0,25				Q.40			SI		0,551	80	55	135			
2,00					0,30	0,30				E555876	SI				0,432	88	72	160			
1,05					0,30	0,30				TC43036			SI		0,272	100	92	192			
1,30					0,30	0,30				E551628	SI				0,333	100	90	190			
1,50					0,30	0,30				E-505490			SI		0,381	100	80	180			
1,50					0,30	0,50				E555553	SI				0,381	100	80	180			
1,50					0,60	0,60				E-350039			SI		0,381	99	87	186			
1,50					0,60	0,60				Q.22			SI		0,381	100	87	187			
25,0	1,50				0,30	0,30				TC43007			SI	SI	0,381	100	88	188			
	1,80				0,25	0,25				Q.03			SI		0,451	100	85	185			
	2,00				0,30	0,30				E-500218			SI		0,497	100	84	184	C/TOL		
	2,00				0,30	0,50				E555055	SI				0,497	100	84	184	C/TOL		
	2,00				0,30	0,50				Q.43			SI		0,497	100	83	183			
	2,00				0,60	0,60				2050121	SI				0,499	99	83	182			
	2,00				2,00	1,00				E555695	SI				0,489	97	82	179			
	2,00				0,30	0,30				TC43033			SI		0,497	100	84	184			
	3,00				3,00	0,30				E-502837			SI	SI	0,691	95	76	171	C/TOL		
	25,4	3,25				0,50	0,50			TC43088			SI		0,778	102	76	178			
26,0	2,00				1,00	0,50			E557855	SI				0,602	118	103	221				
28,0	1,20				4,00	3,50				CB-79-10			SI		0,351	107	95	202	C/TOL	ondas hacia el exterior	
	1,30				4,00	2,70				CB-79-03			SI		0,363	110	95	205	C/TOL	ondas hacia el exterior	
30,0	1,10				0,30	0,30				TC43009			SI		0,344	120	112	232			
	1,30				0,30	0,30				E551626	SI				0,403	120	110	230			
	1,30				0,30	0,30				Q.24			SI		0,403	120	109	229			
	1,30				0,60	0,60				2053871	SI				0,404	120	109	229			
	1,30				0,30	0,30				TC43010			SI		0,403	120	110	230			
	1,50				0,30	0,30				E551440	SI				0,462	120	108	228			
	1,50				0,30	0,30				TC43061			SI	SI	0,462	120	108	228			
	1,80				0,60	0,60				Q.19			SI		0,548	120	105	225			
	2,00				0,30	0,30				E-500127			SI		0,605	120	104	224	C/TOL		
	2,00				0,30	0,30				E-507230			SI		0,605	120	104	224			
	2,00				0,30	0,30				Q.45			SI		0,605	120	103	223			
	2,00				0,30	0,50				E555171	SI				0,605	120	104	224			
	2,00				0,60	0,60				E-350040			SI		0,605	119	103	222			
	2,00				0,30	0,30				TC43013			SI		0,605	120	104	224			
	2,00				0,30	0,30				E-17119			SI		0,604	119	105	224	C/TOL		
	2,20				0,25	0,25				Q.28			SI		0,641	115	101	216			
	2,50				0,30	0,30				E-500771			SI		0,740	120	100	220	C/TOL		
	2,50				0,30	0,30				E551441	SI				0,743	119	100	219			
2,50				0,60	0,60				2052552	SI				0,745	119	100	219	C/TOL			
3,00				0,30	0,30				E554108	SI				0,875	120	96	216				
3,00				1,00	1,00				E558322	SI				0,875	118	94	213	C/TOL			
3,00				0,30	0,30				TC43037			SI		0,875	120	96	216				
31,0	2,50				3,50	1,00			E554591	SI				0,743	118	102	220				
31,8	2,64				0,25	0,25			Q.56			SI		0,830	126	105	231				
32,0	1,60				0,50	0,20				E-369936			SI		0,525	127	115	242			
	1,10				0,30	0,30				TC43014			SI		0,403	140	132	272			

# PRODUKTDATABLAD JB-WELD



J-B WELD COMPANY  
 P.O. BOX 483, SULPHUR SPRINGS, TEXAS 75483  
 903-885-7696 • Fax: 903-885-5911  
 www.jbweld.com • e-mail: in Fo@JBWELD.COM

Revision Date: 10/2013  
 Supersedes: All Previous dates  
 Literature Reference #: JBWTT0001

## TECHNICAL DATA J-B Weld

### PRODUCT DESCRIPTION:

J-B Weld is the original "Cold Weld" steel reinforced two part epoxy adhesive that provides strong and lasting repairs to metal, aluminum and multiple surfaces found in the automotive, household, mechanical and industrial applications.

### RECOMMENDED FOR:

Bonding and filling various metals such as steel, aluminum, iron, copper, brass and bronze. Can also be used on non-metal surfaces such as concrete, most plastics, wood, tile, ceramic, fiberglass and many others.

### TYPICAL APPLICATIONS:

Can be used to repair many items including, machinery, automotive components, tools, pipes, housings, outdoor equipment, off road equipment, appliances, fuel tanks, furniture, fixtures and household items.

### DIRECTIONS:

1. Clean and Prepare surface area of all dirt, grease, oil, paint, rust or debris.
2. Mix equal parts of the Part A Hardener and the Part B steel resin. Be sure to mix equal parts thoroughly until color is uniform.
3. Apply with appropriate tool or spatula in an even coat, weld bead, or extruded shape as needed.
4. Let Product Set. Product will set for 20-25 minutes and cure in 15-24 hours (depending on the environment and temperature conditions present. Allow 4-6 hours minimum before putting object back into use or service.

### PRODUCT FEATURES AND BENEFITS:

- Superior Product Strength able to withstand significant shear loads, shock loads, and impact resistance.
- Can be used on differing substrates and multiple surfaces
- High Heat Resistant up to 600 F intermittent temperatures
- Gasoline and Petroleum resistant
- Water Resistant when fully cured
- Won't shrink or crack
- Can be tapped, filed, sanded and drilled when fully cured

### NOT RECOMMENDED FOR:

Polyethylene Plastic (PE), polypropylene Plastic (PPE), Nylon, and other highly flexible materials and non-porous surfaces. Not recommended for under water immersion.

### SAFETY AND PRECAUTIONS:

Avoid product contact with eye, skin and clothing. Use rubber gloves and eye protection. Use in an adequately ventilated area. Do not ingest. If contact with eyes occurs flush with water for 10-15 minutes and seek medical attention immediately. If contact with skin, wash with soap and water.



ITEM # 82655  
 PACKAGE: Carded Tubes  
 SIZE: 2 x 1 oz.



ITEM # 8280  
 PACKAGE: Boxed Tubes  
 SIZE: 2 x 5 oz.

PROPERTIES	TEST METHOD	RESULT
Color (cured)		Dark Grey
Working time (70° F)		45 min. max
Set time		4-6 hours
Cure time		16-24 hours
Max temp (intermittent)		600° F
Max temp (continuous)		500° F
Tensile strength	ASTM C1638	3960 psi
Adhesion strength	ASTM D297	3960 psi
Flexural strength	ASTM D790	3960 psi
Compressive strength	ASTM 0695	3960 psi
Shore D hardness	ASTM 02240	85 (1 wk)
Shrinkage	ASTM 01779	0.0%
Flash Power (uncured)		7400



## TECHNICAL DATA SHEET

### J-B WELD

TEST	ASTM	RESULTS
Adhesion Strength	D297	1800 psi/126.6 kg/cm <sup>2</sup>
Flexural Strength	D790	7320 psi/514.7 kg/cm <sup>2</sup>
Tensile Lap Shear	D1002	1040 psi/73.1 kg/cm <sup>2</sup> (Room Temp 25°C Steel) 1840 psi/129.4 kg/cm <sup>2</sup> (3 hrs 400°F/204°C Steel) 671 psi/42.2 kg/cm <sup>2</sup> (3 hrs 550°F/288°C Steel) 1367 psi/96.1 kg/cm <sup>2</sup> (3 hrs 400°F/204°C Alum) 580 psi/40.8 kg./ cm <sup>2</sup> (3 hrs 550°F/288°C Alum)
Shrinkage Volumetric Change	D1779	0
Deflection Temperature	D648	102.5°F/39.2°C
Tensile Strength	D638	3960 psi/278.4 kg/cm <sup>2</sup> % elongation 1.7
Volume Resistivity		3.16 x 10 <sup>15</sup> ohm cm
Surface Resistivity		9.78 x 10 <sup>15</sup> ohm cm
Water Soak Absorption Test	D470	24 hr Wgt Gain 0.07%
Mix ratio by Weight		1 to 1
Mix ratio by Volume		1 to 1
Viscosity mixed (cps)		Approx. 250,000 cps
Specific Volume		1.78
Coverage per lb in sq. in <sup>1</sup> / <sub>4</sub> " thick		65
Cured Hardness (Shore D)	D224	85
<u>TEST METHOD</u>		<u>CHEMICAL SOLN</u>
Sulfuric Acid Spot Test (7 days)		20% Sulfuric Acid
		30% Sulfuric Acid
		40% Sulfuric Acid
		<u>EFFECT</u>
40-Day Immersion Test (D543-67)		20% Sulfuric Acid
		30% Sulfuric Acid
		40% Sulfuric Acid
		5.3% Wgt Gain
		5.2% Wgt Gain
		4.1% Wgt Gain

## DATABLAD EPOXY LIM

Joining > Adhesives > Rigid >

### General

#### Designation ⓘ

Joining: adhesives, epoxy

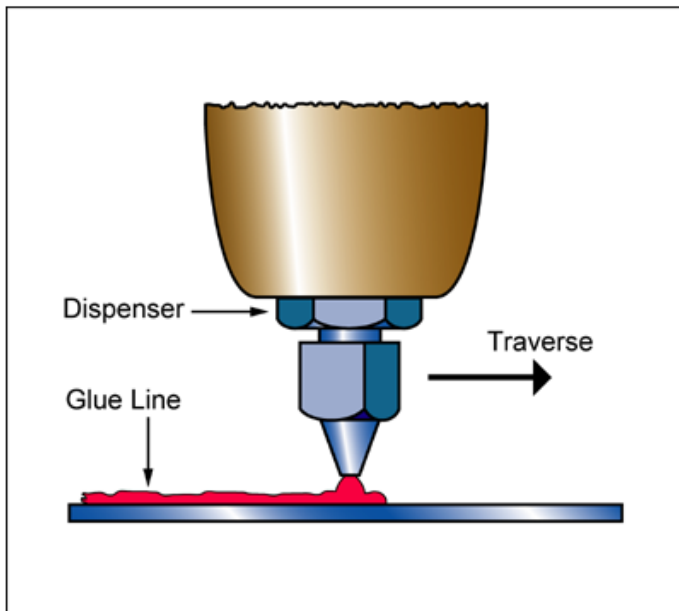
#### Tradenames ⓘ

Araldite

#### The process

Epoxyes and epoxy-phenolics are thermosetting adhesives with high tensile strengths (up to 45 MPa) and low peel strengths (1.8 kg/mm), resistant to solvents, acids, bases and salts. Nylon-epoxyes have the highest strengths and are used primarily to bond aluminum, magnesium and steel. Epoxy-phenolics retain their strength up to 150 - 250 °C and are used to bond metals, glass and phenolic resins. Most are two-part systems, curing at temperatures between 20 - 175 °C, depending on grade. They are used in relatively small quantities because of price: but, with imide-based adhesives, they dominate the high-performance adhesives markets.

#### Process schematic





## Materials to be joined

Metals	ⓘ	✓
Polymers	ⓘ	✓
Composites	ⓘ	✓
Glasses	ⓘ	✓
Ceramics	ⓘ	✓
Natural materials	ⓘ	✓
Dissimilar materials	ⓘ	✓

## Joint geometry

Lap	ⓘ	✓
Butt	ⓘ	✓
Sleeve	ⓘ	✓
Scarf	ⓘ	✓
Tee	ⓘ	✓

## Recommended loading

Compression	ⓘ	✓
Shear	ⓘ	✓
Bending	ⓘ	✓
Torsion	ⓘ	✓
Peeling	ⓘ	✓

## Physical attributes

Range of section thickness	ⓘ	0,01	-	100	mm
Tolerance	ⓘ	0,05	-	1	mm
Unequal thicknesses	ⓘ	✓			
Accessibility by one side	ⓘ	✓			

## Function

Watertight/airtight	ⓘ	✓
Demountable	ⓘ	✓

## Process characteristics

Discrete	ⓘ	✓
Continuous	ⓘ	✓

## Economic attributes

Set-up time	ⓘ	0,1	-	0,4	hr
Time before handling	ⓘ	600	-	8,64e4	s
Relative equipment costing	ⓘ	0,1	-	10	
Labor intensity	ⓘ	low			

## Cost modeling

Capital cost	①	159	-	1,59e3	NOK
Tooling cost	①	79,7	-	797	NOK

## Supporting information

### Design guidelines

Adhesive joints resist shear, tension and compression better than cleavage or peel. Butt joints are practical only when the area is large. For joints loaded in shear, width (normal to the direction of shear) is more important than length (parallel to the shear direction). Use thin bond lines (typically 25 microns) except when high impact strength is required. Epoxies give good adhesion to a wide range of substrates, with low shrinkage and good mechanical properties from -250 to +260 C.

### Technical notes

All metals (Al, Mg, Ni, Steel, Cr, Cu, Sn, Ag) and metal/metal joints. All porous ceramics (brick, concrete, cement, pottery). All glasses. All thermosetting polymers. Polyamides, Polyesters, PMMA, Phenolics, Polycarbonate. paper and wood, but NOT Polyethylene, polypropylene, polystyrene, rubber (all elastomers) leather.

### Typical uses

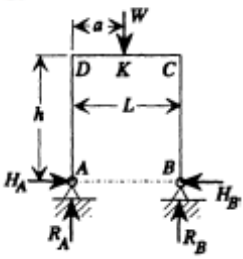
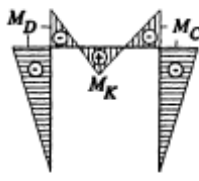
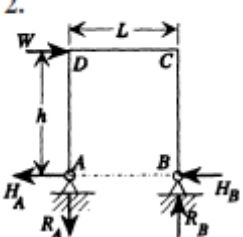
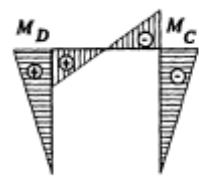
General structural use, metal/metal joints, aerospace industry (metal/metal, metal/composite and honeycomb structures), transportation industry (cycles, automobiles, railway), buildings and public works, electronic and electrical industry, leisure industry, DIY.

### The environment

Good ventilation is important whenever adhesives are used. Avoid prolonged contact with skin.

**TABLE 13-2 STATICALLY INDETERMINATE RECTANGULAR FRAMES**

The directions of the reaction forces are shown in the figures of the configurations. The signs of moments are shown in the moment diagrams. A bending moment is indicated as positive when it causes tension on the inner side of the member and compression on the outer side. Opposing moments are negative. The formulas in the table give the magnitudes of the forces and moments.

<i>Definitions</i>		
$e = h/L$		
$\beta = I_h$ (horizontal beam)/ $I_v$ (vertical members)		
Configuration	Moment Diagram	Important Values
<p>1.</p> 		$R_A = W \frac{L-a}{L} \quad R_B = W \frac{a}{L}$ $H_A = H_B = \frac{3Wa}{2hL} \frac{L-a}{2\beta e + 3}$ $M_C = M_D = \frac{3Wa}{2L} \frac{L-a}{2\beta e + 3}$ $M_K = \frac{Wa(L-a)}{2L} \frac{4\beta e + 3}{2\beta e + 3}$
<p>2.</p> 		$R_A = R_B = W \frac{h}{L}$ $H_A = H_B = \frac{1}{2}W$ $M_C = M_D = \frac{1}{2}Wh$



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

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway