

MASINAEHITUSE INSTITUUT  
Tootearenduse õppetool

MES70LT

**Paul Liias**

**Nanosatelliitide struktuuri konstruktsioonide  
projekteerimine ja testimine**

Autor taotleb  
tehnikateaduse magistri  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2016

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Martin Eerme juhendamisel

12. jaanuar 2016 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

12. jaanuar 2016 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....2016 a.

..... allkiri

TTÜ masinaehituse instituut  
Tootearenduse õppetool  
**MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**  
2015 aasta sügissemester

Üliõpilane: Paul Lias, 121883  
Õppekava: MAHB  
Spetsialiseerumine: Tootearendus  
Juhendaja: Tootearenduse õppetooli juhataja, Martin Eerme  
Konsultandid: .....

**MAGISTRITÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles) Nanosatelliitide struktuuri konstruktsioonide projekteerimine ja testimine  
(inglise keeles) Development and testing of nanosatellite structure elements

**Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Turu uuring	Mai 2015
2.	Nõuete loetelu koostamine	August 2015
3.	Lahenduste otsimine	September 2015
4.	Korpuse projekteerimine ja analüüsid	Oktoober 2015
5.	Tootmine ja testimine	Detsember 2015
6.	Töövormistamine	Jaanuar 2016

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:**

Lõputöö eesmärk on leida nii tehniliselt kui ka majanduslikult efektiivne viis ja komponendid nanosatelliitide korpuste projekteerimiseks.

**Täiendavad märkused ja nõuded:** .....

**Töö keel:** eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada dekanaati hiljemalt ..... **Töö esitamise tähtaeg**.....

**Üliõpilane** ..... /allkiri/ ..... kuupäev.....

**Juhendaja** ..... /allkiri/ ..... kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

## Sisukord

<b>AUTORIDEKLARATSIOON</b> .....	2
Lühendid.....	6
Eessõna.....	7
1. Sissejuhatus .....	8
1.1. CubeSat .....	8
1.2. Ülesande püstitus.....	9
2. Olemasolevad lahendused ja tooted .....	10
2.1. Turg .....	10
2.2. Turul olemas olevad tooted .....	10
3. Nõuded korpusele.....	14
3.1. CDS-ist tulenevad nõuded.....	14
3.2. COTS toodetel ja teenustelt tulenevad nõuded.....	16
3.3. Nõuete järelendus.....	17
4. CubeSati korpuse võimalikud lahendused.....	18
4.1. 1-3U korpuste projekteerimine.....	18
4.2. Korpuse disaini sõlmed .....	19
4.2.1. CS raam .....	20
4.2.2. Materjalid .....	22
4.2.3. Pinnakatted .....	25
4.2.4. Trükkplaatide kinnitus.....	26
4.2.5. Poldid ja inserdid.....	28
4.2.6. Seinapaneelid.....	29
4.2.7. Eraldusüliti ja eraldusvedru .....	29
4.2.8. Ülevaade.....	31
5. Disaini lahendus .....	32
5.1. Disaini valik .....	32
5.2. Korpuse projekteerimine .....	33
6. Arvutused ja testid.....	38
6.1. Mass ja massikese .....	38
6.2. Koormus .....	39
6.3. Omavõnkesageduste otsimine .....	41
6.4. Testide tulemused.....	44
7. Kokkuvõte .....	46
8. Kokkuvõte inglise keeles.....	47

Kasutatud kirjandus .....	48
Lisad .....	51
1. Lisa – CDS joonis.....	51
2. Lisa - Nanoracks.....	52
3. Lisa – pingete ja deformatsioonide tulemused .....	53
4. Lisa - omavõnkesagedused.....	56
5. Lisa - joonised .....	61

## Lühendid

CDS - *CubeSat Desing Specification*

CS – CubeSat

COTS – *Commercial of the shelf*

U – *Unit / ühik*

PCB - *printed circular board / trükkplaat*

RBFp - *remove before flight pin*

DS – *deployment switch*

FEM - *Finite element method*

ISIS – *Innovative Solutions In Space*

NRCSD - *NanoRacks CubeSat Deployer*

ECSS - *European Cooperation for Space Standardization*

CAD - *Computer-aided design*

## **Eessõna**

Lõputöö teema, nanosatelliitide struktuuri konstruktsioonide projekteerimine ja testimine, on pärit Eesti esimesest satelliidi projektist ESTCube-1 välja kasvanud firmast pl Space OÜ ja hiljem arendati edasi Radius Space OÜ-s. Korpuste ja katseseadmete prototüüpimisega toetas Radius Machining OÜ. Tartu Observatoorium toetas projekti katseseadmetega.

## 1. Sissejuhatus

Antud lõputöö käsitleb väikesatelliidi korpuse konstrueerimise temaatikat, millega lõputöö autor Paul Liias alates 2008 aastast aktiivselt tegelema on. Esimesed kogemused väikesatelliitide projekteerimisega on pärit Eesti esimese satelliidi ESTCube-1 projektist. Peale edukat ESTCube projekti on autor töötanud mitmete teiste satelliitide korpuste ja mehhanismide projekteerimise või tootmisega. Lõputöö käigus kasutatakse viimase seitsme aasta jooksul saadud valdkonna teadmisi ja neile tuginedes projekteeritakse sobilik satelliidi korpus. Projekteerimise käiguse ei võeta arvesse mitte ainult tehnilisi nõudeid vaid arvestatakse ka turult toimuvate muutustega.

### 1.1. CubeSat

*CubeSat Design Specification* (CDS) ehk rahvakeeles tuntud kui CubeSati standard on pärit California Polütehnilisest Ülikoolist (Calpoly) ja projekt loodi juba aastal 1999. Eesialgne eesmärk oli arendada uus satelliitide platvorm, millega ülikoolides odavaid kosmose projekte teha. Tänapäevaks viiakse CubeSati projekte läbi juba üle 100-s ülikoolis maailmas. [1] Esimene CubeSat lendas alles aastal 2003 Eesti esimene satelliit oli ka CubeSat ja ta lennutati orbiidile 7. mail 2013. [2]

CubeSatid kuuluvad nanosatelliitide hulka. Nanosatelliidi all mõeldakse Maa tehiskaaslast massiga 1 kg kuni 10 kg. Kõik satelliidid mille mass on alla 500 kg kuuluvad väikesatelliitide hulka. [3]

Alguses loodi CubeSatit pigem õppe eesmärgil ülikooli projektide jaoks. Tänapäevaks on CubeSati standard aga populaarsust kogunud ja ka ettevõtlusesse läbimurdnud. Silicon Valleys on mitmed *startup* ettevõtted oma äri just CubeSat platvormile üles ehitanud. Suureks eeliseks on nanosatelliitide puhul saanud nende hind. Esiteks väikese kaalu tõttu on võimalik nanosatelliite odavalt orbiidile toimetada ja kindel standard aitab kaas protsessi kiirendamiseks. Teine põhjus, mis on veelgi olulisem on satelliitide omahind. Nimelt koos nanosatelliitide kiire arenguga on tekkinud ka mitmeid ettevõtteid kes kommertsiaalseid alamsüsteeme pakuvad. Ehk toimub alamsüsteemide mass tootmine, millega on võimalik toote hinda oluliselt alandada.



## 1.2. Ülesande püstitus

Nõudlus CubeSattide toodete järgi on viimaste aastatega hüppeliselt kasvanud. Standard on loonud keskkonnas, et tooteid omavahel ühildada. Samas siin on ka palju puuduseid, sest standard annab pigem kindlad nõuded mehaanilistele liidestele CubeSati ja kanderaketi vahel. Satelliidi elektroonika lahendamiseks on arendajatel aga käed rohkem vabad. Seega suureks probleemiks nii nimetatud CubeSattide *commercial of the shelf* (COTS) komponentidega on, et mitte kõik poest ostetud alamsüsteemid ei ühildu omavahel. Ainsaks tooteks, mida oleks võimalik arendada sellisena, et oleks võimalik kasutada pea kõigi turul olevate süsteemidega on satelliidi korpus.

Turul on paar CubeSati korpust, mis on end küllaltki hästi müünud. Samas need tooted on küllaltki kallid ja seavad piiranguid kasutatavatele komponentidele. Tehnoloogia arenguga on nad ka ajast maha jäänud ja vajavad värskendamist.

Mitmed meeskonnad plaanivad oma CubeSatile korpuse ise projekteerida ja toota. Tihti kõlab see lihtsamamini kui see tegelikult on, sest väikeste projekteerimise vigade või sõlmede vale lahenduse tõttu võib konstruktsioon kõlbmatuks muutuda.

Lõputöö eesmärgiks on tuua välja väikesatelliitide struktuuride arenduse juures olulised nõuded ja neile tuginedes arendada uus standartne CubeSat struktuuride tootepere mis vastaks turu muutustele. Töö sisaldab järgmisi punkte

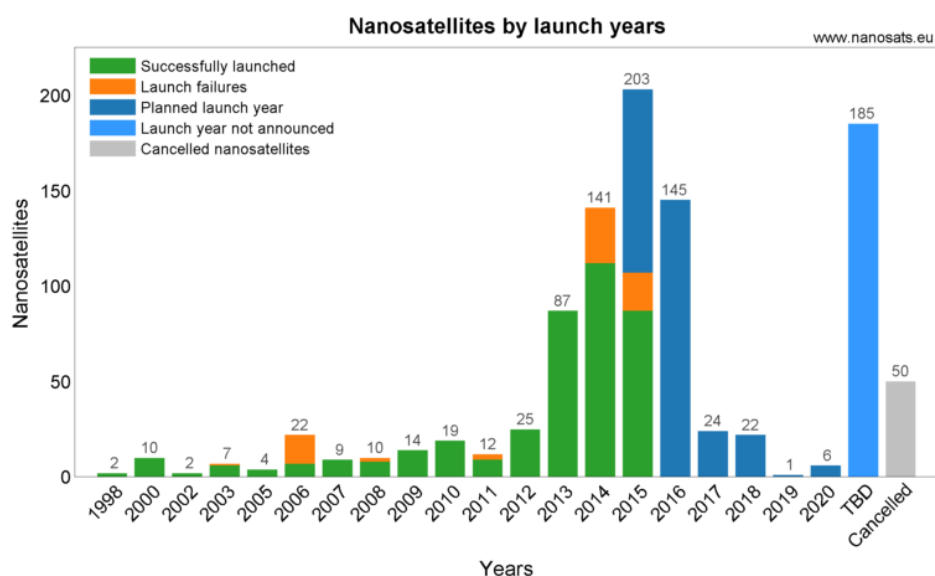
- Turu ja olemasolevate toodete analüüs
- Nõuded tootele
- Võimalikud lahendused
- Tootmine ja testimine

## 2. Olemasolevad lahendused ja tooted

Selles peatükis keskendume olemasolevatele lahendustele ja sellele mis suunas nanosatelliitide turg liigub. Ehk saab ülevaate nõuetest, vajadustest ja teiste tehtud tööst

### 2.1. Turg

Nanosatelliitide turg on viimaste aastatega kiirelt kasvanud ja sele 1 toob toimunu kõige paremini välja. Võrreldes aastaga 2012 on tänasega toimunud hüppeline kasv orbiidile saadetud CubeSattide seas ja tulevatel aastatel on veelgi suuremat kasvu oodata. Iga orbiidile saadetav satelliit vajab aga korpust, seega võib eeldada et nõudlus valmis ja erilahenduste vastu kasvab.



Sele 1: Nanosatelliitide stardid aastate kaupa [4]

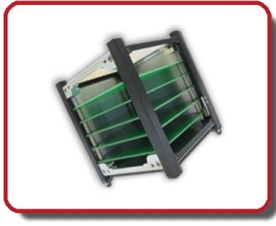


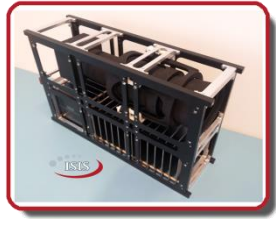
### 2.2. Turul olemas olevad tooted

Suurimateks tootjateks, kes täna CubeSat COTS korpuseid pakuvad on Euroopas ISIS ja USA-s Pumpkin. Lisaks kahele suuremale on veel paar väiksemat firmat, kelle tooteid ka uurime.

*Innovative Solutions in Space* (ISIS) on kõige laialdasem praegu turul olev tootepere. Nende tooted algavad juba 0,5U-st ja praegu suurim, mida pakutakse on 6U. ISIS-e suureks eeliseks

on nende modulaarsus, freesitud detailid, tugevdatud keermed ja kõik mis on koostamiseks tarvis on tootega kaasas. Lisaks on mitmed nende toodetest juba ka kosmoses lennanud.

Tabel 1: ISISE tooted [5]


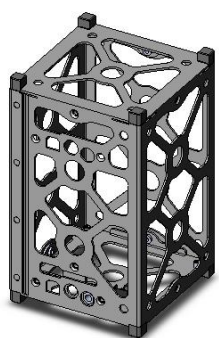
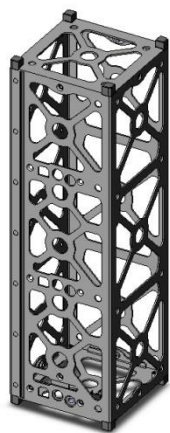
			
<b>1U</b>	<b>2U</b>	<b>3U</b>	<b>6U</b>

Tabel 2: ISISE toodete eelised ja puudused

<b>Eelised</b>	<b>Puudused</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulaarne struktuur</li> <li>• Toode sisaldab kõike koostamiseks</li> <li>• Tugevdatud keermed</li> <li>• Freesitud detailid</li> <li>• Osad tooted on juba kosmoses käinud</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kõrge hind</li> <li>• Keeruline koostada</li> <li>• Suhteliselt pikka tarneaeg</li> </ul>

Teiseks suuremaks konkurendiks on PUMPKIN, kelle tooted on näidatud tabelis 3. Võrreldes ISISega on Pumpkini lähenemine teine ehk pakutakse madalamat kvaliteeti ja sellega ka madalamat hinda. Toote müügi poolest on kontsept hästi toimunud sest PUMPKIN on enim müüdud CubeSati korpus maailmas.

Tabel 3: PUMPKINI tooted [6]

 <p>1U Skeleton CAD Model RevD</p>	 <p>1.5U Skeleton CAD Model RevD</p>	 <p>3U Skeleton CAD Model RevD</p>
<b>1U</b>	<b>2U</b>	<b>3U</b>

Tabel 4: PUMPKINI toodete eelised ja puudused

Eelised	Puudused
<ul style="list-style-type: none"><li>• Odav hind</li><li>• Sobib kokku enamus turul olevate COTS toodetega</li><li>• Korduvalt kosmoses käinud</li><li>• Madalam kaal kui ISIS-el</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Painutatud lehtmetailist – tolerantsid pole head</li><li>• Palju detaile - Koostamine on pigem keeruline</li><li>• Korpuse kuju seab piiranguid satelliidi lastile</li></ul>

Väikemate konkurentidena võib lugeda Šveitsi firmat Else (endine GOSMOZ), Leedu Up&Above ja SkyFox Labs. Tänapäevaks ei ole nad aga suutnud ühtegi oma toodetest mõnele teisele satelliidi projektile veel müüa.

Sele 2 kujutatud Else on neist kindlasti kõige innovaatilisem projekt, sest neid on välja töödeldud täiesti uus lahendus, mis on sarnane suurematel satelliitidel kasutatavate struktuuridega. Uudne lahendus aitab lihtsustada satelliidi koostamise protsessi. Samas kõigel heal on oma hind ja toode toob kaasa endaga olulisi miinused, mis on loetletud tabelis 5.

Sele 2: Else toode [7]

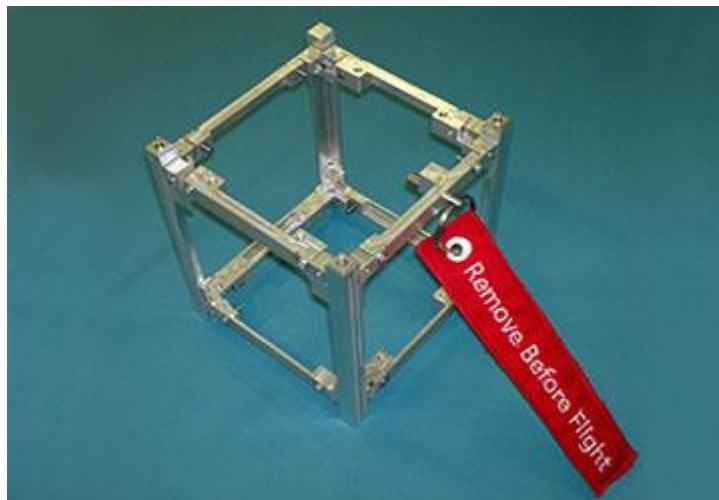


Tabel 5. Else toote eelised ja puudused

<b>Eelised</b>	<b>Puudused</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Satelliidi integratsioon on lihtne</li><li>• Freesitud detailid</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kõige kallim lahendus</li><li>• Palju detaile</li><li>• Korpuse kuju seab piiranguid satelliidi lastile</li><li>• Turul ei ole raamile sobivat elektroonikat müügil, ehk ei vast COTS toodete liidestele</li></ul>

Leedu firma Up&Above ei ole millegi uuega panustanud. Toode tugineb pigem ISIS-e lahendusele, kuid on sellest kehvem. [8] Korpus on küll kosmosesse saadetud, aga reaalselt pole ta praktiline ja järgmistes projektides rakendust ilmselt ei leie.

Seles 3 näidatud SkyfoxLabi toote kohta käib sama jutt mis ka Up&Above poolt pakutavale lahendusele. Lisaks tundub raam ka oluliselt raskem olevat kui eelnevalt nimetatud suurematel firmadel.



Sele 3: SkyfoxLab toode [9]

### 3. Nõuded korpusele

Nõuded loodavale tooteperele tulenevad peamiselt CDS-ist ja turul olevatest alamsüsteemidest, millega korpus ühilduma peab hakkama. Kõik nõuded, mis on esitatud CDS-is ei pruugi korpuse disainimisel väga suurt rolli mängida, sest need puudutavad pigem rohkem satelliidi ehitajat või koostajat. Antud lõputöös me ei käsitlenud Euroopa Kosmoseagentuuri poolt koostatud standardit ECSS, sest see on sellise projekti jaoks liiga mahukas ja CDS katab enamuse olulisi nõudeid ära.

#### 3.1. CDS-ist tulenevad nõuded

Tabelis 6 on toodud välja olulisemad nõuded CDS-ist mis puudutavad otseselt CubeSati struktuuride arendamist.

Tabel 6: CDSi nõuded

Üldised nõuded [1]	
CDS 3.1.2	Kõik osad peavad jääma stardi ajal CubeSati külge.
CDS 3.1.7	CubeSatis kasutatud mürgiseid materjalid peavad olema kooskõlas AFSPCMAN 91-710, Volume 3
CDS 3.1.8	CubeSati materjalid peavad olema madala <i>out-gassing</i> omadustega, et vältida teiste satelliitide saastamist integratsioonil, testimisel ja stardil.
CDS 3.1.8.1	CubeSati materjali maksimaalne massikadu (TML) $\leq 1.0\%$
CDS 3.1.8.2	CubeSati materjalide kondenseerumisel kogutud kaotatud materjal (CVCM) $< 0.1\%$
Mehaanilised nõuded [1]	
CDS 3.2.1 / 3.2.2	CubeSat peab kasutama sama koordinaadisüsteemi nagu joonisel lisas 1 näidatud. CubeSat tuleb Külge –Z ees sisestada P-POD-i.
CDS 3.2.3	Ükski komponent rohelisel ega kollasel alal ei tohiks ületada 6.5 mm pinda normaali suunas.
CDS 3.2.5	Rööbaste miinimum laius peab olema 8.5 mm.
CDS 3.2.6	Rööbaste pinnakaredus peab olema alla 1.6 $\mu\text{m}$ .

CDS 3.2.7	Rööbaste kantide raadiused ümmardatakse vähemalt 1 mm.
CDS 3.2.8	Rööbaste tipud +/-Z küljel peavad olema minimaalse pinnaga 6.5 mm x 6.5 mm
	CubeSati konfiguratsioon ja mõõtmed peavad olema lisa 1 joonise järgi.
CDS 3.2.9	Vähemalt 75% CubeSati rööbastest peab olema kontaktis P-POD-i omadega.
Mass [1]	
CDS 3.2.10/3.2.12/3.2.13	Maksimaalne 1U/2U/3U CubeSati mass ei tohiks ületada vastavalt 1.33/2.66/4.0 kg.
CDS 3.2.10.1/3.2.12.1/3.2.13.1	Suurem mass võib missioonist olenevalt ka suurem olla.
CDS 3.2.14	CubeSati gravitatsiooni keskpunkt ei peaks asuma 2 cm kaugusel oma geomeetrisest keskpunktist X ja Y telje sihis.
CDS 3.2.14.1/3/4	1U/2U/3U CubeSat-i massikeske peaks asuma Z telje sihis vastavalt 2/4.5/7 cm kaugusel geomeetrisest keskkohast.
Materjalid [1]	
CDS 3.2.15	Nii CubeSat-i raami, kui ka rööbaste jaoks peaks olema kasutatud alumiinium 7075, 6061, 5005 või 5052.
CDS 3.2.16	CubeSat-i rööpad ja otsad, mis puutuvad kokku P-Pod-iga ja teiste CubeSattidega, peavad olema anodeeritud alumiiniumist, et vältida külmkeevitust P-Pod-is.
Elektri nõuded [1]	
CDS 3.3.7	CubeSat peab omama <i>remove before flight pinni</i> (RBFp). RBFp tuleb eemaldada, kui CubeSat P-Podi asetatakse.
CDS 3.3.2	CubeSatil peab olema rööpa tipus vähemalt üks eralduslüüti.
Töönõuded [1]	
CDS 3.2.17	1U, 1.5U ja 2U CubeSatid peavad kasutama eraldusvedrut.

### 3.2. COTS toodetel ja teenustel tulenevad nõuded

Lisaks CDSi nõuetele, millest enamus on pigem soovituslikud, peame vaatama ka teisi nõudeid. Tabelis 7 on loetletud erinevad teised nõuded, mis tulevad turul olevatest toodetest, teenuse pakkujatel ja eelnevate projektide kogemusest nagu näiteks ESTCube-1.

Tabel 7: COTS toodetelt ja teenustelt tulenevad nõuded

<b>Üldised nõuded [10]</b>	
ESTCube	Satelliidi detailid peaksid olema mitte magnetilisest materjalist.
ESTCube	Modulaarne struktuur piirab vähem satelliidi koostamist.
<b>COTS ja teenuse pakkujate nõuded</b>	
ISIS, GOMSpace, Clyde Space, Tyvak, Pumpkin	Trükkplaadid kinnitatakse PC 104 standardi järgi. [11]
ISIS [12]	Ükski komponent ei tohi ületada 10.0 mm normaali suunas kuubiku pinnast.
Nanoracks	Lisaks rööbaste ja otstele võib satelliidi osadest <i>dispenseriga</i> kokku puutuda ka eralduslüli. Eralduslüli võib paikneda lisaks -Z küljel ka rööpa sees, nii et lülituks vastu NRCSD rööbast. [13]
Nanoracks	Kõik CubeSatid va 6U peavad omama eraldusvedru. [13]
Nanoracks	Maksimaalne lubatud mass 1U / 2U / 3U puhul on vastavalt 2.82 / 5.657 / 8.485 kg.
	Vibratsiooni test vahemikus 5-2000 Hz.
Arianespace	Kiirendus mööda pikkitelge ei ületa 5.0g.
<b>Soovitused</b>	
	Satelliidi seintele peaks olema võimalik lisada mehhanisme ja sensoreid.
	Satelliidi korpuse mass ei tohiks ületada 1/3 lubatud satelliidi kaalust.



### 3.3. Nõuete järelendus

Eelnevalt tabelites 6 ja 7 loetlesime CubeSati korpuse disainimiseks antud soovitusi ja nõudeid. Kiire järelendusena saab öelda, et nõuded olenevad CubeSatti kanderaketi külge kinnitavast konteinerist ehk *dispenserist*. CDS on kõige esimene CubeSati disaini dokument ja selle loojad on arendanud ka P-Podi. Seega on tegu rohkem P-Podi andmelehega. Turul on aga mitukümmend teist *dispenserit*. Eelnevas tabelis tõime täitena välja kaks: ISIPod ja NRCSD. Võrreldes P-Podiga on põhilised CubeSati dimensioonid samad, aga neil on ka väikesed erinevused sees, mis teevad arendajate tööd lihtsamaks.

CubeSati korpuse projekteerimise aluseks tasub võtta siiski CDSi, sest seal on kõige konservatiivsemad nõuded ja kui CubeSat P-Podi sobib siis reeglina sobib ta ka teistesse *dispenseritesse*.

## **4. CubeSati korpuse võimalikud lahendused**

CubeSati korpust on võimalik mitmel erineval viisil projekteerida ja toota. Esialgse ülevaate võimalikest lahendustest oli võimalik saada juba punktis 2.2 kus oli juttu konkurentidest ja nende toodetest. Nüüd vaatame kuidas oleks võimalik korpust ja selle sõlmi projekteerida, toota ja koostada. Projekti käigus eeldame, et satelliidi korpust kasutatakse Maa madalal orbiidil.

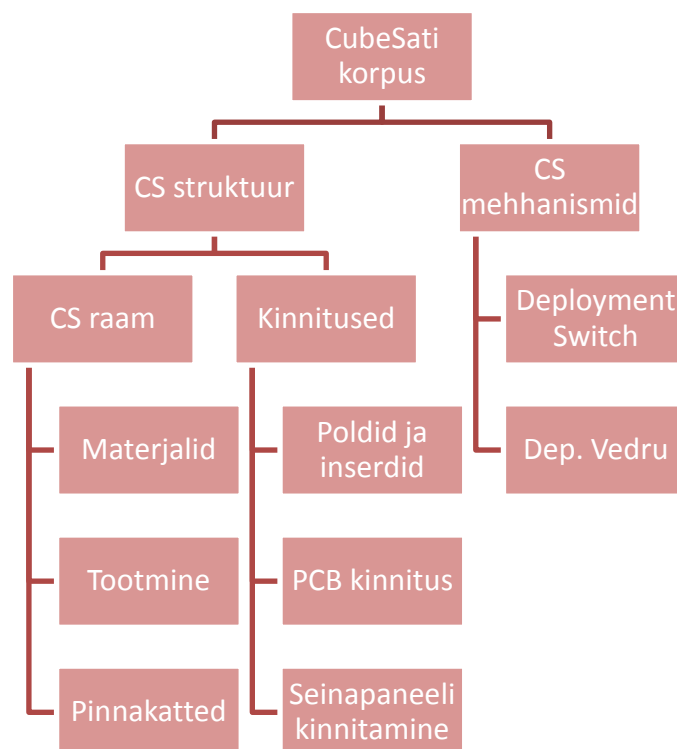
### **4.1. 1-3U korpuste projekteerimine**

1U, 2U ja 3U korpustele võimaliku disaini otsimise ühe eesmärgina oleks leida lahendus mis oleks võimalikult modulaarne, kuluefektiivne ja töötaks ka tooteperena. Tootepere puhul oleks tegu ühele platvormile tuginevate toodetega, et rahuldada kindla kliendi nõudeid. Iga toode, millest tootepere koosneb on nii nimetatud toote variant. Antud projekti puhul on platvormiks CDS ja variantideks sealt tulenevad ühikus 1U, 2U ja 3U. Variantide omavaheliseks erinevuseks on raamide pikkus ja trükplaatide arv.

Püstitatud eesmärgiks on konkurentsivõimelise toode arendamine. Selle täitmiseks peame lähtuma sellest, et tootmisel toote omahind võimalikult odav tuleb. Tootepere sisest tuleb rõhuda modulaarsusele ja pigem tootmiskesksele tootepererele kui projekteerimise kesksele. Arvestades aga kosmosevaldkonna üldisi tingimusi kus nõutakse eri lahendusi, tuleks kergemateks liidese muudatusteks valmis olla. Ehk kliendi keskne lähenemine tuleks tootearendusel kasuks.

## 4.2. Korpuse disaini sõlmed

Arenduse lihtsustamiseks saame satelliidi korpuse jagada erinevateks alamosadeks.



Sele 4: CubeSati korpuse sõlmed

Selel 4 on toodud ära põhilised sõlmed, millest üks CubeSati korpused koosneda võiks. Põhimõtteliselt on võimalik jaotada nad kahte kategooriasse struktuur ja mehhanismid. CubeSati struktuuri alla lähevad koostud kus ei toimu liikumist ja mehhanismide all on liikuvad osad. Sealt edasi jaotuvad mõlemad veel omakorda.

CubeSati struktuur jaotub raamiks ja kinnitusteks. Raami disaini mõjutavad väga oluliselt kasutatavad materjalid ja tootmise protsess. Satelliidi kinnituste eesmärk on enamasti erinevate elektroonikakomponentide kinni hoidmine. Korpuse puhul on oluline ka korrektne korpuse detailide liitmine.

CubeSati korpused suuri mehhanisme ei oma. Vastavalt CDS-ile on aga ettenähtud kahe kasutamine: eraldusvedru ja eralduslüüti.

Kindlaid piire seles 4 nimetatud süsteemide vahel siiski ei ole ja olenevalt konstruktsioonist võivad lahendused omavahel kattuda.

### 4.2.1. CS raam

CubeSati raami on võimalik mitmel erineval moel projekteerida ja toota. Levinumad meetodid tootmisel täna on freesimine ja lehtmetsalli painutamine. Ainuüksi neile kahele meetodile on võimalik projekteerida suurel hulgal sobivaid lahendeid

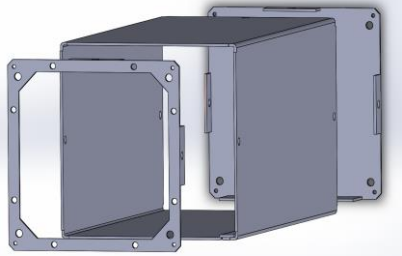
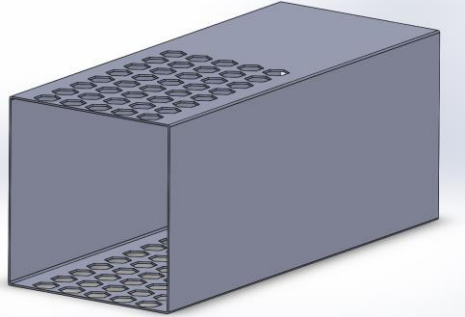
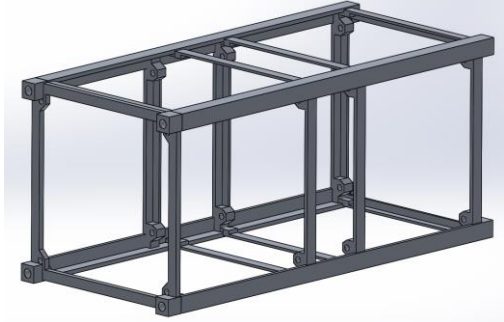

Tabelis 8 on toodud välja visuaalseid näiteid milliseid CubeSati raame on võimalik toota. Lisaks pildile on toodud välja ka eeliste ja puuduste nimekiri. Tabeli eesmärgiks on selgitada välja mõistlikumad võimalikud lahendused raami tootmiseks.

Profiilist lõikamine on kindlasti üks kõige odavamaid lahendusi kuidas CubeSatile korpust toota. Põhimõtteliselt läheb vaja 100 x 100 mm profiili seinapaksusega 1,5 mm ja see tuleb lõigata vastavalt 1U, 2U või 3U pikkusele. Lisaks pikkuse õigeks lõikamisele tuleb kaablite jaoks seinte sisse veel mitu ava lisaks lõigata. Nelikantprofiil ise kaaluks küllaltki palju ja seinte seest oleks mõttekas massi säästmiseks osa materjali maha kanda. Selleks sobiks kõige paremini vesilõikus. Kogu eelnevalt kirjeldatud protsess vajab üldkokkuvõttes mitme erineva tehnoloogia kasutamist ja seab hiljem palju piiranguid satelliidi koostamisele. Veel üheks tõsiseks miinuseks on aga see, et profiili enda tolerantsid ei pruugi alati kõige täpsemad olla. Ehk peene aparatuuri mahutamine korpusesse võib minna vaevaliselt. Heal juhul tuleb välismist rööpa pinda töödelda. Viimane devalveeribki profiili kontsepti kõige enam.

Lehtmetsallist painutamine on sobilik suurte seeriade tegemiseks. Lihtsalt ühte raami või hilisemaid erilahendeid ei tasu eraldi painutada, sest tootmise ettevalmistus on aega nõudev. Nõutavad tolerantsid +/-0.1 on saavutatavad.

3d printimine on kosmose ja lennunduse valdkonnas juba korduvalt kasutust leidnud. Samas lihtsamate detailide 3d printimine ei tasu end ära, sest freesimine on odavam tehnoloogia kus materjali omadused on paremini teada. Printimise puhul kaasneb materjali omaduste testimisega palju lisatööd. CubeSati korpuse puhul ei annaks 3d printimine suurt efekti sest korpuse mass on praeguste lahenduste juures juba suhteliselt madal ja ruumala väga vähendada pole mõtet. Samas printide tasuks mõnda teist nanosatelliidi detaili kui satelliidikorpus iseennast. Näiteks kaamera korpus, teadusaparatuuri osad või klambrid.

Tabel 8: CubeSati raami tootmis viisid

Tootmise viis	Eelised / puudused
<p><b>Lehtmetailist painutatud</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- piiratud võimalused kasutamiseks</li> <li>+ suur seeria puhul väga odav hind</li> <li>- eri lahenduste tegemine on kallis</li> <li>- suur alginvesteering</li> <li>- vajab mõnda freesitud detaili</li> </ul>
<p><b>Profiilist lõigatud</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ standard profiili kasutades kõige odavam lahendus</li> <li>- vajab mõnda freesitud detaili</li> <li>- profiili tolerantsid kõiguvad</li> <li>- avade tegemiseks on vaja vesilõikust</li> <li>- piiratud võimalused kasutamiseks</li> </ul>
<p><b>Freesitud</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kättesaadav tehnoloogia</li> <li>+ sobib nii väikese kui suure seeria tootmise jaoks</li> <li>+ eri lahenduste tegemine võimalik</li> <li>- keerulise lahenduse prototüüpimine on kallis</li> <li>- tehnoloogilised piirangud disainile</li> </ul>
<p><b>3D prinditud</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ võimalik teha optimaalse massiga raam</li> <li>+ vähe tehnoloogilisi piiranguid disainile</li> <li>+ sobib väikesele seeriale</li> <li>+ kerge muuta disaini</li> <li>+ võimalik vähendada detailide arvu koostus</li> <li>- prinditav materjal ei ole ühtlane ja vajab eraldi testimist</li> <li>- pole veel väga kättesaadav</li> <li>- ei sobi mass tootmiseks</li> </ul>

Tehnoloogiaid võrreldes tundub freesimine kõige efektiivsem viis CubeSati raami toota olevat. Eelisteks on kindlasti see, et on võimalik toota suuremaid või väiksemaid seeriaid ja väikeste muudatuste tegemine on suhteliselt lihtne. Lisaks on freesimis teenuse pakkujate arv piisavalt suur ja materjali omadused on teada. Seega ei ole vaja tootest tootesse materjali sobivust tõestama, nagu prinditud detailide juures teha tuleks. Freesimisel tekkivat kallist hinda on võimalik vältida kui detailide disain eelnevalt põhjalikult läbi mõelda.

#### 4.2.2. Materjalid

CubeSati raami materjali valik on osaliselt määratud CDSi poolt kuid üldiselt on jäänud vabad käed. Soovituslikud materjalid CDSi algusest saati on olnud AW 6061-T6 ja AW 7075. Tabelis 9 võrdleme kolme alumiinium sulamit mida võiks kasutada.

Tabel 9: Raami materjalid [14] [15] [16]

	AW 6061 –T6	AW 6082-T6	AW 7075
<b>Tihedus - <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.70	2.70	2.81
<b>Soojuspaisuvus (<math>\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}</math>)</b>	23.6	23.4	23.6
<b>Elastsusmoodul - E (GPa)</b>	69	70	72
<b>Soojusmahtuvus (J/g<sup>°C</sup>)</b>	0.896	0.896	0.920
<b>Tugevuspiir - <math>\sigma</math> (MPa)</b>	276-310	270-310	505
<b>Specific strength - <math>\sigma/\rho</math></b>	108.5	107.4	179.7
<b>Jäikus - E/<math>\rho</math></b>	25.56	25,96	25.62
<b>Hind</b>	madal	madal	kõrge
<b>Töödeldavus</b>	Väga hea	Väga hea	hea

Materjalide valiku puhul käib tihti vaidlus 6000 ja 7000 seeria vahel. Mitmed nanosatelliidi ehitajad otsustavad esialgu 7000 seeria kasutuks, sest esimesel pilgul on materjali numbrid paremad. AW 7075 on AW 6061-st kõrgema hinnaga ja mitte nii meeldiv töödelda. Kui on tegu õhukeste struktuuridega nagu CubeSattide puhul tavaks siis AW 7075-st freesitud detailid kipuvad palju rohkem kõveraks tõmbuma kui AW 6061.

Üldiselt võib öelda et 6000 seeria materjalid on CubeSati raami jaoks täiesti sobilikud, sest nad peavad ainult lühiajalist koormust taluma ja sel ajal on nad kõigist külgedest toetatud. Valik AW 6061 või AW 6082 vahel tuleb teha enda asukohast tulenevalt. Ehk USAs kus ka CubeSatid alguse said on levinud AW 6061 ja seega on CDS-is just seda materjali soovitatud.

Euroopa alternatiiviks on AW 6082 mida on siis nii majanduslikel kui ka tarne põhjustel mõttekam kasutada.

CubeSattidel on poltide materjali puhul üks olulisemaid kriteeriume materjali ferromagneetilised omadused. CubeSattid leiavad peamiselt kasutust Maa madalal orbiidil kus Maa magnetväli on piisavalt tugev, et saab mõjutada orbiidil oleva satelliidi liikumist. Näiteks püsimagneti kasutamine on üks võimalus kuidas satelliidi asendikontrolli passiivselt teha. [3] Sellisel juhul hoiab satelliidi sees olev püsimagnet Maa magnetvälja suunda ja poolustel keerab satelliidi teise külje ette. Väiksemate magnetite või magnetiliste komponente kasutades hakkavad nad satelliidi asendikontrolli segama.

Sama juhtus ka ESTCube-1 missioonil kus akude ümbrised ja kinnitamiseks kasutatavad poldid olid ferromagneetilised. [10] Valede materjalide kasutamine oli tingitud projekti kiirest ajakavast ja õigete komponentide tarneaegade tõttu. Satelliidi korpuse projekteerimisel valiti poltide materjaliks titaan, mis pole magnetiline. [14]

Tabel 10: Poldide materjalid [17] [18]

Materjalid	Tihedus $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Märkused
Roostevaba A2 1.4567	7.9	Ferromagneetiline, hea töödeldavus.
Roostevaba 1.3964	7.9	Ei ole ferromagneetiline, keskmine töödeldavus.
Titaan Grade 5 3.7165	4.45	Ei ole ferromagneetiline, hea töödeldavus.

Tabelist 10 näitab, et enim kasutatud A2 roostevabast terasest poldid ei ole oma magnetiliste omaduste pärast sobilikud. Roostevabast terasest numbriga 1.3964 polte oleks võimalik materjali omaduste pärast kasutada, aga neid on raske leida ja eritellimuse pärast oleksid nad kallid. Puuduseks on ka materjali töödeldavus võrreldes terasega 1.4567. Alumiiniumist poltide kasutamine oleks mõeldav samas tuleb silmas pidada, et testimise ajal tuleb satelliiti korduvalt kinni ja lahti keerata mille tulemusena alumiiniumist keere väsiks kiiresti. Eriti kui räägime M2 poltidest. Olenevalt satelliidi disainist on alumiinium trükkplaatte eraldavateks

M3 *stand-offide* jaoks suurepärase valik. Korpusesse kinnitatud *stand-offid* ei saa end ise lahti keerata ja säästavad massi.

Parim materjal poltideks on vaieldamatult titaan. Tööstuses on laialt levinud titaan grade 5 poldid, seega on nende tootmise hulk piisavalt suur ja hind vastuvõetav. Titaanist poltide eeliseks on kerge kaal, kulumiskindlus ja mitte ferromagneetilised omadused. Miinuseks on aga kohati 100 korda kallim hind kui standartsete roostevabast terasest tehtud poltidel. Samas on odavam kasutada kohe titaanist polte kui eritellimusega sobivast roostevabast terasest treitud detaile. Arvestades aga kogu projekti maksumust ei ole see hinnavahe nii tohutult suur.

Tabel 11: Insetide materjalid [19]

Materjalid	Temperatuuri taluvus	Minimaalne <i>tensile strenght</i> ruumi temperatuuril	Märkused
Roostevaba A2 X5 CrNi 18 10 1.4301	Madal temperatuur - 196°C Lühiajaline 425°C Pikaajaline 315°C	1400 N/mm <sup>2</sup>	ferromagneetline
Pronks CuSN 6 2.1020.34	Lühiajaline 300°C Pikaajaline 250°C	900 N/mm <sup>2</sup>	
Inconel X 750 NiCr 15 Fe 7 TiAlD 2.4669	Lühiajaline 750°C Pikaajaline 550°C	1150 N/mm <sup>2</sup>	Kasutuses lennu- ja kosmosetööstuses
Nimonic 90 NiCr 20 Co 18 Ti 2.4632	Lühiajaline 900°C Pikaajaline 600°C		
Alumiinium AlZnMgCu 1.5 3.4365	Lühiajaline 170°C Pikaajaline 150°C	500 N/mm <sup>2</sup>	

Insetide materjalide all võrdleme Böllhoffi poolt pakutavate Helicoilide materjale. Tabelist 11 saab hea ülevaate millisest materjalist helicoile kasutada võib. Kasutuses olev



roostevabateras on ferromagneetiline, seega nagu jube eelnevalt mainitud siis olenevalt missioonist pole ta Maa madalal orbiidil kasutamiseks kõige sobilikum. Alumiiniumist Helicoili panek alumiiniumist korpuse sisse ei annaks suurt efekti. Üle jäävad pronksist ja titaani sulamist Helicoilid. Mõlemad on sobilikud kosmose keskkonnas kasutamiseks. Arvestades et CubeSattidele mõjuvad jõud on suhtelised väikesed siis pronksis Helicoilid on suurepärane valik.

### 4.2.3. Pinnakatted

Pinnakatted on kosmoseaparatuuri oluline osa, sest nende abil on võimalik muuta materjalide elektri juhtimist, valguse peegeldamist ja teisi soojus omadusi. CDSi kohaselt tuleb CubeSati raami rõõpad anodeerida, et vältida elektrilist kontakti ja külmkeevitust kanderaketiga. Lisaks anodeerimisele on ka teisi pinnakatteid mida elektri juhtimise ja külmkeevituse vastu kasutatakse.

Pinnakatte omaduste juures on kõige tähtsam kihi paksuse teadmine, sest selle järgi tuleb detailide tolerantsid arvutada. 1/3 oksiidi kihti tekib materjali pinnale ja 2/3 materjali sisse. [20]

Pinnakatte värvuse valimine madalal Maa orbiidil pole nii oluline kuid olenevalt missioonist võib ka see oma rolli mängida. Kvaliteetsete katete puhul suurt värvide valikut ei eksisteeri.

Tabel 12: Pinnakatted [20] [21]

Pinnakate	Kihi paksus	Värvus	Saadavus
Anodeerimine	5 – 25 µm	Naturaal, must, teised värvid on õhema kihina	Palju pakkujaid kuid paljudel töökodadel on kõikuv kvaliteet
HARD-COAT	30 – 50 µm	Hall, pruun, must	Olemas, kuid mitte Eestis
Alodine 1200S	0.125-0.250 µm	Kollakas	Keerulisem leida

CubeSati raami naturaalselt või mustaks anodeerimine on hea valik, sest teenuse pakkujate hulk on suur ja hind odav. Iga anodeeritud partii kvaliteeti tuleb aga põhjalikult kontrollida, sest kehv anodeering kulub kiirelt maha. Lihtsalt anodeeritud CubeSati rööbaste pind saab vibratsiooni teste tehes küllalki palju kannatada. Rööbaste ja *dispenseri* kontaktpinndadelt kulub ebakvaliteetne pinnakate kiirelt ära ja katte all olev materjal tuleb nähtavale. Seega on mõttekam kasutada tugevamate või paksemate kihtidega pinnakatteid. Anodeeringule väga sarnane on Hard-Coat.

Lennukiehituses laialdaselt kasutuses oleva Alodine 1200S kasutamise peale võib mõelda suuremate ja vastustusrikkamate missioonide puhul.


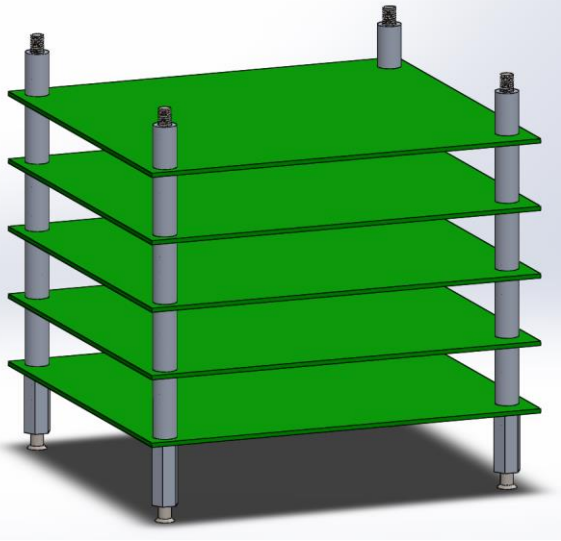
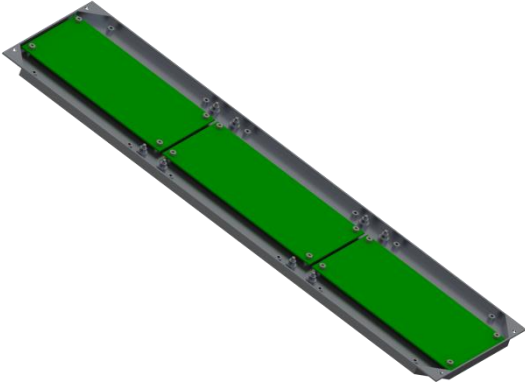
#### 4.2.4. Trükkplaatide kinnitus

Trükkplaatide kinnituse kohapealt innovaatilisi lahendusi otsima ei hakka. Siin on kindlad viisid kuidas trükkplaadid satelliidi sisse kinnituvad ja seda on korpuse teiste toodetega ühildamiseks oluline jälgida.

Tabelis 13 on toodud ja võrreldud kolme erinevat viisi trükkplaatide kinnitamiseks satelliiti. Kõik nimetatud lahendustest on ka kasutust leidnud ja omavad häid eeliseid. *Stand-off* lahendus on väga lähedane pukside lahendusele ja mõlemad sobivad ideaalselt elektroonika kinnitamiseks satelliidi keskele. Poltidega seintele kinnitamine on kasutuses pigem eri lahenduste juures ja nii on võimalik kõik alamsüsteemid satelliidi seinte külge kinnitada. Tulemuseks on rohkelt vaba ruumi satelliidi keskel kasuliku aparatuuri jaoks.

Võttes eesmärgiks disainida võimalikult laialdaselt kasutatav toode, siis keermelati ja pukside lahendus on kõige mõistlikum sest võimaldab mitmeid erinevaid lahendusi nii pukside materjali kui ka vahekauguste muutmise osas.

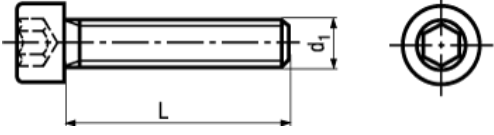
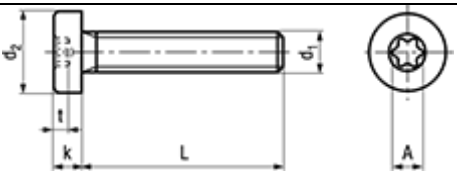
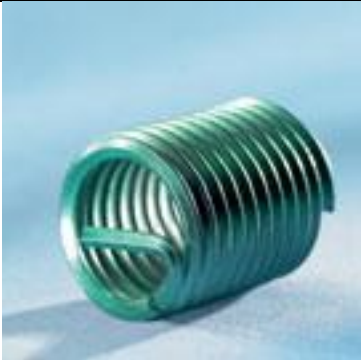

Tabel 13: Trükkplaatide kinnitus [22]

<p><b>Stand-off</b></p> 	<p>Eelised / puudused</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ kergesti saadavad standardsed komponendid</li> <li>+ tugev koost</li> <li>+ toetab PC104 trükkplaatide kinnitamist</li> <li>- aeganõudev kui koostu lammutada vaja</li> <li>- eri lahendusi keeruline teha või kallis</li> </ul>
<p><b>Keermelatt ja puksid</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kergesti saadavad standardsed komponendid</li> <li>+ erinevates suurustes pukside valik on lai</li> <li>+ hea viis missiooni spetsiifilist stacki teha</li> <li>+ kiire lammutada</li> <li>+ toetab PC104 trükkplaatide kinnitamist</li> </ul>
<p><b>Poltidega seintele</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kiire koostada ja eraldada</li> <li>- seab suured piirangud disainile</li> <li>-PC104 trükkplaatide kasutamine on keeruline</li> <li>- seina platide disain tuleb keerulisem sest lihtsalt laseriga lõikamisest ei piisa</li> <li>- soojuseülekanne võib rohkem varieeruda</li> </ul>

## 4.2.5. Poldid ja inserdid

Satelliitide ehitamise juures omab iga detail tähtsust. Seega ka poltide ja struktuuri sees olevate avade keermestamine on oluline aspekt mida jälgida.

Tabel 14: Poldid ja inserdid [19] [23]

Sisekuuskant	Eelised / puudused
	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ laialt levinud standartne pea</li> <li>- väiksemaid mõõte raske leida</li> <li>- väiksemate poltide puhul kulub peab pingutades tihti ära</li> </ul>
<p><b>Trox</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hea kinnitada ja pea ei kulu kiirelt ära</li> <li>- halb saadavus</li> </ul>
<p><b>Helicoil®</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ võimaldab poldi tugevamat pingutamist</li> <li>+ alumiiniumis oleva keeme eluiga on pikem</li> <li>+ ei võta oluliselt palju ruumi</li> <li>+ hea materjalide valik</li> <li>- spetsiifiliste mõõtude puhul võib olla pikk tarneaeg</li> </ul>
<p><b>Amicoil®</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ võimaldab polti tugevalt pingutada</li> <li>- võtab rohkem ruumi võrreldes traadist insertidega</li> <li>- väikeseid suuruseid pole saadaval</li> </ul>

Poltide puhul tuleks võimalusel kasutada trox peaga polte, sest nende abil on võimalik polte täpsema momendiga kinni keerata ja pidevalt kasutades on nende eluiga pikem. Kui sobivat trox peaga polti pole võimalik leida siis tuleb sisekuuskanti kasutada.

Insertide kasutamine satelliidi keermestatud avades on äärmiselt oluline, sest nii on võimalik pikendada korpuse eluiga ja polte tugevamalt kinnitada. Kõikidesse avadesse siiski inserte panna vaja ei ole. Soovitatavalt peaksid insertid olema aga kõikides avades mida korduvalt kinni - lahti kruvitakse. Üheks parimaks insertiks on kujunenud Helicoilid, sest nad on küllaltki väikesed ja ei mõjuta oluliselt projekteeritavate osade mõõtmeid. Keermestatud ava peaks olema ühe keerme suuruse võrra suurem ja Helicoili minimaalne keerme pikkus on määratud.

#### **4.2.6. Seinapaneelid**

Seinapaneele kasutatakse elektroonika eraldamiseks väliskeskkonnast ja komponentide kinnitamiseks. Seinapaneele on võimalik projekteerida ja toota mitmel erineval viisil ja olenevalt missioonist võivad nad oluliselt muutuda nii kuju kui ka materjali poolest.

Standardset lahendust kinnitusavade asukoha ja suuruse suhtes ei eksisteeri. Peamiselt on kasutuses M2 või M3 poldid.


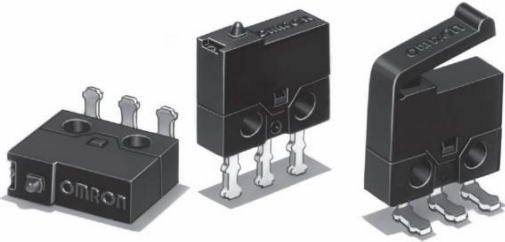

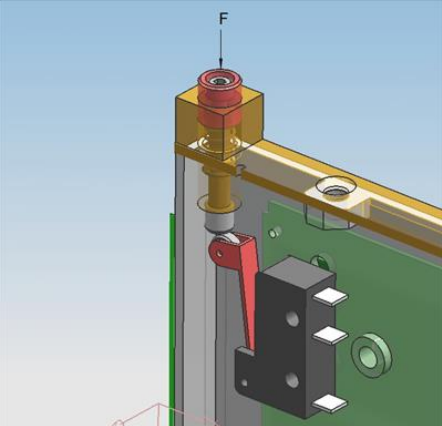
Satelliidi korpuse puhul anname ainult seinapaneelide kinnituse kohad, aga paneele ise lisama ei hakka.

#### **4.2.7. Eraldusüliti ja eraldusvedru**

*Deployment Switchi* (DS) ehk eraldusüliti eesmärk on peale satelliidi eraldumist kanderaketist lülitada sisse vooluring. CDS-i järgi peab DS asuma CubeSati raami otstes ja soovitatult peaks olema kaks paralleelselt ühendatud lülitit.

Eraldusvedru eesmärk on lihtsustada CubeSattide eraldumist üksteisest ja kanderaketist. Vastavalt CDS-ile peab eraldusvedru olema vaid 1U või 2U korpustel. Ehk kõikide CubeSattidel, mis ei ole üksinda dispenseris.

Tabel 15: Eralduslüli ja eraldusvedru [24] [25] [26]

<p><b>Standard lüli</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ riiulilt saadav toode ja korduvalt kosmoses käinud</li> <li>- keeruline mehaaniline liides lüli ja raami vahel</li> </ul>
<p><b>Mikrolüli</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ üks kõige väiksemaid mikrolüliteid</li> <li>+ Nanoracksi <i>dispenserit</i> kasutades võib lüli vastu <i>dispenseri</i> rööbast minna</li> <li>- enamus mikrolüliteid on suured</li> <li>- paljudel juhtudel tuleb lisada veel eraldi mehhanisme.</li> </ul>
<p><b>Eraldusvedru</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ riiulilt saadav toode</li> <li>+ keermel on nailonist riba mis väldib lahti keeramist</li> <li>- võtab palju ruumi</li> <li>- keeruline paigaldada</li> </ul>
<p><b>Eralduslüli</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ integreeritud eraldusvedru ja –lüli</li> <li>+ võimalik leida parim lahendus oma konstruktsioonile</li> <li>- võtab palju ruumi</li> <li>- töökindlust tuleb testida</li> </ul>

Võrreldes kõiki eelnevalt tabelis toodud variant tundub kõige huvitavam eralduslüüti vetsioon kus on nii lüüti kui ka vedru integreeritus ühte mehhanismi. Seda kontsepti on võimalik vastavalt oma tootele parajaks teha.

#### 4.2.8. Ülevaade

Selles punktis võtame kokku eelnevalt loetletud ja kirjeldatud lahendused, mida erinevate sõlmede juures kasutada tasuks. Tabelis 16 on nimekiri sõlmedest ja vastavalt sõlmele on kõrvuti pandud parim lahendus.

Tabel 16: Lahenduste ülevaade

Sõlm / alamosa	Lahendus
Raam ja tootmine	Freesimine
Trükkplaatide kinnitus	Keermelatt ja puksid
Poldid ja inserdid	Trox poldid ja Helicoil inserdid
Seinapaneelid	Ei käsitle selles projektis
Materjalid	Raami materjal AW6082. Teised materjalid soovituslikult mitte magnetilised ehk pronks või titaan.
Pinnakatted	HARD-COAT
Dep. Lüüti ja vedru	Eralduslüüti (microswitch + vedru)

Tabelist 16 abil saadud ülevaatest alustame nüüd oma konstruktsiooni loomist.

## 5. Disaini lahendus

Eelmistes punktides oleme käsitlenud nanosatelliitide teemat üldisemalt, tõime välja olulisemad nõuded, mis CubeSattide mehaanika arendamist mõjutavad, nimetasime CubeSati korpuse olulisemad sõlmed ja leidsime neile võimalikud lahendused. Nüüd omame piisavalt informatsiooni mille põhjal CubeSati raami disain kokku panna.


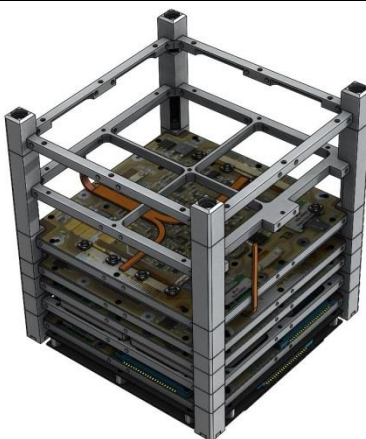
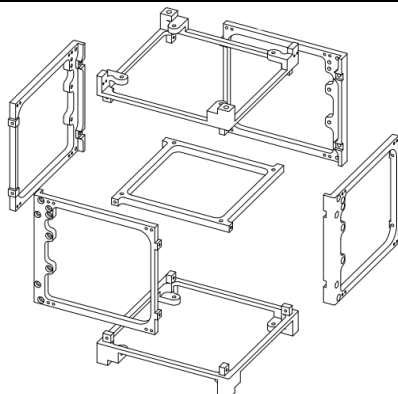
### 5.1. Disaini valik

CubeSati korpuse disainile on võimalik mitut moodi läheneda ja sihile jõuda. Samas on antud projekti eesmärgiks luua võimalikult modulaarne, kvaliteetne ja hinda väärt lahendus. Silmas tuleb aga pidada, et standartsete lahenduste tootmine suurtes seeriates pole kosmosesektoris veel tavaks. Tihti soovitakse satelliitide korpuseid kergelt modifitseerida, et saaks uusi sensoreid või mehhanisme lisada.

Tabelist 16 saame kõigile sõlmedele kas parima tehnoloogilise lähenemise või toote mida kasutada. Järgmise sammuna peame panema paika satelliidi struktuuri üldise kontseпти. Tehnoloogiaid võrreldes osutus praegug parimaks valikuks freesimine, ehk satelliidi korpuse disain peaks olema freesitav.

Uurides turul olevaid tooteid tõime mitu näidet välja toodetest mis on toodetud freesides. Tabelis 17 on toodud näited võimalikest freesitud raami tüüpidest.

Tabel 17: Freesitavad raamid [27] [7] [28]

Ühest tükist	tasandid	modulaarne
		



*Monoblock* lahendus on kindlasti üks huvitavamaid, sest raami ühest tükis freesides kaotab ära mitu liitekohta. Samas on see väga mahukas töö ja suuremate kui 1U satelliitide puhul väga mahukas ja ei anna seda efekti mida vaja. Seega oma toote arendamise puhul pole parim lahendus.

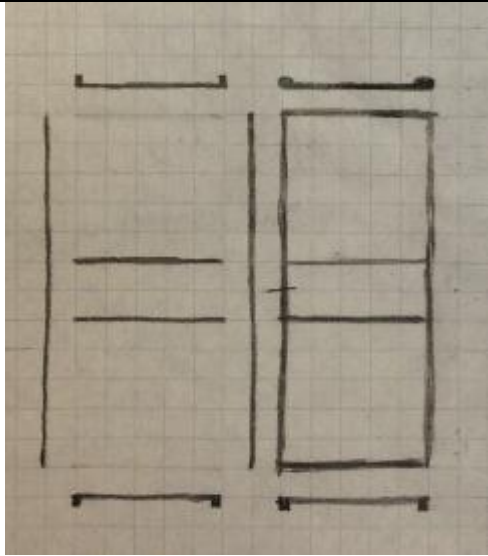
Tasandite lahendus mida Šveitsis kasutatud on, on küllaltki keerukas ja ei sobi kästi 2U või 3U satelliitide koostamiseks.

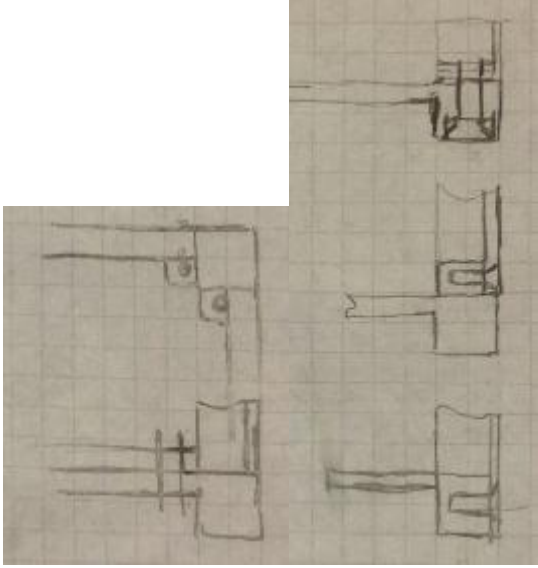
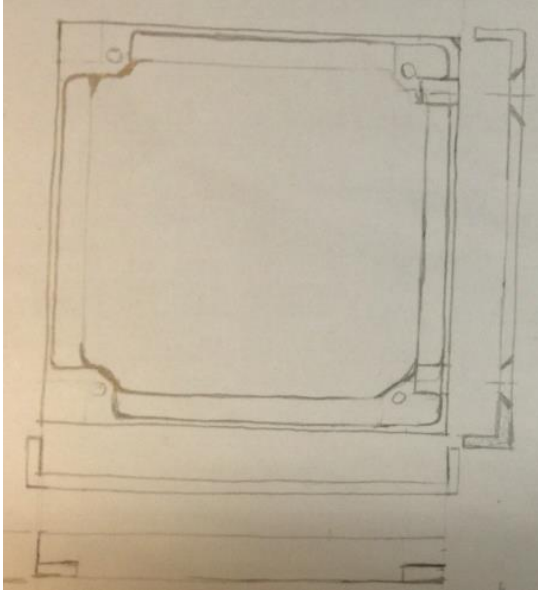
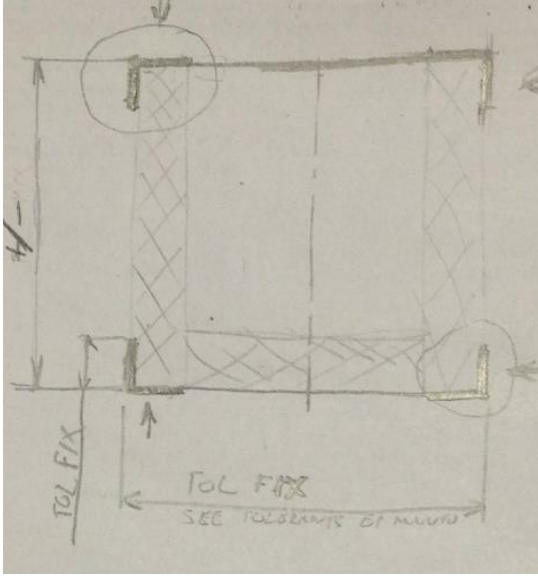
Modulaarne lähenemine, kus on satelliidi kaks külge ja neid ühendavad talad tundub hea lahendus olevat. Selle lahenduse juures positiivne on just see, et vajadustele vastavalt on võimalik palju muudatusi sisse viia. Lisaks on võimalik kõiki tükke umbes 12 mm paksusest lehest freesida.

## 5.2. Korpuse projekteerimine

Eelmises punktis valisime oma toote kontseptiks modulaarse lähenemise, ehk korpuse põhilisteks osadeks saavad raami pooled ja neid ühendavad talad. Järgmisena vaatame kuidas oleks võimalik korpust CAD-is projekteerida ja teeme eelnevalt eskiisid olulisematest sõlmedest.

Tabel 18: Toote projekteerimine

Nr.	Eskiis	Märkmed
1		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Korpus koosneb külgedest ja tasanditest</li> <li>- Tasandid seovad küljed omavahel</li> <li>- Trükkplaadid kinnitatakse tasandite vahele</li> <li>- Vedrud/lülitid paiknevad kas otste tasandites või külgedes</li> </ul>

2		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poltliite näidis tasandi ja külje vahel</li> <li>- Kasutada tuleks peitpeaga polte</li> <li>- Polte on võimalik paigutada kas rööpa sisse või rööpa kõrvale</li> </ul>
3		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Võimalik tasandi geomeetria</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Skeem tasandi ja külje kinnitamiseks</li> <li>- Üks rööbaste vaheline tolerants jääb paika ja teine sõltub tasandi külgedest ja külgede vahelisest iistust.</li> </ul>

Esimeses eskiisis toodud tasandite eeliseks ISIS-e raamid kasutatavate sildade ees on kindlasti korpuse osade vähenemine ja koostamise protsessi kiirendamine. Lisaks on ühe detailiga rööbaste omavahelist täpsust kindlam tagada. Koostamise kiirus tuleb peamiselt sellest, et ühe tasandi peale on kiirelt võimalik trükkplaate kinnitada.

Küljed ja tasandid kinnitatakse omavahel poltidega. Häid kohti kuhu poltliide teha on palju, aga täpse koha määramine toimub CAD-is kus on võimalik näha et kõik sõlmed omavahel sobiksid.

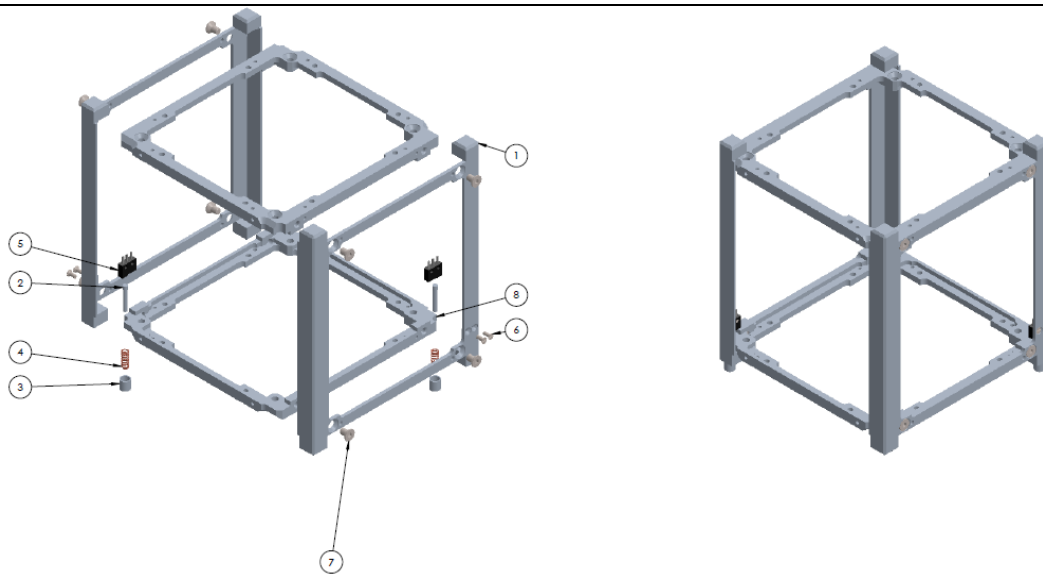
Jooniste tegemisel on tähtis tähelepanu pöörata korpuse komponentide omavahelistele iistudele, et tagada rööbaste vahelised tolerantsid. Antud kontsepti puhul ei tohiks iistude panemine keeruliseks kujuneda. Küljel oleva rööpa paari tolerants määratakse otse freesimisel. Kahe külje vaheliste rööbaste tolerantsi vahele jääb aga kaks liite kohta, kus kõik pinnad freesitakse ja seejärel saavad pinnakatte. Pinnakatte kihi paksust tuleb arvestada juba varakult tehniliste jooniste tegemisel.

Olenevalt satelliidi suuruselt külje suurus varieeruks, kuid tasandid jääksid kõigile samaks. Näidatud lähenemisega on võimalik hea modulaarne toode saavutada. Suureks eeliseks on veel see, et trükkplaatide kooste saab eraldiseisvalt koostada ja testida. Trükkplaatide koostud, mis on aluste vahel paigutatakse kahe külje vahele ja satelliit on koos.

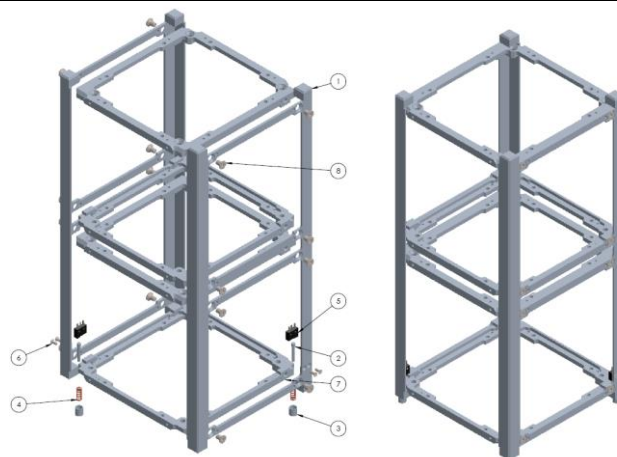
Järgnevates tabelites on näidatud pilte CAD keskkonnas projekteeritud korpustest. Tabel 19 annab ülevaate kolmes erinevas suuruses projekteeritud CubeSati korpusest. Tabel 20 näitab kahte põhilist viisi trükkplaatide kinnitamiseks raami külge. Kõige lihtsam viis on horisontaalne. Vertikaalse puhul tuleb kasutada selleks eraldi ettenähtud 90° all olevaid pukse. Täpne tükitabel kasutatavastest komponentidest on toodud töö lõpus olevatel joonistel.

Tabel 19: Projekteeritud raamid

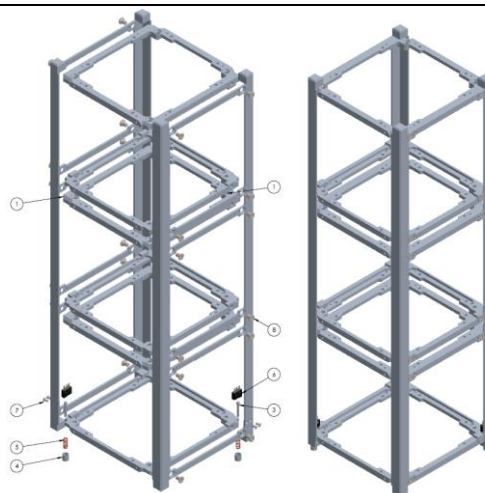
**1U**



**2U**

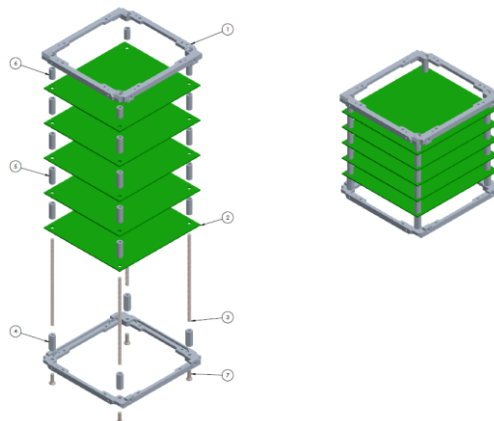


**3U**

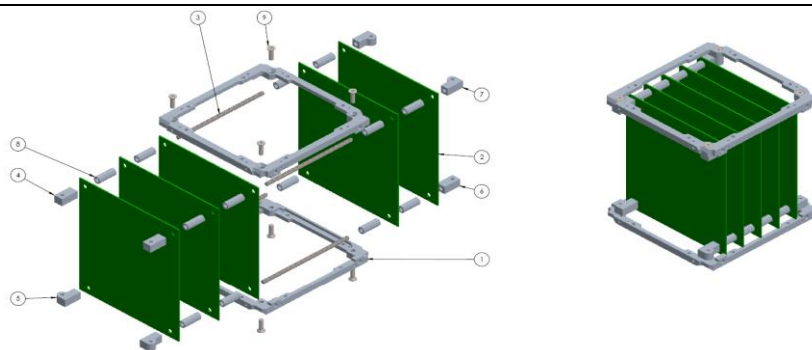


Tabel 20: Trükkplaatide kinnitamine

### Vertikaalsed trükkplaadid



### Horisontaalsed trükkplaadid



## 6. Arvutused ja testid

Arvutused ja testid viime peamiselt läbi 1U korpuse näitel. Ainult korpusele kõiki satelliidile ettenähtud teste teha pole mõtet teha, sest satelliiti tuleb testida kui tervikut. Vaatleme siin aga kõige olulisemaid parameetreid, ehk mass, massikeske, deformatsioonid, pinged ja omavõnkesagedused.

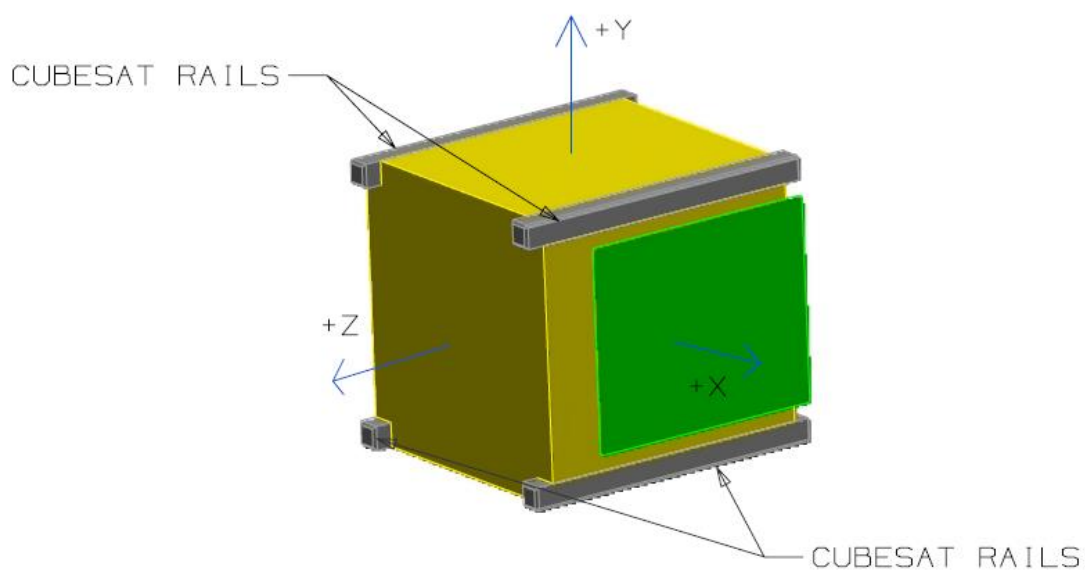
### 6.1. Mass ja massikeske

Mass ja massikeskme nõue on etteantud juba CDS-is. Seda nõutakse kogu CubeSati kohta, siin võrdleme aga lihtsalt korpuse ja korpuse koos tühjade trükkplaatidega massikeset. Tabelis 21 on toodud 1-3U CubeSattide korpuste massid.

Tabel 21: Struktuuri mass

	1U		2U		3U	
	kogus	mass (g)	kogus	Mass (g)	kogus	Mass (g)
Külg	2	20,7	2	37,5	2	54,3
Korrus	2	22,5	4	22,5	6	22,5
Poldid	12	2	20	3,9	28	5,7
Helicoilid	12	2,32	20	4,64	28	6,74
Vedrud	2	0,24	2	0,24	2	0,24
Lülitid	2	0,60	2	0,60	2	0,60
Mass kokku (g)		90,0		172,4		254,7

CubeSati teljestik on määratud ära CDS-i poolt ja seel 5 on toodud näide teljestiku paiknemisest.



Tabel 22: Massikeske

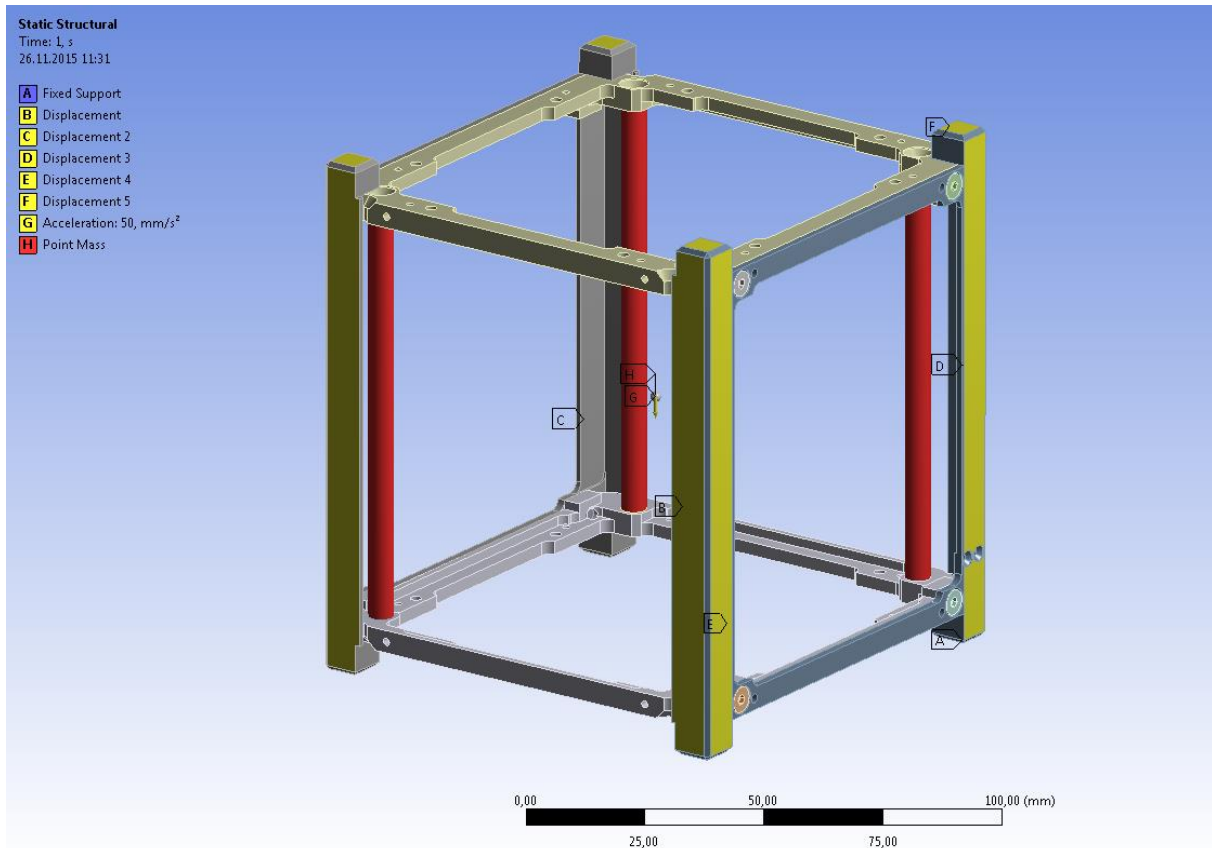
Telg	1U		2U		3U	
	Korpus	PCB	Korpus	PCB	Korpus	PCB
	kaugus (mm)					
X	-0.38	0.00	0.00	-0.04	-0.41	0.00
Y	49.30	0.78	105.94	-1.64	162.37	-1.44
Z	0.00	-0.26	0.00	-0.23	0.00	0.06

Tabel 22 näitab 1U, 2U ja 3U CubeSati raamide massikeskme ilma ja koos trükkplaatidega. Koostatud satelliidi numbrid võivad aga oluliselt eristuda tabelis toodud väärtustest.

## 6.2. Koormus

CubeSatile mõjuv koormus on suhtelisel väikene, sest satelliidi raam asub kogu kanderaketil oldud aja *dispenseris* kus satelliiti kuuest küljest toetatakse. Satelliidi korpuse peamise koormuse tekitajaks on kanderaketi kiirendus. Vastavalt VEGA kanderaketi andmetele võime lugeda maksimaalseks kiirenduseks  $50 \frac{mm}{s^2}$ .

Deformatsioonid ja pinged leiame kasutades ANSYS tarkvara. Analüüsi rajatingimused on toodud seel 6. Satelliidi korpuse rööpad on külgedelt toetatud pinna normaali sihis ja rööbaste alumised otsad on kinnitatud kõiki telgi pidi. Kiirendus mõjub mööda pikki telge. Lihtsustuse mõttes pole trükkplaate ja erinevaid pukse arvestatud. Selle asemel on neli pikka puksi, mille külge on riputatud punktmass massiga 1000 g. Teisi korpuse detaile ei ole muudetud.



Sele 6: Rajatingimused

Tabelis 23 on toodud analüüsi tulemused ja võrreldes neid tabelis 9 olevate materjali omadustega siis nii tekkivad deformatsioonid kui ka korpuses tekkivad pinged on tühised. Lisas 3 on toodud analüüsi tulemused graafiliselt. Üldiselt saab öelda, et suurim koormus avaldub puksidele, mis ühendavad seadmeid või elektroonikat satelliidi korpusega.

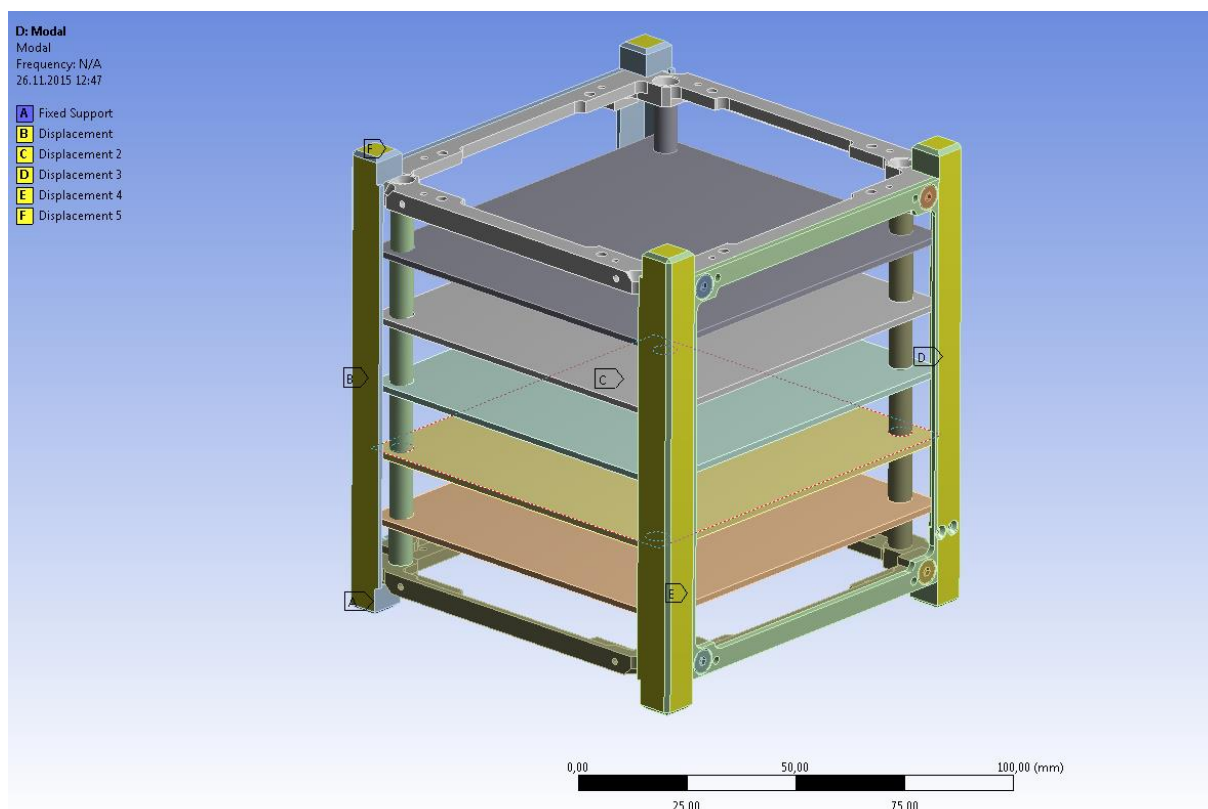
Tabel 23: Kiirendusest tulenevad deformatsioonid

	Teljed		
	X	Y	Z
Deformatsioon <i>mm</i>	$10.17 \cdot 10^{-3}$	$10.52 \cdot 10^{-3}$	$0.54 \cdot 10^{-3}$
Pinged <i>MPa</i>	4.02	4.05	1.01



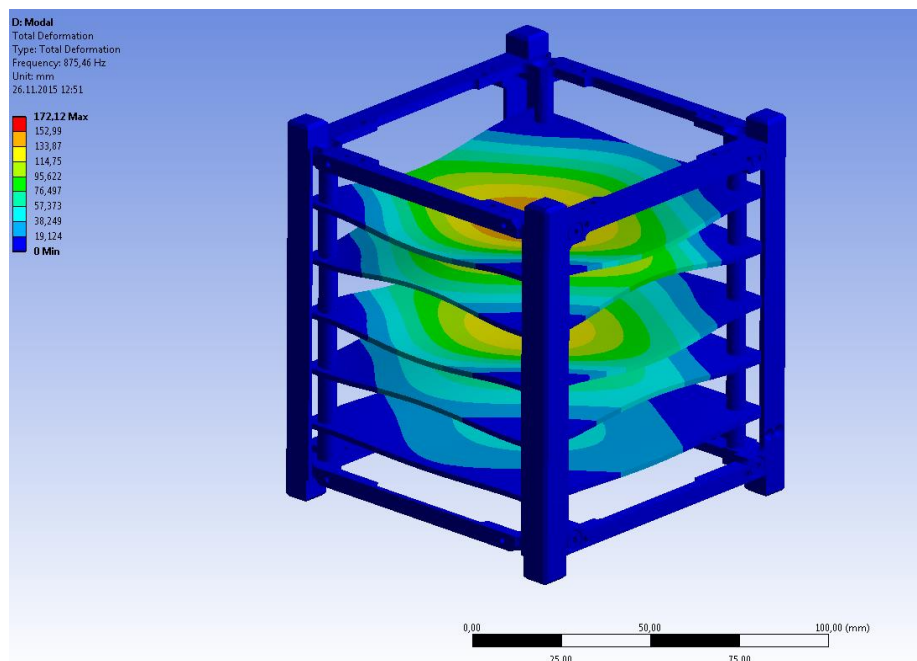
### 6.3. Omavõnkesageduste otsimine

Kosmoseaparatuuri disainimise juures tuleb alati konstruktsiooni omavõnkesageduste leida. Projekteerimise käigus on otstarbekas selleks kasutada FEM modal analüüsi. Analüüsi käigus on võimalik hoiduda vigadest projekteerimisest ja vältida mitmekordset prototüüpimist.



Sele 7: Rajatingimused omavõnkesageduste otsimiseks

Analüüsi rajatingimused näitab sele 7. Rajatingimused on toodud 1U satelliidi näitel ja jääb teiste CubeSati suuruste juures samaks. Analüüsil arvestame olukorda kus satelliit on pandud kanderaketi *dispenseri* või rakise sisse ja on igast küljest toetatud.



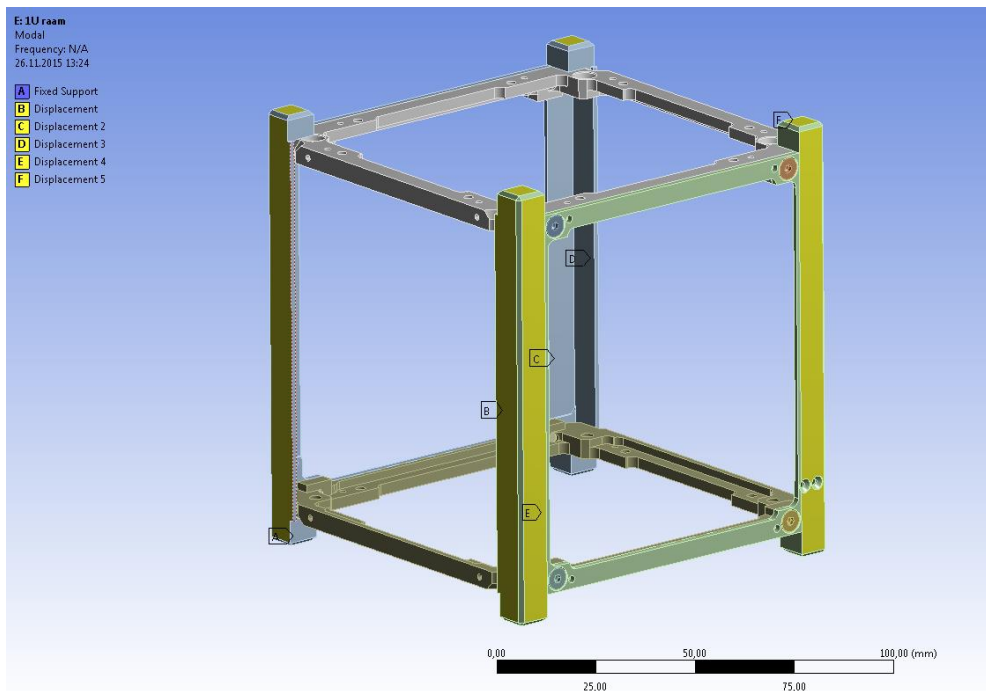
Sele 8: Modal analüüsi näide

Sele 8 ja tabel 24 näitavad ära modal analüüsist saadud tulemused. Suuremaks probleemiks tulemuste juures on, et nad näitavad trükkplaatide omavõnkesagedust, aga mitte satelliidi raami enda. Eeldatavasti tekivad samad probleemid ka 2U ja 3U puhul siis ei jätkanud analüüsi. Parema tulemuseni jõudmiseks tuleks muuta rajatingimusi.

Tabel 24: Esimese modal analüüsi tulemus

Mode	1U Hz
1	875,46
2	879,96
3	884,70
4	887,80
5	889,43

Paremate tulemuste saamiseks muudame rajatingimusi, mis on kajastatud seel 9. Võtame eesmärgiks ainult korpuse omavõnkesageduse otsimise, sest sellisel juhul on võimalik teostada reaalne test analüüsile võimalikult sarnastel tingimustel. Punktmasside lisamine võib tingimusi jällegi muuta. Sellisel juhul kus satelliit on koostatud varieeruvad tulemused jälle. Seega uue katse puhul on raam kinnitatud sarnaselt esimesele katsele. Suurimaks muutuseks on trükkplaatide kaotamine koostust, teised toed ja kinnitused jäävad samaks.



**Sele 9: Uued rajatingimused omavõnkesageduste otsimiseks**

Tabelis 25 on toodud ülevaade omavõnkesageduste otsingu tulemustest. Saadud tulemused jäävad kõrgemale kui 2000 Hz ja nende õigsust tasub kontrollida testimise teel.

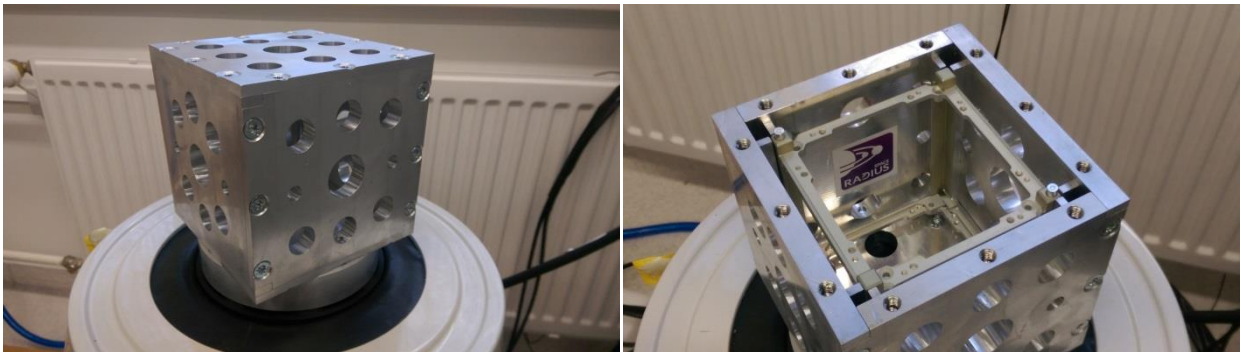
**Tabel 25: Teise omavõnkesageduse otsingu tulemused**

Mode	1U Hz
1	3203,90
2	3208,30
3	3477,30
4	3481,90
5	3740,6

## 6.4. Testide tulemused

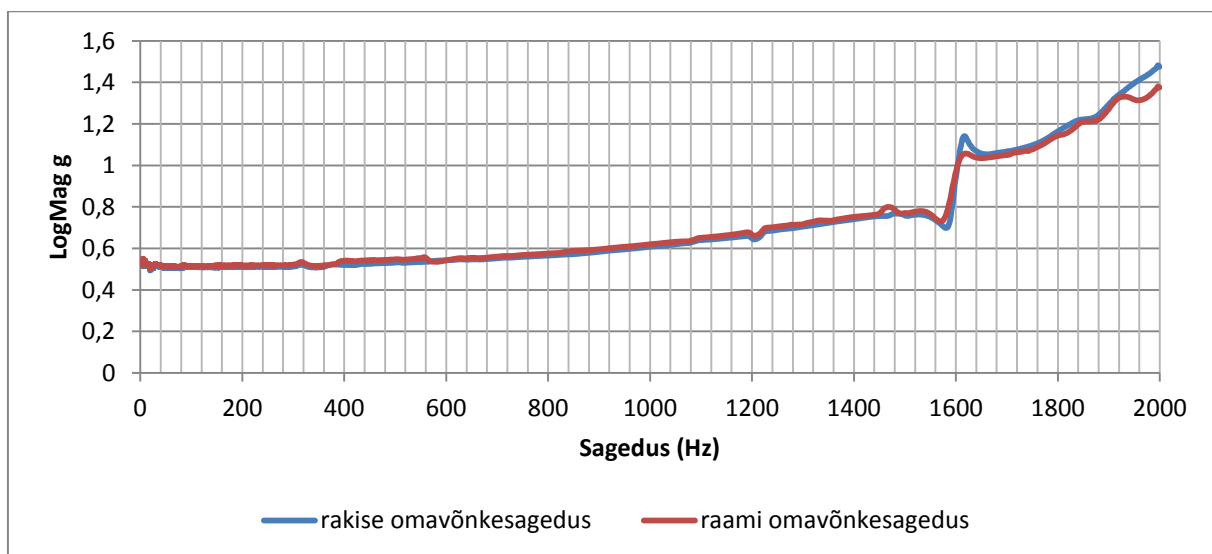
Lisaks FEM analüüsile teostasime veel omavõnkesageduste otsimise Tartu Observatooriumi vibratsioonipingil. Testide tulemusi saab hiljem võrrelda arvutatud tulemustega ja nii mõlema õigsust kontrollida.

Esimese sammuna määratakse CubeSati rakise omavõnkesagedus, sest rakis mõjutab testitavat keha kõige rohkem. Eriti CubeSati puhul kus satelliit täielikult rakise sisse käib. Testimisel kasutatav rakis ja raami paiknemine rakises on näidatud seel 10.



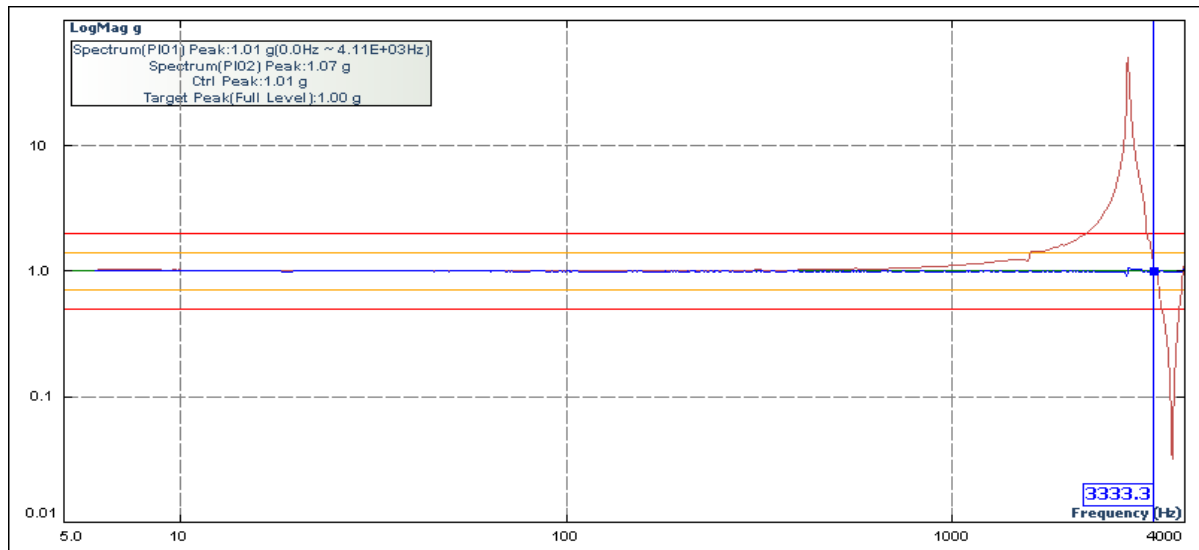
Sele 10: rakis ja raam koos rakisega

Sele 11 täitab rakise ja raami omavõnkesageduste otsimise graafikut vahemikus 5 – 2000 Hz. Sinine graafik on saadud rakise omavõnkesageduse otsingutelt ja punane raami omavõnkesageduse otsimisel. Graafikutelt on sarnased ja sellest võib järeldada, et rakis mõjutab testimist oluliselt, sest raam on asetatud rakise sisse. Saadud tulemustest ei saa ühtegi raami omavõnkesagedust välja lugeda ja võttes arvesse FEM analüüsis saadud tulemusi siis ei tohikski ühtegi olla.



Sele 11: rakise omavõnkesagedus

FEM analüüsi õigsuse kinnitamiseks vaatleme järgmises testist sageduste vahemiku 5 – 4000 Hz. Reeglina sellist testi pole vaja läbi viia, aga antud juhul on see oluline pigem eelnevalt saadud tulemuste kontrollimiseks.



Sele 12: rakise omavõnkesageduse otsing 5 - 4000 Hz

Sele 12 näitab 5 – 4000 Hz testis saadud graafikut, millest võib välja lugeda, et satelliidi korpuse omavõnkesagedus on 3333 Hz. Arvutiga tehtud analüüsi tulemusena oli esimene sagedus 3208 Hz, ehk suhteliselt lähedane testil saadud tulemusele. Arvestades et testil mõjutas tulemust veel korpust hoidnud rakis mida arvutiga tehtud analüüsides ei eksisteerinud, siis saab tulemusega rahul olla.

## 7. Kokkuvõte

Magistritöö teemaks on nanosatelliitide korpuse konstruktsioonide projekteerimine ja testimine. Lõputöö käigus ehitati valmis reaalne kosmosekõlblik toode. Standardse nanosatelliidi korpuse arendamise idee ja suur osa sisust on alguse saanud Eesti esimese satelliidi projektist ESTCube-1 ja sealt välja kasvanud firmadest pl Space OÜ ja Radius Space OÜ.

Lõputöö üks eesmärke oli anda ülevaade nanosatelliidi mehaanika arendusest ja üldiseid näpunäiteid kosmosetehnika arendamisest CubeSati näitel.

CubeSattide ehk enim levinud nanosatelliidi kontsepti ja tänast kiiresti kasvavat turgu tutvustati töö alguses. Lisaks üldisele turu tutvustusele toodi välja ka olulisemad müügil olevad CubeSati raamid ja toodi välja nende eelised ja puudused.

Kolmandas peatükis tuuakse välja olulisemad nõuded nanosatelliidi korpusele. Nõuded pärinevad kas *CubeSat Desing Specification*-ist, teistest turul olevatest toodetest ja teenustest või ESTCube-1 projekti kogemusest.

Korpuse võimalike lahendeid käsitletakse neljandas punktis, kus jaotatakse CubeSati korpus alamosadeks ehk sõlmedeks. Igale alamosale leitakse võimalikud viisid kuidas toota, projekteerida või valida. Siin käsitletakse nii projekteerimise juures olulisi näpunäiteid, materjale, pinnakatteid kui ka tootmise protsesse. Peatüki lõpus on ülevaade tulemustest ja igale alamosale on pakutud välja võimalik lahendus edasiseks kasutamiseks.

Tulenevalt nõuetest ja neljandas punktis toodud lahendustele leitakse korpusele viiendas punktis sobilik disain. Esialgu tutvustatakse eskiisidega kuidas midagi teha võiks ja seejärel koostatakse ideedest CAD mudelid.

Peatükis kuus tehakse korpusele vajalikud arvutused, analüüsid ja testid. Analüüside tegemiseks kasutati ANSYS tarkvara ja testid viidi läbi Tartu Observatooriumi laborites. Laboris tehtud testidega kinnitatakse ANSYSis saadud tulemuste õigsust.

Lõputöö eesmärk anda ülevaade nanosatelliidi korpuse mehaanika arendamisest ja jõuda lõpuks valmis tooteni sai täidetud. Kõiki tootearenduses iseloomulikud etapid: turu uuring, lahenduste otsimine ja võrdlemine, projekteerimine, tootmine ja testimine said edukalt täidetud.

## 8. Kokkuvõte inglise keeles

The topic of this master's thesis is Development and testing of nanosatellite structure elements. Nanosatellites are satellites with mass up to 10 kg and the most common type is called CubeSat. During this thesis a standardized structure for CubeSats was developed, manufactured, assembled and tested. The topic has heritage from the ESTCube-1 project and is related to its spin-off companies. Thesis also aims to give a good overview on how to design mechanics for Low Earth Orbit nanosatellites.

CubeSats are today the most launched type of nanosatellites. The concept of CubeSats and their rapidly growing market is presented in the beginning of the thesis. In addition the general CubeSat market overview and products for CubeSat structures are explained and analysed.

Third chapter focuses on the requirements to a nanosatellite structure. The main requirements come from the CubeSat Design Specification and from most common satellite subsystems or applications. Also lessons learned from ESTCube-1 are taken into account.

The CubeSat structure is divided into subparts in the fourth chapter. After all subparts were listed possible solutions for each part were discussed in detail. A closer look to which materials, coatings or manufacturing process to use has been given. Outcome of the discussion is summarized in a table at the end of the chapter.

In the fifth chapter the satellite structure is designed according to the listed requirements and possible solutions discussed in the previous chapter. At first basic sketches from structure parts have been made and described. Later design of three different most common sized CubeSat structures CAD models are presented.

Calculations and tests are described in the sixth chapter. At first basic physical properties were calculated with help of SolidWorks. For static and modal analysis ANSYS software and testing facilities in Tartu Observatory were used.

## Kasutatud kirjandus

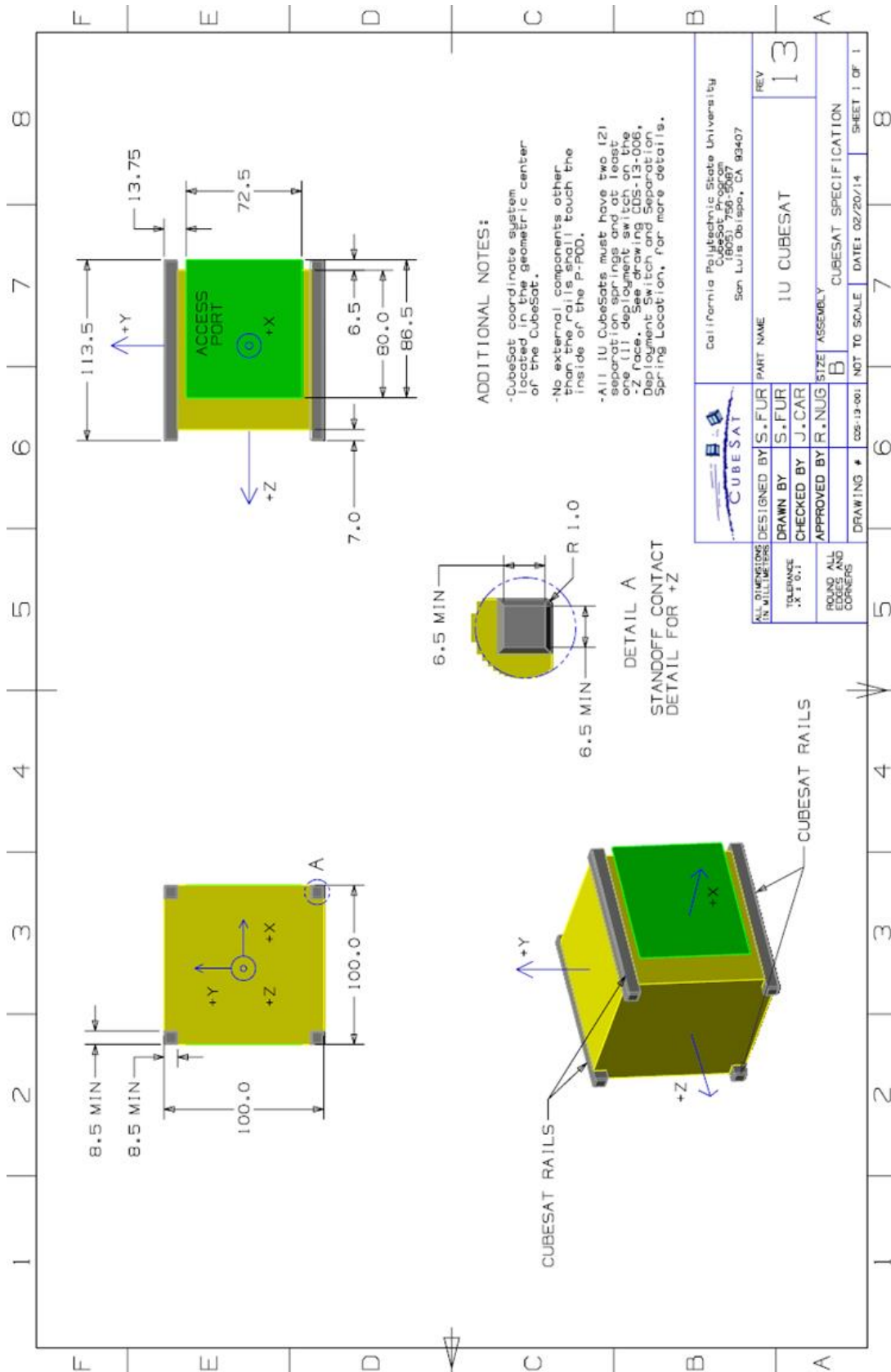
- [1] California Polytechnic State University, CubeSat Design Specification, 2014.
- [2] Wikipedia, „CubeSat,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/CubeSat>. [Kasutatud 16 11 2015].
- [3] W. Ley, K. Wittmann ja W. Hallmann, „Handbook of Space Technology,“ John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [4] Nanosatellite Database, „Figures,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [www.nanosats.eu](http://www.nanosats.eu). [Kasutatud 20 11 2015].
- [5] CubeSatShop, „CubeSatStructures,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [www.cubesatshop.com](http://www.cubesatshop.com). [Kasutatud 15 11 2015].
- [6] PUMPKIN, „CubeSatKit,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [www.cubesatkit.com](http://www.cubesatkit.com). [Kasutatud 16 11 2015].
- [7] Elegant Systems Engineering, „else,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.else.io/xu/>. [Kasutatud 10 11 2015].
- [8] Up&Above, „Products,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Available: [http://upnabove.com/file/repository/Product\\_Nanosatellite\\_20150303\\_EN.pdf](http://upnabove.com/file/repository/Product_Nanosatellite_20150303_EN.pdf). [Kasutatud 16 11 2015].
- [9] SkyFoxLabs, „Products,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.skyfoxlabs.com/products?category=4>. [Kasutatud 16 11 2015].
- [10] A. Slavinskisa, H. Kuuste, E. Ilbis, M. Pajusalu, T. Eenmäe, I. Sünter, K. Laizāns, H. Ehrpais, P. Liias, E. Kulu, J. Viru, J. Kalde, U. Kvell, J. Kütt, K. Kahn, S. Lätta, J. Envall, P. Toivanen, J. Polkko, P. Janhunen, R. Vendt, V. Allik ja M. Noorma, „ESTCube-1 student satellite in-orbit experience and lessons,“ *IEEE Aerospace and Electronics Systems*, nr 0885-8985, August 2015.
- [11] P. Consortium, „PC/104,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://pc104.org/hardware-specifications/pc104/>. [Kasutatud 20 11 2015].
- [12] ISIPOD CubeSat Deployer, „ISIPOD CubeSat Deployer,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: [www.isispace.nl](http://www.isispace.nl). [Kasutatud 15 11 2015].
- [13] Nanoracks, „NanoRacks CubeSat Deployer (NRCSD) Interface Control Document,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://nanoracks.com/wp-content/uploads/Current\\_edition\\_of\\_Interface\\_Document\\_for\\_CubeSat\\_Customers.pdf](http://nanoracks.com/wp-content/uploads/Current_edition_of_Interface_Document_for_CubeSat_Customers.pdf).



- [Kasutatud 15 11 2015].
- [14] P. Liias, „ESTCube struktuuri ja mehhanismide arendus,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2012.
- [15] G. Aluminium, „EN AW 6082,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://gleich.de/en/products/round-bars/en-aw-6082?pdf>. [Kasutatud 25 11 2015].
- [16] MatWeb, 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://matweb.com/>. [Kasutatud 20 11 2015].
- [17] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH, „1.3964,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.dew-stahl.com>. [Kasutatud 14 12 2015].
- [18] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH, „1.4567,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.dew-stahl.com>. [Kasutatud 14 12 2015].
- [19] Wilhelm Böllhoff GmbH, „HELICOIL,“ 2105. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.boellhoff.com/static/pdf/downloadcenter/EN/HELICOIL-Plus-EN-0100.pdf>. [Kasutatud 24 11 2015].
- [20] AHC Oberflächentechnik GmbH, „Surface Treatment,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ahc-surface.com/en/surface-treatment/>. [Kasutatud 23 11 2015].
- [21] Henkel Technologies, „ALODINE 1200S,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.solvents.net.au/index\\_htm\\_files/ALODINE%201200%20S1%20\(169308\).pdf](http://www.solvents.net.au/index_htm_files/ALODINE%201200%20S1%20(169308).pdf). [Kasutatud 20 11 2015].
- [22] Ettinger Elektronik-Bauelemente, „Products,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ettinger.de>. [Kasutatud 20 11 2015].
- [23] Bossard Group, „Products,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.bossard.com/>. [Kasutatud 20 11 2015].
- [24] Grayhill Inc, „Pushbutton Switches,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.grayhill.com/assets/1/7/push\\_39\\_panel\\_mount.pdf](http://www.grayhill.com/assets/1/7/push_39_panel_mount.pdf). [Kasutatud 20 11 2015].
- [25] Omron Corporation, „Microswitches unsealed,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://components.omron.eu/Product-details/D2MQ>. [Kasutatud 23 11 2015].
- [26] University of Applied Sciences of Southern Switzerland, Department of Technology and Innovation, „Structures, Mechanics and Materials,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.spacelab.dti.supsi.ch/tiSat1SMM.html>. [Kasutatud 23 11 2015].
- [27] ESTCube, [Võrgumaterjal]. Available: [www.estcube.eu](http://www.estcube.eu). [Kasutatud 2015].
- [28] J. Dolengewicz, L. Whipple ja S. Wong, The Next Generation CubeSat, Calpoly, 2010.

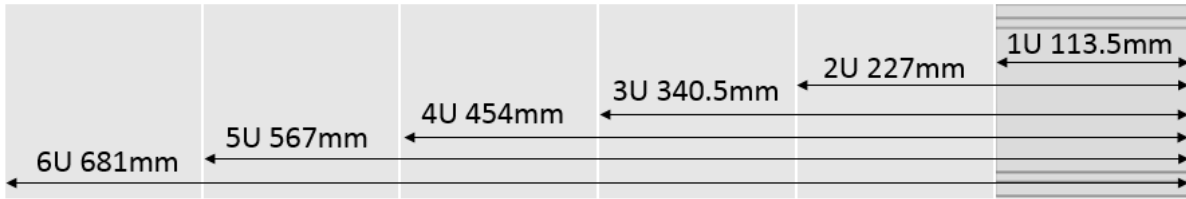
[29] HEINRICH KIPP WERK KG, „Federnde Druckstücke mit Schlitz und Druckstift,“ [Vörgumaterjal]. Available: <http://www.kippwerk.de/de/de/Produkte/Bedienteile-Normelemente/Federnde-Druckst%C3%BCcke-Arretierbolzen-Kugelsperbolzen/Federnde-Druckst%C3%BCcke-mit-Schlitz-Druckbolzen-Stahl-LONG-LOK-gesichert.html>. [Kasutatud 21 11 2015].

1. Lisa – CDS joonis

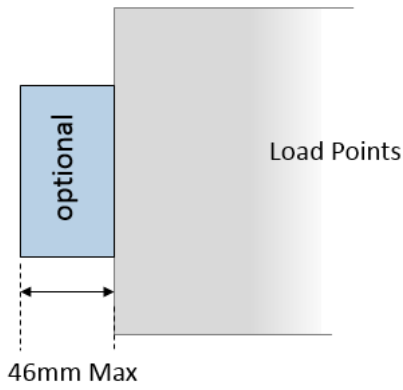


## 2. Lisa - Nanoracks

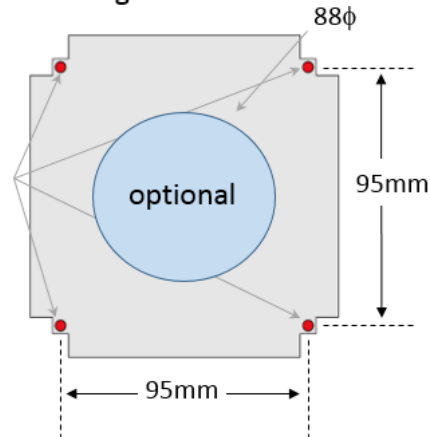
CubeSat Z-axis Rail-to-Rail Maximum Dimensions



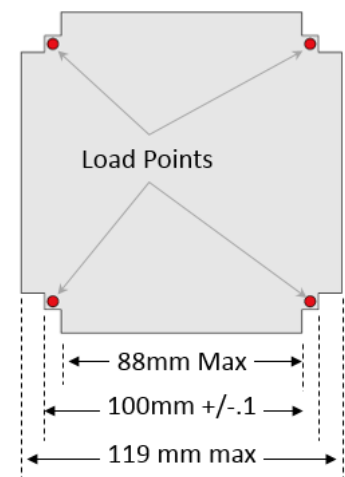
Optional Envelope\*  
Lateral View



End View (X,Y) Load Points  
Negative Z Face



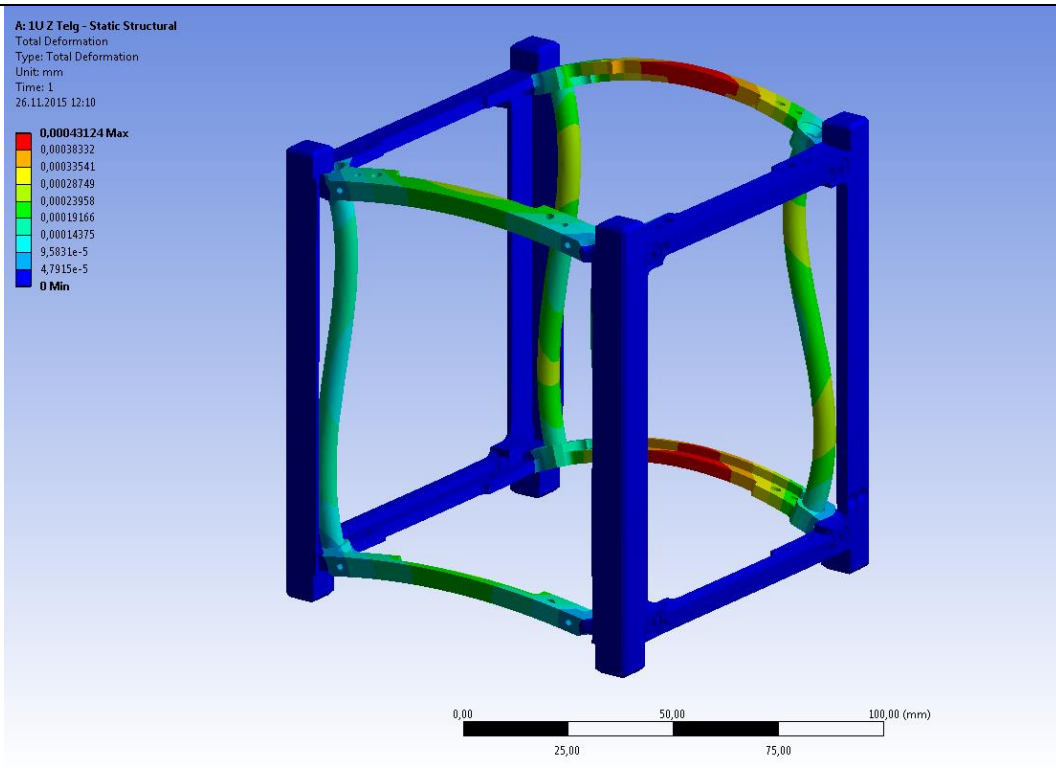
End View (X,Y) Rail-to-Rail  
Positive Z face



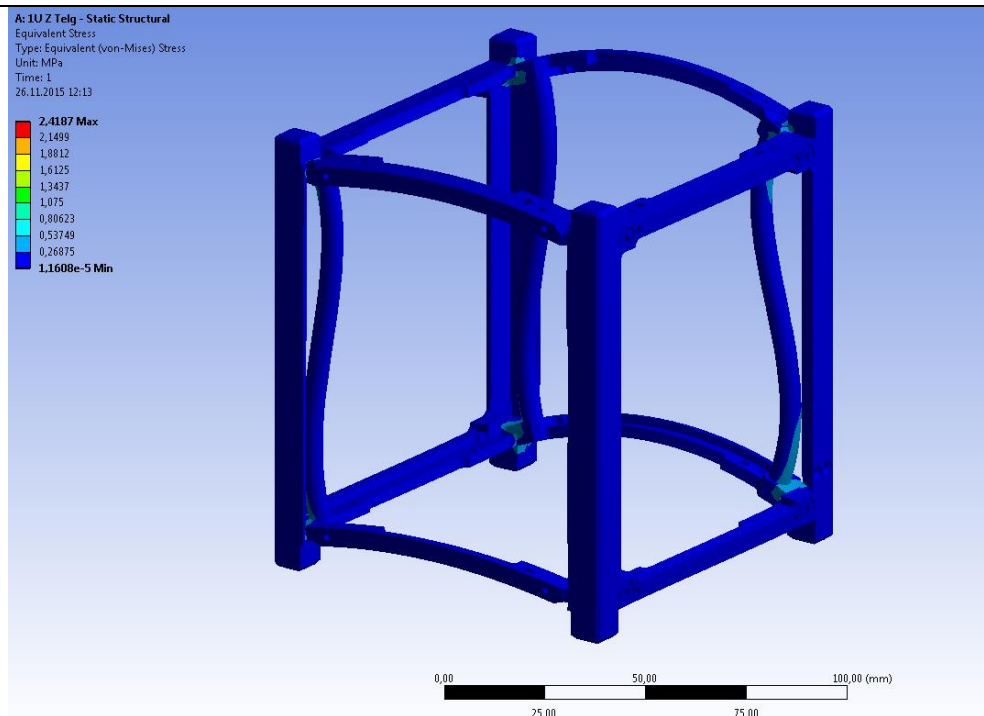
\*Requires approval

### 3. Lisa – pingete ja deformatsioonide tulemused

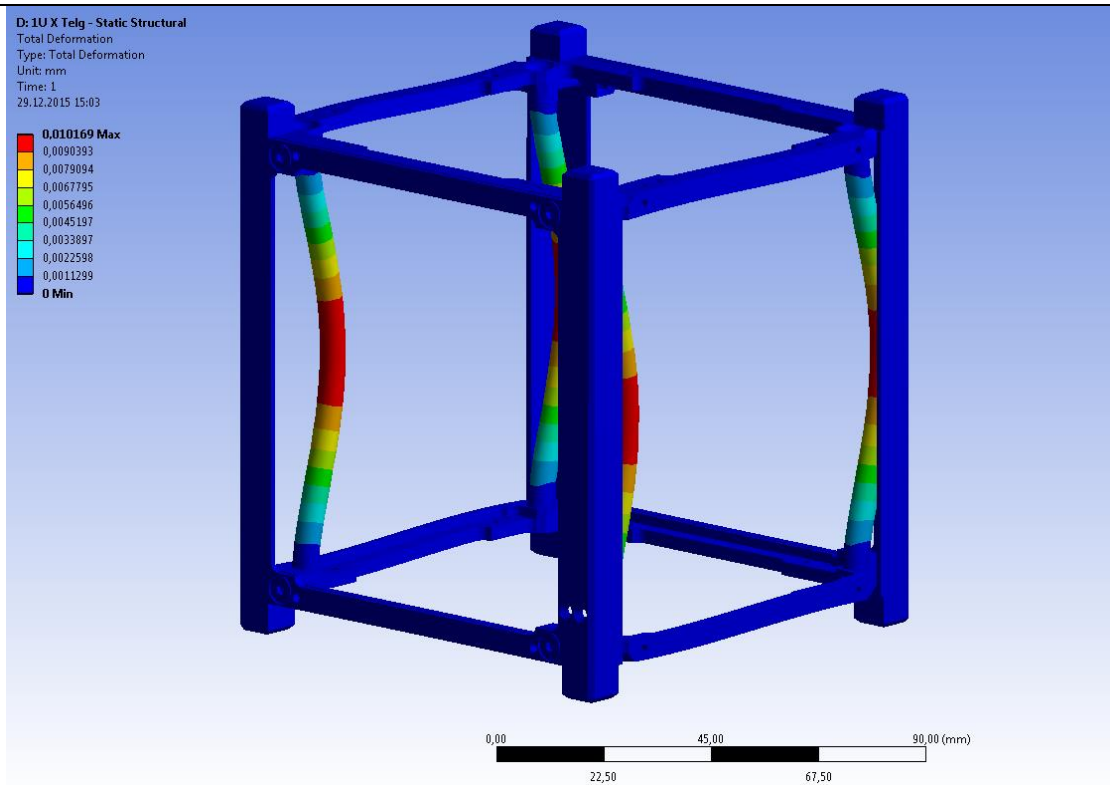
#### Deformatsioonid Z telje suunas



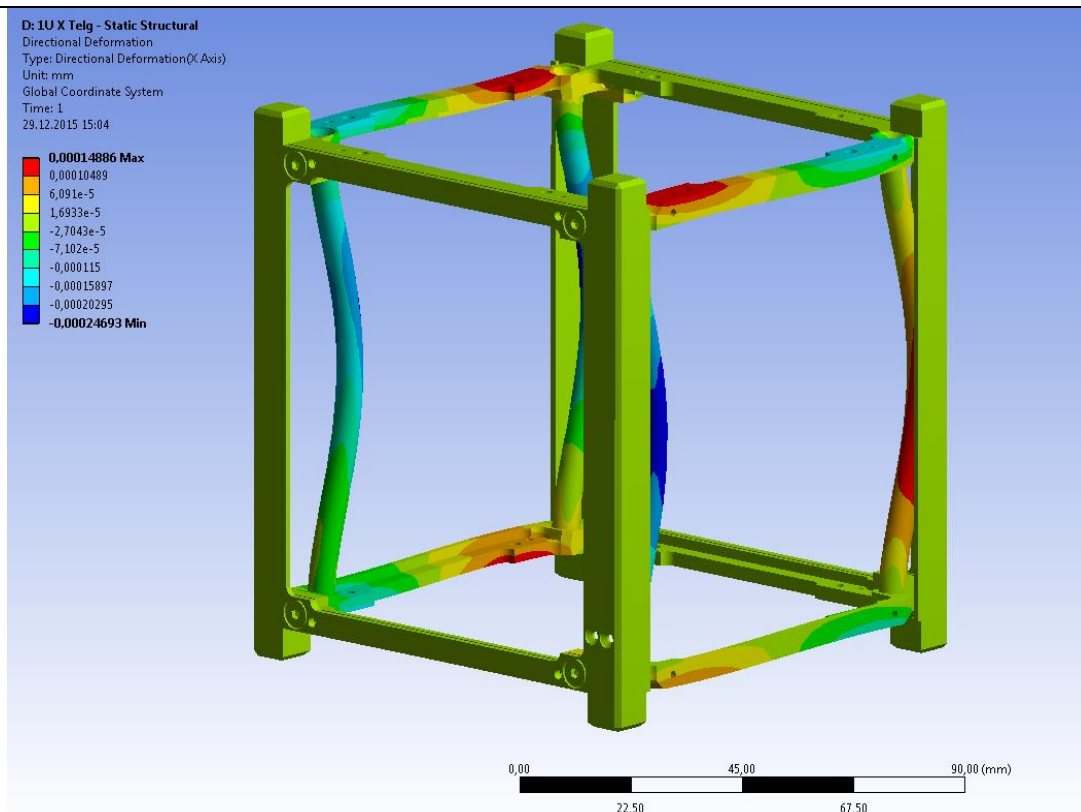
#### Pinged Z telje suunas



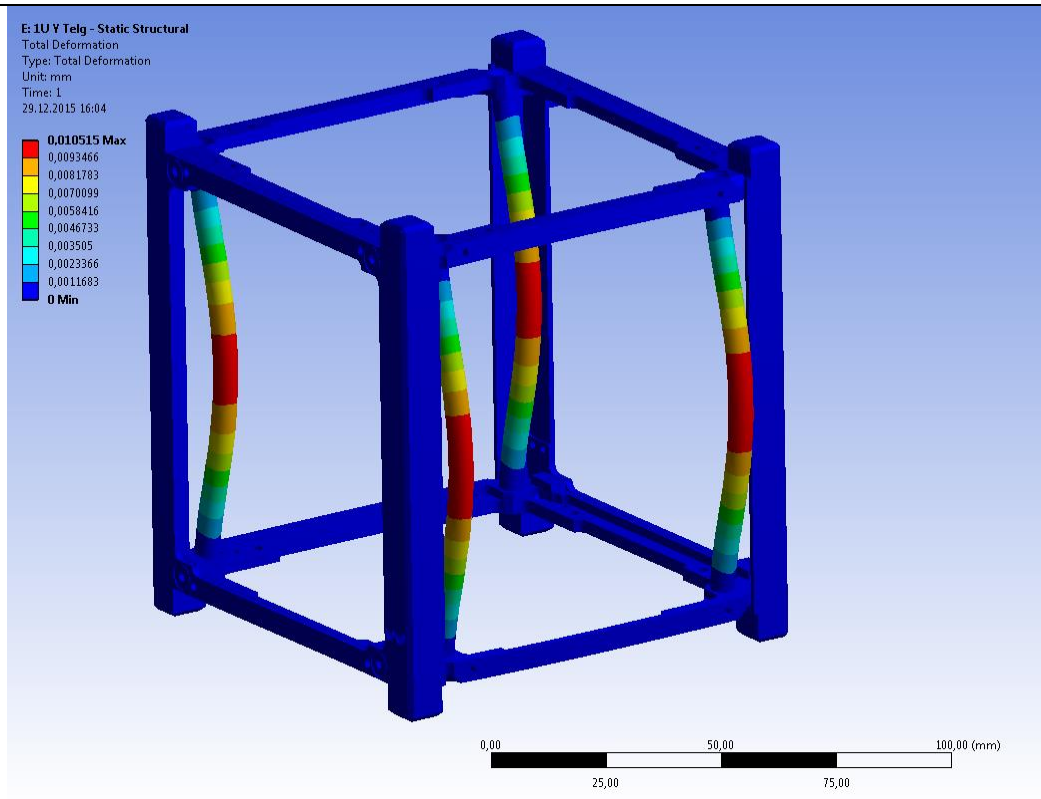
## Deformatsioonid X telje suunas



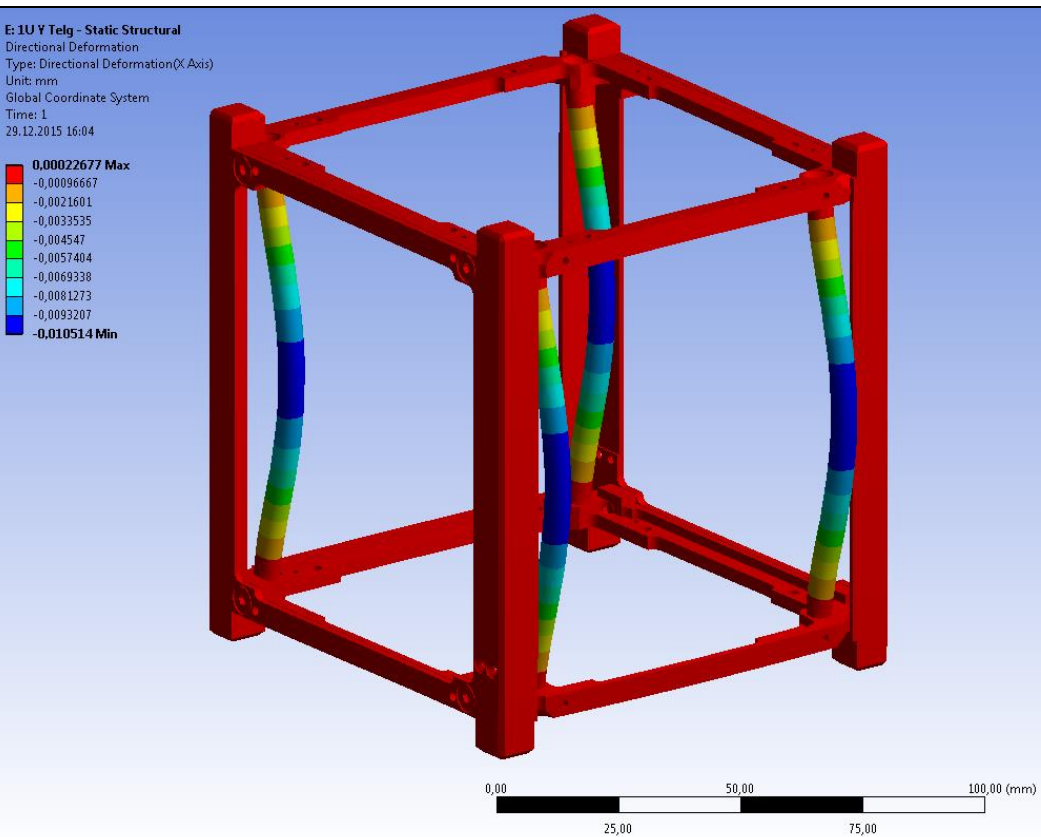
## Pinged X telje suunas



## Deformatsioonid Y telje suunas

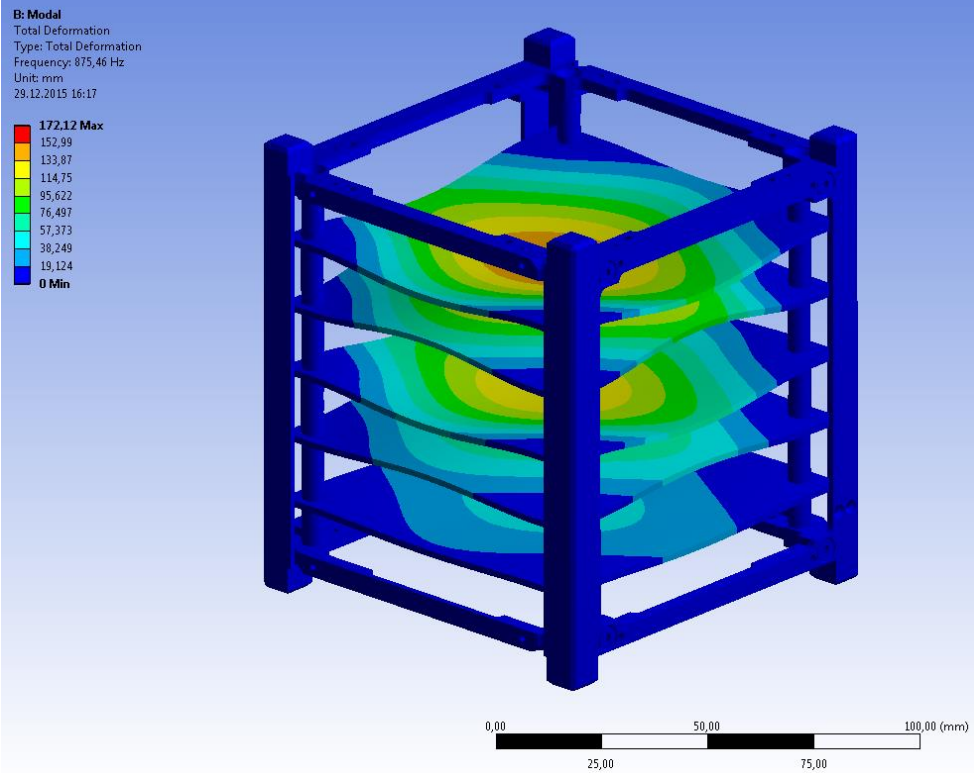


## Pinged Y telje suunas

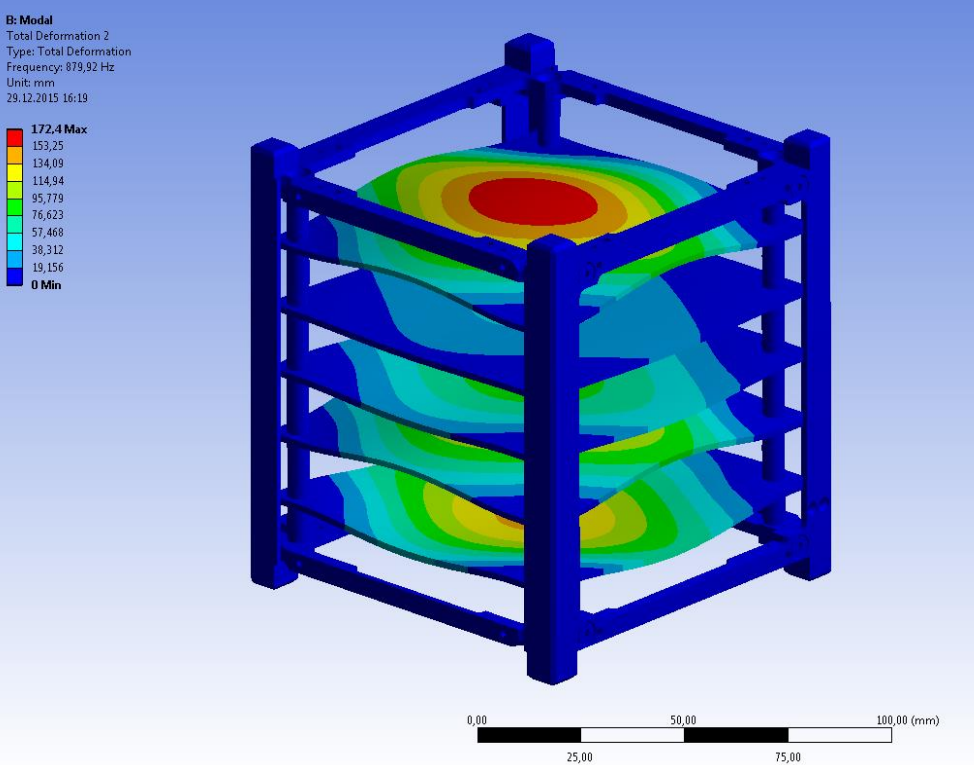


## 4. Lisa - omavõnkesagedused

Mode 1

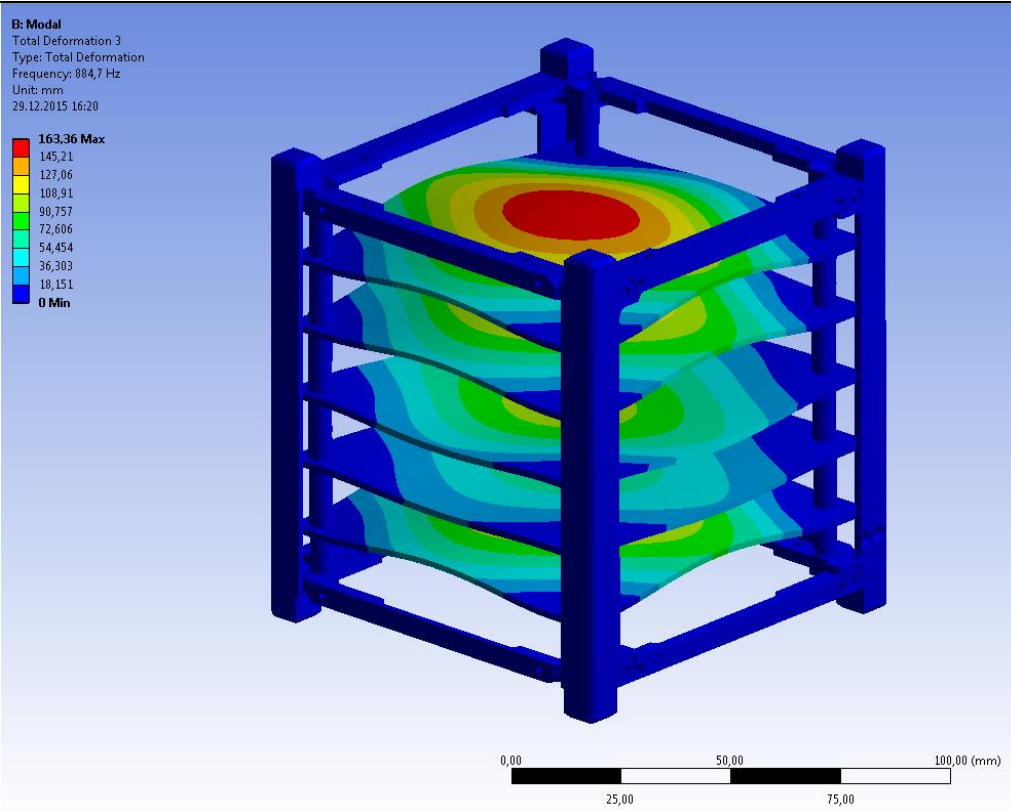


Mode 2

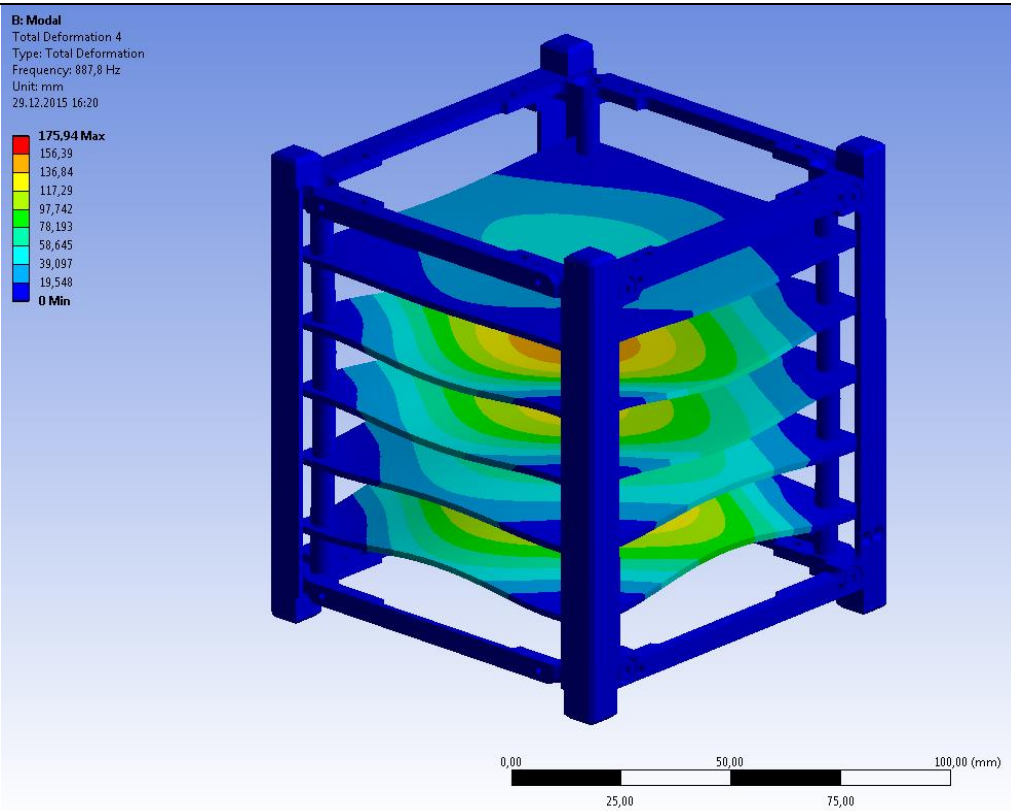




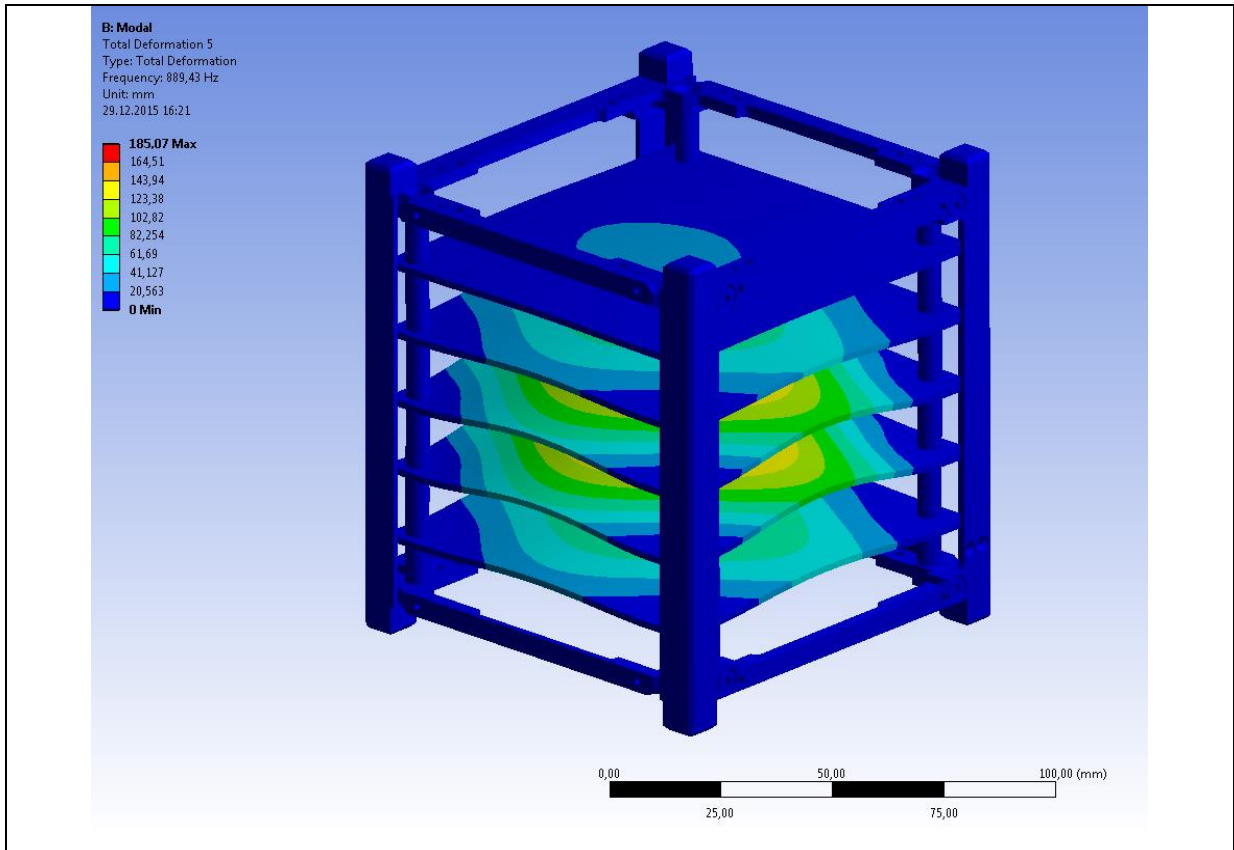
### Mode 3



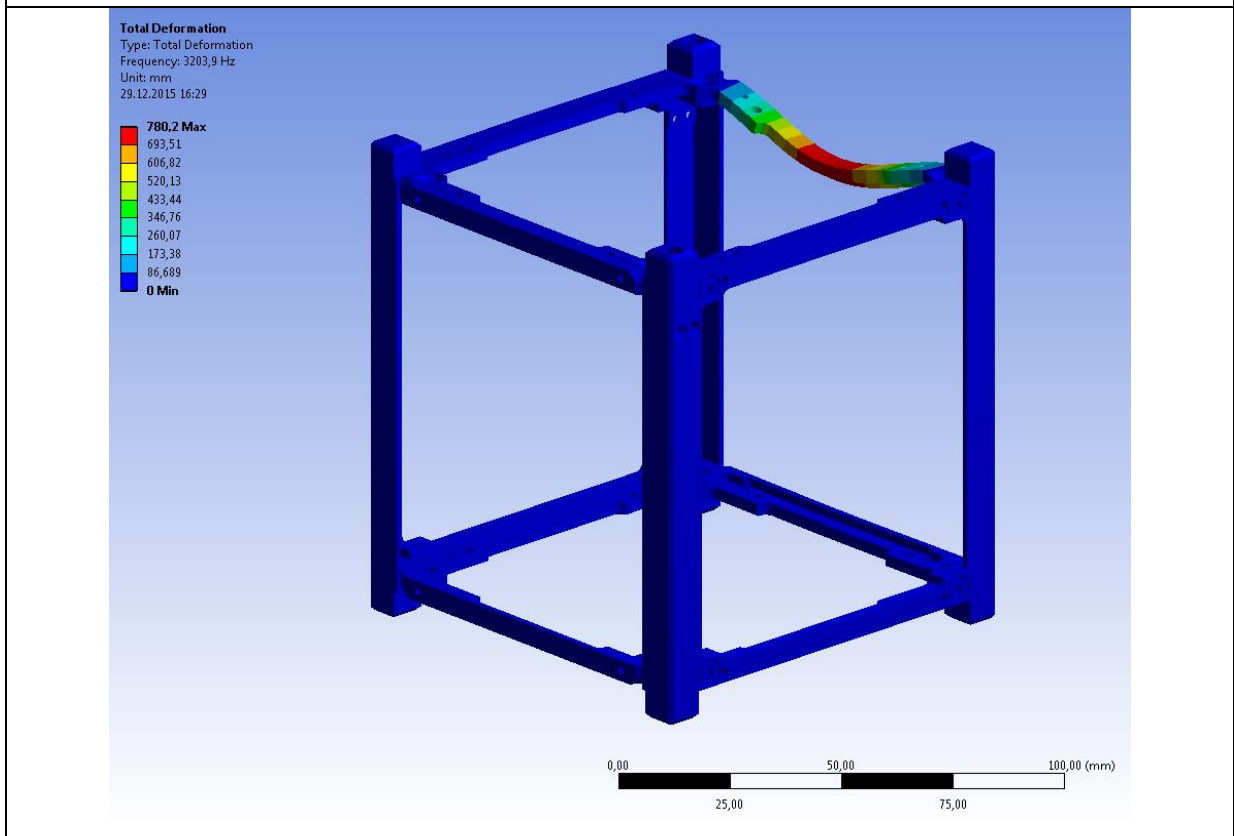
### Mode 4



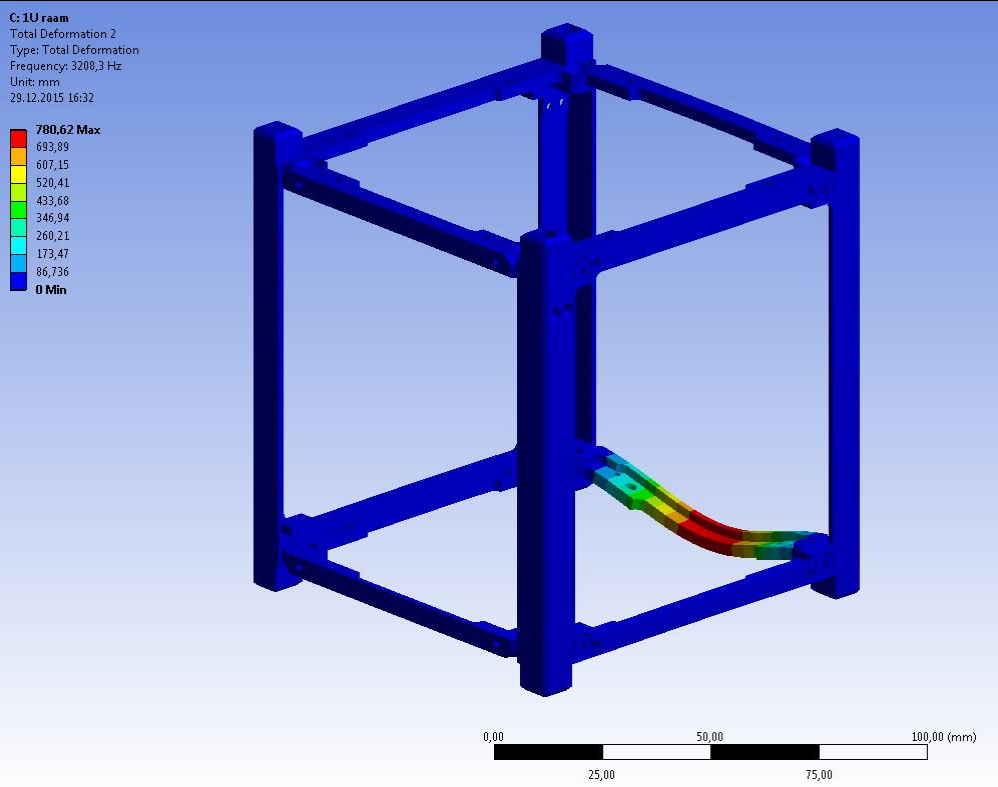
### Mode 5



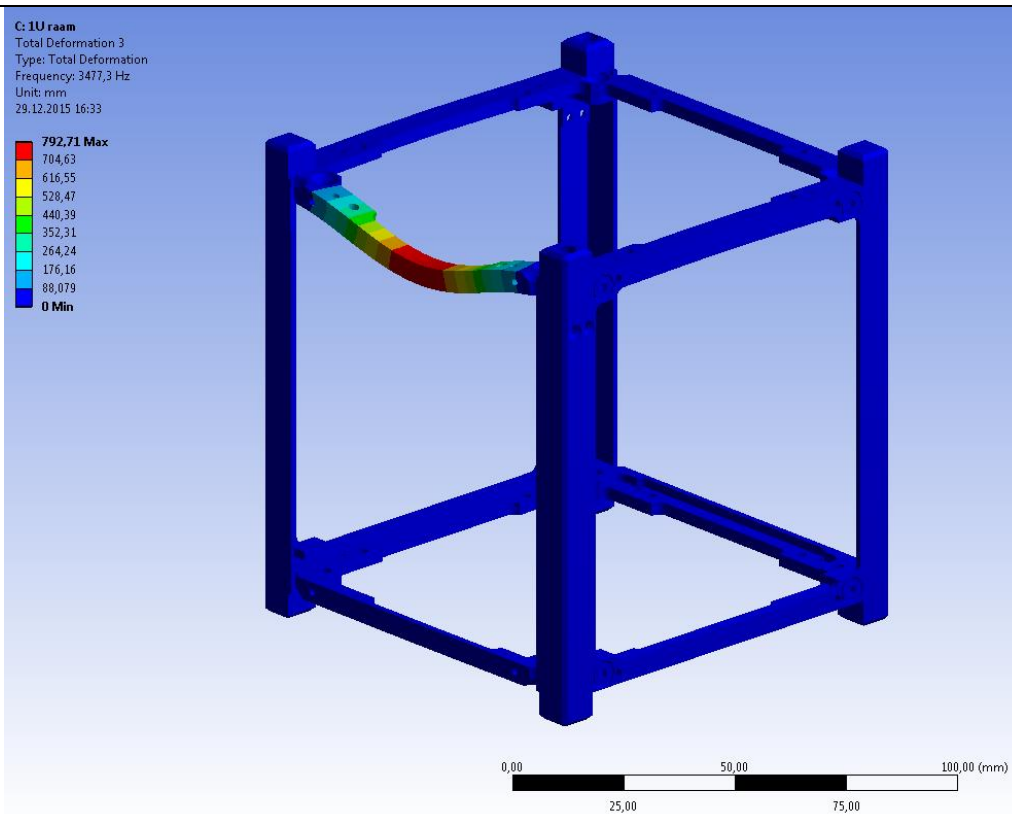
Test 2 mode 1



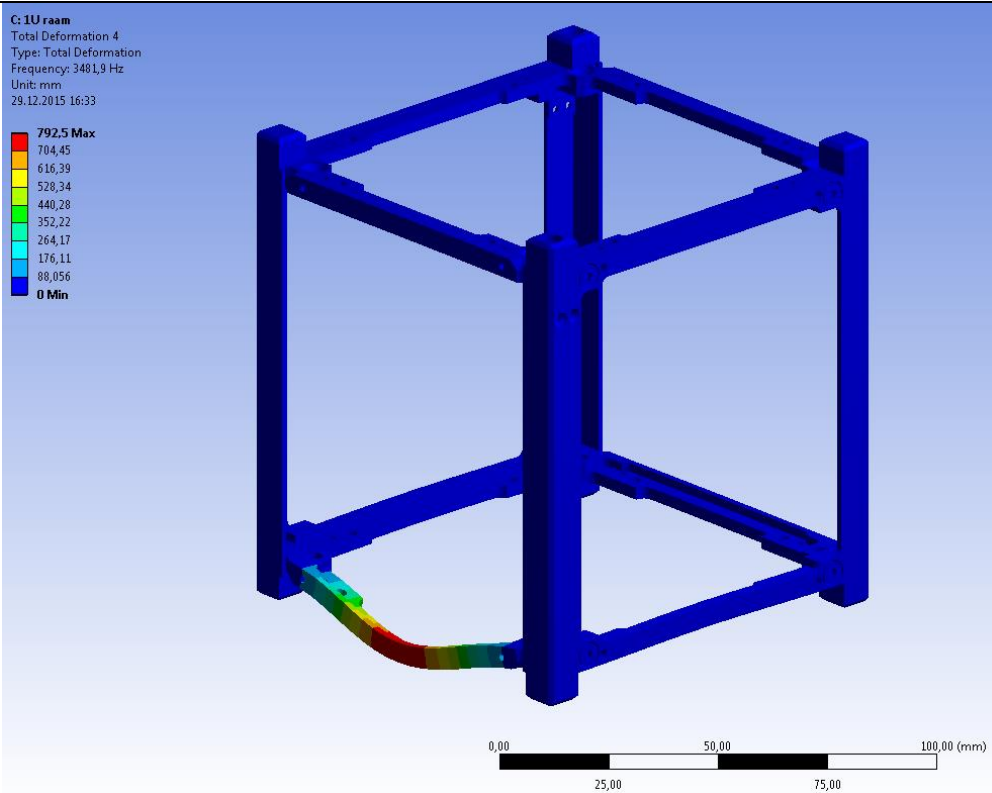
## Test 2 mode 2



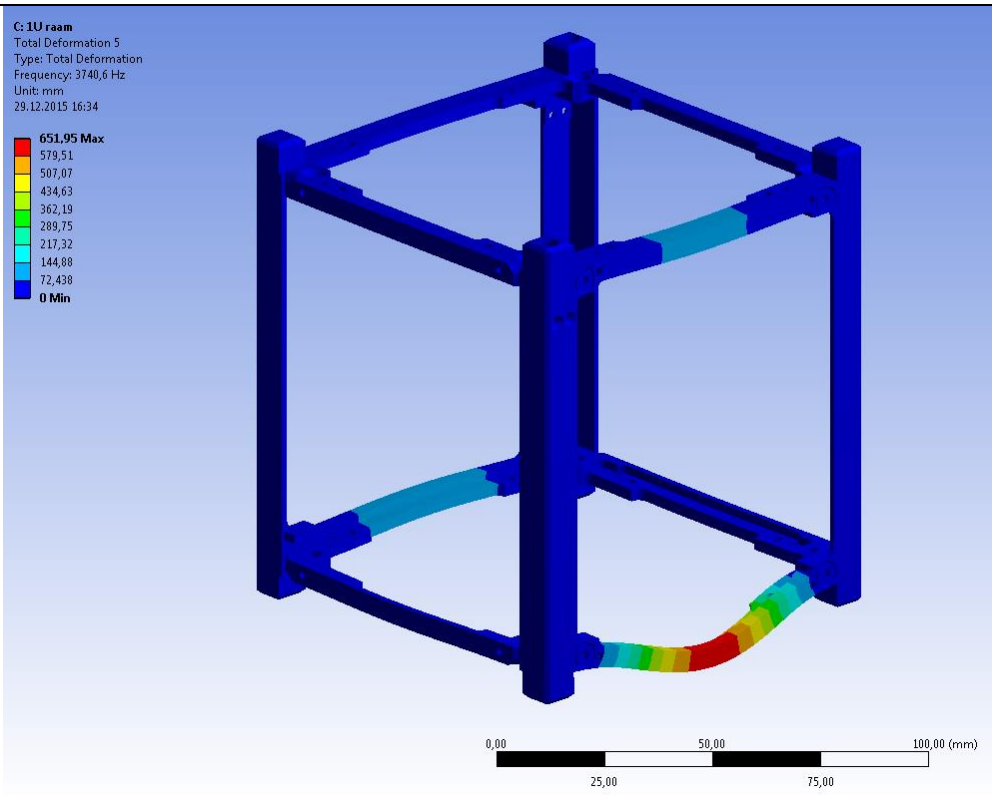
## Test 2 mode 3



### Test 2 mode 4



### Test 2 mode 5



## 5. Lisa - joonised