

Kristoffer Halvorsen
Thor-Håkon Skogheim
Klara Hirseland

Design av en ny og forbedret ramme til en 2U CubeSat

Design of a new and improved frame for a 2U
CubeSat

Bacheloroppgave i ingeniørfag, maskin

Veileder: Evangelos Tyflopoulos

Mai 2021

Kristoffer Halvorsen
Thor-Håkon Skogheim
Klara Hirseland

Design av en ny og forbedret ramme til en 2U CubeSat

Design of a new and improved frame for a 2U
CubeSat

Bacheloroppgave i ingeniørfag, maskin
Veileder: Evangelos Tyflopoulos
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for maskinteknikk og produksjon



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Forord

I forbindelse med maskiningeniørutdanningen ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet skrives en avsluttende bacheloroppgave relevant for maskinfaget. Denne oppgaven skrives av studentene Kristoffer Halvorsen, Klara Hirseland og Thor-Håkon Skogheim. Oppgaven var utlyst til maskiningeniørstudenter gjennom NTNU's interne nettside av Orbit NTNU. Gruppen kontaktet Orbit og fikk tildelt oppgaven på starten av året 2021. Målsetningen for prosjektet var å utvikle en ny ramme til bruk i 2U CubeSat nanosatellitter som er både lettere, billigere og enklere å produsere enn deres nåværende ramme. Rammen var ment å kunne bli brukt i fremtidige CubeSat-prosjekter hos Orbit. Innholdet i denne oppgaven står for forfatterens regning.

Innholdet i oppgaven er i stor grad basert rundt produktutvikling, designoptimalisering, styrkeberegninger, finite element analyser, dataassistert konstruksjon og materialvitenskap. Derfor er det anbefalt og kan være en fordel at leserne av denne oppgaven har bakgrunnskunnskaper innenfor disse temaene.

Vi vil takke Orbit NTNU for å gi oss oppgaven og for å være åpen for konsultasjon og rådgivning. Ikke minst vil vi gjerne gi en stor takk til vår veileder Evangelos Tyflopoulos for å dedikere sin tid til å gi oss råd, tilbakemeldinger og veiledning gjennom hele prosjektet.

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven er basert på arbeidet vi har gjort for å designe en egen 2U CubeSat satellitt-ramme for Orbit NTNU. Orbit er en studentorganisasjon innen romfart som ønsker seg en lettere og billigere ramme enn rammen fra Spacemind som blir brukt i dag. For å løse problemstillingen har gruppen brukt sin kunnskap innen produktutvikling, designoptimalisering, styrkeberegninger, finite element analyser, dataassistert konstruksjon og materialvitenskap. Oppgavens struktur følger produktutviklingsmetodikken av Ulrich og Eppinger, hvor prosessen startet med å innhente all relevant informasjon for å sette rammebetingelser for designet av rammen.

Designspesifikasjonene er tatt fra CubeSat Design Specification, mens de dimensjonerende belastningene rammen må tåle baseres på belastningene fra oppskytning av en SpaceX Falcon 9 bærerakett. Rammebetingelsene konkluderes med de overordnede målene om vekt og kostnad fra Orbit.

Utviklingsprosessen startet med idemylding hvor de beste konseptene ble tatt vare på og evaluert basert på fordeler og ulemper i forhold til prosjektets mål. Prosessen suppleres med verktøy som morfologisk tabell og evalueringstrinnsmatrise. En kombinasjon av de mest lovende konseptene ble valgt ut til å bli videreutviklet i struktur- og utformingfasen. Struktur- og utformingfasen har vært en iterativ prosess hvor det ble benyttet rapid prototyping ved hjelp av dataassistert konstruksjon. Som del i denne utviklingen ble det benyttet topologioptimalisering basert på SIMP metoden for å finne måter å redusere vekten mest mulig, samtidig som tilstrekkelig styrke opprettholdes. For hver iterasjon ble det gjennomført styrkeberegninger og vibrasjonsanalyser basert på belastningene fra rammebetingelsene som brukes til begrunning av materialvalg. Videre er valg av materiale og produksjonsteknikk optimalisert etter utforming, vekt og kostnad.

Primærstrukturen til rammen består av en hovedenhet og to endeplater. Hovedenheten til rammen konstrueres av en kvadratisk ekstrudert profil med dimensjonene $100 \times 100 \times 2[mm]$ i 6061 T6 legert aluminium, mens endeplatene konstrueres av to $100 \times 100 \times 15[mm]$ plater i 7075 T6 legert aluminium. Alle konturene blir utformet av fresing og boring. Ved å utnytte konven-

sjonelle bearbeidingsmetoder og tilgjengelige materialer som ikke er sterkere enn nødvendig, reduseres produksjons- og materialkostnader. For sekundærstrukturer kjøpes det inn standardiserte deler der det er mulig for å holde kostnadene nede, mens enkelte deler har muligheten for å bli 3D-printet med utstyr som Orbit har tilgjengelig. De forrigenevnte faktorene, kombinert med smart utforming som resultat av topologioptimalisering har ført til en ramme som teoretisk sett er 23,7% lettere enn målvekten, mens den anslåtte material og produksjonskostnad er 25% lavere enn målet.

Abstract

This bachelor thesis is based on the work we have done to design a frame for a 2U CubeSat satellite for Orbit NTNU. Orbit is a student driven space exploration organization, which have tasked us with designing a satellite which is lighter and cheaper than that of the Spacemind satellite frame that they currently use. To complete this task the group has utilized their knowledge within product development, design optimization, computer aided design, finite element analysis, and material science. The structure of the thesis follows the product development methodology by Ulrich og Eppinger, where the process starts by collecting all the necessary data to be able to create a guideline for which the frame's design must adhere to.

The design specifications are taken from the CubeSat Design Specifications, while the loads that the frame has to endure are based upon the loads experienced under launch of a SpaceX Falcon 9 launch vehicle. On top of that, the frame has to fall within the weight and price limit set by Orbit.

The development process starts with brainstorming, where only the best concepts are kept and evaluated based on their pros and cons regarding the goals of the project. The process is supplemented with tools like morphological tables and evaluation matrixes. A combination of the most promising concepts are chosen to be further developed in the structure and design phase of the project. The structure and design phase has been an iterative process where the group utilized rapid prototyping in combination with computer aided design. This was complemented by topology optimization based on the SIMP method to find ways to reduce the weight of the frame as much as possible while maintaining adequate structural integrity. Strength and vibration analyses based on the design guidelines were conducted after every iteration. Meanwhile, material and production methods are chosen to optimize strength, weight and price based on the design of the frame.

The primary structure consists of a main unit and two end plates. The main unit is constructed from a quadratic $100 \times 100 \times 2[mm]$ extruded profile, while the two end plates are constructed from two $100 \times 100 \times 15[mm]$ slabs of 7075 T6 aluminum. All contours are formed by both milling and boring, which can be done by using the same machinery. By utilizing con-

ventional processing methods and commonly available materials, the production and material costs are minimized. By using as many standardized parts as possible, we are able to keep down the costs of secondary structures. To further keep costs down, some secondary structures are designed to be 3D-printed with equipment that Orbit already has access to. These previously mentioned factors, combined with a smart design as a result of topology optimization has lead to a reduction in weight of 23,7%, and a 25% reduction in costs compared to the target values.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Problemstilling	1
1.2	Orbit NTNU	2
1.3	Gruppen	2
1.4	Prosjektoppstart	2
1.5	Rapportens struktur	3
2	Teori	4
2.1	CubeSat	4
2.2	Belastninger under oppskytning	5
2.3	Produksjonsteknikk	7
2.3.1	Produksjonsmetoder	8
2.3.2	Overflatebehandling	10
2.4	Valg av material	11
2.5	CAD og FEA	16
2.5.1	Styrkeberegning	17
2.5.2	Vibrasjonsanalyse	18
2.5.3	Topologioptimalisering	19
2.6	Produktutvikling	21
2.6.1	Fase 1: Visjon	21
2.6.2	Fase 2: Behovs- og teknologianalyse	22
2.6.3	Fase 3: Konseptutvikling	22
2.6.4	Fase 4: Struktur og utforming	23
2.6.5	Fase 5: Konstruksjonsgjennomgang	24
3	Metode	25
3.1	Behovs- og teknologianalyse	25
3.1.1	Rammebetingelser og begrensninger	25

3.2	Konseptutvikling	27
3.3	Struktur og Utforming	28
3.3.1	Rapid prototyping med bruk av topologioptimalisering	28
3.3.2	Analyse av komponenter	29
3.3.3	Styrkeberegning	29
3.3.4	Vibrasjonsanalyse	29
3.4	Konstruksjonsgjennomgang	30
4	Konseptutvikling	31
4.1	Hovedenhet	33
4.2	Festemekanisme til kretskort	35
4.3	Endeplate	37
4.4	Standoff	38
4.5	Killswitch	39
4.6	Alternativ sammensetning	41
5	Struktur og utforming	42
5.1	Hovedenhet	42
5.2	Endeplate	46
5.3	Brakett	52
5.4	Sammensatt ramme	52
5.5	Materialvalg	55
6	Resultat og drøfting	58
6.1	Rammen	58
6.1.1	Primærstruktur	58
6.1.2	sekundærstruktur	62
6.1.3	Resultatet av den sammensatte rammen	64
6.2	Produksjon	64
6.2.1	Material- og produksjonskostnader	67
7	Konklusjon	70
	Referanseliste	70

Vedlegg 1	76
Vedlegg 2	80
Vedlegg 3	81

Tabeller

2.1	Kombinasjon av akselerasjoner som oppstår under oppskytingen av bæreraketten	6
2.2	Shock Response Spectrum	6
2.3	Maksimalt anslått vibrasjonsmiljø	7
2.4	Maksimal ekvivalent sinusvibrasjon	7
2.5	Oversikt av herbare og ikke-herdbare aluminiumlegeringer [63]	12
2.6	Oversikt av herbare aluminiumlegeringer	13
2.7	Oversikt av ikke-herbare aluminiumlegeringer	13
2.8	Oversikt av aktuelle legeringer	14
2.9	Sammenligning av plasttypene	16
4.1	Morfologisk tabell med utvalgte konsepter som var ansett som mulige løsninger	32
4.2	Evalueringsmatrise av hovedenhet	34
4.3	Evalueringsmatrise for kretskort festemekanisme-konseptene	36
4.4	Evalueringsmatrise for endeplate-konseptene	37
4.5	Evalueringsmatrise for standoff-konseptene	38
4.6	Evalueringsmatrise for Killswitch-konseptene	40
4.7	Evaluering av den alternative sammensetningen	41
5.1	Resultater fra simulasjonene på de forskjellige konfigurasjoner til utskjæringen med 8,5 g-kraft i y-retning	44
5.2	Resultater fra vibrasjonsanalyser på den ferdige hovedenheten	46
5.3	Resultater fra statisk analyse av de forskjellige utformingene hvor g-graften er konstant 8,5 i y-retning	49
5.4	Resultater fra frekvensanalyse av de forskjellige utformingene	50
5.5	Resultater av vibrasjonsanalyser	50
5.6	Resultater av vibrasjonsanalyser	51
5.7	Resultater fra sjokk analyse av de forskjellige utformingene	51
5.8	Resultater fra statisk analyse hvor g-kraften er 8,5 konstant i y-retning	53

5.9	Resultater av vibrasjonsanalyser	53
5.10	Resultater av vibrasjonsanalyser	54
5.11	Resultater fra sjokkanalyse	54
5.12	Resultater fra alle analysene av brakett	57
6.1	Et eksempel av hvordan en kalkyle kan se ut for produksjon av primærstrukturen	68
6.2	Kalkyle av innkjøpsvarer	69

Figurer

2.1	Produktutviklingsfasene etter Ulrich og Eppinger	21
3.1	Det lokale koordinatsystemet til satellitten	26
3.2	Eksempel: Topologioptimalisering av en massive endeplate. Til venstre er plattens massive utgangspunkt fra konsept. Til høyre er resultatet av analysen. Det gule må beholdes, resten av massen kan i følge analysen fjernes.	28
5.1	Profilen med alle hull og detaljer lagt til.	43
5.2	Resultatet fra topologioptimalisering av hovedenheten som en hel profil med beskyttete områder	43
5.3	Resultaterende forskyvning fra den statiske analysen på konfigurasjonen uten støttestruktur.	44
5.4	Topologistudie på hovedenheten med konfigurasjon <i>uten</i> med mål å fjerne 30% av materialet.	45
5.5	Figuren viser endringene som blir gjennomført etter den andre TO på hovedenheten. <i>Venstre</i> viser før endringene, <i>Høyre</i> viser etter endringene.	46
5.6	Venstre: Massiv endeplate med integrerte standoffklosser. Høyre: Undersiden av endeplaten der hylsene er plassert i hvert hjørne	47
5.7	Til venstre er endeplaten med støttestruktur før TO. Til høyre er resultatet av TO.	48
5.8	Til venstre er utgangspunktet der utskjæring i senter er grovt skissert for å fjerne støttestruktur. Til høyre er resultatet av en TO som blir et utgangspunkt å redigere etter.	48
6.1	Bilde av hovedenheten med markerte funksjonsområder som omtales i teksten	59
6.2	Bilde av endeplater med markerte funksjonsområder som omtales i teksten	61
6.3	Bilde av brakettens utforming	63
6.4	Øverst: Splintene som kan brukes til å feste brakettene. Nederst: Eksempel på hvordan splintene brukes til å feste en brakett mot rammen	63

6.5	<i>venstre</i> : sammensatt primærstruktur til rammen, <i>høyre</i> : sammensatt sekundærstruktur til rammen med 2 killswitches og en sentrert brakett	64
7.1	Venstre: Sjokkanalyse av sammensatt ramme med lasttilfelle gitt av Orbit. Høyre: Største spenninger [MPa] opptrer på gjengestang mot hylse.	76
7.2	Sjokkanalyse av sammensatt ramme med lasttilfelle gitt av Orbit. Maksimal forskyvning [mm].	77
7.3	Statisk analyse av sammensatt ramme med lasttilfelle gitt av Orbit. Venstre viser spenninger [MPa], til høyre vises forskyvninger [mm].	77
7.4	Vibrasjonsanalyse av sammensatt ramme med lasttilfelle gitt av Orbit. Til venstre er resultatet av en harmonisk vibrasjonsanalyse. Til høyre er resultatet av en tilfeldig vibrasjonsanalyse. Begge viser spenninger [MPa].	78
7.5	Sjokktestanalysen av sammensatt ramme med verste lasttilfelle.	78
7.6	Statisk analyse av sammensatt ramme med verste lasttilfelle. Venstre viser hele rammen med spenninger. Til høyre ser vi at de største spenningene oppstår på gjengestang mot hylsene.	79
7.7	Til venstre er resultatet av en harmonisk vibrasjonsanalyse. Til høyre er resultatet av en tilfeldig vibrasjonsanalyse. Begge med verste lasttilfelle.	79

Akronym

NTNU	-	Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet
SW	-	SolidWorks
CAD	-	Computer Aided Design
FEA	-	Finite Element Analysis
PSD	-	Power Spectral Density
CNC	-	Computer numerical control
SRS	-	Shock response Spectrum
FDM	-	Fused Deposition Modeling
SLS	-	Selective Laser Sintering
SLA	-	Stereolitografi
TO	-	Topologisk optimalisering
SIMP	-	Solid Isotropic Material with Penalization method
PCB	-	Printed Circuit Board

1 Innledning

Dette kapitlet skal gi innsikt i bakgrunnen for oppgaven og problemstillingen, samt definere omfanget av prosjektet. Deretter skal gruppens kompetanse evalueres i forhold til innholdet i prosjektet, som er etterfulgt av en disposisjon for oppgaven.

I forbindelse med maskiningeniørutdanningen ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet skrives en avsluttende bacheloroppgave relevant for maskinfaget. Alle på gruppen går tredje året innen maskiningeniør studiet. Veilederen til gruppen er Evangelos Tyfopoulos, stipendiat ved institutt for maskinteknikk og produksjon.

1.1 Problemstilling

Gruppen ble gjort oppmerksom på temaet til oppgaven i en opplysning fra Orbit NTNU som ble lagt ut til alle maskiningeniør studenter. Temaet romfart og satellitter fanger interessen av alle grupped medlemmene. Etter en samtale med kontaktpersonen Nathanael Hjermer, leder i mekanisk avdeling i Orbit NTNU, ble problemstillingen tydeliggjort for gruppa.

Oppgaven til gruppa er å designe en ny og forbedret ramme til bruk i CubeSat satellitter som Orbit kan bruke i sine fremtidige CubeSat prosjekt. Orbit ønsker at rammen skal være billigere og lettere enn rammen som de har kjøpt inn til det pågående prosjektet deres. Denne rammen er kjøpt fra Spacemind og refereres til videre i denne oppgaven som *Spacemind rammen*. Ønskene til Orbit medfører at primærvekten til rammen ikke skal overstige 156g, mens sekundærvekten skal holde seg under 216g. Samtidig skal den nye rammen ha en material- og produksjonskostnad på under 20.000kr. I tillegg ønsker Orbit at rammen skal være brukervennlig, og at den skal være lett å produsere slik at en student kan ha mulighet til å produsere deler av rammen. Rammens design skal gå innenfor spesifikasjonene til en 2U CubeSat etter CubeSat Design Specifications (CDS). Orbit ønsker at Falcon User's Guide fra SpaceX brukes som grunnlaget for opptredende belastninger under oppskytning av satellitten. Det betyr at rammen må dimensjoneres for å tåle disse belastningene. All form for testing av rammen i denne oppgaven er derfor basert på dette.

1.2 Orbit NTNU

Orbit NTNU er en av mange studentorganisasjoner ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet i Trondheim. Studentorganisasjonen ble grunnlagt i 2018 og holder til på Gløshaugen campus i Trondheim. Organisasjonen er en «non-profit» og blir kun drevet av frivillige studenter. Organisasjonens flerfaglige omfang medfører at det er studenter fra mange forskjellige linjer som er involvert i organisasjonen. For øyeblikket utvikler Orbit NTNU den første norske studentsatellitt som skal være i full drift. Om dette prosjektet er vellykket, skal det utvikles flere satellitter i framtiden. Rammen som utvikles i denne oppgaven skal være til et slikt framtidig prosjekt.

1.3 Gruppen

Gruppen består av tre studenter som er spesialisert innen konstruksjonsteknikk i maskinfaget. Spesialiseringen innen konstruksjonsteknikk har gjort at gruppen egner seg spesielt godt til dette prosjektet hvor deres kunnskap om styrkeberegninger, produksjonsteknikk, materialeegenskaper og CAD/FEA kommer til god nytte. En på gruppen har også tatt prosjektledelse som valgfag og har utnyttet sin kunnskap til å lede gruppen gjennom en suksessfull utførelse av prosjektet. Kunnskapen har blitt brukt til å strukturere prosjektet fra start til slutt ved bruk av flere metoder innen prosjektledelse. Et annet gruppemedlem har fagbrev som platearbeider og industrimekaniker, og har dermed erfaring med flerfoldige metall bearbeidingsmetoder. Dette har vært til stor nytte og gav gruppen større innsikt i utførelsen av produksjon. Gruppen har brukt kunnskapen til å utforme produktet deretter. Kompetansen til gruppen danner et godt grunnlag for å kunne takle prosjektet med informerte valg og avgjørelser.

1.4 Prosjektoppstart

Prosjektets varighet var fra uke 2 til uke 20 i 2021. Prosjektet startet samtidig som et prosjekt fra et annet emne, og gruppemedlemmene fikk dermed to uavhengige prosjekt å jobbe med. I tillegg startet prosjektet midt i Corona-pandemien, som gjorde at gruppen var nødt til å samarbeide digitalt. På grunn av dette ble det ekstra behov for å legge en strategisk plan for prosjektet. Det ble skrevet en samarbeidsavtale i starten for å blant annet utnevne en gruppeleder og sikre lik fordeling av arbeidsmengde. Ut ifra avtalen ble det enighet om å ha minst to møter i uken

innen gruppen frem til det andre prosjektet ble ferdig, og deretter gå over til å ha møte klokken 09.15 hver ukedag. Slike møter hadde som formål å tillate gruppen å samarbeide med prosjektet, delegere oppgaver for dagen, og oppdatere hverandre på arbeidet som ble gjort dagen før dersom gruppemedlemmene jobbet på egenhånd. I tillegg hadde gruppen korte oppdateringsmøter klokken 13.00 for å delegere nye oppgaver hvis det viste seg å være nødvendig. Videre har gruppen hatt jevnlig møter med Orbit og veilederen i hver fase av prosjektet for å få veiledning og for å oppdatere alle partene på prosjektets progresjon. Som supplement til møtene har det blitt skrevet referat fra alle møtene for å holde kontroll på hva som ble sagt og gjort. Det ble også opprettet et Gantt-skjema som ble oppdatert ukentlig for å spore fremgang på prosjektet og forsikre at gruppen ikke falt bak skjema. Gantt-skjemaet kan sees på vedlegg 2. Alt samarbeid foregikk gjennom den digitale kommunikasjonsplattformen Microsoft Teams, som ble brukt for å holde møter og for å samle all data slik som referat, CAD-tegninger og analysedata. Hensikten med tiltakene i oppstarten var for å få en oversikt av arbeidsmengde, sørge for et individuelt ansvar med mål å inkludere alle tidlig i prosjektet, i tillegg til å lagre alt av resultater, arbeid og informasjon for å kunne kvalitetssikre arbeidet.

1.5 Rapportens struktur

I denne rapporten har vi valgt å dele tekstene inn i sju kapitler. Innledning, Teori, Metode, Konseptutvikling, Struktur og Utforming, Resultat og Drøfting og Konklusjon. Dette er ment til å gi en god struktur til rapporten og vil hjelpe leserne med å få en oversikt over innholdet. I innledningen presenterer vi bakgrunnen for prosjektet og hvilken kompetanse vi har. I tillegg til dette så vil problemstillingen bli presentert. Neste kapittel i oppgaven er teori-kapittelet som tar for seg all teori som blir benyttet i prosjektet og omtalt i resten av oppgaven. Deretter kommer metode-kapittelet som beskriver gruppens fremgangsmåte: hvordan teorien blir utnyttet i utførelsen av prosjektet. De følgende kapitlene «Konseptutvikling» og «Struktur og Utforming» omtaler selve utførelsen og resultater derifra, og skal gi innsikt i de teoridrevne begrunnelsene for designvalgene som ble gjort. Til slutt går oppgaven til å presentere resultatene av hele prosjektet som fører til en konklusjon for produktutviklingen.

2 Teori

I dette kapitlet skal teorien bak utviklingen av rammen presenteres. Kapitlet starte med en innføring av hva en CubeSat er og hvilke belastninger satellitten utsettes for under oppskytning. Med hensyn på problemstillingen blir de relevante produksjonsteknikkene og materialene som kan brukes presentert. For selve utviklingen av rammen er det valgt en programvare som vil hjelpe til ved å tegne og simulere rammen, samt vil teoriene bak modelleringene og simulering for den utvalgte programvaren bli presentert. Til slutt beskrives metodene som er brukt for å gjennomføre produktutviklingen.

2.1 CubeSat

CubeSat-prosjektet ble startet og utviklet av California Polytechnic State University (Cal Poly) i samarbeid med Stanford University. Utviklingen av CubeSat standarden begynte som et samarbeid mellom de to universitetene i 1999 og har i ettertid blitt videreutviklet av Cal Poly. Nå er prosjektet et internasjonalt samarbeid mellom over 100 universiteter verden over. Målet med standarden er å redusere tid og kostander forbundet med utvikling av små satellitter samt å åpne opp for et mer tilgjengelig verdensrom. Standarden omfatter mekaniske, elektroniske og operasjonelle krav som skal tas hensyn til i designfasen. I tillegg dekker den krav til testing før oppskytning. Satellittene er ment til å gå i lav jordbane og brukes ofte til romforskning og til testing av ny teknologi. CubeSat standarden blir brukt av både studentorganisasjoner, regjeringer, kommersielle selskaper og amatører til forskjellige formål.

CubeSat modulen

En CubeSat er en satellitt som går innenfor kategorien nanosatellitt. Konseptet baserer seg rundt kube-enheter på 10cm x 10cm x 10cm med en maksimal vekt på opp til 1.33 kg per modul. Flere enheter kan kombineres i forskjellige konfigurasjoner til en enkelt satellitt. Konfigurasjonene betegnes med et tall etterfulgt av U, slik som 1U, 2U, 3U, 6U og 12U, der U står for Units, altså enheter. Dimensjonene til satellitten er forhåndsbestemte på alle de forskjellige konfigurasjone-

ne slik at alt er standardisert og at de passer i standardiserte dispensere. En CubeSat konstrueres ofte av standardiserte komponenter og hyllevarer som er allment tilgjengelig, slik som kretskortene som er av PC104 standarden. Alle dimensjonene til kretskortene i dette prosjektet er basert på CubeSat Kit [6] sin spesifikasjon etter ønske fra Orbit. Til oppskytningen settes satellitten inn i en dispenser som er festet til en bærerakett. Dispenseren har en mekanisme som lanserer satellitten i omløpsbane. Både dispenseren og satellitten blir utsatt for diverse belastninger under oppskytning, og må konstrueres etter disse betingelsene[51].

2.2 Belastninger under oppskytning

En CubeSat må være konstruert for å tåle belastningene under reisen opp til sin bane rundt jorden. Den blir skutt opp av en romrakett, og det påfører satellitten flere typer belastninger. Etter ønske fra Orbit NTNU baseres belastningene som rammen utsettes for på *Falcon User's Guide* fra SpaceX [62].

SpaceX eller Space Exploration Technologies Corporation er et privat amerikansk firma som utvikler og produserer romraketter. De har utviklet gjenbrukbare to-steps bæreraketter som de kaller Falcon 9 og Falcon 9 Heavy. Disse har mulighet for å lande seg selv etter oppskytning og bli brukt igjen i nye oppdrag. Sammenlignet med NASA sin Space Launch System bærerakett koster oppskytningen $\frac{1}{5}$ av prisen per kg nyttelast [18]. SpaceX tilbyr også kommersielle oppdrag til private kunder, firmaer og regjeringer. Den relativt lave prisen har resultert i at langt flere organisasjoner har mulighet til å skyte opp en privat nyttelast. SpaceX gir ut all informasjon angående fysiske belastninger som kunder trenger til konstruksjon av sin nyttelast gjennom Falcon User's Guide. Manualen beskriver miljøet og alle belastningene som nyttelasten opplever under oppskytning.

CDS 13 [51] har spesifisert at belastningene som er relevante for dette prosjektet er støt og vibrasjon. Med hensyn på belastninger fra Falcon User's Guide testes det også for spenninger grunnet opptredende akselerasjon etter ønske fra Orbit.

Akselerasjonen forekommer som en kombinasjon av aksial og lateral akselerasjon. Her tas det kun hensyn til maksimalverdiene som er presentert i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Kombinasjon av akselerasjoner som oppstår under oppskytningen av bæreraketten

Kombinert akselerasjon [g]	
<i>Aksial</i>	<i>Lateral</i>
8,5	2
4	2
4	3
-1,5	3
-1,5	2
-4	2

Støtbelastningene er presentert i form av et Shock Response Spectrum (SRS). Se tabell 2.2. Det største støtet opptrer ved separasjon av romraketten og belastningen vil variere fra oppdrag til oppdrag basert på nyttelasten [62]. Likevel har Orbit avgjort at verdiene som er oppgitt i Falcon User's Guide skal benyttes til dette prosjektet.

Tabell 2.2: Shock Response Spectrum

<i>Frekvens[Hz]</i>	<i>Akselerasjon[g]</i>
100	30
1000	1000
10000	1000

Belastninger grunnet vibrasjon finnes i to former. Den første er målte vibrasjonsdata fra tidligere oppskytninger hvor maksimalverdier oppgis som Power Spectral Density (PSD) sammen med tilhørende frekvenser som vist i tabell 2.3. Den andre er ekvivalent sinus vibrasjon hvor en aksial og en lateral akselerasjonskomponent oppgis for en rekke tilhørende frekvenser. Begge er presentert i tabell 2.3 og 2.4 og må tas hensyn til.

Tabell 2.3: Maksimalt anslått vibrasjonsmiljø

Frekvens [Hz]	PSD [$\frac{g^2}{Hz}$]
20	0,0044
100	0,0044
300	0,001
700	0,001
800	0,003
925	0,003
2000	0,00644

Tabell 2.4: Maksimal ekvivalent sinusvibrasjon

Frekvens [Hz]	akselerasjon [g]	
	Aksial	Lateral
5	0,50	0,50
20	0,80	-
35	0,80	-
35	0,60	-
75	0,60	-
85	0,90	0,50
100	0,90	0,60

Både den tilfeldige vibrasjonen og den ekvivalente sinusvibrasjonen forekommer i «Payload Attach fitting», og det antas at nyttelasten kan oppleve samme nivå av vibrasjon. Vibrasjonsdataene gjelder for demping faktor Q fra og med Q=20 til Q=50 [62]. Rammen må konstrueres for å tåle alle de nevnte belastningene. Det medfører at design, material og produksjonsteknikk må bestemmes deretter.

2.3 Produksjonsteknikk

Produksjonsteknikk omhandler prosessen fra råvarer som metall, tre eller plast til et ferdig produkt. Fagfeltet inneholder en rekke produksjonsmetoder slik som formgiving, sponfraskillende prosesser, additiv tilvirkning. Videre inneholder emnet materialkunnskap, montasje, sammenføyningsteknikker, overflatebehandling, kvalitetssikring, økonomi og automatisering. Kunnskapen fra produksjonsteknikk skal hjelpe til for å evaluere hvilke produksjonsmetoder og overflatebehandlinger som egner seg best til designet av rammen samtidig som de er økonomisk gunstige.

2.3.1 Produksjonsmetoder

Rammen skal kunne produseres og derfor må konturer og kompliserte utforminger begrenses etter de allment kjente og aktuelle produksjonsmetodene slik som fresing, støping og 3D-printing.

Fresing

Fresing er en sponfraskillende prosess som ligner boring. I fresing er det vanlig at arbeidsbordet kan bevege seg i x-,y- og z-retning. x- og y-aksene ligger horisontalt i arbeidsbordet hvor også arbeidstykket spennes fast. Vertikalt blir dermed z-retning hvor avstanden mellom arbeidstykket og fresen reguleres. Ofte blir en slik fres kalt en 3-akset fres pga. de tre frihetsgradene. Mating i x-, y- og z-retning, kjøling, samt hastighet på rotasjon er viktige parameter med tanke på overflate finish og slitasje av fres. Mer kompliserte freser kan styre bordet i x-,y- og z-retning og selve skjæreverktøyet kan vinkles ut fra z aksen. Slike maskiner blir ofte kalt en 5-akset fres pga. flere frihetsgrader så kan den utføres litt mer komplisert arbeidsoperasjoner. Slike maskiner er ofte CNC-styrt og brukes mye på deler med kompliserte utforminger.

Det roterende skjæreverktøyet, fresen, har ofte mange egger. Det skilles da mellom freser av hurtigstål eller utskiftbare vendeskjær av hardmetall som er festet til freskroppen. Selve skjæreverktøyet kan ha mange utforminger avhengig av arbeidsoperasjon. De tre vanligste arbeidsoperasjonene er planfresing, formfresing og sporfresing[49].

Ved planfresing så planeres overflaten ved at materiale fjernes jevnt over hele overflate slik at ruheter på materialoverflaten blir like. Planfresen bruker ofte å være relativt stor og dekker ofte hele arbeidsområdet på en tur over overflaten. For å få en fin finish brukes metoden medfresing som innebærer at arbeidstykket mates i samme retning som fresens rotasjonsretning, dette gir også en mindre verktøyslitasje i forhold til motfresing der arbeidstykket mates mot fresens rotasjonsretning [58].

Formfresing egner seg til kompliserte strukturer. De tre mest brukte fresene for denne prosessen er avrundet freser, kulefreser og fasefreser. Avrundet freser har flat bunn men eggene er avrundet. Avrundet fres blir generelt mye brukt for komplisert grovformingen da hjørner og skarpe kanter ikke blir perfekte. Kulefreser har samme bruksområdet som avrundet, kompliserte utforminger men der det er behov for innvendig radius. Fasefreser også kalt formfres brukes til avsluttende prosess for å fase over kanter eller spesielle former på deler av arbeidstykket [15].

Sporfresing benytter seg ofte av samme type freser som formfresing, og metoden benyttes til å lage blant annet kilespor. Generelt finnes det tilfeller hvor fresing brukes som en etterbehandlingsmetode av overflater, eller videreproduksjon etter at deler er støpt.

Støping

Støping er en formgivende produksjonsteknikk som skjer ved at en smelte blir formet ved størkning. Flytende materiale størkner i en form som skjer på grunn av avkjøling eller kjemisk reaksjon. Metaller, termoplaster og glass stivner ved avkjøling, betong, gips og herdeplast stivner ved kjemiske reaksjoner. Former kan lages av sand om man bare skal produsere én. Kokiler er permanente former som kan brukes til masseproduksjon, i slik sammenheng brukes gjerne presstøping [5].

3D-printing

3D-printing er en additiv tilvirkningsmetode hvor en del bygges lagvis med utgangspunkt i en digital 3D-modell. Det finnes flere metoder innenfor 3D-printing avhengig av hvilke krav som settes til budsjett, materiale, styrke, og produksjonstiden delen skal ha. De forskjellige metodene gjør at man kan benytte en rekke materialer slik som termopolaster, metaller og kompositter, alt etter behov. I dette prosjektet sees det på metoder som benytter plast som materiale. Derunder finnes det tre metoder som er mest relevante. Disse er stereolitografi (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), og Fused Deposition Modeling (FDM) [48].

SLA benytter fotopolymerer i form av harpiks som herder når de blir eksponert for sterkt lys fra en laser eller en alternativ kilde. Prosessen foregår ved at lyskilden beveger seg over overflaten på et kar fylt med flytende fotopolymerer. Når laget er herdet, beveger en flate seg nedover i karet slik at overflaten til forrige lag ligger ved overflaten til væsken i karet. Slik repeteres prosessen. SLA egner seg til å lage funksjonelle prototyper og produkt[52, 57]

SLS er en pulverbasert metode som fungerer ved at lag på lag med fint termoplastisk pulver blir bundet til hverandre ved å smelte pulverpartikler sammen ved hjelp av en laser. Et lag med pulver legges ned og laseren smelter pulveret på bestemte steder. Når laseren har gått over alle områdene legges et nytt lag med pulver og prosessen gjentar seg til delen er ferdiglaget [52, 57].

FDM er en metode som virker ved å ekstrudere smeltet polymer filament ut fra en dyse som beveger seg langs en bestemt rute som samsvarer med et lag av strukturen som skal printes. Materialet størkner raskt etter det forlater dysen og binder seg til laget under. Avhengig av

strukturen, printes det også avtakbare støttestrukturer for å forhindre at delen siger. Prosessen repeteres til alle lagene av delen er printet, og deretter fjernes støttestrukturene av brukeren [52]. Prosessen er relativt rask og billig, og krever lite trening for å bruke. Samtidig er selve utstyret billig og lett tilgjengelig. Dette gjør at FDM fungerer utmerket for rapid prototyping og «proof of concept» prototyping. Noen ulemper er at metoden har lavere oppløsning, nøyaktighet og gir mindre styrke enn andre metoder [7]. Det gjør at delene som produseres ikke egner seg til å være lastbærende i en stor grad. Det medfører også at delene ikke må ha behov for nøyaktige toleranser. Mangelen på styrke kan til en viss grad motvirkes med bruk av rette filament. Filamentene brukt i FDM er i de fleste tilfeller en termoplast eller en blanding av termoplast og andre materialer. Det finnes flere typer filament med forskjellige materialegenskaper som egner seg til forskjellige formål. Dette skal videre utdypes i kapittel 2.4.

2.3.2 Overflatebehandling

Overflatebehandling er en metode som har som hensikt å enten gi overflater et annet utseende eller motstandsdyktighet mot slitasjer eller ødeleggelse[54]. Eksempler på overflatebehandling er maling, sandblåsing, polering, galvanisering og anodisering. Etter CDS er det krav om at ruheten på enkelte overflater skal være mindre en $1,6\mu m$ [51], og det skal dermed sees videre på mekanisk polering og anodisering som metoder som kan brukes til å oppnå kravet.

Mekanisk Polering

Mekanisk Polering er en type overflatebehandling som reduserer overflateruheten. Overflateruheten forekommer av mikroskopiske topper og groper i overflaten på et materiale. Prosessen fungerer ved å bevege et poleringsbelte eller en poleringsdisk over arbeidsflaten gjentatte ganger mens press påføres. Poleringsflatene er dekket med små, harde slipepartikler, ofte laget av diamant eller aluminiumsoksid. Ved polering foregår det to prosesser: 1. Overflaten varmes opp på grunn av friksjon, som får materialet i toppene til å «flyte» og legge seg i de mikroskopiske gropene i overflaten ved hjelp av trykket. 2. De små harde partiklene på poleringsverktøyet fjerner materiale fra toppene. Dette skaper en glatt overflate. Glattingen forekommer altså av at de lokale mikroskopiske toppene blir slitt bort og/eller flyttet ned i gropene ([19, s. 748]). Et annet krav fra CDS er at noen overflater ikke bare skal ha en mindre ruhet, men også være anodiserte.

Anodisering

Anodisering er en elektrokjemisk prosess der et metall senkes ned i en elektrolyttløsning mens strøm blir sendt gjennom stykket. Komponenten som skal anodiseres fungerer som anoden i den elektrolytiske cellen. På den måten oksideres metallet og det oppstår et beskyttende oksidlag på overflaten som er mye tykkere enn det som naturlig forekommer på grunn av oksidasjon i luft. Halvparten av oksidlaget legger seg over den opprinnelige overflaten, mens den andre halvparten legger seg under. Et oksidlag med tykkelse t vil dermed føre til en økning i tykkelse på grunnmaterialet på $\frac{t}{2}$ per side. Oksidlaget som oppstår forhindrer korrosjon og gir økt hardhet [19, s. 984]. Oksidlaget forhindrer også kaldsveising mellom to overflater [51]. Hard anodisering, også kalt Type III anodisering, produserer et oksidlag som er tykkere og mer kompakt enn Type I og II anodisering. Dette gjøres ved å øke strømstyrken, i tillegg til å senke temperaturen til elektrolyttløsningen ned til vannets frysepunkt. Hard anodisering brukes ofte når tykkelsen på oksidlaget skal være mellom 20-100 μm tykt [25]. Ved hard anodisering øker også overflateruheten med 2-3 ganger den opprinnelige overflateruheten. Dermed er det viktig at komponenten forbehandles og/eller etterbehandles i tilfeller der overflateruhet spiller en viktig rolle. De fleste materialer kan anodiseres, men noen egner seg bedre til dette formålet enn andre. I dette prosjektet vil material spille en viktig rolle og materialvalg må dermed undersøkes videre.

2.4 Valg av material

For å konstruere en lett men samtidig sterk ramme er valg av materiale en viktig faktor. Det finnes mange typer materialer med forskjellige legeringer, alt til sin hensikt. Ifølge CDS er det et krav at primerstrukturen må være laget av aluminium med legeringstype 5005, 5052, 6061, 6082 eller 7075 [51]. Flytespenning, bruddspenning og forlengelsesgrad skal derfor sammenliknes og vil spille en stor rolle for valg av type legering for rammen som skal konstrueres og produseres.

Aluminium og legeringer

Grunnstoffet aluminium er et sølvhvitt metall som er relativt lett med massetetthet på $2,7\text{kg}/\text{dm}^3$, som er omtrent $1/3$ av massetettheten til jern. I forhold til vekten kan bestemte aluminiumslegeringer være like sterke som jern da flytegrensen for aluminium kan variere fra 70 til 800 [MPa] avhengig av legeringstype. Aluminium er også formbart og blir derfor utnyttet til ekstrudering

av diverse konstruksjonsprofiler. Det har god ledeevne, dyktig korrosjonsbestandighet i kontakt med oksygen og er et ikke-magnetisk metall, samtidig er aluminium relativt enkelt å bearbeide med tradisjonelle bearbeidingsmetoder, samt egnes aluminium seg til anodisering da dette øker tykkelsen av det naturlige korrosjonsbeskyttende oksidlaget [16].

Det finnes en del forskjellige klassifiseringer av aluminiumlegeringer. ISO (International Standard Association) bruker Al benevning som ligner AA systemet av The Aluminium Association sitt system som igjen er mest brukt i verden da systemet inkluderer mye informasjon i leveringskodene. AA deler de syv mest brukte legeringene inn etter herdbare og ikke-herdbare legeringer, samt et generelt firesifferet nummer som karakteriserer legeringen etter hvilke tilsetninger det inneholder. Dette kan være alt fra jern, silikon, kopper, magnesium, mangan eller sink. En oversikt over herdbare og ikke-herbare legeringer er presentert i tabell 2.5.

Tabell 2.5: Oversikt av herbare og ikke-herdbare aluminiumlegeringer [63]

Serie	Primær tilsetning	Herdbare/ikke-herdbare
1xxx	99 prosent rent aluminium eller høyere	
2xxx	Kopper/Kobber	Herdbare
3xxx	Mangan	Ikke-herdbare
4xxx	Silikon	Ikke-herdbare
5xxx	Magnesium	Ikke-herdbare
6xxx	Magnesium og silikon	Herdbare
7xxx	Sink, kopper, krom og magnesium	Herdbare

Tabell 2.6 og 2.7 [16] gir en oversikt over herdemetodene og tilstandskode for både herbare og ikke-herdbare legeringer.

Tabell 2.8 viser materialeegenskapene til de aktuelle legeringstypene for et generelt CubeSat-prosjekt. Tabellen viser til materialene som er omtalt i CDS [51]

Ikke-primærstrukturer behøver ikke alltid å tåle like store belastninger som primærstrukturen. Slike komponenter kan produseres i plast hvis de tåler belastningene. Videre i kapittelet skal det presenteres flere plastmaterialer som kan være relevante med tanke på bruk i en CubeSat.

Tabell 2.6: Oversikt av herbare aluminiumlegeringer

Herdbare legeringer		
Legering	Hardhetsgrad	
xxxx	T x	Varmebehandlet
	T 2	Avkjølt fra varmformingstemperatur, kaldbearbeidet og utherdet ved romtemperatur (kaldutherdet)
	T 3	Innherdet, kaldbearbeidet og utherdet ved romtemperatur (kaldutherdet)
	T 4	Innherdet og utherdet ved romtemperatur (kaldutherdet)
	T 6	Innherdet og varmeutherdet

Tabell 2.7: Oversikt av ikke-herbare aluminiumlegeringer

Ikke-herdbare legeringer		
Legering	Hardhetsgrad	
xxxx	F	Som produsert
	O	Glødet
	H xx	Deformasjonsfasthet
Grad av kalddeformasjon		
	H x2	Kvart hard
	H x4	Halv hard
	H x6	Trekvart hard
	H x8	Fullhardhet
	H x9	Ekstra hard
Etterbehandlinger		
	H 1x	Kun formasjonsfasthet
	H 2x	Deformasjonsfasthet og delvis glødet
	H 3x	Deformasjonsfasthet og stabilisert ved lavtemperaturbehandling

Tabell 2.8: Oversikt av aktuelle legeringer

Aluminium	Herdetype	Min. flytegrense [Mpa]	Min. bruddstyrke [Mpa]	Forlengelses- grad %	Massetetthet [$\frac{g}{cm^3}$]	
5005	O	41,4	124	25	2,70	[46]
	H12	131	138	10	2,70	[27]
	H14	152	159	6	2,70	[28]
	H34	138	159	8	2,70	[29]
	H38	186	200	5	2,70	[30]
5052	O	89,6	193	25	2,68	[35]
	H32	193	228	12	2,68	[31]
	H34	214	262	10	2,68	[32]
	H36	241	276	8	2,68	[33]
	H38	255	290	7	2,68	[34]
6061	O	55,2	124	25	2,70	[36]
	T4	145	241	22	2,70	[37]
	T6	276	310	12	2,70	[38]
6082	O	60	130	25	2,70	[26]
	T4	110	205	14	2,70	[39]
	T6	250	290	10	2,70	[40]
7075	O	103	228	17	2,81	[41]
	T6	503	572	8	2,81	[42]

Plast

Plast er et syntetisk materiale som er anvendt i mange områder i dagens samfunn. Plast er i all hovedsak produsert av petroleum, men noen typer er også laget av cellulose. Plast deles inn i to hovedtyper; termoplast og herdeplast. Herdeplast kan ikke smeltes etter den har herdet og har fått sin endelige form ved fremstillingen. Termoplast kan formes på nytt ved smelting. Forskjellen skyldes at i en herdeplast henger alle polymerkjedene sammen i et nettverk, mens termoplast består av kjeder som ikke henger sammen [12]. Begge er basert på basisplast men får tilsatt forskjellige ingredienser som gir en kjemisk reaksjon slik at basisplasten omdannes til enten herde- eller termoplast [13]. Plastmaterialer sine egenskaper gjør at de egner seg godt 3D-printing. Denne oppgaven ser spesifikt på anvendelsen av ulike plastmaterialer til bruk i FDM metoden. De mest relevante plasttypene for FDM er ABS, PET og PLA. Alle tre plasttypene ligger på omtrent samme prispunkt på ca. 200-300 kr/kg.

ABS-plast er en type termoplast som brukes til lette og stive produkter. Kjemisk sett består ABS-plast av akrylnitril-butadien-styren kopolymerer, som har vært på markedet siden 1950 [10]. På grunn av at den er lett formbar og resirkulerbar er den populær. I tillegg er platen relativt sterk, og fleksibel nok til å gjøre den støttestistent. ABS er også mer varmeresistent enn PLA og vanlig PET. Dens egenskaper gjør at den egner seg godt til å lage funksjonelle produkter [2, 24].

PET er forkortelsen for Polyetylentereftalat og er en termoplast fra 1940-tallet. PET blir mye brukt til å lage beholdere, plastfolie, og brusflasker siden den er matsikker og gjennomsiktig. I likehet med ABS og PLA er platen også resirkulerbar [14]. Avhengig av hvilke egenskaper man er ute etter finnes det flere typer PET plater slik som PETG. Tilsetningen av glycol til PET gjør PETG er både sterkere og mer varmeresistent, nesten på lik linje med ABS. I tillegg til dette er PETG lite reaktivt med andre kjemikalier. En ulempe er at den tar til seg fuktighet og bør derfor ikke brukes eller lagres i fuktige miljø [1]. Både PET og ABS er relativt tungvinte å printe i forhold til PLA og krever en oppvarmet 3D-printer-plattform for å unngå vridning av komponenten når materialet kjøles ned. Dette gjør at de ikke egner seg veldig godt til prototyping.

PLA er forkortelsen for Polylaktid og er en termoplast. Platen kan fremstilles av plantebaserte oljer og i motsetning til mange andre plater er PLA ansett som biologisk nedbrytbar [11]. PLA er relativt lett og raskt å printe, og støttestrukturer kan enkelt brytes av. En bakdel er at

PLA er skjør i forhold til andre plasttyper og at den brytes ned over tid. Disse egenskapene gjør at plasten egner seg godt til prototyping av konsept, men mindre godt til bruk i ferdige deler eller funksjonelle prototyper [24, 2]

Nedenfor er en tabell som sammenligner ABS, PLA og PET sine materialegenskaper. Materialegenskapene kan variere basert på tilsetningstoffene i plasten.

Tabell 2.9: Sammenligning av plasttypene

Plasttype	Bruddstyrke [MPa]	Tetthet [$\frac{g}{cm^3}$]	Smeltetemperatur [°C]	
ABS	28-55	1-1,1[13]	177-320	[43]
PET	7-40	2,1-90	120-295	[44]
PLA	37,6	1,26	145-160	[20]

2.5 CAD og FEA

CAD står for «Computer Aided Design», som på norsk er datamaskin-assistert konstruksjon (DAK). Det er en metode som forenkler konstruering av tekniske tegninger ved hjelp av digitale løsninger. Alle typer tekniske tegninger som er laget med støtte fra datamaskiner kan betegnes som CAD. De fleste CAD-programmer har et visualiseringsprogram inkludert som gjør det enkelt å lage digitale tredimensjonale modeller. Parametere som er satt inn i programmet gjør det lett å endre detaljer i modellen. CAD brukes i mange fagfelt men er mest brukt innen arkitektur og ingeniørfag. Mange CAD-programmer har tilleggsfunksjoner slik som Finite Element Analysis [53].

«Finite Element Analysis» (FEA) er en digital metode som baserer seg på numerisk analyse og brukes for å analysere konstruksjoner ved å simulere scenario som er ønskelig å undersøke. For å utføre en FEA trengs det en CAD-modell. Det lages en matematisk modell som baserer seg på valgte belastninger, fastholdninger, materialegenskaper og den valgte typen analyse. Før analysen kan gjennomføres må det lages et elementnett over CAD-modellen. Det kan være en fordel å forenkle CAD-modellen for å minske kompileringstiden med for eksempel å fjerne detaljer i utformingen som ikke påvirker styrken. Elementnettet består av mange finite elementer. Elementene kalles *finit* siden de er små men ikke uendelig små, altså ikke infinitesimal i

størrelsen [22]. Den matematiske modellen blir brutt ned i disse elementene. Elementene kan være av første eller andre orden. Første ordens elementer inneholder bare knutepunkter ved hjørnene av elementet, mens andre ordens elementer har også knutepunkter midt på elementkantene. Andreordens elementer kan simulere avrundinger fordi kanten kan beskrives som en parabel, altså en kurve. Etter elementnettet er lagt til kan analysen bli løst numerisk. Tolkningen av resultatene må gjøres for hånd av ingeniøren og er avhengig av kravene som settes til konstruksjonen [22]. Ingeniøren velger også hvilken typer analyser som skal gjennomføres for å få nyttige informasjon. I de neste avsnittene forklares det forskjellige analyser. I dette prosjektet ble SolidWorks benyttet til analysene, og derfor gjelder all teori angående analysene spesifikt for dette programmet.

2.5.1 Styrkeberegning

En statisk analyse baseres på grunnleggende mekanikk. Ved statiske analyser antas det at materialet er lineært og belastningene er statiske. Med lineært material menes det at spenninger og tøying er proporsjonal. Dette samsvarer ikke med virkeligheten hvor det oppstår plastisk deformasjon og maksimale spenninger er begrenset av flyt eller brudd. Statisk belastning er konstant under hele analysen i motsetning til dynamiske belastninger som varierer over tid. For å kunne utføre en statisk analyse må fastholdninger, materialegenskaper, belastninger og elementnettet legges til CAD-modellen.

Spenninger beskrevet i analysen beregnes etter Von Mises-kriteriet. Von Mises spenning beskriver spenning i tredimensjonale objekter ved å ta hensyn på alle seks spenningstilstander. Disse er strekk i de tre koordinatretninger og skjær i de tre koordinatplan.

Von Mises spenning med seks spenningstilstander:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0,5 \times [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3 \times (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.1)$$

Hvor:

σ_x = strekkspenning i x-retning

τ_{xy} = skjærspenning i xy-plan

Von Mises spenning med tre spenningstilstander:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{0,5 \times [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]} \quad (2.2)$$

[22, s. 24]

2.5.2 Vibrasjonsanalyse

Målet med frekvensanalysen er å finne egenfrekvenser til én del eller sammensatt enhet. Nødvendige rammebetingelser er de samme som i den statiske analysen bortsett fra belastninger, som ikke skal legges til modellen. Resultatet av en frekvensanalyse er en liste med egenfrekvensene. Egenfrekvensen er et kritisk punkt i frekvensene til en del eller konstruksjon. Dersom vibrasjonsfrekvenser befinner seg i dette området kan det føre til store spenninger og deformasjoner i konstruksjonen. Alle konstruksjoner har en uendelig antall egenfrekvenser. Egenfrekvensene som er viktig å ta hensyn til er de som er innenfor frekvens-rekkeviddet til de opp-tredende vibrasjonene. Når geometrien endres, endres også egenfrekvensene. Om modellen har bare én frihetsgrad kan egenfrekvensen bli beskrevet som følgende:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

Hvor:

ω = vinkelfrekvens av svingning [rad/s]

m = masse [kg]

k = stivhet

[23, s. 36]

Sammenheng mellom vinkelfrekvens og frekvens målt i Hz er:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.4)$$

[22, s. 123]

For vibrasjonsanalyser kreves det egenfrekvensene til den analyserte konstruksjonen. For å så løse simulasjonen brukes superposisjonsprinsippet, som vil si at resultatet er et sammendrag av løsninger til de forskjellige modene fra frekvensanalysen.

En av de lineære dynamiske analysene er en harmonisk analyse. Ligningen til vibrasjon i en harmonisk analyse er en frekvensfunksjon som påvirkes av egenskapene vekt, demping og stivhet. Ligningen får følgende utforming:

$$[M]\ddot{d} + [C]\dot{d} + [K]d = F(\omega) \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

Hvor:

[M] = matrise av massen

[C] = demping matrise

[K] = stivhet matrise

$F(\omega)$ = vektor av belastningen på endepunktet, vektoren er en frekvensfunksjon

d = ukjent vektor av forflytting til endepunktet

[22, s.369]

Det trengs de samme rammebetingelser som i en frekvensanalyse med tillegg av en dynamisk belastning og demping. Ved en tilfeldig vibrasjon analyse er vibrasjonen ikke periodisk og har ingen repetisjon i seg. Det legges inn de samme rammebetingelser som i andre vibrasjonsanalyser. Resultatet er angitt i Root-Mean-Square (RMS) som viser sannsynligheten at deformasjonen eller spenningen opptrer. Den siste nevnte dynamiske analysen er Respons Spectrum analysen som undersøker den maksimale reaksjonen konstruksjonen kan ha [22].

2.5.3 Topologioptimalisering

Topologi er et matematisk område som befatter seg med former. I motsetning til geometrien har formene i topologien ingen fast definerte lengder og vinkler, men heller andre egenskaper som definerer formen. De to hovedfeltene i topologien er generell og algebraisk topologi. Til topologisk optimalisering brukes det algebraisk topologi [4].

Topologisk optimalisering (TO) er en designstudie som skal hjelpe ingeniøren å velge det mest optimale designet til en del med tanke på forholdet mellom vekt og styrke. Den kan brukes i produktutvikling av nye produkter og til optimalisering av et eksisterende produkt. Den mest populære matematiske modellen brukt til TO er *Solid Isotropic Material with Penalization method* (SIMP). TO basert på SIMP beregner hvor materialet skal være for å oppnå den beste styrken. Tradisjonelt i TO blir tettheten til elementene definert med binære verdier, hvor 0 betyr

tom, ingen material i elementet og 1 betyr massiv, fylt ut av material. Ved SIMP er tettheten bestemt relativt og kan variere mellom en minimal valgt tetthet og 1. Om den relative tettheten endres så endres også E-modulen til elementet. Denne endringen beskrives med formel 2.6. p-faktoren skal minske bidraget av elementer som har en verdi midtimellom 0 og 1, altså verken massiv eller tom. Dette skjer basert på potensloven. En god verdi for p er 3 etter [61].

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \quad (2.6)$$

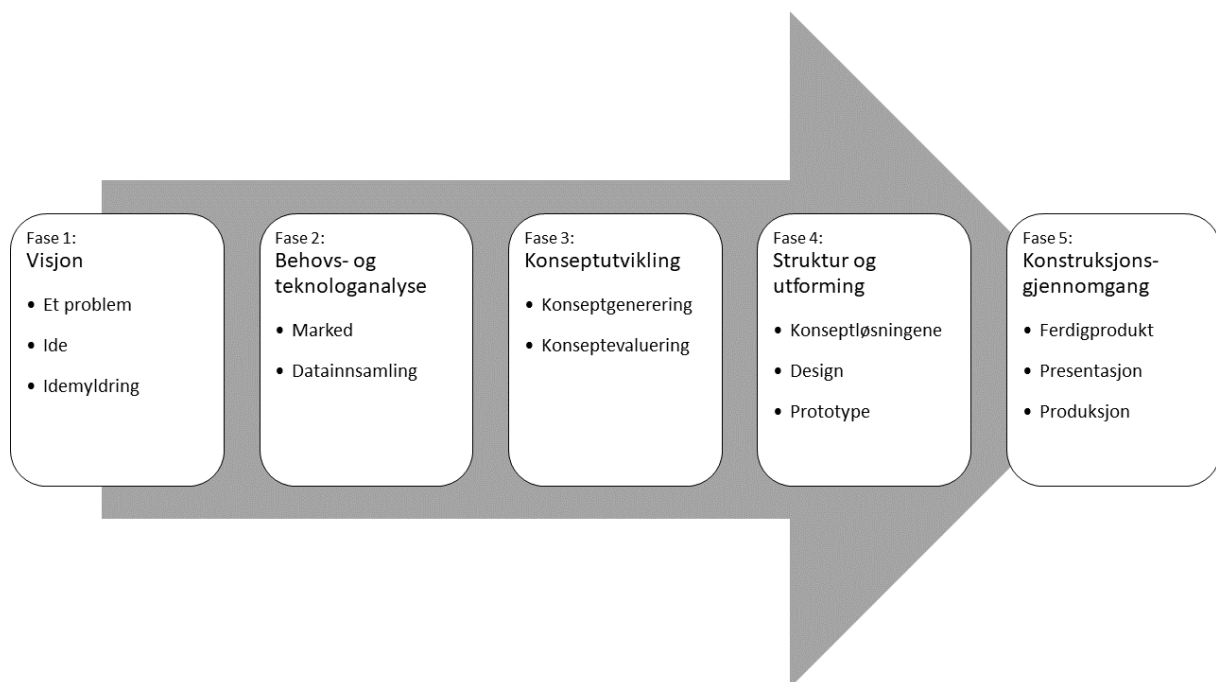
Når E-modulen reduseres minsker det samtidig styrken til elementet. Denne styrken beregnes etter følgende formel:[61]

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e \quad (2.7)$$

Resultatet oppnås med iterative algoritmer. Siden TO også er en FEA trengs det en CAD-modell, og de samme rammebetingelser som i de andre analysene nevnt tidligere for å gjennomføre analysen. Det vil si at det må bestemmes belastninger, materialegenskaper, fastholdninger og et elementnett. I tillegg kan det bestemmes tilleggskrav som områder hvor det ikke skal fjernes material. Målet til analysen må også velges. Et godt generelt mål er å oppnå det beste forholdet mellom styrke og vekt. Optimaliseringen av designet kjøres i en loop til resultatet er mest optimalt med hensyn på de valgte kravene [60].

2.6 Produktutvikling

Produktutvikling er en prosess som bidrar til utviklingen av et nytt produkt. Prosessen kan være bygget opp på mange forskjellige måter. Det finnes flere modeller som beskriver produktutviklingen. For denne oppgaven benyttes en metode basert på Ulrich og Eppinger [9]. I denne modellen deles hele produktutviklingsprosessen i fem faser som er vist i figur 2.1. I de neste avsnittene utredes formålet i hver fase og det presenteres metoder og verktøy som kan brukes i gjennomføringen av de forskjellige fasene.



Figur 2.1: Produktutviklingsfasene etter Ulrich og Eppinger

2.6.1 Fase 1: Visjon

Det bygges vanligvis opp en gruppe i fase 1 hvor man utpeker en prosjektleder og referent til møtene, og man lager en samarbeidsavtale. Hovedfokuset i denne fasen bør likevel være å ta hensyn til en problemstilling og et behov. Problemstillingen kan være en ide (problemløsning), eller eventuelt bare et problem uten en løsning. Det kan også være et eksisterende produkt som har forbedringspotensial. Ut fra problemstillingen kjøres det en idemyldring for å løse problemet. Slike idemyldringer beskriver problemet og forsøker å finne løsninger på det. Det finnes en del metoder innenfor idemyldring, der noen nevnte kan være «brainstorming», «bisosiasjon», «Scamper/ Osborns Checklist» og «power of three».

Idemyldring

Idemyldring er en prosess med hensikt å produsere flest mulig ideer innenfor en problemstilling. Generelt oppsett for idemyldring skjer ved at problemstillingen, mål eller ønske blir definert for hele gruppen, og ut ifra dette deles deltakerne opp i mindre grupper med tverrfaglige egenskaper og får 30-60min til å komme på en løsning. Inni individuelle grupper har alle medlemmer lov til å komme med sine ideer som etterpå skal presenteres for hele gruppen uten at de kritiseres, slik at den kreative tankeprosessen ikke forhindres. Etterpå er hele gruppen med på å stemme for hvilke ideer som skal tas med videre og hvilke som skal forkastes. Dette kan da gjentas til man har funnet en tilstrekkelig løsning.

2.6.2 Fase 2: Behovs- og teknologianalyse

Fase 2 fortsetter der fase 1 avsluttet, i denne fasen tar man resultatene fra de forskjellige idemyldringene og undersøker det opp mot markedet. Dette innebærer å undersøke om konseptene allerede eksisterer og om det finnes lignende løsninger. Samtidig er innsamling av data fra brukere sentralt for å se om interessen er der. Hvis noe må forandres kan man gå tilbake til fase 1 igjen. Når fase 2 er fullført går det over til konseptutvikling.

2.6.3 Fase 3: Konseptutvikling

Fase 3 inneholder en del trinn for konseptutviklingen. Konseptgenerering omhandler systematisk søk etter alternative løsninger. CAD kan bli brukt for å lage skisser. Til konseptvalg bruker man en del teknikker og kombinerer gjerne ulike løsninger ved hjelp av f.eks. morfologisk tabell. Dersom man ønsker å evaluere konseptene kan en evalueringmatrise benyttes. I fasen skal usikkerheter fjernes, og en skal være trygge på at produktet lar seg realiseres. Også her er det mulig å starte på fase 1 igjen dersom konseptvalg ikke kan konkluderes. Etter konseptvalget er tatt går man over til neste fase.

Morfologisk tabell

En morfologisk tabell gir en oversikt over de forskjellige konseptene basert på deres delfunksjon, og hjelper til med å sette sammen forskjellige versjoner av et produkt. Ofte lages en rad med funksjoner og en tilhørende kolonne med konsepter for hver funksjon. Dette skaper en oversikt over hvilke alternativer som finnes for å oppfylle hver av funksjonene. Dermed kan man velge hvilke konsepter som skal tas i bruk for å utføre den aktuelle funksjonen. På denne måten gjør en morfologisk tabell det enklere å sette sammen en optimal kombinasjon av konsepter samtidig som det potensielt fører til nye, uoppdagede løsninger. Den morfologiske tabellen fungerer bra i samspill med en evalueringstrise.

Evalueringstrise

En evalueringstrise er en matrise som brukes til å velge ut konsepter og ideer til et produkt, basert på hvor godt de oppfyller forhåndsbestemte evalueringstrisekrav. Evalueringstrisekravene kan være krav til fysiske egenskaper, faktorer som påvirker kostnad, kompleksitet, brukervennlighet, miljøvennlighet osv. En poengsum gis etter hvor godt konseptene utfyller kravene. Skalaen kan for eksempel ligge mellom 1-5 poeng. Når evalueringstrisekravene er vurdert summeres poengene til slutt for hvert konsept. Vekting av krav kan også legges inn som en faktor som påvirker poengsummen kravet gir. Til slutt vil man stå igjen med en endelig poengsum. På denne måten kan man se hvilket konsept som i størst grad utfyller kravene. Evalueringstrisen gir dermed et grunnlag for å kunne utpeke de beste konseptene.

2.6.4 Fase 4: Struktur og utforming

Overgangen fra konseptutvikling til struktur og utforming henger mye sammen og blir ofte sett på som en stor fase. I fase 4 bearbeides prinsippstrukturen som vil si den funksjonsmessige sammenhengen mellom produktets viktigste komponenter. Det tas stilling til viktige parametre som f.eks. plasseringen av funksjonsflater. Ofte skjer dette i form av en CAD-tegning for å enklere kunne visualisere og endre på produktet. Til slutt sammenlignes forskjellige konfigurasjoner med tanke på styrke og stivhet, materialvalg og funksjonalitet.

2.6.5 Fase 5: Konstruksjonsgjennomgang

Fase 5 er sammenlikning og vurdering av resultater. Her blir prototyper i forhold til spesifiserte mål og produksjonsmetoder grunnlaget for valg av det ferdige produktet. I denne fasen kan produktet presenteres for deltakere som ikke er involvert i konstruksjonsgjennomgangen slik som forbrukere og investorer ved hjelp av fysiske eller digitale prototyper.

Prototyping

En prototype er en modell av en individuell komponent eller produkt. Prototyping kan deles inn i to hovedgrupper: et fysisk produkt og digitalt produkt. Ofte benyttes prototyper som et fysisk bevis for at oppfinnelsen kan produseres og/eller fungerer. Fysiske prototyper kan også gå gjennom flere former for testing i den virkelige verden. På den andre siden har man digitale prototyper. En digital prototype i form av en CAD-tegning blir ofte brukt som en prototype i tidligere faser. CAD i lag med FEA gir muligheter til simulere og evaluere prototypene fortløpende for å kontinuerlig videreutvikle produktet [21], uten å måtte konstruere en fysisk modell som tar opp mye tid. En slik utviklingsprosess kalles for rapid prototyping, som er en av mange metoder som blir omtalt i neste kapittel.

3 Metode

Dette kapitlet vil ta for seg hvilke metoder som er brukt i de forskjellige produktutviklingsfasene, samt hvordan disse metodene ble benyttet til å utvikle en komplett CubeSat ramme. Fokuset er satt på behovs- og teknologianalysen, konseptutvikling, prototyping og simulering ettersom disse aspektene har vært de største og viktigste delene av produktutviklingsprosessen. Før man begynner å se på spesifikke konsepter er det nødvendig å sette rammer og begrensninger for prosjektet, noe som er beskrevet i kapittel 3.1.

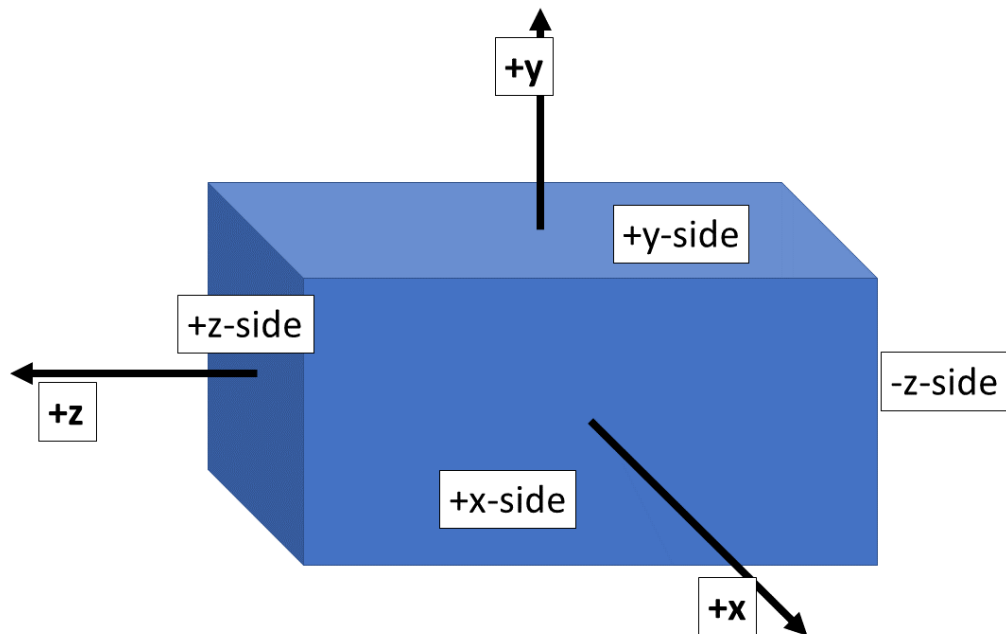
3.1 Behovs- og teknologianalyse

Delkapittel 3.1 har som mål å gi innsikt i det som ble gjort for å legge grunnlaget for konseptutviklingen. Det viser til hvordan gruppen har arbeidet for å utlede rammebetingelser, begrensninger og mål ut ifra CubeSat standarden, oppdragsgiveren sine ønsker.

3.1.1 Rammebetingelser og begrensninger

Utformingen av rammen er begrenset av forskjellige rammebetingelser. Rammen skal brukes til en 2U CubeSat og designes etter CubeSat Design Specifications. I denne oppgaven brukes det versjon 13 fra CDS[51]. Det ble også sett på CDS 14[17] som fortsatt var i utkast fasen under oppgavens tidsrom. Siden rammen skal brukes i fremtidige prosjekter brukes det versjon 14 som en innblikk i framtiden men alle spesifikasjoner følger versjon 13. Etter CDS er de ytre dimensjonene til en 2U ramme $100 \times 100 \times 227$ [mm]. Alle toleransene til rammen er +/- 0,1mm bortsett fra den totale lengden hvor toleransen er +/- 0,2mm. Ifølge CDS 13 skal satellitten ha en maksimal vekt på 2,66 kg, men etter versjon 14 av CDS kan en 2U CubeSat ha en vekt på opp til 4 kg. Denne vekten brukes som dimensjoneringsfaktor i testing av rammen. Videre definerer CDS et koordinatsystem for dispenseren som rammen skal ligge i. I dette prosjektet baseres rammen sitt koordinatsystem på dette, slik at x-, y- og z- aksene stemmer overens med hverandre. Dermed defineres z-aksen som parallell med de lange sidene av rammen og x-aksen samt y-aksen er parallell med de korte sidene. Origo til det lokale koordinatsystemet ligger i det

geometriske senteret til satellitten. Sideflatene kalles tilsvarende $\pm x$ -side, $\pm y$ -side og $\pm z$ -side. Se figur 3.1.



Figur 3.1: Det lokale koordinatsystemet til satellitten

Hjørnene som er parallelle med z-aksen kalles «rails» og har kravet om å ha en bredde av minst 8,5 mm ut fra kanten (CDS 3.2.5). I tillegg skal hjørnene til rails være avrundet med en radius av minst 1 mm (CDS 3.2.7). Overflateruhet til rails er påkrevet til å være mindre enn $1,6\mu\text{m}$ (CDS 3.2.6). Z-sidene kan bli kalt endeflatene. I hjørnene til endeflatene skal det plasseres hjørneklosser, såkalte «standoffs» som er definert til å være $8,5\text{mm} \times 8,5\text{mm}$ med en høyde mellom 0,5 og 7,0 mm. Kontakflaten og dermed toppflaten av standoffs skal være minst $6,5\text{mm} \times 6,5\text{mm}$ (CDS 3.2.8). Minst 75% av overflaten til rails skal være i kontakt med dispenserens (CDS 3.2.9). For motvirkning av kaldsveising må rails og standoffs være hard anodisert (CDS 3.2.16). I standoffs på -z-side skal det installeres to separasjonsfjærer som er plassert diagonalt i forhold til hverandre (CDS 3.2.17). Primærstrukturen til rammen og rails skal lages av Aluminium 7075, 6061, 5005 eller 5052 (CDS 3.2.15). Det kreves at satellitten har minst én «killswitch». Dette er en bryter som skal forhindre strøm å gå gjennom de elektriske kretsene i satellitten når den er plassert i dispenserens (CDS 3.3). Videre har Orbit har angitt at det antas at rammen er plassert med z-aksen parallell til jordoverflaten og y-aksen i positive retningen er oppskytningsretningen. Ut fra definisjoner i CDS lanseres satellitten i den positive z-retningen.

3.2 Konseptutvikling

Delkapittelet skal vise hvordan konseptutviklingen har foregått, hvordan ulike metoder ble benyttet og hvilket utstyr som ble brukt.

Til konseptutvikling og analysering av satellittdelene ble det brukt SolidWorks (SW) som er et dataprogram som støtter både CAD, FEA og TO. SW gjør det er mulig å hyppig 3D-modellere og kjøre ønskede analyser fortløpende, og passer derfor utmerket til utvikling av konsepter. Gruppen valgte å bruke SW ettersom gruppe medlemmene har tidligere erfaring med programmet samtidig som det tilfredsstillende behøver for design og simulering i dette prosjektet.

Konseptutvikling må skje innenfor de satte rammebetingelsene. Det betyr at konsepter må holdes innenfor spesifikasjonene som definerer en CubeSat, samtidig som målene og ønskene fra oppdragsgiveren tilfredsstilles. Når rammebetingelsene var på plass kan konseptutviklingen begynne. Det første steget i konseptutvikling var idemyldring. Målet var å skape et flertall av konsepter som kunne være med på å oppfylle målene som ble satt. Forskjellige områder på rammen utfører forskjellige funksjoner, og det kan oppnås på flere måter. Derfor ble konseptene kategorisert etter hvilken funksjon de utfører og satt inn i en morfologisk tabell. Hvert gruppe medlem fikk frihet til å finne ideer til hver kategori. Etter en begrenset tidsperiode samlet gruppen seg og presenterte konseptene. All form for kritikk ble unngått for å ikke forhindre kreativitet. Skisser og enkle CAD-tegninger ble benyttet for å visualisere og formidle ideene. Prosessen ble gjort flere ganger helt til en ønskelig mengde konsepter var generert.

Konseptene fra idemyldringen ble satt opp i en morfologisk tabell. Det gav gruppen en oversikt over hvilke konsepter som finnes for hver av underfunksjonene på rammen, samt hvilke konsepter som kan fungere bra sammen. Kun konseptene som ble ansett som mulige løsninger ble satt inn i den morfologiske tabellen. Se tabell 4.1. Opp til tre konsepter per underfunksjon fra den morfologiske tabellen ble valgt ut og satt inn i en evalueringstrinnsmatrise for å vurdere deres egenskaper. Konseptene ble vurdert etter brukervennlighet, styrke/stabilitet/reliabilitet, hvor enkel delen er å produsere, hvor enkel delen er med tanke på antall deler, og om det er utførbart. Brukervennlighet, vekt, og hvor enkel delen er å produsere ble vektet tyngre enn resten av vurderingskriteriene. Dette er bestemt basert på ønskene til Orbit. Deretter ble konseptene tegnet i CAD-programvare der hensikten var å danne grunnlaget for rapid prototyping prosessen samt å sette lys på uforutsette problemer med deres utformingen.

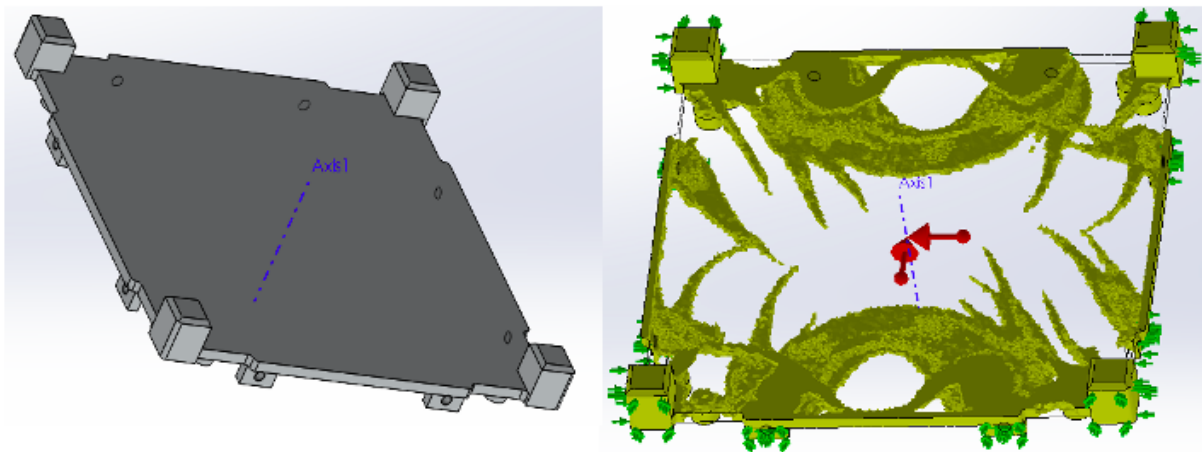
Med tanke på målene for prosjektet utmerket enkelte konsepter seg som de beste løsningene basert på evalueringsmatrisen. Disse konseptene ble derfor valgt ut som grunnlaget for det komplette konseptet som skulle videre utvikles i Struktur- og Utformingfasen. Grunnlaget for valgene som ble tatt er videre utdypet i kapittel 4.

3.3 Struktur og Utforming

Delkapittelet Struktur og Utforming skal ta for seg hvordan rapid prototyping, topologioptimalisering, og styrkeberegning har blitt brukt for å utforme konseptene etter prosjektets mål.

3.3.1 Rapid prototyping med bruk av topologioptimalisering

Resultatet fra konseptutviklingsfasen ble tatt inn i TO med hensikt å videreutvikle konseptet hvor TO ble brukt i to separate steg. På første steg ble det brukt på en massiv plate som konsept B1 for å finne en optimal utforming med tanke på styrke i forhold til vekt. Et eksempel av dette er vist på figur 3.2. Deretter ble det kjørt TO for å finne muligheter for å fjerne mer materiale, slik som konsept B2. Se tabell 4.1.



Figur 3.2: Eksempel: Topologioptimalisering av en massive endeplate. Til venstre er platens massive utgangspunkt fra konsept. Til høyre er resultatet av analysen. Det gule må beholdes, resten av massen kan i følge analysen fjernes.

Et av målene var å få satellitten så lett som mulig med hensyn på styrke og stivhet. Dermed ble TO hyppig brukt under rapid prototyping av de individuelle delene til rammen, med mål å redusere materialbruk mest mulig samtidig som tilstrekkelig styrke og stivhet blir opprettholdt. Rapid prototyping er en utviklingsprosess av det originale designet, og prosessen kan gjøres

gjentatte ganger. Det originale designet ble gjennomgått for å finne mulige modifikasjoner slik som endring av materiale, utforminger eller produksjonsmetodene. Når en ny digital prototype ble konstruert, ble delene analysert med simulasjoner for å teste deres styrke.

3.3.2 Analyse av komponenter

Analysing av de individuelle delene til rammen var en viktig del av prosessen for å undersøke om forandringene som ble gjort på grunnlag av TO var forstandige med tanke på kravet om rammens styrke og stivhet. Etter TO ble satellittdelene testet gjennom en forhåndsbestemt testprosedyre. Prosedyren tok delene gjennom simulasjoner av kjente belastninger som forekommer under oppskytning ved hjelp av FEA-verktøyet. Se kapittel 2.2 for mer informasjon om belastningene. Analysene i prosedyren inneholdte en statisk-, en egenfrekvens-, og en «shock response spectrum» analyse i lag med to forskjellige vibrasjonsanalyser. Analysene er beskrevet i de følgende avsnittene.

3.3.3 Styrkeberegning

Belastningen i styrkeberegningen ble gjort om til en statisk analyse som består av 2 komponenter. Dispenserens fjær påfører en kraft $F = 44,4N$ på rammen gjennom standoffs til en hver tid mens rammen ligger i dispenserens. Kraften virker direkte på overflaten til standoffs i xy -planet ved $-z$ -siden. I tillegg virker det g -krefter på rammen under oppskytning. Maksimalverdiene som er fremhevet i Falcon User's Guide tas med i simulasjonene, se tabell 2.1. Den aksiale akselerasjon antas å virke gjennom y -aksen, mens den laterale kan virke langs både x - og z -aksen, dog ikke samtidig. Hensikten med styrkeberegningen få et grunnlag på hvor spenninger oppstår og eventuelle svake ledd man kan ta hensyn til før videre TO ble utført.

3.3.4 Vibrasjonsanalyse

I vibrasjonsanalysen gjennomgikk satellittdelene først en frekvensanalyse for å finne egenfrekvensene. Ut fra frekvensanalysen ble delene tatt videre med til en harmonisk vibrasjonsanalyse, tilfeldig vibrasjonsanalyse og sjokkanalyse (SRS). For den harmoniske analysen ble det benyttet en egentilpasset frekvenskurve hvor punktene fra tabellene 2.4 plottes inn. For vibrasjonsanalysen med tilfeldig vibrasjon benyttes en egentilpasset frekvenskurve hvor punktene fra tabell 2.3 plottes inn. Til slutt benyttes også en egentilpasset frekvenskurve benyttes hvor

dataene fra Shock Respons Spectrum (i tabell 2.2) plottes inn i. Den aksiale belastningen er alltid i y-retning, mens de laterale belastningene må testes i både x- og z-retning. Konfigurasjoner av delene som gjennomgikk styrkeberegning, vibrasjonsanalyse og sjokktest med relative høye sikkerhetsfaktorer gjennomgikk en ny runde med TO.

Etter alle enkeltdelene var tilstrekkelig utviklet og testet på egenhånd ble de satt sammen til en komplett ramme som ble analysert i sin helhet som en del av konstruksjonsgjennomgangsfasen.

3.4 Konstruksjonsgjennomgang

Konstruksjonsgjennomgang var den siste fasen for utviklingen av rammen hvor alle individuelle deler ble sammensatt for videre analysering, og til slutt 3D-printet for å evaluere en fysisk form.

Analyse av komplett ramme

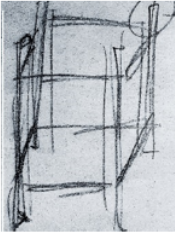

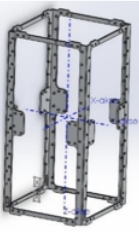
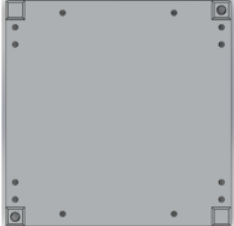
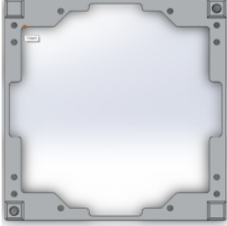
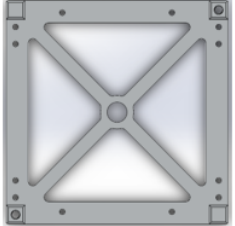
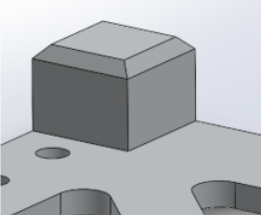
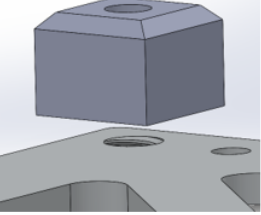
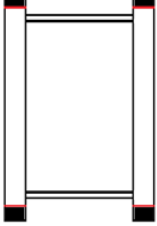
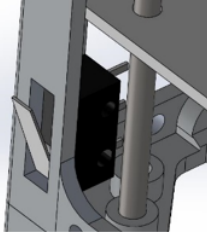
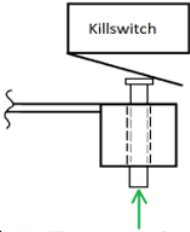
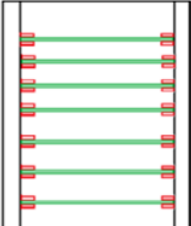
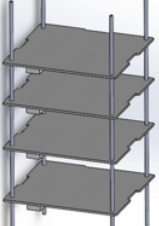
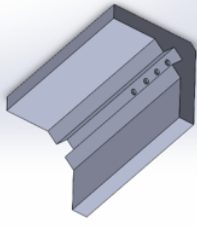
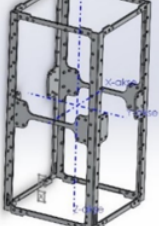

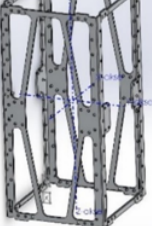
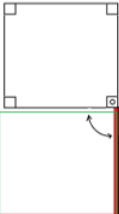
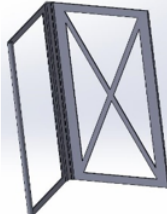
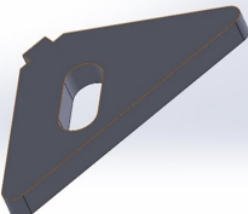
Analyse av sammensatt ramme var siste steget i prosjektet. Ved testing av rammen ble alle delene satt sammen til en assembly for å gjennomgå samme prosedyre som hver individuelle del har gjennomgått. Videre ut fra det ble det lagt til ekstra masse på kretskortene for simulere verste lasttilfeller under hver analyse i prosedyren. Hensikten med det var å finne de svakeste punktene i et verste tilfelle for å evaluere om rammen er forsvarlig å bruke eller ikke. Til slutt ble rammen i sin helhet 3D-printet for å evaluere utformingen med en fysisk og visuell inspeksjon.

Resultatet fra bruken av metodene som er omtalt i kapittel 3, er videre utdypet i kapittel 4, 5 og 6 hvor fokuset ligger på begrunnelsen bak valgene som ble gjort og resultatene fra rammens utvikling.

4 Konseptutvikling

Kapittel 4 drøfter begrunnelsene bak hvilke konsepter som ble valgt ut fra fra idemyldringen. Basert på den morfologiske tabellen (tabell 4.1) tar kapittelet for seg funksjon for funksjon der fordeler og bakdeler veies opp mot hverandre. Det er nødvendig å utføre konseptvalg med målet til prosjektet i fokus. Målet er å skape en ramme som er lettest mulig samtidig som den er brukervennlig og billig å produsere. For å gjøre produksjonen billig forsøkes det å gjøre rammen lett å produsere, slik at relativt enkle produksjonsmetoder kan benyttes. Videre er valgene som har blitt tatt angående konsepter vært svært preget av hvor godt konseptene oppfyller kravene om vekt og kostnad.

Tabell 4.1: Morfologisk tabell med utvalgte konsepter som var ansett som mulige løsninger

	<u>Konsept/funksjon</u>	1	2	3
A	<u>Hovedenhet</u>			
B	<u>Topp/bunn</u>			
C	<u>Standoffs</u>			
D	<u>Killswitch</u>			
E	<u>Kretskort fastholdning</u>			
F	<u>Støttestrukturer</u>			
G	<u>Annet</u>			

4.1 Hovedenhet

Etter idemyldringen stod tre konsepter frem som gode løsninger på designet til en hovedstrukturen til rammen. Konseptene ble vurdert etter hvor godt de passer målene til prosjektet om å være enkel, brukervennlig, lett og enkel å produsere. Konsept A1 er et relativt komplekst design. Det går ut i fra å ha 4 separate rails som kobles sammen av braketter som skrur fast i hver ende av railene. Alle delene antas å måtte maskineres ut. Dette konseptet medfører mange separate deler: 4 rails, 2 eller flere braketter avhengig av design, og mange skruer. Utformingen av designet gjør at rammen må demonteres for hver gang kretskortene «stacken» skal inn og ut av rammen. Denne faktoren kombinert med mengden deler gjør at konseptet ikke er er veldig brukervennlig eller enkelt i forhold til de andre konseptene. Antall deler og utformingen gjør også at produksjonen kan være mer tidskrevende, avhengig av design. Vekten antas å være lett, men at den muligens kan reduseres ved bruk av andre design ettersom brakettene er nødt til å være relativt tykke. I sin helhet anses konseptet som å være tilstrekkelig robust.

Konsept A2 går ut i fra å bruke en tynnplate hvor ønskede geometrier maskineres ut, og så bøyes platen for å skape den ytre strukturen til rammen. Dette konseptet krever også en topp- og bunnplate som kan festes i hovedenheten. Det er et simpelt design med få deler, og er antatt å være brukervennlig. Konseptet har også potensiale til å oppnå lav vekt avhengig av hvor mye materiale som kan fjernes mens tilstrekkelig styrke og stabilitet opprettholdes. Bakdelene med designet ligger i produksjonen av enheten. Platene er nødt til å være bøyd slik at rammen blir nøyaktig $100\text{mm} \times 100\text{mm}$, i tillegg til at vinklene må være nøyaktig 90 grader for at satellitten skal passe og ikke sitte fast i dispenseren. I tillegg til dette trengs det å sammenføre begge endene. Endene må enten sveises sammen, eller skrur sammen ved hjelp av to overlappende flater. Sveising kan medføre deformasjon på grunn av varmen, i tillegg til å legge på masse slik at massesenteret til rammen forflytter seg, som er ugunstig med tanke på symmetri. Ved overlapping må det svært små og nøyaktige bøyninger til for å lage en overlapp uten å endre på vinklene til hjørnene på rammen. På en millimeterskala som dette er det unødvendig vanskelig. Det skaper også ujevnt fordelt masse som flytter på massesenteret. I tillegg til det oppstår det en utstikkende masse på enten innsiden eller utsiden av rammen som kommer i veien for enten kretskortene eller solcellepanelene. Utfordringene med produksjon av dette konseptet gjorde at konseptet ble sett på som for vanskelig å produsere og ble dermed forkastet.

Konsept A3 bygger på konsept A2 hvor man har en enkelt hovedenhet og tilhørende topp-

og bunnplater. I stedet for å benytte en tynnplate som bøyes, kan det brukes en standardisert ekstrudert $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ profil i aluminium. På denne måten er det sikkert at profilen er nøyaktig $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ og at vinklene er 90 grader. Profilen kappes i riktig lengde og den ønskede geometrien på sideflatene til profilen kan maskineres ut. Dette gjør produksjonsaspektet relativt enkelt. Når det kommer til styrke og stabilitet anses konseptet som solid ettersom alt er én enkelt del uten noen sammenføyninger.

Eventuelle støttestrukturer på sideneflatene til rammen kan modifiseres etter behov for vekt, styrke og stabilitet. For å minske vekten og beholde styrken i rammen tar konsept F1-3 forskjellige ideer til hvordan støttestrukturer kan skjæres ut i stedet for å ha massive sideflater. En ulempe er hvis geometriene blir veldig tynne, slik at fresen har potensiale til å ødelegge rammen under produksjonsprosessen må tas hensyn til. Dette blir videre utforsket i struktur- og utformingfasen i kapittel 5.1.

Til slutt ble det bestemt at konsept A3 skulle tas med i videre utvikling på grunn av konseptets potensiale til å være både lett, sterkt og relativt enkelt å produsere samtidig som det beholder brukervennligheten som A2 har.

Tabell 4.2: Evalueringsmatrise av hovedenhet

Score (1-5)	Hovedenhet / Rails			Vekting
	A1	A2	A3	[Faktor]
Brukervennlighet	3	5	5	1.3
Vekt	3	4	4	1.2
Styrke/stabilitet/ reliabilitet	4	3	4	1
Enkelhet (produksjon)	3	1	4	1.3
Enkelhet (få komponenter)	2	4	5	1
Utførbar?	Ja	Nei	Ja	-
Sum	17.4	19.6	25.5	-

4.2 Festemekanisme til kretskort

Konsept E1 var tenkt å kunne holde fast kretskortene med to skinner med spor som går langs to sider av hovedenheten slik at kretskortene kunne presses inn og på plass uten å måtte feste kortene videre. Akkurat slik som man setter en rist inn i en stekovn. Størrelsen på kretskortene gjør at det trengs å skjæres ut spor i rails. Med tanke på vekt er dette designet det mest optimale, men fører til lav styrke og stabilitet. Spesielt hvis det er ønskelig å ha mulighet for å ha mange kretskort eller mange forskjellige plasseringer av kretskortene. På grunn av dette gikk gruppen bort fra konsept E1.

Et lignende konsept er E3+G3 som baserer seg på braketter med hull som matcher kretskortene sine skruehull. Kretskortene kan festes i brakettene og plasseres i hovedenheten hvor de skrues fast med skruer gjennom hull i rails (E3). Dette gir brukeren mange muligheter for å tilpasse plasseringen av kretskortene. Bakdelen med konseptet er at det krever mange braketter, spesielt hvis man skal ha en brakett per hjørne. Hvis brakettene viser seg å måtte være laget av metall i motsetning til plast blir den ekstra vekten uakseptabel med tanke på målene for prosjektet. Produksjon av brakettene påfører ekstra uønskede kostnader i form av materiale og mer tidsbruk. Ikke minst er det mye arbeid å installere brakettene for brukeren i forhold til hvor gode tilpasningsmuligheter man oppnår.

Det tredje alternativet er konsept E2 hvor kretskortene tres på gjengestenger og låses fast med PCB-spacere på begge sidene av kretskortene. Gjengestengene festes så i bunn- og topplatene. For å passe i hullene til PC104 kretskortene må gjengestengene ha en diameter lik 3mm [6]. Konseptet er brukt av mange andre CubeSat-design og er et design som er testet og fungerer. Det er ikke like vektbesparende som E1, men er betydelig sterkere og mer stabilt. Gjengestenger er standardiserte deler og kan kjøpes inn i rett kvalitet og størrelse slik at produksjonen blir simplificert, men konseptet har også innvirkning på produksjonen til endeplatene som må holde de fast. Likevel er det enklere enn konsept E1 og E2. På grunn av konseptets enkelhet og styrke i forhold til de andre konseptene ble konsept E3 valgt ut som det beste konseptet av de tre og tatt med videre i prosjektet.

I tillegg til den vanlige festeanordningen til kretskortene ønsket Orbit en enkel måte å montere og demontere kretskort uten å måtte feste de til gjengestengene når de tester plasseringen til kretskortene i prosjektene sine. For å løse dette problemet kom gruppen frem til å basere seg på konsept E3+G3 for å konstruere en brakett som enkelt kan festes til kretskortene, og tas inn og ut

uten mye arbeid. Det var tenkt å bruke splinter i plast som presses inn i braketten gjennom hull i hovedenheten for å holde de på plass. På den måten kan brukeren hurtig forandre posisjonen til kretskortene. Dersom brukeren har behov for å feste brakettene bedre fast kan gjenneinnsatser settes inn i braketten slik at de kan skrues fast i stedet. Utformingen og utviklingen av dette konseptet er videre diskutert i kapittel 5.3. Videre i oppgaven omtales denne festeanordningen som braketter med mindre det er spesifisert at det snakkes om en annen type brakett.

Tabell 4.3: Evalueringsmatrise for kretskort festemekanisme-konseptene

Score (1-5)	Kretskort festemekanisme			Vekting
	E1	E2	E3+F3	[Faktor]
Brukervennlighet	3	4	4	1.3
Vekt	5	4	3	1.2
Styrke/stabilitet/reliabilitet	2	5	5	1
Enkelhet (produksjon)	2	4	3	1.3
Enkelhet (få komponenter)	4	4	3	1
Utførbar?	Kanskje	Ja	Ja	-
Sum	18.5	24.2	20.7	-

4.3 Endeplate

På grunn av valget om å bruke konsept A3 som hovedenhet ble det et naturlig valg å benytte en endeplate i begge endene, ettersom behovet for braketter til å sammenføre hovedenheten falt bort. Endeplatene sitt formål er å gjøre det mulig å feste gjengestengene, og fungere som et festepunkt for solcellepanel eller antenner som kan skrues fast i endene på en CubeSat. Konseptene B1, B2 og B3 varierer kun i hvor mye materiale som er fjernet fra platen, der B1 ikke har fjernet noe materiale og B2 er et konsept hvor mest mulig er fjernet. Desto mer materiale som kan fjernes, desto bedre med er det med tanke på vekt. En større åpning medfører også at brukeren har lettere tilgang til komponentene inni rammen ved sammensetning av satellitten. Det er altså gunstig å fjerne så mye materiale som mulig mens konstruksjons beholder tilstrekkelig styrke. Det var usikkert på dette stadiet hvor mye materiale som kunne fjernes før strukturen kollapser under belastningene som forekommer. Derfor ble det bestemt at det skulle utføres TO på endeplaten for å bestemme hvor mye materiale som kunne fjernes.

Tabell 4.4: Evalueringsmatrise for endeplate-konseptene

Score (1-5)	Topp/bunn			Vekting
	B2	B3	Braketter i stedet for plate	[Faktor]
Brukervennlighet	5	4	4	1.3
Vekt	4	3	4	1.2
Styrke/stabilitet /reliabilitet	4	5	4	1
Enkelhet (produksjon)	4	4	4	1.3
Enkelhet (få komponenter)	5	5	3	1
Utførbar?	Ja	Ja	Ja	-
Sum	25.5	24	22.2	-

4.4 Standoff

Valget av standoff-konseptet blir påvirket av de andre konseptene som blir valgt. Konsept C3 er at standoffene er samme del som railene. Dette fungerer ikke når railene er en ekstrudert profil, og ettersom standoffene må være massive slik at separasjonsfjærene kan skrues fast i dem så utgår dette konseptet. På grunn av dette trenger man en brakett eller en topp/bunnplate som standoffen kan være festet på. Konsept C1 er standoffs som er en del av topp/bunnplata hvor de maskineres ut av samme blokk av aluminium som resten av platen. Konsept C2 er løse standoffs som kan skrues fast. På grunn av kretskortstandarden som brukes kommer mutrene i konflikt med standoffklossene når de skal monteres på gjengestengene fra siden hvor standoffklossene står. Dermed kan konsept C2 benyttes dersom gjengestengene er nødt til å festes på samme side som standoffs. Det er klart at det er mindre brukervennlig å måtte feste totalt 8 standoffs, i forhold til ingen slik som i konsept C1. Produksjonen blir også mer tidskrevende ved bruk av konsept C2. Det var mest ønskelig å bruke konsept C1 på grunn av dens enkelhet og brukervennlighet, men det var for usikkert å bestemme designet på dette stadiet. Dermed ble begge løsningene tatt med videre i utviklingsprosessen som potensielle løsninger.

Tabell 4.5: Evalueringsmatrise for standoff-konseptene

Score (1-5)	Standoffs			Vekting
	C1	C2	C3	[Faktor]
Brukervennlighet	5	3	5	1.3
Vekt	0	0	0	1.2
Styrke/stabilitet/reliabilitet	5	4	5	1
Enkelhet (produksjon)	4	3	4	1.3
Enkelhet (få komponenter)	5	3	5	1
Utførbar?	Ja	Ja	Bare hvis hovedenheten	-
Sum	21.7	14.8	21.7	-

4.5 Killswitch

En killswitch brukes for å bryte en elektrisk krets. Når killswitchen er trykket inn og aktivert, brytes kretsen som går gjennom den. Når satellitten er i dispenserens, skal det ikke gå strøm fra batteripakken til de andre elektriske komponentene. Det betyr at når satellitten settes inn i dispenserens må killswitchene aktiveres. I konseptutviklingsfasen kom gruppen frem til to konsepter som utmerket seg.

Konsept D1 fungerer ved at bryteren til killswitchen stikker ut gjennom en utskjæring i en rail. Killswitchen festes til den andre siden av samme rail med skruer fra utsiden som ikke stikker ut over overflaten til railen. Når satellitten plasseres i dispenserens blir bryteren trykket inn av railene til dispenserens som er i kontakt med rammen sine rails, og dermed brytes kretsen. Når satellitten blir dyttet ut av dispenserens er det ikke noe som holder inne bryteren slik at kretsen lukkes.

Konsept D2 baserer seg på en løstsittende sylinder som sitter i standoffene som kan bevege seg langs z-aksen. Sylindren plasseres fra innsiden av rammen og går gjennom standoffen, ut på yttersiden. På innsiden av rammen, rett over sylindren plasseres killswitchen med bryteren rettet mot sylindren. Når rammen plasseres i dispenserens, kommer standoffene i kontakt med bunnen av dispenserens eller standoffene til en annen satellitt. Da blir sylindren trykket inn og kommer i kontakt med bryteren til killswitchen som også blir trykket inn. Når satellitten forlater dispenserens er det ingenting som holder sylindren på plass, og dermed lukkes kretsen. Når det kommer til enkelhet er det klart at D1 er simplere. Det kreves ingen ekstra komponenter som må produseres bortsett fra to skruer, som lett kan fås tak i. Produksjonsprosessen er også relativt simpel ettersom det bare må freses ut en åpning i railene og bores to hull for å feste killswitchen. Dette gjør at konseptet er veldig enkelt å benytte for brukeren. Det påløper ingen ekstra kostnader ved produksjon ettersom at rammen allerede må maskineres, i tillegg til at det forekommer en liten reduksjon i vekt. Bakdelen med dette konseptet er at styrken til rammen reduseres litt på grunn av utskjæringen.

D2 konseptet krever at det produseres ekstra sylindere som skal gå gjennom standoffene. I tillegg er det en sannsynlighet for at sylindren kan sette seg fast i, eller kaldsveises til standoffene på grunn av vibrasjonen som forekommer under oppskytning. For å unngå dette måtte sylindrene vært anodiserte som medfører ekstra produksjonskostnader. Brukeren må også installere sylindrene, som muligens kan være utfordrende. For å løse problemene rundt brukervennlighet

kreves det andre løsninger som medfører økt tidsbruk og økt kompleksitet, som igjen kan gjøre produksjonen vanskeligere. Det ble avgjort at konsept D1 skulle benyttes ettersom det er klart bedre på flere områder enn D2. Konseptet scorer også svært godt på faktorer som er viktige for prosjektet slik som brukervennlighet, enkelhet og produksjonskostnad.

Tabell 4.6: Evalueringsmatrise for Killswitch-konseptene

Score (1-5)	Killswitch		Vekting
	D1	D2	[Faktor]
Brukervennlighet	4	5	1.3
Vekt	5	4	1.2
Styrke/stabilitet/reliabilitet	5	3	1
Enkelhet (produksjon)	5	3	1.3
Enkelhet (få komponenter)	5	3	1
Utførbar?	Ja	Ja	-
Sum	27.7	21.2	-

4.6 Alternativ sammensetning

Det var flere ideer om kombinasjoner av forskjellige konsept som ble valgt bort. En lovende kombinasjon av konsepter var basert rundt konsept G1. Konsept G1 baserer seg på å ha en ramme som er todelt, hvor en av hjørnene til hver del er festet sammen med hengsler eller lignende for å skape en svingene dør. Se konsept G2. Rammen ville hatt braketter slik som i konsept E1 for å feste kretskortene. Hvis gjort riktig kunne dette ha vært et svært brukervennlig konsept som ville gjort det veldig enkelt å sette inn og ta ut kretskort. Bakdelene med dette er kompleksiteten til konstruksjonen som kunne gjort den vanskelig å produsere billig. Konseptet var også vurdert til å kunne være for svakt og ustabil med tanke på hengslene og vibrasjonen som forekommer. Konseptet ble valgt bort mot simplere og mer robuste løsninger, ettersom det ville krevd for mye tid å utvikle en ramme med en styrke og enkelhet på lik linje med de andre konseptene.

Tabell 4.7: Evaluering av den alternative sammensetningen

	Annet	Vekting
Score (1-5)	E1+F1	[Faktor]
Brukervennlighet	5	1.3
Vekt	4	1.2
Styrke/stabilitet/reliabilitet	2-3	1
Enkelhet (produksjon)	2	1.3
Enkelhet (få komponenter)	2	1
Utførbar?	Nei	-
Sum	15.9	-

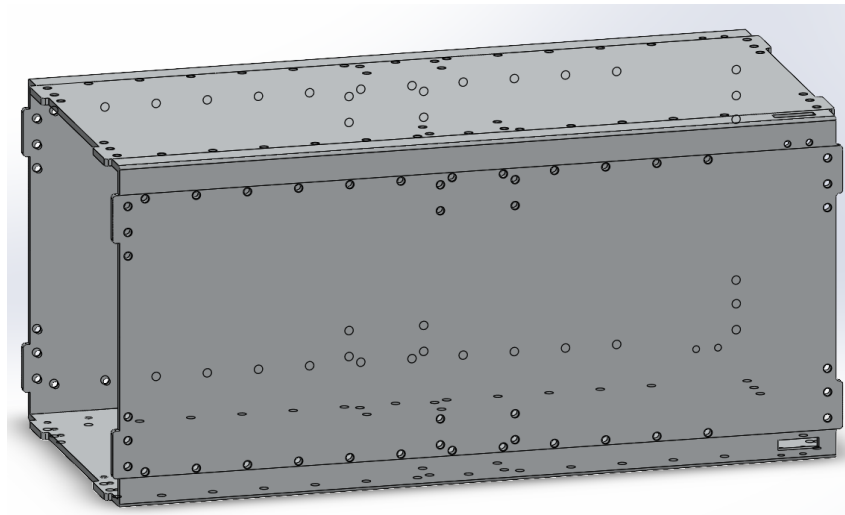
Til slutt var det konsept A3, B2 og B3, C1 og C2, D1, og E2 som ble ansett som de beste utgangspunktene for å lage en funksjonell ramme og for å nå prosjektets mål. Disse konseptene ble dermed tatt med videre til Struktur- og utformingfasen hvor rapid prototyping og TO blir brukt for å videreutvikle dem.

5 Struktur og utforming

Kapittelet *Struktur og utforming* bygger på grunnlaget fra kapittel 4 og omhandler utviklingsprosessen fra ideer til definerte konsept. Kapittelet er ment å gi innblikk i begrunnelsene for valgene som ble gjort angående utformingen av rammen. Det skal samtidig vise hvordan gruppen har benyttet rapid prototyping og topologioptimalisering for å utvikle en komplett ramme ut ifra konseptene som ble valgt i konseptutviklingsfasen. Kapittelet avsluttes med drøfting av materialvalg.

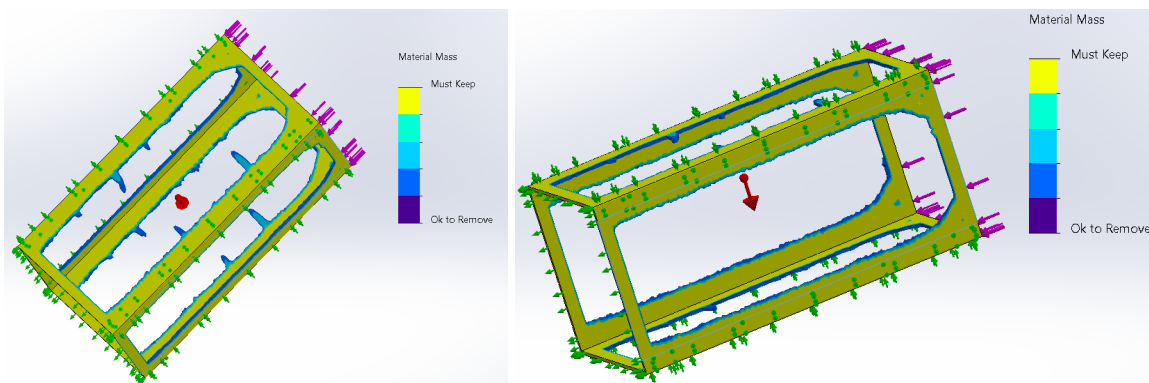
5.1 Hovedenhet

Hovedenhetens oppgave er å gi formen til satellitten. Utgangspunktet er en 100x100x2 ekstrudert profil hvor sideflatene og endeflatene er identiske. På enden av z-sidene befinner det seg seks hull, de på midten er for å feste hovedenheten og endeplaten. Samtidig er utstikkene også plassert på enden av z-sidene for å gjøre monteringen mellom hovedenhet og endeplaten lettere. Videre er det plassert to hull under hvert utstikk som er til solcellepanelene. Hullkonfigurasjonen til solcellepanelene kommer fra Spacemind rammen, som er en populær konfigurasjon av mange produsenter. Hovedenheten skal være kompatibel med disse for å lette innkjøpsprosessen av solcellepanelene. Videre har vi railsene som befinner seg i hvert hjørne. På rails er det plassert en rektangulær åpning for killswitch og to skruhull for montering av killswitchen. Samt fra konseptet E3+G3 trengs det muligheter for å feste braketter i hovedenheten. Dette gjøres ved å legge til skruhull langs rails. Massen til utgangspunktet kommer på 442,44 gram med 6061 T6 legert aluminium som vist på figur 5.1.



Figur 5.1: Profilen med alle hull og detaljer lagt til.

Av utgangspunktet kunne det konstrueres forskjellige konfigurasjoner fra morfologisktabell 4.1. Alle tre konseptene ble grovt skissert hvor konsept F1 har et stag i senter for støtte mellom railsene. Konsept F2 har krysstag fra hvert hjørne og møtes gjennom senter. Det siste konseptet F3 med stag som starter fra senter av rails og går inn mot senter av + og -z-sidene. Samtidig ble det ubearbeidede utgangspunktet TO med hensikt i å finne en gunstig utforming. Resultatet av optimaliseringen tyder på at ikke er behov for støttestruktur langs senter som vist på figur 5.2.



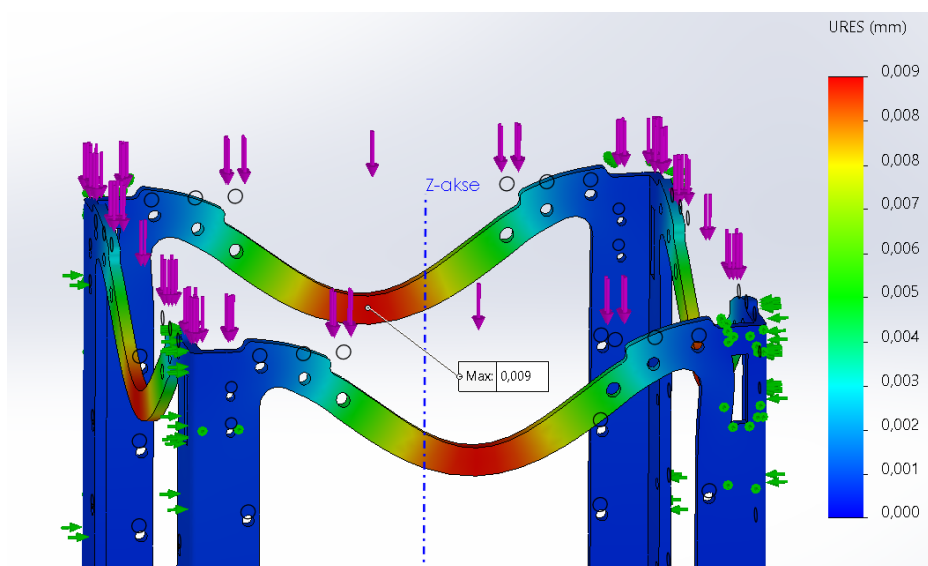
Figur 5.2: Resultatet fra topologioptimalisering av hovedenheten som en hel profil med beskyttede områder

Alle konfigurasjonene analyseres for å finne ut hvilken som gir lavest spenninger og deformasjon. Det gjennomføres kun en statiske analyser med de verste lasttilfellene i første omgang, hvor resultatene skal bedømme hvilken konfigurasjon som skal tas med videre i produktutviklingen.

Tabell 5.1: Resultater fra simulasjonene på de forskjellige konfigurasjoner til utskjæringen med 8,5 g-kraft i y-retning

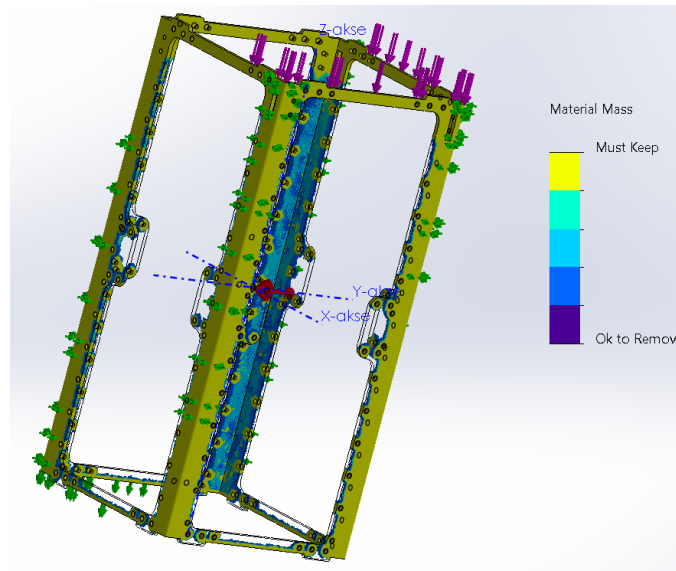
	Statisk analyse			
	Masse	Spenninger	Forskyvninger	Sikkerhetsfaktor
	[g]	[MPa]	[mm]	[-]
Uten	127,77	5,591	0,009	49,185
(F1) Stag	130,82	5,715	0,009	48,120
(F2) Kryss	156,86	6,147	0,009	44,735
(F3) Rombe	147,25	5,775	0,009	47,621

På alle konfigurasjonene oppstår de største forskyvningene på senter av -z-siden som vist på figur 5.3 og i tabell 5.1. Den maksimale forskyvningen er 0,009 mm, som er ubetydelig. *Uten*-konfigurasjonen har også de laveste spenningene med en maksimal opptredende spenning på 5,591 MPa, og med den høyeste sikkerhetsfaktoren med over 49, som er en høy sikkerhetsfaktor. Den høye sikkerhetsfaktoren tyder på at det ikke er nødvendig med støttestrukturer. Den er også lettest med en masse på 127,77 g som er en nedgang på ca. 71 % i forhold til utgangspunktet. Dermed forkastes de andre konfigurasjonene, og *Uten* konfigurasjonen tas med i videre utvikling.



Figur 5.3: Resultaterende forskyvning fra den statiske analysen på konfigurasjonen uten støttestruktur.

Det gjennomførtes enda en TO på hovedenheten hvor målet er å finne flere områder hvor materiale kan fjernes. Rundt alle hull settes det en beskytning med 2 mm radius i tillegg til de samme beskytninger fra den første topologistudien. Målet for denne analysen settes til å fjerne 30% av materialet. Resultatene fra analysen viser at materialet mellom hullene til braketten og rundt festepunktene til solcellepaneler ikke er nødvendig for styrken til hovedheten. Resultatet er vist på figur 5.4.

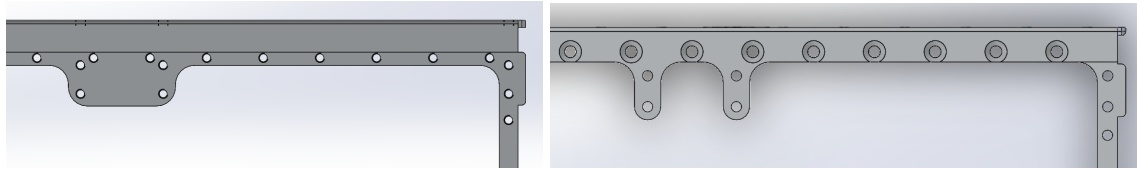


Figur 5.4: Topologistudie på hovedenheten med konfigurasjon *uten* med mål å fjerne 30% av materialet.

Videre undersøkes det om det er mulig å flytte hullrekken langs rails på selve railen i stede for ved siden av for å gå ned i vekt. I CDS 13 [51] er det angitt at minst 75% av overflaten til rails må være i kontakt med dispenseren. For at skruene ikke skal stikke ut over overflaten til rails, må skruhullene være nedfelt. Hullene er M2,5 med nedfelling etter ISO standarden *CTSK Flat ISO 7046-1*. Det beregnes for hånd om arealet som fjernes ligger under 25% ved å dividere arealet av 12 hull på arealet av en rail. Utregning vises i formel 5.1, der alle målene er i mm.

$$\frac{12 \times 2,75^2 \pi}{8,5 \times 225} = 0,149 = 14,9\% \quad (5.1)$$

Siden bare 14,9% av rail-overflaten fjernes kan hullrekken flyttes inn på rails. Det fjernes også litt material som er rundt festeanordningen til solcellepanelene midt på hovedenheten. Etter disse endringene ble gjennomført har hovedenheten en masse på 94,38 g som er en nedgang på 26% fra utgangspunktet til *Uten*-konfigurasjonen.



Figur 5.5: Figuren viser endringene som blir gjennomført etter den andre TO på hovedenheten. *Venstre* viser før endringene, *Høyre* viser etter endringene.

Resultatet fra TO nummer to viser også at det er mulig å fjerne enda mer materiale ved stagen som forbinder rails ved z-sidene. Det velges likevel å ikke fjerne material der ettersom hovedenheten skal være identiske i begge endene og tåle like store belastninger i begge retninger. Resultatene fra analysen av denne iterasjonen er vist i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Resultater fra vibrasjonsanalyser på den ferdige hovedenheten

	Vibrasjonsanalyser	
	Spenninger	Forskyvninger
	[MPa]	[mm]
Harmoniske svingninger	0,049	0,000
Tilfeldige svingninger	6,447	0,011
Sjokk	41,7	0,000

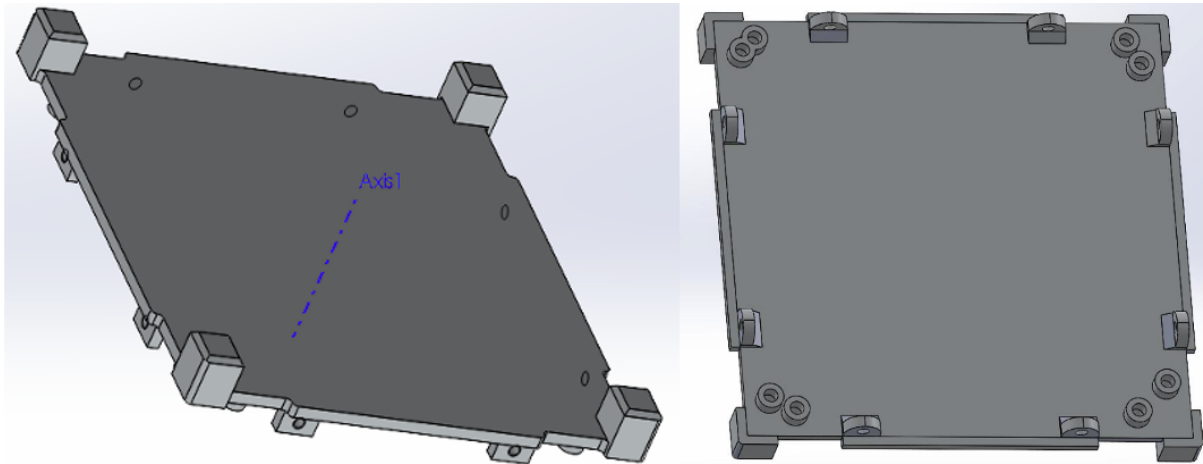
Ut i fra utformingen er det klart at mest mulig materiale er fjernet med hensyn på symmetri og begrensningene fra CDS. Analysene tyder på at hovedenheten fortsatt tåler belastningene den blir utsatt for når den er laget i 6061 T6 aluminium.

Utviklingen av hovedenheten foregikk parallelt med utviklingen av endeplatene som er beskrevet i neste delkapittel.

5.2 Endeplate

Fra morfologisk tabell 4.1 og delkapittel 4.4 kunne det velges om standoffklosser skal være en integrert del eller en separat ettermontert del. Ut fra CAD-modellen viste det seg at muttrene kommer i konflikt med standoffklossene når mutterne skal monteres på gjengestengene fra siden hvor standoffklossene står. Det vil si at det må være mulig å montere og demontere standoffklossene slik som i konsept C2. For å unngå separate standoffklosser fant gruppen en

annen løsning hvor hylser blir plassert på motsatt side av standoffklossene. Dermed kan gjengestengene monteres mot hylsene og ikke gjennom endeplaten som vist på figur 5.6. Plasseringen av hylsene er basert på plasseringen av hullene til kretskortene etter standarden fra CubeSat Kit PCB Specification [6]. Videre ble plassering av hull for solcellepanelene basert på standarden av GOMSPACE P110C sin spesifikasjon[8].

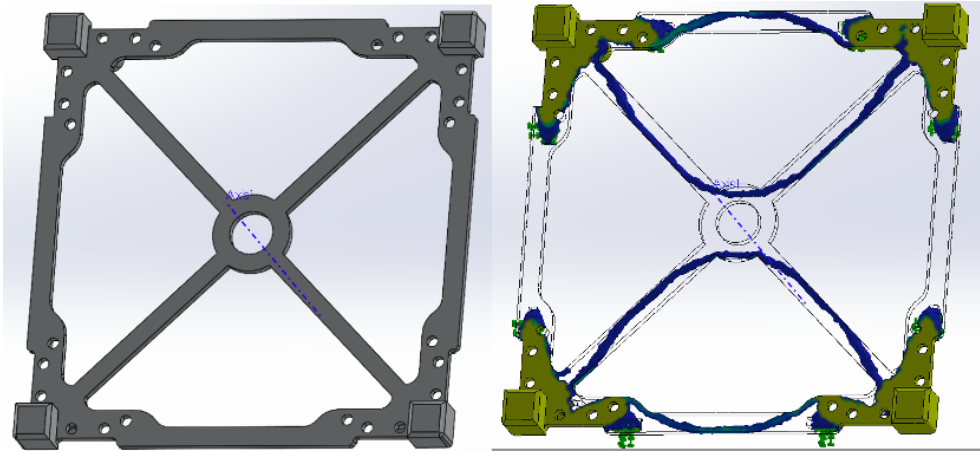


Figur 5.6: Venstre: Massiv endeplate med integrerte standoffklosser. Høyre: Undersiden av endeplaten der hylsene er plassert i hvert hjørne

Den massive endeplaten med integrerte standoffklosser, innfelling på hver side av stand-off, hull for solcellepanel, to sett hylser til gjengestengene og festeørere veide 63 gram med 7075 T6 legering, og ble utgangspunktet for konseptutvikling av endeplaten.

Ut fra en massiv endeplate kunne man velge å enten ha en støttestruktur på tvers av platens senter med tanke på styrke og stivhet, eller ingen materiale i senter i det hele tatt. Med et massivt utgangspunkt ble det kjørt en TO som vist på figur 3.2 for å finne en optimal form og samtidig gi et inntrykk på hvordan kreftene oppfører seg til videre utvikling av designet, med og uten støttestruktur i senter.

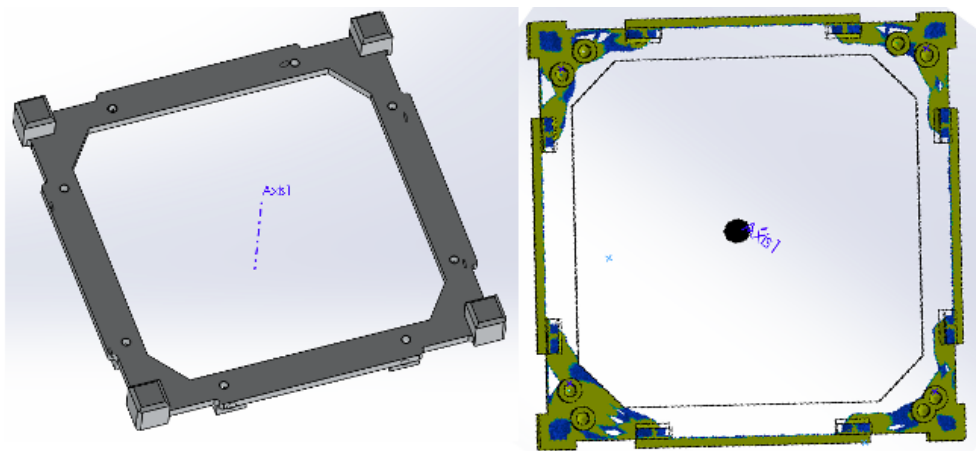
Fra den massive endeplaten ble en støttestruktur grovt skissert i senter av 3D-modellen, for å sette et utgangspunkt for TO. Under analysene ble de verste lasttilfellene valgt fra kapittel 2.1, samt fastholdninger som skal simulere at den enda var festet mot hovedenheten. Resultatet av TO vist på figur 5.7.



Figur 5.7: Til venstre er endeplaten med støttestruktur før TO. Til høyre er resultatet av TO.

Ved redigering av utforminger slik som hjørner og kanter må det tas hensyn til produksjonsmetode. Etter endringene ble lagt til modellen kom vekten på omtrent 26 gram med 7075 T6 legering. Ved valgt legering ble designet testet gjennom tidligere nevnte analyser som statiske analyser, frekvensanalyser og vibrasjonsanalyser. Resultatene av de statiske analysene ligger i tabell 5.3, harmonisk vibrasjonsanalyse i tabell 5.5, tilfeldig vibrasjonsanalyse i tabell 5.6 og sjokktest i tabell 5.7. Alle tabeller sammenligner resultatene av de nevnte konfigurasjonene og endeplate uten støttestruktur.

Endeplaten uten støttestruktur ble grovt skissert i 3D-modellen ved at alt materiale i senter av platen ble fjernet. I fra det utgangspunktet ble det kjørt en TO med hensyn på å redusere mest mulig materiale, men også beholde styrken slik de andre konfigurasjonene. Resultatet fra TO vises på figur 5.8.



Figur 5.8: Til venstre er utgangspunktet der utskjæring i senter er grovt skissert for å fjerne støttestruktur. Til høyre er resultatet av en TO som blir et utgangspunkt å redigere etter.

Etter redigering ble vekten omtrent 16 gram med 7075 T6 legering. Under alle analyser ble det påført de verste tilfellene av belastninger, samt fastholdninger som skal illustrere at den er festet mot hovedenheten. Resultatene av alle analysene er vist i de følgende tabellene.

Tabell 5.3: Resultater fra statistisk analyse av de forskjellige utformingene hvor g-graften er konstant 8,5 i y-retning

Statisk analyse			
	Spenninger [MPa]	Forskyvninger [mm]	Sikkerhetsfaktor [FOS]
Maksimal g-kraft i y- og x-retning			
Massiv	0,389	0	1 297
Med støttestruktur	0,853	0	591
Uten støttestruktur	0,556	0	908
Maksimal g-kraft i y- og z-retning			
Massiv	0,489	0	1 032
Med støttestruktur	0,856	0	590
Uten støttestruktur	0,555	0	917

Tabell 5.4: Resultater fra frekvensanalyse av de forskjellige utformingene

Mode nr	Egenfrekvenser [Hz]		
	Massive	Med støttestruktur	Uten støttestruktur
1	1 904,1	862,7	9 413
2	3 898,2	2 406,6	9 426,7
3	3 899,7	2 419,5	9 427,4
4	5 966,4	3 609,9	9 441,3
5	6 730,4	4 792,9	16 772
6	7 135,5	4 781,2	19 405
7	8 928,7	7 917,9	19 433

Tabell 5.5: Resultater av vibrasjonsanalyser

Harmonsike svingninger		
	Spenninger [MPa]	Forskyvninger [mm]
Belastning i y- og x-retning		
Massiv	0,028	0
Med støttestruktur	0,051	0
Uten støttestruktur	0,228	0
Belastning i y- og z-retning		
Massiv	0,007	0
Med støttestruktur	0,113	0
Uten støttestruktur	0,232	0

Tabell 5.6: Resultater av vibrasjonsanalyser

	Tilfeldig svinginger	
	Spenninger	Forskyvninger
	[MPa]	[mm]
Massiv	0,273	0
Med støttestruktur	5,42	0,03
Uten støttestruktur	23,3	0

Tabell 5.7: Resultater fra sjokk analyse av de forskjellige utformingene

	Spenninger	Forskyvninger
	[MPa]	[mm]
Massiv	3,6	0,012
Med støttestruktur	8,8	0,04
Uten støttestruktur	0,5	0

Ved å sammenligne resultatene av analysene kommer det massive utgangspunktet best ut da det generelt har lavere spenninger på alle analyser. Produksjonen vil også være relativt enkel med tanke på at det ikke blir for avansert å konstruere, vekten derimot på 64 gram gjør den uaktuelt å bruke. Videre ligger resultatene mellom konfigurasjon med og uten støttestruktur likt. Det er høyere sikkerhetsfaktor i den statiske analysen og lavere spenning under sjokktest med konfigurasjon uten støttestruktur, ved vibrasjonsanalysene derimot viser det seg at konfigurasjon med støttestrukturen har lavest spenninger. Med tanke på produksjon og vekt vil en endeplate uten støttestruktur være mest optimal da den veier minst, og mindre avansert å produsere da den inneholder mindre avrundinger. Samtidig vil det være smidigere for brukeren dersom det er behov for å komme til kretskortene gjennom endeplaten. Derfor vil konfigurasjonen uten støttestruktur velges som vår endeplate. For nå kan det vise seg at legeringen 7075 T6 er en overdimensjonert legering, men siden virtuell analyse ikke er helt reelt så vil all materialvalg bli drøftet etter analysene av en sammensatt ramme hvor alle komponenter er involvert.

5.3 Brakett

Som diskutert i kapittel 4.2 kom gruppen fram til å benytte konseptene E3+G3 hvor det brukes braketter som kan festes i rammen, for å enkelt kunne montere og demontere kretskort. Brakettene skal passe på innsiden av hovedenheten og skal kunne festes mot hovedenheten ved hjelp av skruer, samt mot kretskortene og gjengestengene ved å legge til samme hullkonfigurasjon som kretskortene har. For at ingen komponenter på kretskortene skal støte mot braketten, er materialet i det geometriske senter av braketten fjernet. Siden brakettene kun brukes til å finne gode plasseringer av kretskort og ikke skal brukes i den ferdige satellitten behøver ikke brakettene å tåle de samme belastningene som resten av delene. Resultatet av konstruksjonen vises på figur 6.3 og 6.4.

5.4 Sammensatt ramme

Et av de siste stegene i struktur- og utformingfasen var analysering av alle delene sammensatt. Siden en analyse ikke samsvarer helt med virkelighet så er det utført samme typer analyser som tidligere men med forskjellige lasttilfeller hvor antall kretskort og kretskortenes vekt varierer. Det ble kjørt en del forskjellige lasttilfeller men i dette avsnittet skal det i hovedsak fokusere på to lasttilfeller. Det første er et realistisk lasttilfelle gitt av Orbit og et lasttilfelle som skal illustrere et verste tilfelle.

I det verste tilfellet inneholder satellitten 4 kretskort fordelt tilfeldig med en total masse på 4.16kg. I den realistiske simuleringen har vi fått et oppsett av Orbit NTNU med plassering og vekt av kretskortene i satellitten fra det aktuelle prosjektet. Oppsettet består av 9 kretskort som til sammen veier 0,87 kg. Alle analyser er utført med solcellepanel montert på alle sideflatene. Lasttilfellene skal utføres og analyseres med hensikt å kvalitetssikre at rammen takler forskjellige lasttilfeller. Analysene skal også finne eventuelle svake punkt eller feil i konstruksjonen vår. Resultater av analysene vises i tabell 5.8, 5.9, 5.10 og 5.11.

Tabell 5.8: Resultater fra statistisk analyse hvor g-kraften er 8,5 konstant i y-retning

Statisk analyse			
	Spenninger	Forskyvninger	Sikkerhetsfaktor
	[MPa]	[mm]	[FOS]
Belastning fra y- og x-retning			
Realistisk tilfelle	42,828	0,058	14,486
Verste tilfelle	101,887	0,121	2
Belastning fra y- og z-retning			
Realistisk tilfelle	43,236	0,055	14,350
Verste tilfelle	95,686	0,120	2,16

Tabell 5.9: Resultater av vibrasjonsanalyser

Harmonsike svingninger		
	Spenninger	Forskyvninger
	[MPa]	[mm]
Belastning i y- og x-retning		
Realistisk tilfelle (aksial)	4,832	0,008
Realistisk tilfelle (lateral)	2,326	0,018
Verste tilfelle (aksial)	21,682	0,025
Verste tilfelle (lateral)	20,958	0,024

Tabell 5.10: Resultater av vibrasjonsanalyser

Tilfeldige svingninger		
	Spenninger	Forskyvninger
	[MPa]	[mm]
Belastning i y- og x-retning		
Realistisk tilfelle	72,151	0,239
Verste tilfelle	364,65 inn	0,343

Tabell 5.11: Resultater fra sjokkanalyse

	Spenninger	Forskyvninger
	[MPa]	[mm]
Realistisk tilfelle(ny)	252,582	0,617
Verste tilfelle	825,2	0,908

Det viser seg at dersom lasten som er festet til gjengestengene er tilstrekkelig tung og plassert på ugunstige plasser, kan gjengestengenes utbøyning bli så stor at kreskortene treffer hovedenheten når støtbelastningene fra Falcon User's Guide inntreffer. Det er antatt at utbøyningen blir redusert når PCB-spacere er installert på gjengestangen. Gruppen fant en annen løsning på problemet hvis utbøyningen fortsatt blir for stor: en brakett med samme utforming som i figur 6.3 kan plasseres hvor utbøyningene er størst for å gi støtte til gjengestengene. For å bekrefte at brakettene tåler belastningen ble de analysert gjennom samme simulasjonsprosedyre som resten av komponentene. Resultatene finnes i tabell 5.12. Valg av materiale til en slik brakett er diskutert i kapittel 2.4.

Flere figurer blir lagt til vedlegg som skal hjelpe til å drøfte valg av material. Ut fra resultatene fra hovedenheten, endeplater, brakett og den sammensatte rammen vil valg av materialer drøftes samtidig som det tas hensyn til at en virtuell analyse ikke er helt i samsvar med virkelighet.

5.5 Materialvalg

Under hver analyse må det velges materiale for hver komponent. Materialer som skal brukes på rammens primærstruktur står i tabell 2.8, hvor 7075 er overlegent sterkt i forhold til de andre legeringene, men 7075 har høyere massetetthet forhold til de andre legeringene som gjør konstruksjonen tyngre. Videre er 6061 og 6082 omtrent like sterke forhold til hverandre, men 6061 har større forlengelsesgrad i forhold til 6082 som kan være nyttig til å redusere brudd grunnet vibrasjoner. Av ikke-herdbare legeringer vil 5052 H38 være sterkest, ha større forlengelsesgrad og lavere massetetthet sammenlignet mot 5005. Disse kriteriene skal hjelpe til å drøfte valget av materialene som skal velges for hovedenheten og endeplatene.

Fra tabell 5.1 hvor hovedenheten presenteres for seg selv med 6061 T6 legering kommer det frem en sikkerhetsfaktor på 49 med konfigurasjon uten stag eller senterstruktur, og fra resultatene hvor sammensatt ramme har blitt analysert virker det som om hovedenheten ikke opplever store spenninger som vist på figur 7.3 og figur 7.4. Den største forskyvningen stacken kan ha er 0,11mm, og på grunn av store forskyvninger som fysisk ikke skal være mulig som vist på figur 7.2 og høye spenninger under sjokktestene av sammensatt ramme må det antas at det kan forekomme krefter som ikke oppstår i analysen. Figur 7.1 viser en spenning på omtrent 252 Mpa og velger dermed å beholde 6061 T6 legering på hovedenheten uten senterstruktur for å ha en tilstrekkelig sikkerhetsfaktor mot kjente og ukjente belastninger.

Endeplatene som ble valgt var konfigurasjonen uten senterstruktur (kapittel 5.2), og ut fra resultatene fikk den en minimum sikkerhetsfaktor på 908 med 7075 T6 legering. Sikkerhetsfaktoren ble vurdert som svært høy og overdimensjonert. Ut ifra analysering fra delkapittel sammensatt ramme 5.4 ble 7075 T6 det eneste alternativet da sjokktestene viser høye spenninger rundt hylsene og gjengestengene som vist på figur 7.1. Under sjokktesting forekommer det høye spenninger som kan føre til brudd da resultatene av analysene viser spenninger fra 252 til 850MPa. Se figur 7.1 og figur 7.5. Ut fra dette kan det antas at spenningene kan bli høyere enn bruddspenningen til 6061 eller 6082 og det bør derfor benyttes 7075 T6 legering for endeplatene for å oppnå en sikkerhet mot brudd.

For sekundærstrukturer som braketter brukes det materialer fra tabell 2.9. Videre har gjengestenger blitt forenklet i simulasjonene til en stålstang i rustfritt stål siden legeringen har tilnærmet fasthet som en gjengestang med 8.8 fasthet.

Materialet som bør brukes til brakettene varierer med bruken. Dersom brakettene kun skal brukes til montering av kretskortene og blir laget ved hjelp av FDM, kan prototyper lages i PLA. Dette bør gjøres for å finne korrekt hullstørrelse til montering av gjengeinnsatsene. Det er viktig å finne rette hullstørrelse slik at det ikke forekommer delaminering mellom lagene i braketten når gjengeinnsatsene settes inn. Når de endelige brakettene skal produseres, anbefales det å benytte ABS- eller PETG-plast for å få den økte styrken og stivheten som PLA mangler. Den økte styrken er gunstig siden det kan være med å forhindre delaminering og fordi brakettene antas å monteres og demonteres flere ganger og kan bli ødelagt i prosessen.

6 Resultat og drøfting

I dette kapittelet vil vi begynne med å presentere vårt ferdige produkt hvor primær- og sekundærstrukturen blir presentert og forklart. Deretter blir resultatet av den sammensatte rammen presentert. Videre vil produksjon av rammen rettet mot problemstilling bli presentert med drøfting av produksjonsmetoder og et eksempel av en kalkyle for material- og produksjonskostnad. Til slutt skal rammens spesifikasjoner sammenlignes opp mot målene.

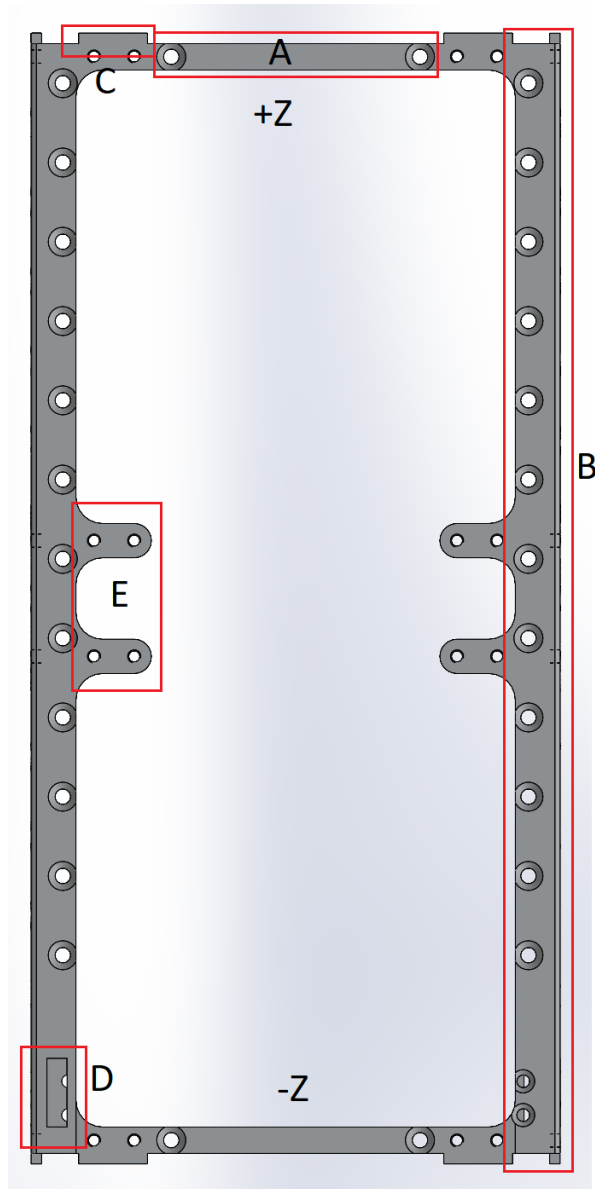
6.1 Rammen

I dette delkapittelet presenteres rammen som resultat fra struktur- og utformingfasen. Rammen består av en primær- og en sekundærstruktur. Primærstrukturen består av tre deler, en hovedenhet og to endeplater. Sekundærstrukturene er gjengestenger, braketter og killswitch. Alle komponentene av rammen blir presentert hver for seg, og til slutt som en sammensatt konstruksjon.

6.1.1 Primærstruktur

Hovedenhet

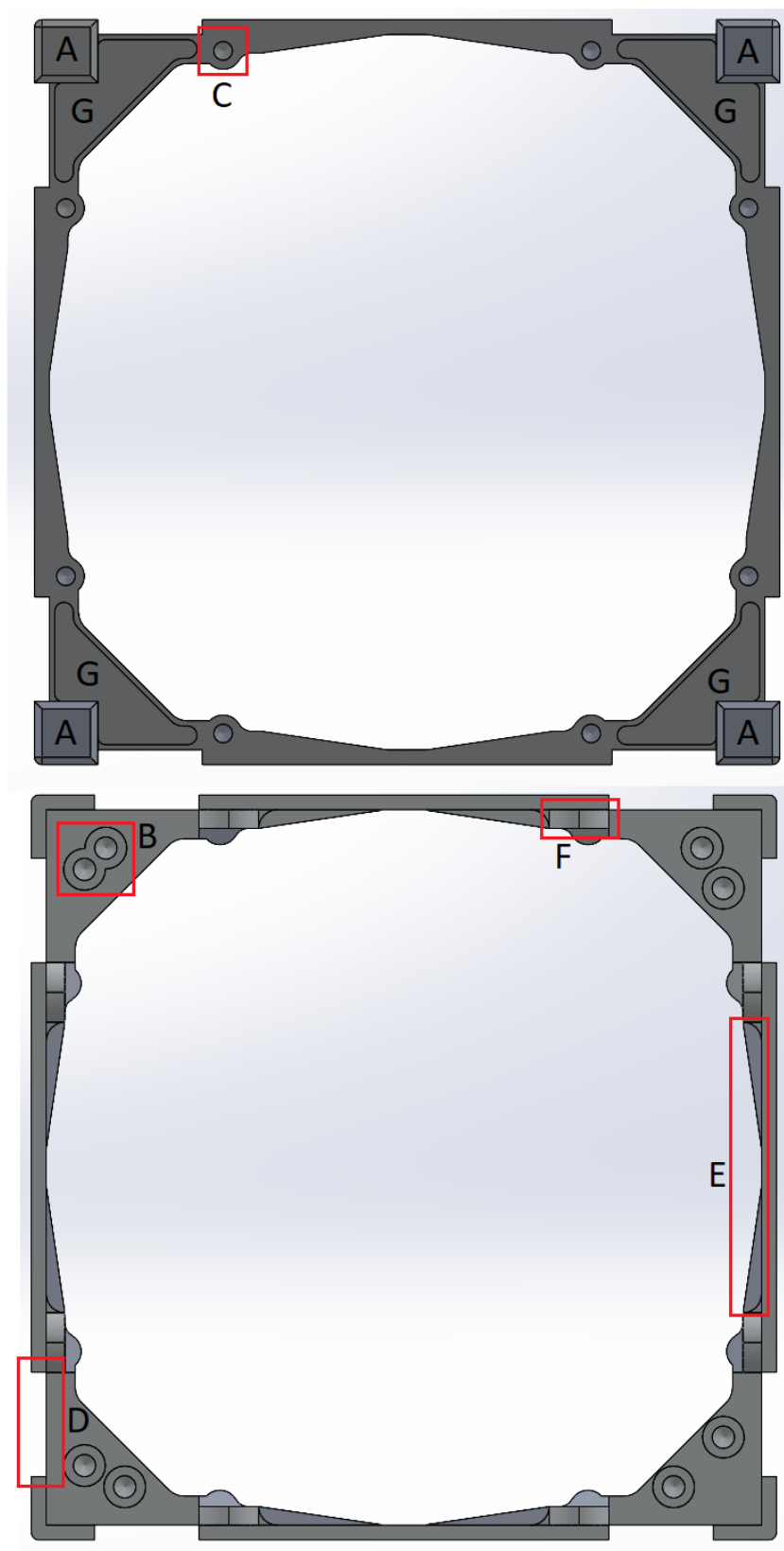
Fra utgangspunktet (av en ekstrudert profil) var massen omtrent 444 gram. Den totale vekten av den ferdigutviklede hovedenheten kommer på 94,4 gram når den er laget av 6061 T6 legeret aluminium. Den nye hovedenheten har identisk utforming av sideflatene som vist på figur 6.1 hvor også toppen og bunnen (+Z) er identisk. I toppen og bunnen er blant annet skruehullene som skal sammenføre hovedenhet med endeplate (A) plassert. Videre er det konstruert to utstikk (C) som skal gjøre montering lette, samt ta opp krefter slik at boltene ikke tar all belastning. Under utstikkene (C) er hullene for solcellepanel plassert og er i samme hullserie som solcellepanelutsikkene (E). Disse stikker ut fra fra rails (B) hvor også hullserien for braketter er plassert. Hullserien for brakettene er identiske på x-sidene og forskjøvet på y-sidene grunnet fordobling av tilkoblingsmuligheter for braketter. Til slutt er det et rektangulært hull i rails (D) hvor killswitch vil stikke ut, samt er skruehullene for killswitch plassert 90 grader i forhold til hullet. Se rails(-Z)(B). Teknisk tegning av hovedenhet ligger i Vedlegg 3, 01-V2021.



Figur 6.1: Bilde av hovedenheten med markerte funksjonsområder som omtales i teksten

Endeplater

Fra utgangspunktet veide endeplaten 63 gram med 7075 T6 legert aluminium, topplaten veier 15,8 gram og bunnplaten 16,3 gram. Grunnen til vektforskjellen og det eneste som skiller topp og bunnplaten er to hull på to av standoffsklossene (A) som er til «spring plungerne». Selve utformingen av endeplatene er kvadratisk 100x100 og passer på hver side av hovedenheten som vist på figur 6.2. Endeplatene blir 2mm tykk langs x- og y-siden mens det tykkeste blir ved standoffs (A) og festepunktene (F) som vil til sammen gi en total tykkelse på 13.5mm. Det er en nedfelling (G) i hvert hjørne som er 1mm dyp og i tillegg er det en nedfelling langs sideflatene (E) for besparelse av vekt. Videre er det totalt åtte hull til solcellepanel (C) på samme side som standoffklossene er plassert. På motsatt side av endeplaten befinner det seg to hullserier for hylsene (B). Hylsene samsvarer med hullene i kretskortene, slik som definert av CubeSat Kit sin kretskortstandard [6]. Det er to hullserier for å oppnå mer fleksibilitet ved montering når kretskortene skal monteres, samt er det totalt åtte festeører (F) fordelt på x- og y-sidene. Disse skal bores og gjenges for å sammenføre hovedenheten og endeplaten, samt er det innfelling (D) ved begge sidene av standoffs som er 2mm dyp og 14mm lang. Innfellingene er der for å gjøre montering lettere samt ta opp krefter slik at ikke alt kommer på boltene. Teknisk tegning av endeplater ligger i vedlegg Vedlegg 3, 02-V2021.



Figur 6.2: Bilde av endeplater med markerte funksjonsområder som omtales i teksten

6.1.2 sekundærstruktur

Sekundærstrukturen er gjengestenger og braketter som vil ha oppgaven ved å holde kretskortene på plass, samt killswitcher som skal forhindre strømgjennomgang under oppskytning.

Gjengestenger

Gjengestengene er laget av rustfritt stål. Det skal være 4.stk og de har i oppgave å holde kretskortene på plass . Gjengestengene festes med muttrer som skrues mot hylsene slik gjengestengene står i trykk mot hver endeplate. Dermed er det behov for minimum fire muttrer for å holde gjengestengene i trykk, samt minimum åtte PCB spacere for å holde et kretskort på plass.

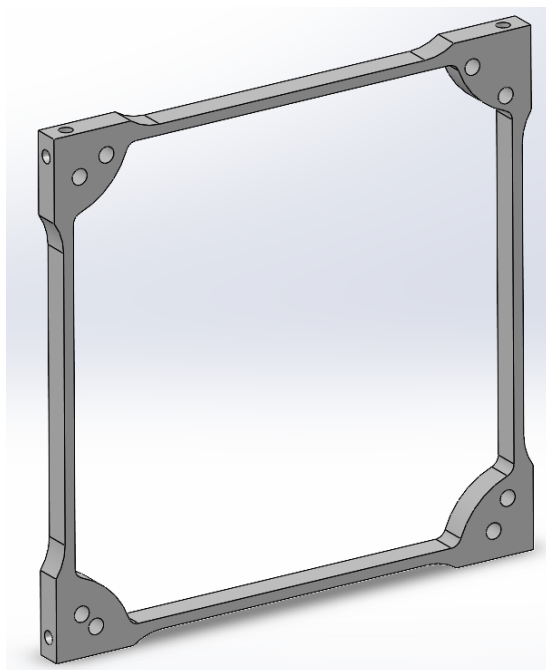
Braketter

Orbit sitt ønske om brukervennlighet var å finne en hurtig måte å montere og demontere kretskortene på uten å måtte benytte gjengestengene. Løsningen ble å feste kretskort til 3D-printede braketter som enkelt kan omplasseres inne i rammen ved hjelp av splinter i plast. Resultatet kan sees i figur 6.3 og 6.4.

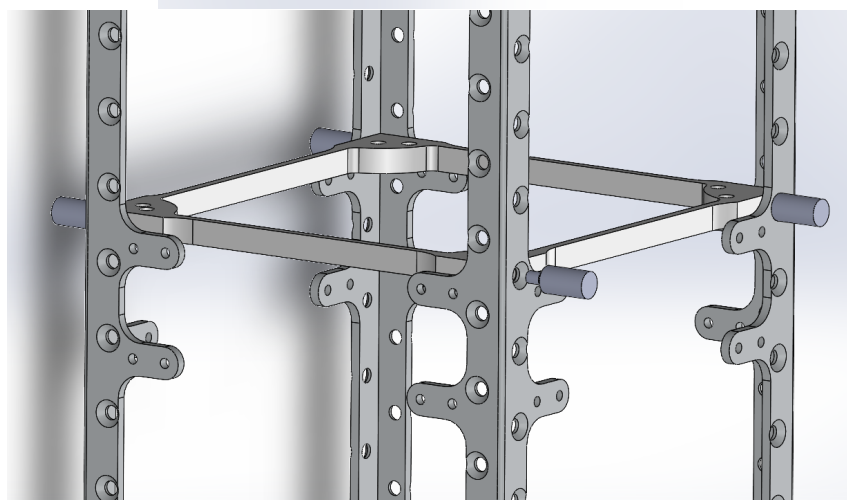
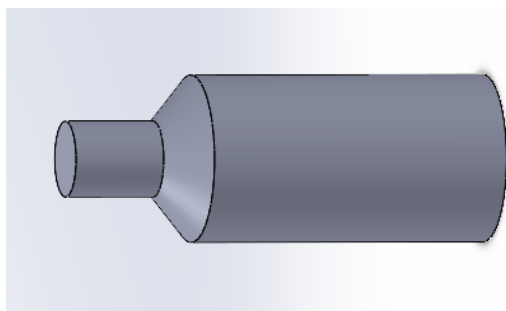
For å minske belastningen på hylsene og kretskortene som oppstår på grunn av utbøying av gjengestengene, kan braketter med samme design plasseres hvor det forekommer størst utbøying for å forhindre translasjon. I motsetning til de andre braketten må det benyttes gjengeinnsatser for å kunne skru de fast til rammen. Brakettene festes med fire skruer mot hovedenheten.

Killswitch

Ifølge CDS 13 er det krav til én killswitch i satellitten, mens i CDS 14 anbefales det å ha to [51, 17]. Gruppen har valgt å legge inn mulighet for å installere fire brytere grunnet mer fleksibilitet med tanke på montering. Festeordningen er utformet for D2F-01L bryteren fra Omron som veier 0,5 g per enhet [47]. Det er mulig å bruke en annen type killswitch enn den fra Omron. Om dette er ønskelig må designet på festeordningen endres, og det må gjennomføres nye analyser for å sjekke om det ikke påvirker styrken til konstruksjonen.



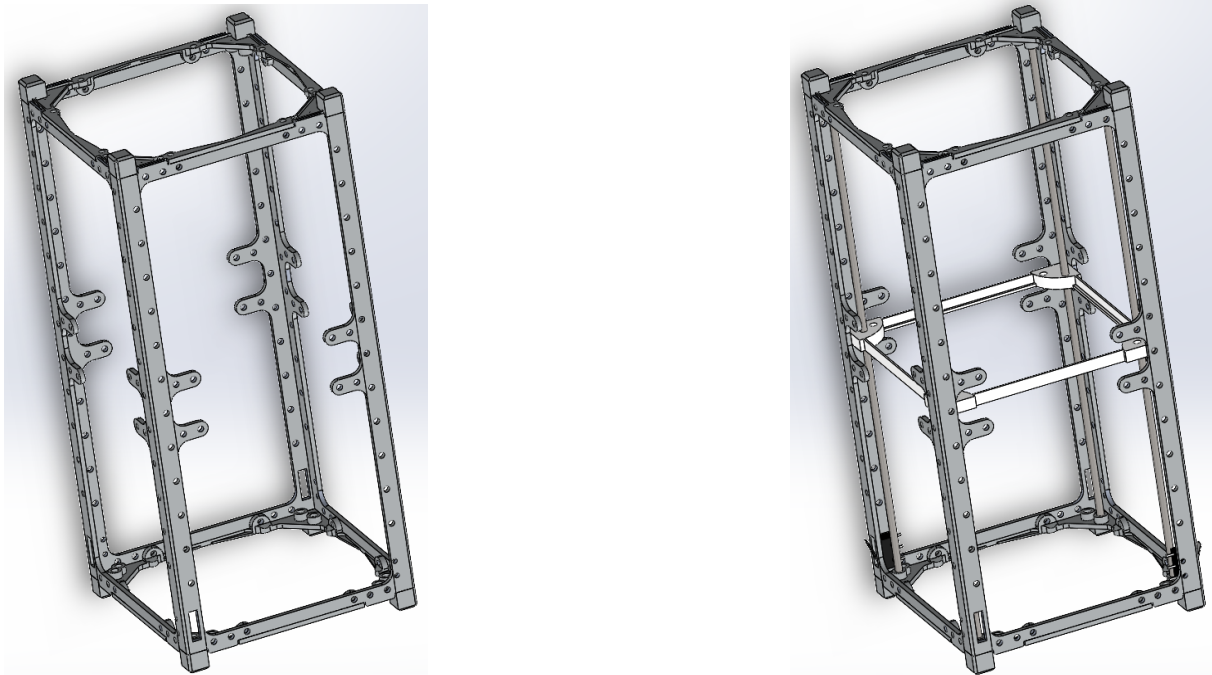
Figur 6.3: Bilde av brakettens utforming



Figur 6.4: Øverst: Splintene som kan brukes til å feste brakettene. Nederst: Eksempel på hvordan splintene brukes til å feste en brakett mot rammen

6.1.3 Resultatet av den sammensatte rammen

Den totale vekten av primærstrukturen kommer på 119,3 gram som er 23,7% mindre vekt enn rammen fra Spacemind. Med sekundærstrukturene kommer rammen på 171,2 gram som er omtrent 20% mindre vekt enn rammen fra Spacemind. Den sammensatte rammen med og uten sekundærstrukturer kan sees på figur 6.5.



Figur 6.5: *venstre*: sammensatt primærstruktur til rammen, *høyre*: sammensatt sekundærstruktur til rammen med 2 killswitches og en sentrert brakett

6.2 Produksjon

Et av problemstillingene fra kapittel 1.1 var at den nye rammen skulle være billigere å produsere en gitt pris på 20.000kr. Produksjonsteknikken er ikke nevnt tidligere for utenom at det er tatt hensyn til under teori og utvikling av delene. I dette kapittelet skal det bli sett på de tidligere nevnte produksjonsteknikkene fresing og støping, som skal drøftes med hensyn på hva som kan bli billigst. Videre vil produksjonsmetoder av primærdelene presenteres og toleranser nevnes med hensyn på beregning av produksjonskostnader, samt vil sekundstruktur og delene med valgte 3D-printingsmetoder bli presentert og overflatebehandling forklares. Til slutt vil det bli satt opp et eksempel av en kalkyle som skal evaluere om det blir billigere enn Spacemind rammen.

Drøfting av produksjonsmetoder

Tidligere nevnt i teori og innledning for delkapittelet er produksjonsmetodene av primærstrukturen begrenset til støping eller fresing. For å oppnå et bra sluttprodukt innen støping kreves det ofte at man kjøper inn kokiler og annet utstyr. Fordelen med støping i forhold til fresing er at metoden ikke bruker mer materiale enn det som trengs. Fresing generelt er dyrt da det krever tid, men ender opp med et ferdig produkt uten annet etterarbeid enn polering og anodisering i vårt tilfelle. Med dette som grunnlag velges fresing som vårt alternativ siden det ikke skal masseproduseres og støpeutstyr kan bli ugunstig dyrt og egner seg best for masseproduksjon.

Produksjonsmetoder av primærstruktur

For å beregne kostnader for produksjon er det nødvendig å sette en plan på hvordan delene kan produseres. Alle delene kan freses med tradisjonell tre-akset fres manuellstyrt eller en CNC-styrt med flere frihetsgrader. Fordelen med flere frihetsgrader og CNC-styring er at den er mer presis med tanke på toleranser, samt er det mulig å frese en hel komponent med få innspenninger, eventuelt alt fra én innspenning. Med en fres som utgangspunkt vil hovedenheten og endeplatene bli presentert for hvordan de kan produseres.

Som nevnt tidligere er det tenkt å benytte en ekstrudert profil til hovedenheten. De innvendige toleransene må først kontrolleres for å forsikre at det er plass til kretskortene før hovedenheten freses. Innvendig må profilen minimalt være 96mm fra side til side, og den må ha en lengde på 210mm, som vist på teknisk tegning i vedlegg. Produksjonen bør starte med å bore alle hullene og gjenge de der det er relevant. Deretter kan utstikkene for solcellepanel og endeplatene freses ut. Denne prosessen må gjøres på alle fire sideflatene, så det kan være nødvendig å endre innspenninger. Til slutt kan selve senterstruktur skjæres ut på alle sideflatene.

Endeplatene kan freses ut fra to plater med dimensjon $100 \times 100 \times 15[mm]$. Hvor det kan være lettes å bore et hull i senter for innspenning, også jobbe seg rundt og ned standoffklossene. Videre kan man fra første innspenning bore eller frese ut hull til solcellepanel og nedfelling. Deretter snu endeplaten 90 grader slik at den står på høykant hvor det kan bores og gjenges ut hull på festeørene, samt frese ut innfellingene og festeørene. Denne prosessen må repeteres på alle sideflatene før den kan snues oppned med en ny innspenning, hvor resterende materiale kan fjernes.

Den totale lengden og bredden av rammen og standoffs er bestemt av CDS [51]. Vi følger deres toleranser, men i tillegg er det en ekstra toleranse som må tas hensyn til. For at kretskortene skal passe inn i rammen må de innvendige målene av hovedenhet være større eller lik 96mm.

Produksjonsmetoder av sekundærstruktur

Når det gjelder braketter som bare skal brukes til festing av kretskort er det tilstrekkelig å produsere de ved hjelp av FDM metoden i ABS eller PETG plast. Dette er på grunn av at de ikke må tåle belastningene som forekommer under oppskytning. Dermed er den relativt lave kvaliteten fra FDM-metoden ikke et problem og brakettene kan bli 3D-printet i plast ved hjelp av FDM-utstyret som Orbit har tilgjengelig. For å feste brakette kan det samtidig printes ut splintene som kan settes inn i hullene i braketten. Disse er utformet for å passe inn i de nedfelte hullene langs rails. Se figur 6.4. For å benytte skruer til å skru fast brakettene anbefales det å installere gjengeinnsatser i braketten. Hullene som gjengeinnsatsene skal stå i må dimensjoneres etter produsentens anbefalinger og varierer basert på type og produsent. Tidsbegrensningene til prosjektet og mangelen på ressurser tillater ikke gruppen å gjennomføre testing for å finne den beste type gjengeinnsats og korrekte dimensjoner på hullene, samt hva som er tilstrekkelig materiale rundt hullene. Dette overlates til Orbit, da det er lagt opp til at de relevante dimensjonene på CAD-modellen til braketten enkelt kan endres på.

Brakettene som skal brukes under oppskytning av satellitten må ha en større styrke enn de andre brakettene. De kan produseres med SLA 3D-printing i ABS plast. NTNU eier en SLA printer og dermed kan delene produseres på universitetet. Tanken bak å 3D printe brakettene er å tillate Orbit å kunne raskt endre designet etter behov og produsere delene på stedet selv, uten ekstra kostnader som medfølge av å outsource produksjonen. For å feste brakettene må det benyttes gjengeinnsatser slik at de kan skrues fast.

Alle andre sekundærdeler er innkjøpsværer. Gjengestengene kjøpes inn i lengder på 1m og må kappes til 210mm. Når delene er produsert og varene er kjøpt inn må rammen settes sammen for hånd. Først bør det skues fast spring-plungers og killswitches. Den ene endeplaten kan allerede skrues fast på hovedenheten mens den andre endeplaten skrues fast til slutt. Alle kretskortene som skal brukes settes på gjengestengene

Overflatebehandling

Alle områder som er i kontakt med dispenserens sine rails må hard-anodiseres. Det inkluderer railene på hovedenheten og områdene på standoffene som fungerer som en del av rails. Ved anodisering av hovedenheten er det viktig at bare yttersiden av railene blir anodisert på grunn av den tette toleransen mellom kretskortene og innsiden av hovedenheten. Toleransene må heller ikke overstige +0.1mm på utsiden av rammen, som medfører at den muligens må slipes ned før den blir anodisert for å kompensere for den økte tykkelsen. Når dette er tatt er tatt hensyn til og railene skal anodiseres må de først poleres for å holde overflateruheten under $1.6 \mu m$. Siden anodisering øker overflateruheten med 2-3 ganger den opprinnelige ruheten betyr det at railene må poleres til de har en overflateruhet på maksimalt $\frac{1.6\mu m}{3} = 0.5\mu m$. Hvis railene har en overflateruhet større enn $1.6 \mu m$ etter anodiseringsprosessen kan overflaten poleres veldig forsiktig for komme innenfor spesifikasjonen, men må ikke poleres ned for mye slik at egenskapene til oksidlaget ødelegges og kaldsveising kan oppstå.

6.2.1 Material- og produksjonskostnader

For å beregne produksjonskostnadene må det settes opp en kalkyle for å se om målet ble nådd, der målet var å komme under 20.000 kr. I dette delkapittelet vil det bli satt opp et eksempel av en produksjonskostnad av rammen vist på tabell 6.1, samt begrunne priser ut fra erfaring innen produksjon. Videre vil det bli satt opp et eksempel av en kalkyle rettet mot innkjøp av deler slik som gjengestenger og muttre vist i tabell 6.2.

Pris for materialet og timespris kan variere ut fra avtaler eller hvordan produsent fakturerer. I vårt tilfelle har vi antatt at det betales kun for kilosprisen av materialet uten gevinst av materialsponet som går i resirkulasjon. Av egenerfaring fra å ha jobbet innen fabrikking og maskinering så antar jeg selv at tiden kan komme på omtrent 8 timer som er en normal arbeidsdag. Grunnen for antakelsen er fordi en CNC-styrt maskin med 5-akser eller flere frihetsgrader jobber hurtig, samt er aluminium godt egnet materiale for bearbeiding da det er seigt i forhold til stål. Dermed kan det fjernes mye materiale i kuttene som fører til at selve bearbeidingstiden ikke vil være faktoren med høy tidsforbruk. Som nevnt tidligere om produksjon av primærdele- ne så kan det være behov for flere innspenninger. Innspenning og eventuelt bytte av innspenning vil være faktorer som påvirker høyere tidsforbruk da slike prosesser ofte tar tid og kan medfører til re-kalibrering. Videre kan operatører bli plaget med tegninger som blir tilsendt som kan

medføre at det må tegnes på nytt dersom filene ikke støtter programmene de bruker, konsekvent kan slike bagateller føre til høyere tidforbruk og sluttpris.

Tabell 6.1: Et eksempel av hvordan en kalkyle kan se ut for produksjon av primærstrukturen

Del	Produsent	Antall enheter	Pris per enhet	Pris total
Material til endeplater	Norsk Stål	0,787 kg	kr 117,36	kr 93 [50]
Profilen til hovedenhet	Norsk Stål	0,453 kg	kr 116,64	kr 53 [50]
Bearbeiding (fresing)	Egne erfaringer	8 t	kr 1.500,00	kr 12.000
Anodisering	Alliance Finishing and manufacturing	1	kr 1.650	kr 1.650 [3]
Total			kr 13 796,00	

Selve timesprisen som ble satt til 1.500 kr er en antakelse basert på verkstedpris av mekanikere. Diverse firma tar betalt på forskjellige måter, noen ganger tar firma kun betalt for tidsbruk og slitasje av utstyr, samt litt tid til operatør som legger filer inn programmet. Andre ganger tar firma betalt for forrigenevnte men også med en operatør som skriver timer for en hel arbeidsdag. Til slutt finnes det også firma som selger kun operatørtimer og legge ikke til ekstra kostnader for slitasje og maskintid, eventuelt fastpris. Disse tilfellene skyldes ofte avtaler og ordninger innen bedrifter og vil føre til at timespris eller timesbetaling kan variere. Ut fra disse kriteriene antar vi at det ikke blir problemer med filene eller behov for re-kalibrering, men antar bytte av innspenning hvor en operatør går en arbeidsdag å følger med.

Tabell 6.2: Kalkyle av innkjøpsvarer

Del	Produsent	Antall enheter	Pris per enhet	Pris total	
Killswitch	Omron	2	kr 14,52	kr 29,04	[47]
Spring plunger	McMaster-Carr	2	kr 148,33	kr 296,66	[45]
Gjengestenger	RS Pro	1	kr 69,60	kr 69,60	[56]
M3 (1m)					
skruer M2,5	Schäfer + Peter GmbH	1000	kr 0,18	kr 183,52	[59]
PCB spacere	RS-Online	50	kr 4,04	kr 202	[55]
Total				kr 780,82	

Verdiene i kalkylene er et eksempler hentet fra diverse firma hvor pris for deler og tjenester kan variere. Prisen på spring plungeren fra Cal Poly var utilgjengelig for gruppen. Den er derfor erstattet med prisen på en annen spring plunger i samme material med omtrent samme dimensjoner.

En av de største kostnadene er verkstedprisene. For å spare mer kan en løsning være å finne en student hos Orbit eller NTNU som kan betjene NTNU sin CNC-styrte fres. Uansett kommer den sammenslåtte kostnaden for produksjon og innkjøp av deler på 14.576,82 kr etter vår beregning. Dette er omtrent 5400 kr billigere enn Spacemind rammen. Kostnadene kan variere men det er god margin til 20.000 kr som var prisen vi skulle komme under.

7 Konklusjon

Målet for prosjektet var å konstruere en 2U CubeSat ramme som er billigere enn 20.000kr og som har en primærstruktur som er lettere enn 156g. Gjennom bruk av rapid prototyping, styrkeanalyser og topologioptimalisering med CAD- og FEA-programvare, har gruppen utviklet en ramme som oppnår målet til prosjektet. Resultatet er en ramme med en teoretisk vekt på 119g og en anslått pris på rundt 15.000kr. Dette er en 23,7% reduksjon i vekt, og en 25% reduksjon i pris. Med det, overgår rammen flere kommersielt tilgjengelige CubeSat rammer med tanke på både pris og vekt.

Gruppen hadde daglige møter og klarte dermed å oppnå jevn fremgang over hele prosjektforløpet. En stor utfordring var at hele oppgaven måtte gjennomføres gjennom digitale møter grunnet korona-reguleringer. Likevel viser det seg at prosjektplanen som ble lagt i starten ble fulgt med få avvik. Dette tyder på bra gruppedynamikk og realistisk planlegging.

Grunnet tidsfristen og Korona-pandemien som forhindret fysisk oppmøte, kunne ikke gruppen lage en funksjonerende prototype. På grunn av dette har det ikke vært mulig å måle den reelle vekten eller teste brukervennligheten til rammen sammenlignet med den nåværende rammen til Orbit. Likevel er gruppen trygg på at rammen oppfyller ønsket om å være brukervennlig og lettere enn Spacemind rammen, da dette har vært i fokus gjennom hele produktutviklingsprosessen. Videre har det medført at rammen ikke har kunne gjennomgått fysiske tester for å teste rammens styrke. Rammen er imidlertid designet for å tåle alle worst case-scenarioer. Gruppen er dermed trygg på at rammen vil tåle alt av belastninger en CubeSat normalt blir utsatt for. Gruppen konkluderer med et vellykket prosjekt.

Referanseliste

- [1] 3D Natives. *All you need to know about PETG for 3D printing*. 2019. URL: <https://www.3dnatives.com/en/petg-3d-printing-guide-181220194/#!>. (Hentet: 30.04.2021).
- [2] 3D Natives. *3D Printing Materials Guide: Plastics*. 2020. URL: <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/#!>. (Hentet: 28.04.2021).
- [3] Alliance Finishing & Manufacturing. *Hard Anodize (Type III), Non-Dyed (Clear)*. URL: <https://www.alliance-finishing.com/price-list>. (Hentet: 11.05.2021).
- [4] Aubert, K. E. «Topologi». I: *Store norske leksikon* (2018). URL: <https://snl.no/topologi>. (Hentet: 10.04.2021).
- [5] Christensen, N. «Støping». I: *Store norske leksikon* (2018). URL: <https://snl.no/st%C3%B8ping>. (Hentet: 08.04.2021).
- [6] CubeSat Kit. *CubeSat Kit PCB Specification*. 2003. URL: http://www.cubesatkit.com/docs/CSK_PCB_Spec-A5.pdf. (Hentet: 14.03.2021).
- [7] Formlabs. *3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS*. URL: [https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/#Fused%20Deposition%20Modeling%20\(FDM\)](https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/#Fused%20Deposition%20Modeling%20(FDM)). (Hentet: 30.04.2021).
- [8] GOMSPACE. *NanoPower P110*. 2018. URL: <https://gomspace.com/UserFiles/Subsystems/datasheet/gs-ds-nanopower-p110-210.pdf>. (Hentet: 12.04.2021).
- [9] Grave, J. H. L. *TMM4115 Produktmodellering; TMM4121 Produktutvikling*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet; Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi; Institutt for produktutvikling og materialer, 2010.
- [10] Helseth, L. E. *ABS-plast*. 2018. URL: <https://snl.no/ABS-plast>. (Hentet: 07.04.2021).
- [11] Helseth, L. E. «degraderbar plast». I: *Store norske leksikon* (2019). URL: https://snl.no/degraderbar_plast. (Hentet: 03.05.2021).

- [12] Helseth, L. E. «Herdeplast». I: *Store norske leksikon* (2019). URL: <https://snl.no/herdeplast>. (Hentet: 07.04.2021).
- [13] Helseth, L. E. «Plast». I: *Store norske leksikon* (2019). URL: <https://snl.no/plast>. (Hentet: 07.04.2021).
- [14] Helseth, L. E. «polyetylentereftalat». I: *Store norske leksikon* (2019). URL: <https://snl.no/polyetylentereftalat>. (Hentet: 03.05.2021).
- [15] Jasen, J. *Pinnefresens anatomi og hvordan velge riktig verktøy til jobben*. URL: <http://www.tsbfengineering.com/jorgen/2018/8/8/pinnefresens-anatomi-og-valg-av-pinnefres>. (Hentet: 15.03.2021).
- [16] Johansen, H. *Aluminium*. 2012. URL: <https://materialteknologi.files.wordpress.com/2018/02/ml-aluminium-kompendium-mitdl.pdf>. (Hentet: 14.04.2021).
- [17] Johnstone, A. *CubeSat Design Specifications (1U-12U) REV 14 CP-CDS-R14 -DRAFT*. 2020. URL: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4eac1bacd/t/5f24997b6deea10cc52bb016/1596234122437/CDS+REV14+2020-07-31+DRAFT.pdf>. (Hentet: 11.01.2021).
- [18] Jones, H. W. «The Recent Large Reduction in Space Launch Cost». I: (2018). URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20200001093>. (Hentet: 19.05.2021).
- [19] Kalpakjian, S. og Schmid, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Prentice Hall, 2010.
- [20] Kalpakjian, S. og Schmid, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Prentice Hall, 2010, s. 172–195.
- [21] Kalpakjian, S. og Schmid, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Prentice Hall, 2010, s. 11.
- [22] Kurowski, P. M. *Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2017*. Mission: SDC Publications, 2017.
- [23] Kurowski, P. M. *Vibration analysis with SolidWorks simulation 2018*. Mission: SDC Publications, 2018.
- [24] MakerBot. *2020 GUIDE TO 3D PRINTING MATERIALS*. URL: <https://cdn.cnetcontent.com/syndication/mediaserverredirect/e6b5204e10f48834b7bc52e4ebb89b69/original.pdf>. (Hentet: 28.04.2021).

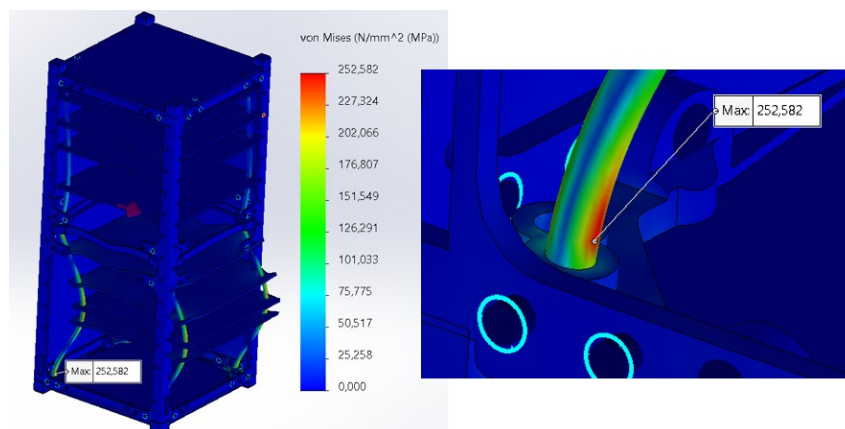
- [25] Manufacturing Network. *WHAT TYPES OF ANODISING ARE THERE, AND WHICH MATERIALS CAN YOU ANODISE?* URL: <https://www.manufacturingnetwork.com/knowledgebase/view/40#>. (Hentet: 17.03.2021).
- [26] MatWeb. *6082-O Aluminum*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=04ff101281a44a4196d5f887fd9191af>. (Hentet: 10.04.2021).
- [27] MatWeb. *Aluminum 5005-H12*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=ebb465d6e89f453582a6939177fd484b>. (Hentet: 10.04.2021).
- [28] MatWeb. *Aluminum 5005-H14*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=4d68415cc11a4003818339237a515a33>. (Hentet: 10.04.2021).
- [29] MatWeb. *Aluminum 5005-H34*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=5882aa95b96644559ec51020cdc1169e&n=1>. (Hentet: 10.04.2021).
- [30] MatWeb. *Aluminum 5005-H38*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3687f205bc05443db8ba25ac384e91dd>. (Hentet: 10.04.2021).
- [31] MatWeb. *Aluminum 5052-H32*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=96d768abc51e4157a1b8f95856c49028>. (Hentet: 10.04.2021).
- [32] MatWeb. *Aluminum 5052-H34*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=8644ac88ccb647869449d6ff6ddfbaed>. (Hentet: 10.04.2021).
- [33] MatWeb. *Aluminum 5052-H36*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=1a5729196f264cc78a3233bf558aee8a>. (Hentet: 10.04.2021).
- [34] MatWeb. *Aluminum 5052-H38*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=03ed379e437945a1a8dbff86c5907f74>. (Hentet: 10.04.2021).
- [35] MatWeb. *Aluminum 5052-O*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b3430ccca1334449b0d59cde9f977b57&ckck=1>. (Hentet: 10.04.2021).
- [36] MatWeb. *Aluminum 6061-O*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=626ec8cdca604f1994be4fc2bc6f7f63>. (Hentet: 10.04.2021).
- [37] MatWeb. *Aluminum 6061-T4; 6061-T451*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d5ea75577b1b49e8ad03caf007db5ba8>. (Hentet: 10.04.2021).

- [38] MatWeb. *Aluminum 6061-T6; 6061-T651*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a>. (Hentet: 10.04.2021).
- [39] MatWeb. *Aluminum 6082-T4*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=117e133f428e40949528be5a86250108>. (Hentet: 10.04.2021).
- [40] MatWeb. *Aluminum 6082-T6*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=fad29be6e64d4e95a241690f1f6e1eb7>. (Hentet: 10.04.2021).
- [41] MatWeb. *Aluminum 7075-O*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=da98aea5e9de44138a7d28782f60a836>. (Hentet: 10.04.2021).
- [42] MatWeb. *Aluminum 7075-T6; 7075-T651*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d&ckck=1>. (Hentet: 10.04.2021).
- [43] MatWeb. *Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Extruded*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=3a8afcddac864d4b8f58d40570d2e5aa&n=1>. (Hentet: 10.04.2021).
- [44] MatWeb. *Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced*. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20>. (Hentet: 10.04.2021).
- [45] McMaster-Carr. *316 Stainless Steel Body and 316 Stainless Steel Nose*. URL: <https://www.mcmaster.com/stainless-steel-spring-plungers/long-nose-spring-plungers-5/>. (Hentet: 11.05.2021).
- [46] MatWeb. *Aluminum 5005-O*. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=5481a70aa799485f85f404ea3d729254>. (Hentet: 10.04.2021).
- [47] Mouser Electronics. *D2F-01L*. URL: <https://no.mouser.com/ProductDetail/Omron-Electronics/D2F-01L?qs=0w99tykdtPJyAZbwr7e4aQ%3D%3D>. (Hentet: 09.05.2021).
- [48] Mæhlum, L. «3D-printing». I: *Store norske leksikon* (2020). URL: <https://snl.no/3D-printing>. (Hentet: 08.04.2021).
- [49] Nilsen, J. og Johnsen, A. *Sponfraskillende bearbeiding og skjæreteknikk*. Norsk Industri, 2009.

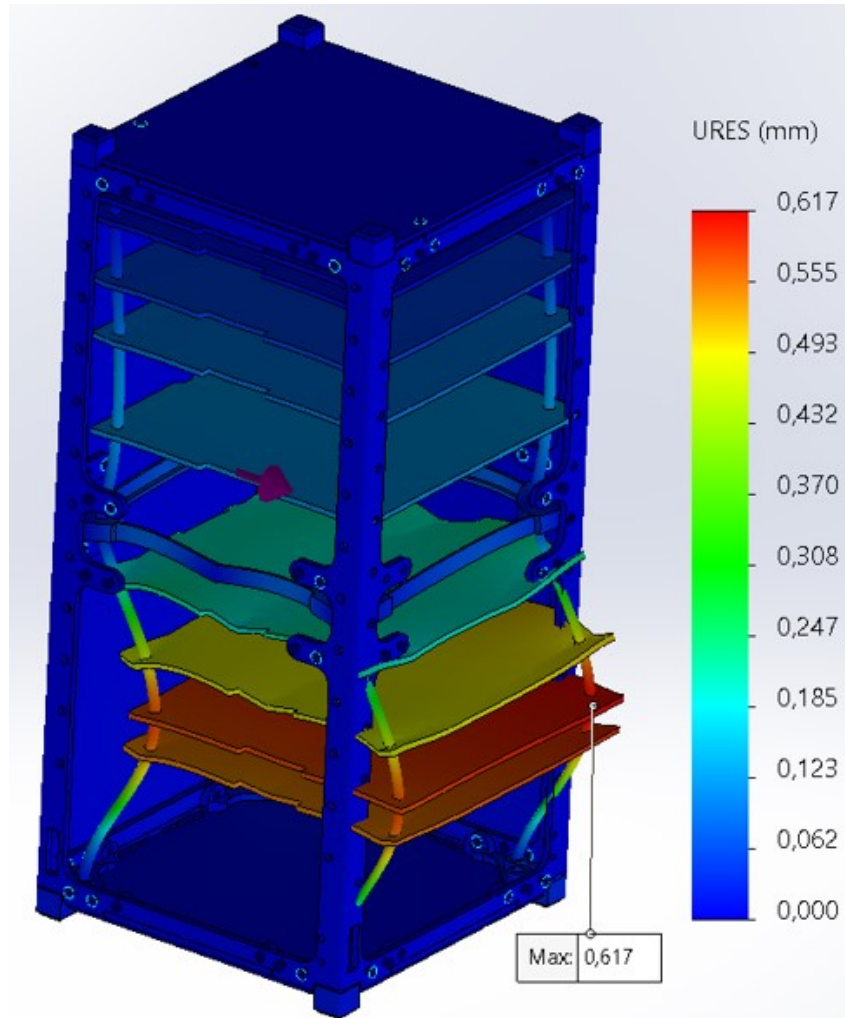
- [50] Norsk Stål. *Norsk Stål Stål Metaller Aluminium Rustfritt Tjenester Prislister*. 2018. URL: <https://pub.webbook.no/norskstaal/prislister/files/assets/common/downloads/publication.pdf>. (Hentet: 11.05.2021).
- [51] Pignatelli, D. og Mehrparvar, A. *CubeSat Design Specifications (CDS) REV 13*. 2014. URL: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf. (Hentet: 08.03.2021).
- [52] Ramya, A. og Vanapalli, S. «3D printing technologies in various applications». I: *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* 7.3 (2016), s. 396–409. DOI: https://www.robolab.in/wp-content/uploads/2017/12/IJMET_07_03_036.pdf.
- [53] Rossen, E. *DAK (IT)*. 2017. URL: https://snl.no/DAK_-_IT. (Hentet: 08.04.2021).
- [54] Rosvold, K. A. «Overflatebehandling». I: *Store norske leksikon* (2020). URL: <https://snl.no/overflatebehandling>. (Hentet: 02.05.2021).
- [55] RS Components AS. *Female PCB spacer, M3, 10mm length*. URL: <https://no.rs-online.com/web/p/standoffs/1613647/>. (Hentet: 11.05.2021).
- [56] RS Components AS. *RS PRO Plain Stainless Steel Threaded Bar, M3, 1m*. URL: [https://no.rs-online.com/web/p/threaded-rod/2009942/?cm_mmc=NO-PLA-DS3A--google--CSS_NO_NO_Fasteners_%26_Fixings_Whoop--\(NO:Whoop!\)+Threaded+Rod--2009942&matchtype=&pla-309921256202&gclid=EAIaIQobChMIve2p1JjB8AIVBa0yCh11MgzWEAQYASABEgJJzvD_BwE&gclidsrc=aw.ds](https://no.rs-online.com/web/p/threaded-rod/2009942/?cm_mmc=NO-PLA-DS3A--google--CSS_NO_NO_Fasteners_%26_Fixings_Whoop--(NO:Whoop!)+Threaded+Rod--2009942&matchtype=&pla-309921256202&gclid=EAIaIQobChMIve2p1JjB8AIVBa0yCh11MgzWEAQYASABEgJJzvD_BwE&gclidsrc=aw.ds). (Hentet: 11.05.2021).
- [57] Shahrubudin, N., Lee, T. og Ramlan, R. «An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications». I: *Procedia Manufacturing* 35 (2019), s. 1286–1296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.
- [58] Skjeggedal, O. «Fres». I: *Store norske leksikon* (2019). URL: <https://snl.no/fres>. (Hentet: 06.04.2021).
- [59] Skrujernet.no. *Maskinskrue DIN 965, senkhode, PH, rustfritt A2, M2,5*. URL: <https://www.skrujernet.no/no/din-965-senkhodeskrue-senkhode-ph-iso-7046-3>. (Hentet: 11.05.2021).

- [60] SolidWorks. *Everything You Need to Know about Topology Optimization*. URL: <https://www.solidworks.com/media/everything-you-need-know-about-topology-optimization>. (Hentet: 12.04.2021).
- [61] SolidWorks help. *SIMP Method for Topology Optimization*. 2019. URL: https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm. (Hentet: 27.04.2021).
- [62] SpaceX. *Falcon User's Guide*. 2020. URL: https://www.spacex.com/media/Falcon_Users_Guide_082020.pdf. (Hentet: 14.03.2021).
- [63] The Aluminium Association. *Aluminum Alloys 101*. URL: <https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>. (Hentet: 08.04.2021).

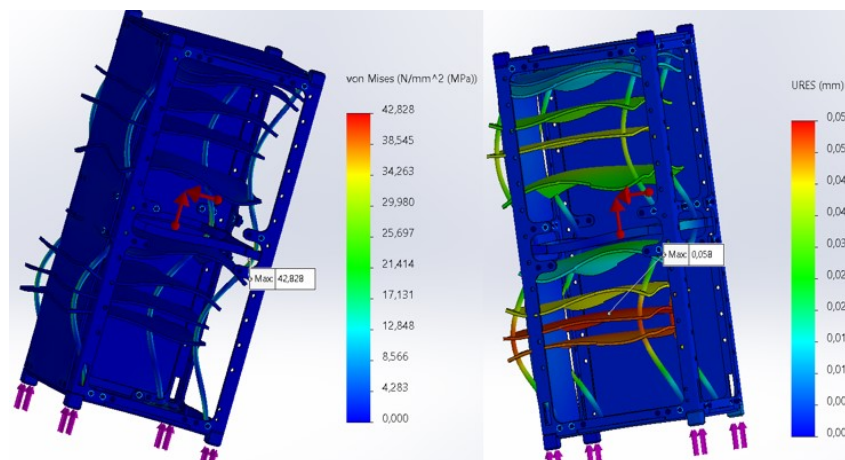
Analyser av sammensatt ramme



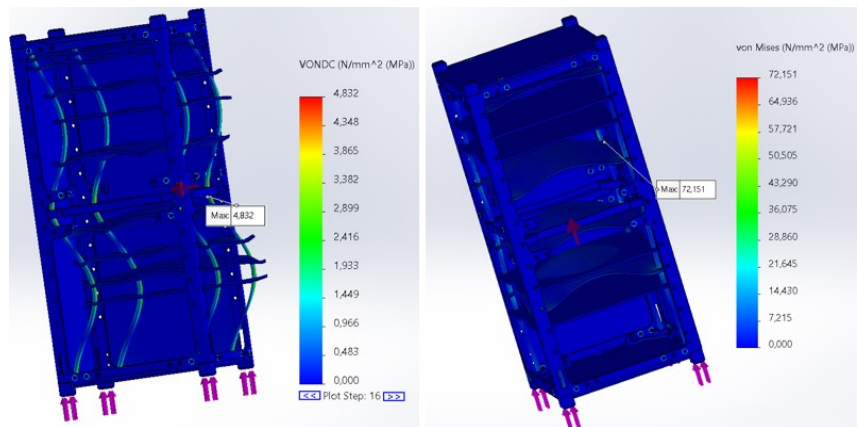
Figur 7.1: Venstre: Sjokkanalyse av sammensatt ramme med lasttilfelle gitt av Orbit. Høyre: Største spenninger [MPa] opptrer på gjengestang mot hylse.



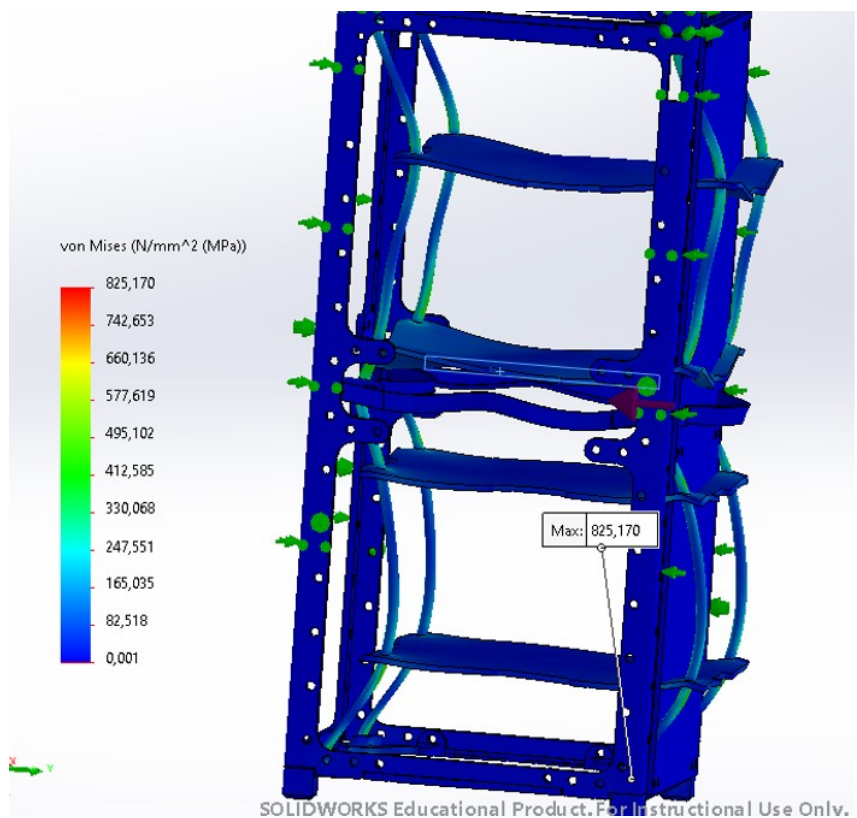
Figur 7.2: Sjokkanalyse av sammensatt ramme med lasttilfelle gitt av Orbit. Maksimal forskyvning [mm].



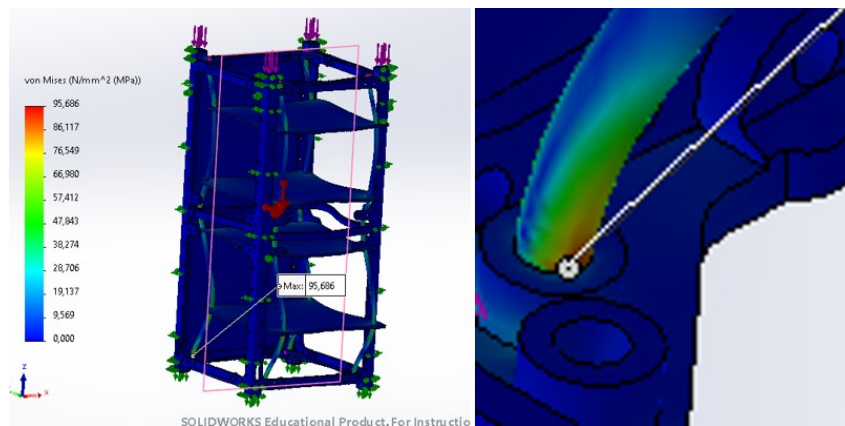
Figur 7.3: Statisk analyse av sammensatt ramme med lasttilfelle gitt av Orbit. Venstre viser spenninger [MPa], til høyre vises forskyvninger [mm].



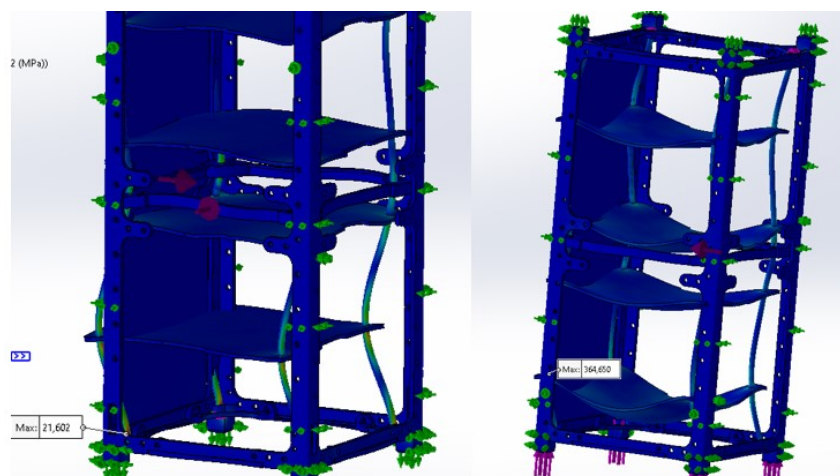
Figur 7.4: Vibrasjonsanalyse av sammensatt ramme med lasttilfelle gitt av Orbit. Til venstre er resultatet av en harmonisk vibrasjonsanalyse. Til høyre er resultatet av en tilfeldig vibrasjonsanalyse. Begge viser spenninger [MPa].



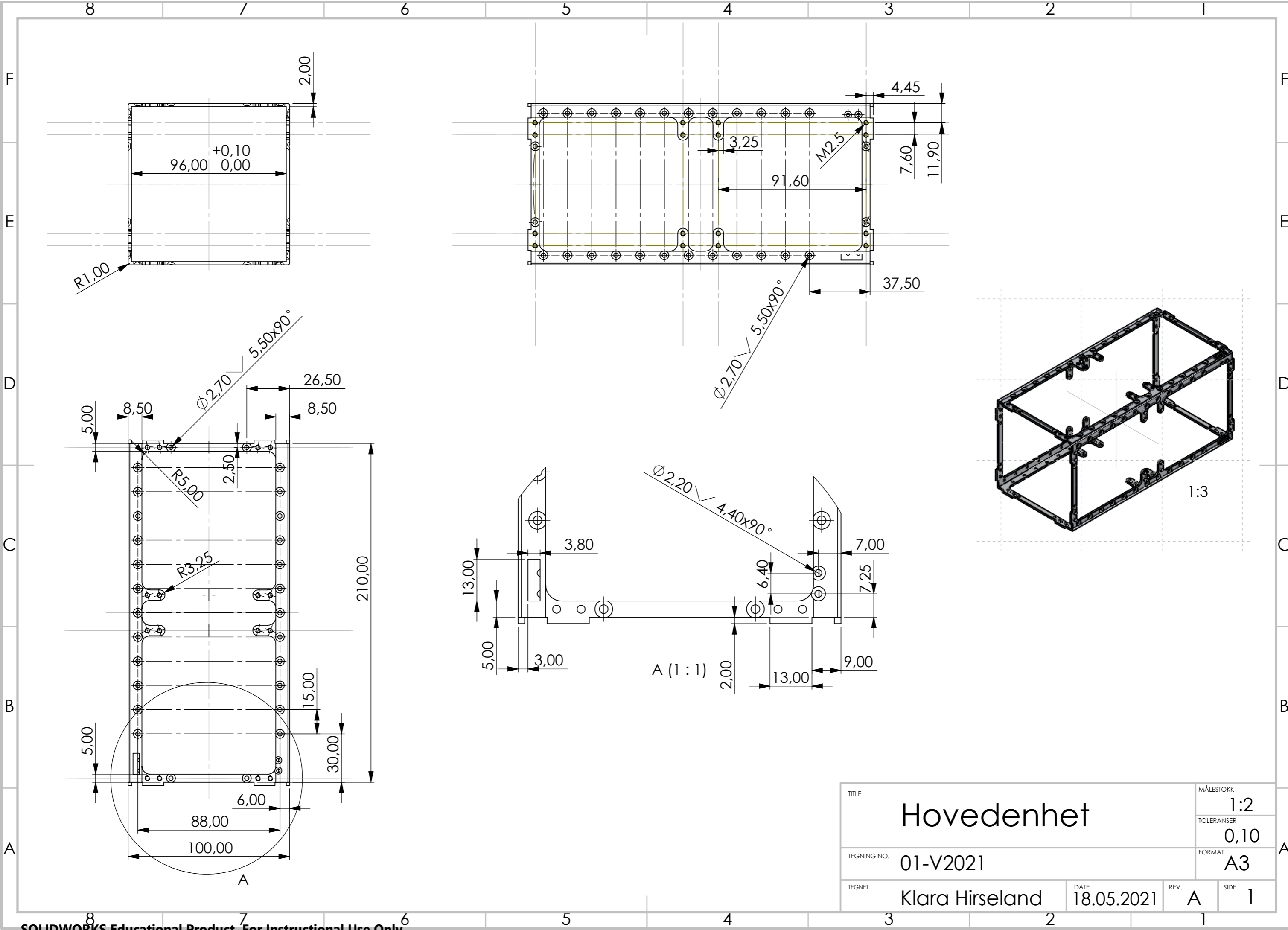
Figur 7.5: Sjokktestanalysen av sammensatt ramme med verste lasttilfelle.



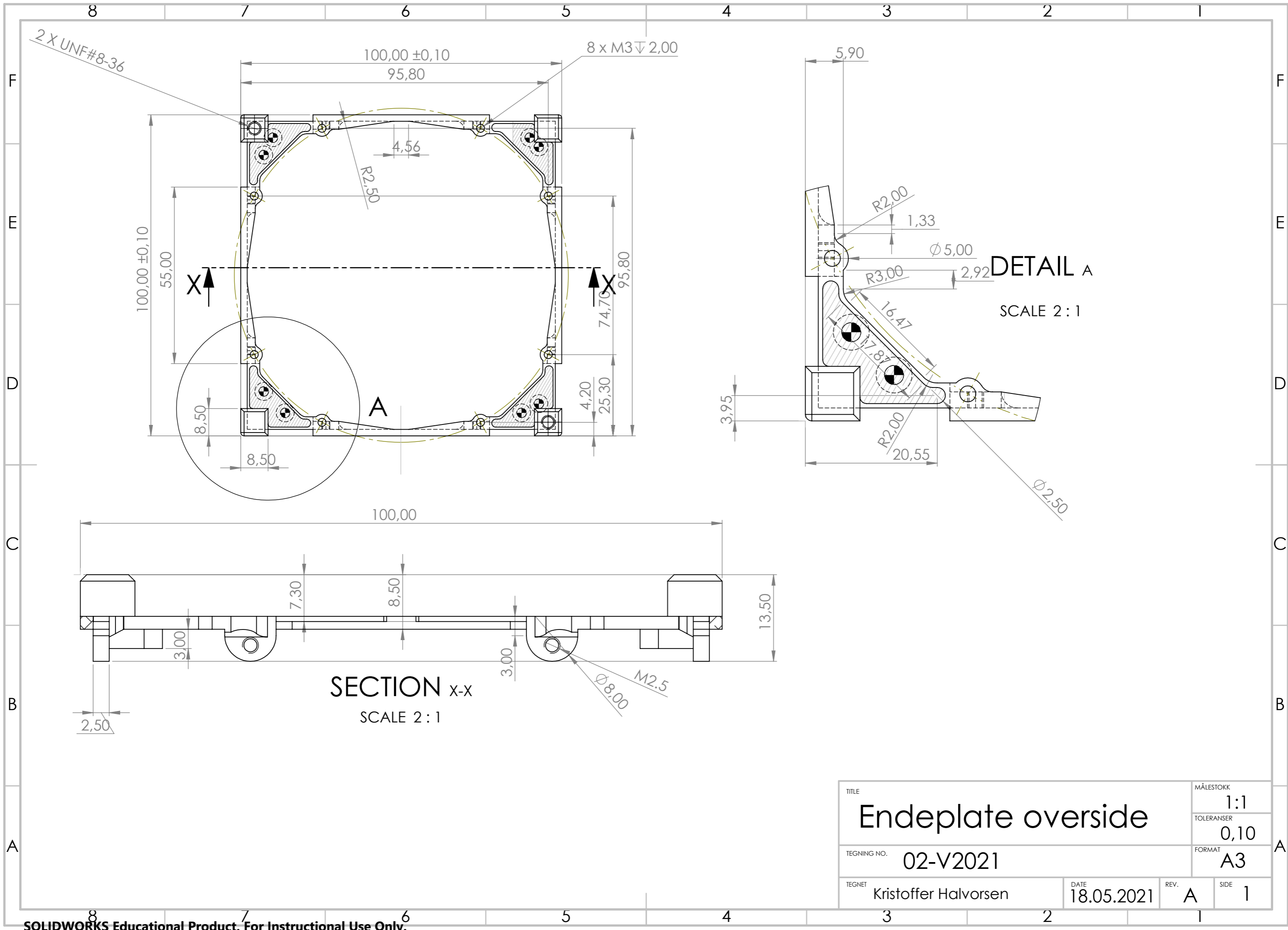
Figur 7.6: Statisk analyse av sammensatt ramme med verste lasttilfelle. Venstre viser hele rammen med spenninger. Til høyre ser vi at de største spenningene oppstår på gjengestang mot hylsene.



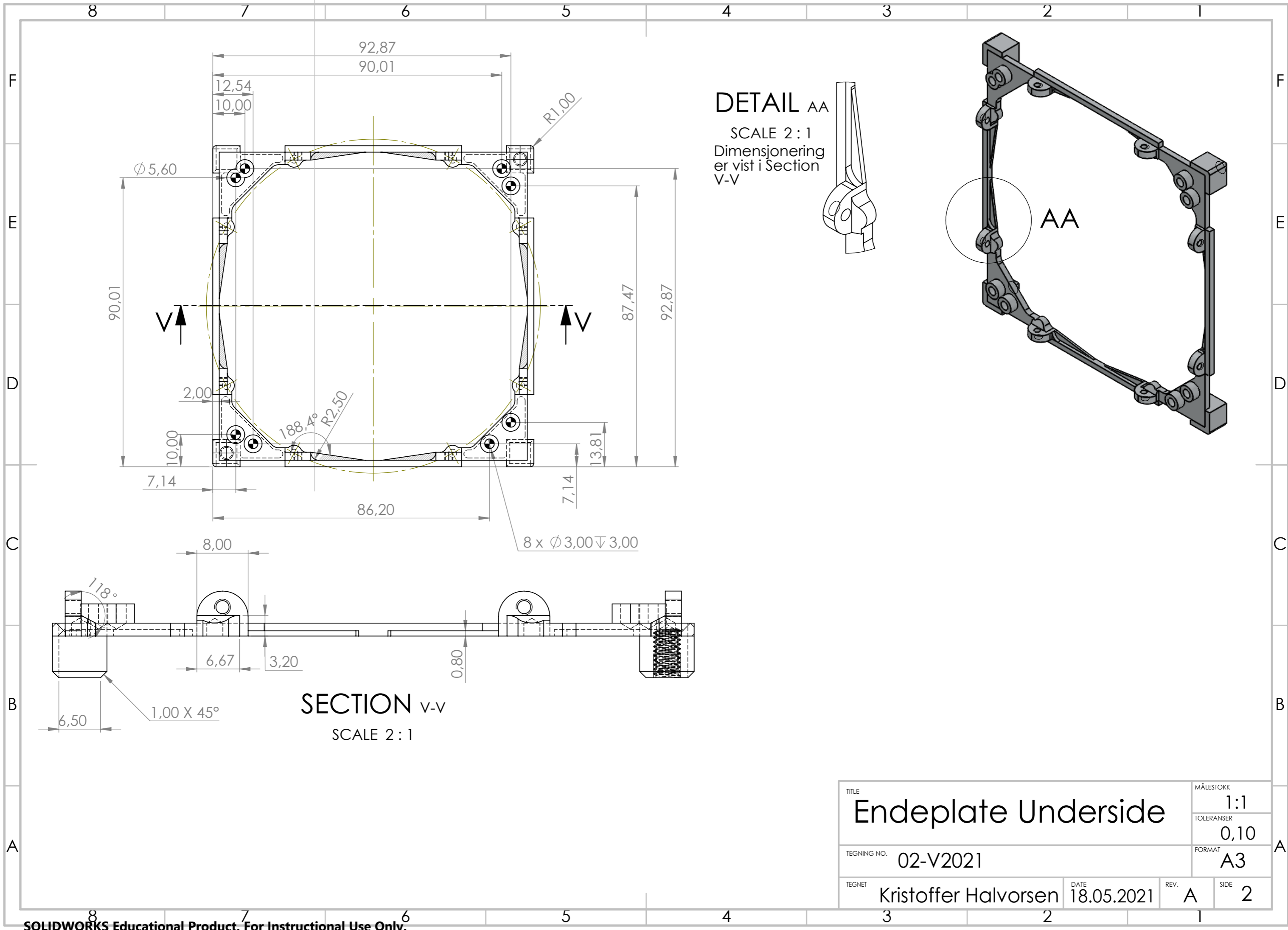
Figur 7.7: Til venstre er resultatet av en harmonisk vibrasjonsanalyse. Til høyre er resultatet av en tilfeldig vibrasjonsanalyse. Begge med verste lasttilfelle.



TITLE		MÅLESTOKK	
Hovedenhet		1:2	
		TOLERANSER	
TEGNING NO.		0,10	
01-V2021		FORMAT	
A		A3	
TEGNET	DATE	REV.	SIDE
Klara Hirseland	18.05.2021	A	1

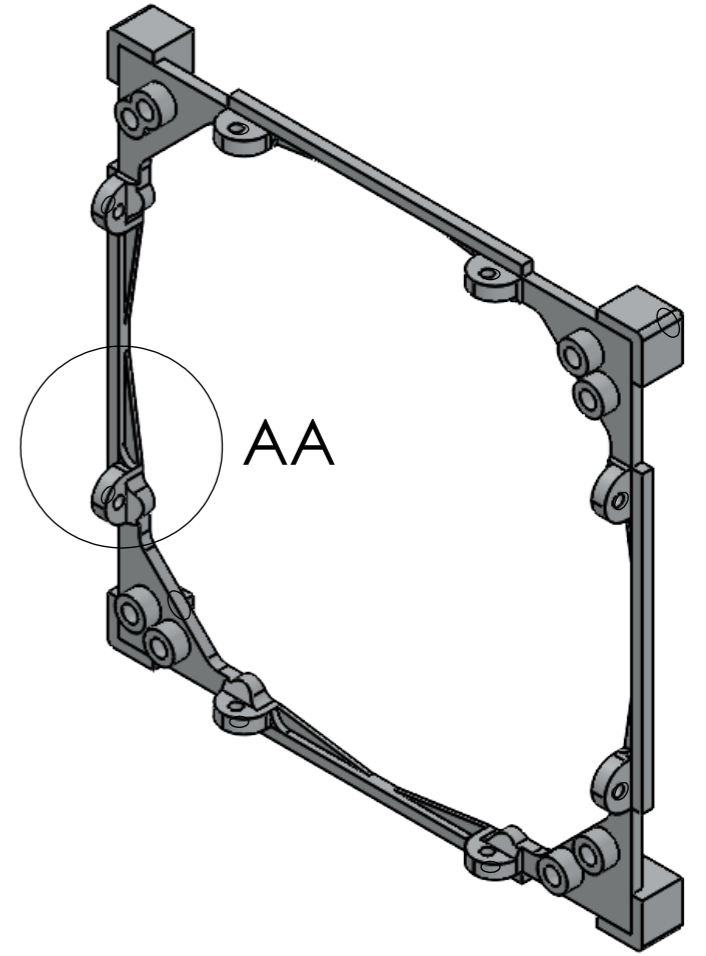


TITLE		MÅLESTOKK	
Endeplate overside		1:1	
		TOLERANSER	
TEGNING NO.		0,10	
02-V2021		FORMAT	
A3		REV.	
TEGNET		DATE	SIDE
Kristoffer Halvorsen		18.05.2021	A 1



DETAIL AA

SCALE 2 : 1
 Dimensjonering
 er vist i Section
 V-V



SECTION V-V
 SCALE 2 : 1

TITLE		MÅLESTOKK	
Endeplate Underside		1:1	
		TOLERANSER	
TEGNING NO. 02-V2021		0,10	
TEGNET		FORMAT	
Kristoffer Halvorsen		A3	
DATE	REV.	SIDE	
18.05.2021	A	2	

