



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JONI KOSKINEN
SATELLIITIN RF-TEHONJAKOVERKON MEKANIKKASUUNNIT-
TELU

Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Ellman
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 8. kesäkuuta
2016

TIIVISTELMÄ

JONI KOSKINEN: Satelliitin RF-tehonjakoverkon mekaniikkasuunnittelu

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 76 sivua, 6 liitesivua

Marraskuu 2016

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tuotantotekniikka

Tarkastaja: professori Asko Ellman

Avainsanat: Mekaniikkasuunnittelu, RF-tehonjakoverkko, 3D-mallinnus

Mekaniikkasuunnittelu tarkoittaa erilaisten mekaanisten kappaleiden suunnittelua sekä mallinnusta. Mekaniikkasuunnittelu muodostaa osan teknistä suunnittelua ja sitä voidaan hyödyntää muun muassa tuotteiden kehittämisessä tai uusien tuotteiden suunnittelussa. Tässä diplomityössä mekaniikkasuunnittelu toteutettiin 3D-mallinnuksen avulla ja mallinnukseen käytettiin Solidworks-suunnitteluohjelmaa.

Diplomityön tavoitteena oli suunnitella ja mallintaa asiakkaan vaatimusten mukainen mekaniikka satelliitissa käytettävään tutkasignaalin tehonjakoverkkoon. Radiotaajuuksia käyttävä tehonjakoverkko koostuu erilaisista tehonjakoyksiköistä sekä niitä yhdistävistä kaapeleista. Diplomityössä keskityttiin suunnittelemaan kolme erilaista tehonjakoyksikköä, jotka integroidaan osaksi tehonjakoverkkoa. Tehonjakoyksiköiden mekaniikkaan vaikuttivat muun muassa asiakkaan toimittama vaatimusmäärittely, RF-tekniikan toteutus sekä kappaleiden valmistusmenetelmät. Tehonjakoyksiköt integroidaan osaksi suurempaa kokonaisuutta ja niiden ominaisuudet, kuten massa ja ulkomitat, olivat tarkasti määriteltäviä. Suunnittelu vaati muun muassa erilaisten avaruusteknologiaa käsittelevien standardien tuntemista.

Työn teoriaosuudessa käsitellään 3D-mallinnuksen erilaisia toteutustapoja, suunnitteluprojektin toteutusta sekä avaruustekniikan asettamia erityisvaatimuksia. Teoriaosuudessa on hyödynnetty laaja-alaisesti avaruustekniikkaa sekä mekaniikkasuunnittelua käsittelevää kirjallisuutta. Kirjallisuustutkimuksen avulla on tutkittu erilaisia ratkaisumalleja sekä selvitetty avaruuskäyttöön suunniteltavan tuotteen erityisvaatimuksia. Lisäksi tehonjakoverkon suunnittelussa on tutkimusmenetelminä käytetty toimintatutkimusta sekä mallinnusta. Toimintatutkimuksen avulla on tutkittu DA-Design Oy:n aikaisemmin suorittamia avaruustekniikkaan liittyviä projekteja ja hyödynnetty näistä projekteista saatua informaatiota. Syklisen toimintatutkimuksen avulla tehonjakoverkon mekaniikkaa on kehitetty niin, että lopullinen tuote täyttää asiakkaan vaatimukset. Mallinnuksen ja simuloinnin avulla on vertailtu mekaniikan vaihtoehtoisia toteutustapoja sekä tutkittu tehonjakoyksiköiden rakennetta.

Tutkimuksen perusteella on suunniteltu ja mallinnettu kolme erilaista tehonjakoyksikköä, joiden tavoitteena on täyttää asiakkaan vaatimukset toiminnallisuuden sekä rakenteellisten ominaisuuksien osalta. Työssä on tutkittu erilaisten mekaanisten ratkaisujen vaikutusta tehonjakoyksiköiden ominaisuksiin, jotta lopulliset ratkaisumallit täyttävät kaikki niille asetetut vaatimukset.

ABSTRACT

JONI KOSKINEN: Mechanical design of RF distribution network
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 76 pages, 6 Appendix pages
November 2016
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
Major: Production Engineering
Examiner: Professor Asko Ellman

Keywords: Mechanical design, RF distribution network, 3D modeling

Mechanical design forms part of the technical design. Mechanical design can be used for example in product design and in product development. In this thesis mechanical design is used to design the RF distribution network that fills all the requirements set by the customer. In this thesis 3D modeling is executed with Solidworks 3D design software.

Objective of this thesis was to design and model RF distribution network. RF distribution network consists of several power dividers and cables. This thesis focuses on modeling three different power dividers which will be integrated into distribution network. Design of the power dividers was affected by the RF design, different manufacturing methods and customer's specifications. Some details of the power dividers, like outer dimensions and mass, were defined because it has to be possible to integrate these dividers into large assembly. Space technology design also requires an understanding of unique conditions and space standards.

Theory chapter contains different modeling methods, principles and information about space technology design. Literature research has been used to understand the basics of the space technology design, 3D modeling and technical documentation. Theory chapter is followed by the process description. In this chapter process is divided into smaller parts so it is easier to understand the workflow. Action research is used in this section to exploit all the DA-Design's knowledge about the power dividers. DA-Design has completed space technology design projects before so it was possible to take advantage of some previous designs. At the same time it was possible to develop company procedures in everyday design. During this project these power dividers were developed until they filled all the requirements. 3D modeling was used to compare different solutions and to improve the structure of the power dividers.

Three different power dividers has been designed and manufactured based on this study. In this thesis different structures and models has been compared to design dividers that fill all the requirements set by the customer.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on laadittu DA-Design Oy:lle ja tutkimusta on hyödynnetty yrityksen avaruusteknologian suunnitteluprojektissa. Diplomityössä on suunniteltu ja mallinnettu kolme tehonjakoyksikköä, jotka integroidaan osaksi satelliitin tutkasignaalin tehonjakoverkkoa. Työ on laadittu Tampereen teknillisen yliopiston konetekniikan koulutusohjelmassa tuotantotekniikan pääaineopintoihin.

Kiitokset haluan esittää DA-Design Oy:lle mahdollisuudesta mielenkiintoiseen suunnittelutyöhön. Erityisesti haluan kiittää Nestori Fabritiusta, Santtu Puskalaa ja Mika Koskirantaa työn ohjaamisesta sekä kannustuksesta projektin aikana. Työn tarkastajana toimi professori Asko Ellman, jota haluan kiittää ohjeista ja neuvoista työn edetessä. Suuri kiitos kuuluu myös vanhemmilleni yliopisto-opintojen aikaisesta tuesta ja kannustuksesta.

Tampereella, 23.10.2016

Joni Koskinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Työn tavoitteet ja tutkimuskysymys	2
1.2	Tutkimusmenetelmät	2
2.	MEKANIKKASUUNNITTELUN TEORIAA	4
2.1	Tietokoneavusteinen suunnittelu eli CAD	4
2.1.1	Kappaleiden mallinnus.....	5
2.1.2	Suunnittelustrategia ja parametrinen piirremallinnus	9
2.1.3	Tekniset piirustukset	11
2.1.4	Suunnittelua ohjaavat standardit	14
2.1.5	Toleranssit teknisessä suunnittelussa	15
2.2	Avaruusteknologian vaatimukset ja standardit	15
2.2.1	Standardijärjestelmät avaruusteknologian suunnittelussa.....	16
2.2.2	ECSS-standardien vaikutus mekaniikkasuunnitteluun	16
2.3	RF-tehonjakaja	20
2.4	Suunnitteluprojekti	20
2.5	Suunnittelu osana tuotekehitystä	21
3.	RF-TEHONJAKOVERKON SUUNNITTELU	23
3.1	Toimintatutkimus	23
3.2	Suunnitteluprosessi.....	24
3.2.1	Avaruusteknologian suunnittelu	25
3.2.2	Kokemukset aikaisemmista avaruusprojekteista	26
3.3	Tehtävän määrittäminen	27
3.3.1	Mekaniikan asiakasvaatimukset.....	27
3.3.2	RF-suunnittelun asettamat vaatimukset	31
3.3.3	Tuotannon asettamat vaatimukset.....	32
3.4	Tuoterakenteen suunnittelu	33
3.5	Projektin dokumentointi	35
4.	MEKANIKKASUUNNITTELUN TOTEUTUS	37
4.1	Tehonjakoyksiköiden materiaalit	38
4.2	Yksiköiden SMA-liittimet.....	40
4.3	Liittimien ja kannen kiinnitys kierre-elementtien avulla	41
4.4	Tehonjakoyksiköiden pohjan ja kannen suunnittelu	43
4.4.1	2:4 Tehonjakoyksikkö.....	43
4.4.2	1:3 Tehonjakoyksikkö.....	49
4.4.3	1:6 Tehonjakoyksikkö.....	54
4.5	Yksiköiden rajapinnat ja kiinnitys.....	59
4.6	Yksiköiden kevennykset	60
4.7	Ominaisvärähtelytaajuudet.....	63
4.8	Kokoonpanot	64
4.9	Piirustukset.....	65

5.	TULOKSET	66
5.1	2:4 Tehonjakoyksikkö	67
5.2	1:3 Tehonjakoyksikkö	69
5.3	1:6 Tehonjakoyksikkö	70
6.	YHTEENVETO	71
	LÄHTEET	74

LIITE A: 1:6 Tehonjakoyksikön ICD-dokumentti

LIITE B: 2:4 Tehonjakoyksikön ICD-dokumentti

LIITE C: 1:3 Tehonjakoyksikön ICD-dokumentti

LIITE D: 1:6 Tehonjakoyksikön räjäytyskuva

LIITE E: 2:4 Tehonjakoyksikön räjäytyskuva

LIITE F: 1:3 Tehonjakoyksikön räjäytyskuva

LYHENTEET JA MERKINNÄT

2D	Kaksiulotteinen (engl. <i>two dimensional</i>)
3D	Kolmiulotteinen (engl. <i>three dimensional</i>)
BB	Prototyypin malli (engl. <i>breadboard model</i>)
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (engl. <i>computer-aided design</i>)
CAE	Tietokoneavusteinen tekniikka (engl. <i>computer-aided engineering</i>)
DXF	Tiedostomuoto (engl. <i>drawing exchange format</i>)
ECSS	Eurooppalaisen avaruusteknologian standardeista vastaava organisaatio (engl. <i>European Cooperation for Space Standardization</i>)
EM	Insinöörimalli (engl. <i>engineering model</i>)
ESA	Euroopan avaruusjärjestö (engl. <i>European space agency</i>)
FM	Lentomalli (engl. <i>flight model</i>)
FS	Varaosamalli (engl. <i>flight spare</i>)
GPS	Geometrinen tuotemäärittely (engl. <i>geometric product specification</i>)
ICD	Rajapintoja käsittelevä dokumentti (engl. <i>interface control drawing</i>)
ISO	Kansainvälinen standardisointijärjestö (engl. <i>International organization for standardization</i>)
METSTA	Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys
MIL-STD	Yhdysvaltojen puolustushallinnon standardi (engl. <i>United States military standard</i>)
Ra	Profiilin aritmeettinen keskipoikkeama, pinnankarheutta kuvaava suure
RF	Radiotaajuus (engl. <i>radio frequency</i>)
SAT	Tiedostotyyppi (engl. <i>Standard Acis text</i>)
SFS	Suomen standardisointiliitto
SMA	Liitintyyppi (engl. <i>subminiature version A</i>)
TMM	Piirilevymateriaali (engl. <i>Thermoset microwave material</i>)

1. JOHDANTO

Diplomityö tehdään DA-Design Oy:lle, joka suunnittelee ja valmistaa kehittyneitä elektroniikkajärjestelmiä esimerkiksi teknologiateollisuuden ja avaruusteknologian käyttöön. Yritys toimii pääasiassa projektiliiketoiminnassa ja se tarjoaa myös koko tuotteen elinkaaren kattavia palveluja. DA-Design Oy toimii yhteistyössä muun muassa Euroopan avaruusjärjestön (ESA, engl. *European Space Agency*) kanssa.

Diplomityössä suunnitellaan asiakkaan vaatimusten mukainen mekaniikka satelliitissa käytettävään tutkasignaalin tehonjakoverkkoon. Radiotaajuuksia käyttävä tutkasignaalin tehonjakoverkko koostuu erilaisista tehoa jakavista yksiköistä sekä niitä yhdistävistä kaapeleista. Diplomityössä käsitellään projektiin kuuluvan tehonjakoverkon tehonjakoyksiköiden mekaniikkasuunnittelua. DA-Design Oy suunnittelee ja toimittaa tehonjakoverkon alihankintana suurelle eurooppalaiselle yritykselle, jolla on paljon kokemusta useista eri avaruusprojekteista.

Diplomityö koostuu teoriaosuudesta, projektin kuvauksesta sekä varsinaisesta mekaniikkasuunnittelusta. Teoriaosuudessa käsitellään mekaniikkasuunnittelun teoriaa ja keskitytään erityisesti 3D-mallinnukseen sekä sen toteuttamiseen teollisuudessa. Teoriaosuudessa käsitellään myös avaruusteknologian yleistä suunnittelua sekä avaruusteknologiaa käsitteleviä standardeja. Luvussa käsitellään lisäksi erityisvaatimuksia sekä rajoituksia, joita avaruuskäyttö asettaa suunniteltavalle teknologialle. Tehonjakoverkon suunnittelussa ja valmistuksessa on kyse hyvin pienistä kappalemääristä ja projektituotannosta, joten suunnittelussa pitää ottaa huomioon myös tuotekehitys. Teoriaosuudessa tutkitaan suunnittelun merkitystä tuotekehityksessä, koska se muodostaa tärkeän osan projekteja, joissa tuotteita valmistetaan vain muutamia kappaleita.

Projektin suunnitteluprosessia tarkastellaan omassa luvussaan, jossa tutkitaan projektin eri vaiheita. Projektin eteneminen seuraa asiakkaan kanssa tehtyä sopimusta muun muassa aikataulun ja eri toimitusten osalta. Luvussa käsitellään projektin lähtökohtia sekä projektin suunniteltua etenemistä. Aikaisemmista projekteista saatu kokemus ohjaa myös uusia projekteja ja toisaalta uusien projektien avulla kehitetään myös omaa toimintaa. Työn neljännessä luvussa käsitellään varsinaista mekaniikkasuunnittelua, mekaanisten rakenteiden toteuttamista sekä niiden dokumentointia. Luvussa tutkitaan erilaisten valintojen ja ratkaisujen merkitystä lopputulokseen sekä tutkitaan mekaniikan vaihtoehtoisia toteutustapoja.

Tehonjakoverkon suunnittelu ja valmistus vaativat tietoa sekä osaamista eri tekniikan aloilta ja toisaalta työ yhdistelee eri alojen osaamista suuremmaksi kokonaisuudeksi. Tehonjakoverkon suunnittelu on hyvin vaativa projekti ja suuri osa suunnittelutyöstä tehdään yhteistyössä muun projektin henkilöstön kanssa. Monialaisen projektin onnistuminen vaatii, että jokainen hyödyntää omaa erikoisosaamistaan ja lisäksi eri alojen osaaminen pystytään yhdistämään toimivaksi kokonaisuudeksi.

1.1 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymys

Diplomityön tavoitteena on suunnitella tehonjakoyksiköiden mekaniikka, joka täyttää asiakkaan vaatimukset. Mekaniikkasuunnittelun toteutukseen vaikuttavat muun muassa asiakkaan vaatimusmäärittely, RF-tekniikan toteutustapa sekä valmistusmenetelmät. Mekaniikkasuunnittelu koostuu kappaleiden suunnittelusta, 3D-mallinnuksesta sekä teknisten piirustusten tekemisestä.

Tehonjakoverkon yksiköiden mekaniikkasuunnittelu toteutetaan niin, että ne noudattavat asiakkaan vaatimuksia ominaisuuksiltaan, toiminnallisuudeltaan sekä ulkomuodoiltaan. Kriittisiä kohteita projektin mekaniikkasuunnittelussa ovat muun muassa suunniteltavien yksiköiden massat, kiinnityspisteet sekä liityntäpinnat. Tehonjakoverkko suunnitellaan avaruuskäyttöön, joten myös se tuo projektiin omat lisävaatimuksensa. Diplomityössä etsitään innovatiivisia ratkaisuja mekaniikkasuunnittelun toteuttamiseen ja tällä tavalla kehitetään DA-Design Oy:n toimintaa. Diplomityön tarkoituksena on löytää toteutettavia ratkaisuja tutkimuskysymykseen: *Kuinka tehonjakoverkon mekaniikkasuunnittelu voidaan toteuttaa vaatimusten mukaisesti sekä mahdollisimman tehokkaasti hyödyntämällä DA-Design Oy:n resursseja?*

1.2 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuskysymykseen etsitään ratkaisuja muun muassa kirjallisuus- ja toimintatutkimuksen avulla. Koska kyseessä on mekaniikkasuunnitteluun keskittyvä projekti, käytetään mallinnusta keskeisenä tutkimusmenetelmänä. DA-Design Oy on suorittanut hieman vastaavia projekteja myös ennen, joten toimintatutkimuksella on merkittävä rooli tutkimuskysymyksen selvityksessä. Aikaisemmista projekteista on saatu paljon kokemusta ja tietotaitoa, jota pystytään hyödyntämään tämän diplomityön tekemisessä. Lisäksi aikaisempien projektien avulla on pystytty luomaan hyödyllisiä kontakteja, jotka helpottavat uusien projektien suorittamista. Toimintatutkimusta hyödynnetään tutkiessa mahdollisia ratkaisumalleja ja selvittäessä, voidaanko vanhoja ratkaisumalleja hyödyntää myös tässä projektissa. Mekaniikkasuunnittelun osalta toimintatutkimuksen avulla pystytään selvittämään valmistusmenetelmien asettamat vaatimukset tehonjakoyksiköiden toteutukselle. Lisäksi työssä käytetään tutkimusmenetelmänä konstruktiota, koska tehonjakoyksiköistä valmistetaan mallit, joiden avulla tutkitaan suunnitteluvaatimusten toteutumista.

Diplomityön teoriaosuudessa on hyödynnetty kirjallisuustutkimusta tiedon keräämiseksi erilaisista avaruusteknologiaa käsittelevistä projekteista sekä avaruusteknologian suunnittelusta. Eri teokset luovat pohjan avaruusteknologian vaatimusten ymmärtämiselle ja niiden soveltamiselle. Kirjallisuustutkimuksen avulla on selvitetty myös mekaniikka-suunnittelun perusteita sekä erilaisia ratkaisuja 3D-mallinnuksen toteuttamiseksi. 3D-mallinnus on kehittynyt valtavasti viime vuosien aikana ja kirjallisuustutkimuksen avulla on selvitetty tämän kehityksen vaikutusta suunnittelutyöhön.

3D-mallinnus muodostaa keskeisen osan diplomityöstä ja mallinnus onkin tärkein käytettävistä tutkimusmenetelmistä. Mallinnuksen avulla ratkaistaan tehonjakoverkon toteutukseen liittyviä kysymyksiä, sekä vertaillaan erilaisia ratkaisumalleja. Mallinnuksen avulla pystytään vertailemaan eri toteutustapoja sekä huomioimaan mahdolliset ongelmatkohdat jo ennen valmistusta. Projektin edetessä mallinnuksen avulla pystytään toteuttamaan erilaisia muutoksia aikaisemmin suunniteltuihin tehonjakoyksiköihin. Muutosten vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan testata suunnitteluohjelmien avulla, jotta valmistettavista kappaleista tulee muun muassa riittävän lujia. Lisäksi mallinnusohjelman avulla saadaan selvitettyä tarvittavien komponenttien kappalemäärät ja näin tilaus-toiminta helpottuu. Kappaleiden valmistus on tarkoitus toteuttaa suunniteltujen 3D-mallien sekä teknisten piirustusten avulla hyödyntämällä DA-Design Oy:n omia valmistusresursseja.

2. MEKANIKKASUUNNITTELUN TEORIAA

Tässä luvussa käsitellään mekaniikkasuunnittelun teoriaa ja mekaniikkasuunnittelun erilaisia toteutustapoja. Erityisesti keskitytään 3D-mallinnukseen ja sen hyödyntämiseen suunnittelussa. Tutkimusmenetelmänä on käytetty kirjallisuustutkimusta ja tutkimuksessa on hyödynnetty laajasti alaa käsittelevää kirjallisuutta.

Mekaniikkasuunnittelu muodostaa osan teknistä suunnittelua. Mekaniikkasuunnittelu tarkoittaa erilaisten mekaanisten kappaleiden tai kokoonpanojen suunnittelua sekä mallinnusta ja sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi kokonaan uusien tuotteiden suunnittelussa tai vanhojen tuotteiden kehittämisessä. Mekaniikkasuunnittelun lähtötietoina voidaan käyttää muun muassa erilaisia laskelmia, joiden avulla on selvitetty lopullisen tuotteen vaatimat ominaisuudet. Suunniteltavan mekaniikan ulkomitat ja rajapinnat voivat olla tarkasti määriteltyjä jo ennen mekaniikkasuunnittelun aloittamista, jolloin nämä vaatimukset ohjaavat merkittävästi suunnitteluprosessia.

Markkinoilla vallitseva kilpailutilanne kasvattaa tuotteiden vaatimuksia niin laadun kuin toiminnallisuuden suhteen. Tästä syystä useat suunnitteluprosessit muuttuvat monimutkaisemmiksi. Toisaalta tuotekehitykseen käytettävä aika saattaa kustannussyistä kuitenkin pienentyä. Tuotteen mallintamisessa on entistä tärkeämpää tunnistaa toiminnallisuuden kannalta oleelliset asiat, jotta suunnitteluprosessia pystytään tehostamaan. Lisäksi kokonaiskustannusten huomioiminen on hyvin tärkeää jo suunnitteluvaiheessa. [3]

2.1 Tietokoneavusteinen suunnittelu eli CAD

Tietokoneavusteinen suunnittelu tarkoittaa suunnittelutyötä, jossa hyödynnetään erilaisia tietokoneohjelmia. Tietokoneavusteisesta suunnittelusta käytetään yleisesti termiä CAD (engl. *Computer Aided Design*). Tietokoneavusteinen suunnittelu voi tarkoittaa esimerkiksi 2D- tai 3D-mallinnusta sekä simulointia. Diplomityössä sovelletaan tietokoneavusteisesta suunnittelusta erityisesti 3D-mallinnusta. Termiä CAD käytetään usein, kun puhutaan erityisesti kappaleiden mallinnuksesta. Kun taas puhutaan esimerkiksi laskennasta tai simuloinnista, voidaan käyttää termiä CAE, joka tarkoittaa tietokoneavusteista tekniikkaa (engl. *Computer Aided Engineering*). 3D-suunnitteluun liitetään usein myös termi CAM (engl. *Computer Aided Manufacturing*), joka tarkoittaa tietokoneavusteista valmistusta. [19]

Tietokoneavusteinen suunnittelu muodostaa pohjan erilaisten kappaleiden mekaniikkasuunnittelulle ja valmistukselle. Nykyaikaiset suunnitteluohjelmat mahdollistavat tehokkaan kappaleiden mallintamisen sekä muokkaamisen. 3D-suunnitteluohjelmat ovat tärkeä osa tuotekehitystä, koska ohjelmien avulla voidaan vertailla eri muutosten vaikutusta

kappaleiden ominaisuuksiin. Mallinnuksen avulla voidaan vertailla sekä visualisoida erilaisia ratkaisumalleja, jolloin lopullisen tuotteen ominaisuuksia voidaan optimoida vaatimusten mukaisesti.

Tietokoneavusteisen suunnittelun keskeisinä etuina voidaan pitää muun muassa nopeutta, laatua sekä kappaleiden muokattavuutta. Lisäksi piirustusten tekeminen pystytään osaksi automatisoimaan suunnitteluohjelmien avulla. Suunnittelun helpottamiseksi on kehitetty tiedostomuotoja, joiden avulla suunniteltuja malleja pystytään vertailemaan ja muokkaamaan monilla eri suunnitteluohjelmilla. Yleisesti käytettävät tiedostomuodot nopeuttavat yritysten välistä yhteistyötä ja mahdollistavat laajojen suunnitteluprosessien jakamisen pienempiin osa-alueisiin. Yhteistyön onnistumiseksi suunnitteluprosessi pitää kuitenkin olla tarkasti määritelty ja kaikkien osapuolien täytyy noudattaa annettuja määräytyksiä. [15]

Nykyään on saatavilla useita erilaisia 3D-mallinnusohjelmia, jotka ovat kuitenkin perusteiltaan melko samanlaisia. Tästä huolimatta yhden kappaleen mallinnukseen on olemassa useita erilaisia keinoja, vaikka suunnittelijat käyttäisivät samaa ohjelmaa. Suunnittelijat käyttävät kuitenkin erilaista strategiaa kappaleiden mallinnukseen, joten kappaleiden muokkaaminen tai yhteistyö eri suunnittelijoiden toimesta ei ole mahdollisimman tehokasta. Yhtenäisen suunnittelutyylin tai strategian luominen on hyvin haastavaa, koska eri ihmiset hahmottavat usein geometriset mallit hieman eri tavalla. Yhtenäisen suunnittelustrategian avulla olisi kuitenkin mahdollista tehostaa yrityksen suunnitteluprosesseja. Lisäksi useiden suunnittelijoiden yhteistyö vaativissa projekteissa toimisi tehokkaammin. [3]

Suunnittelutyötä CAD-ohjelmilla olisi mahdollista yhtenäistää, jos esimerkiksi määriteltäisiin kappaleille piirteet, joiden mallintamisesta suunnittelu aina aloitetaan. Tämä ei kuitenkaan ole käytännössä mahdollista, jos kappaleet poikkeavat suuresti toisistaan. Erityisesti monimutkaisten kappaleiden suunnittelutyössä kannattaisi miettiä, kuinka toinen suunnittelija voi myöhemmin jatkaa tai muokata suunniteltua kappaletta. Lisäksi jo suunnittelun aikana voisi pohtia mahdollisia kappaleeseen tulevia muutoksia, kuten esimerkiksi joitakin relaatioita tai mittoja. Näin myös muiden suunnittelijoiden olisi mahdollista muokata mallia melko nopeasti, eikä rakenteeseen tai mallinnusstrategiaan tutustumiseen tarvitsisi käyttää ylimääräistä aikaa. [3]

2.1.1 Kappaleiden mallinnus

Kappaleiden mallinnus tarkoittaa geometrista mallinnusta, jonka tavoitteena on luoda kappaleen muotoa esittävät tietorakenteet. 3D-suunnitteluohjelmilla pystytään luomaan näitä tietorakenteita sekä muokkaamaan ja käsittelemään niitä. Geometrisen mallin tarkoittaa siis kuvausta fyysisen kohteen muodosta. Geometrisesta mallintamisesta voidaan erottaa kolme tasoa, jotka ovat todellisuus, matemaattinen malli ja esitys. Matemaattisen

mallin avulla laaditaan suunnitteluohjelmille algoritmeja, joiden avulla todellisuutta kuvaavat geometriat voidaan mallintaa. [19]

Kappaleiden geometriset mallit voidaan jakaa karkeasti neljään eri kategoriaan. Nämä neljä geometrinen mallien toteutustapaa ovat rautalankamalli (engl. *wireframe model*), pintamalli (engl. *surface model*), tilavuusmalli (engl. *volume model*) ja hybridimalli (engl. *hybrid model*). Rautalankamalli tarkoittaa mallinnusta, joka koostuu pisteistä ja niitä yhdistelevistä käyristä. Kahdessa tasossa olevien rautalankamallien avulla voidaan kuvata esimerkiksi yksinkertaisia kappaleita tai koneistuskeskuksen työstöraitoja. Rautalankamallin avulla voidaan myös luoda pohja muille mallinnustavoille ja sen avulla voidaan hahmotella esimerkiksi kolmiulotteisen kappaleen pintoja. [19]

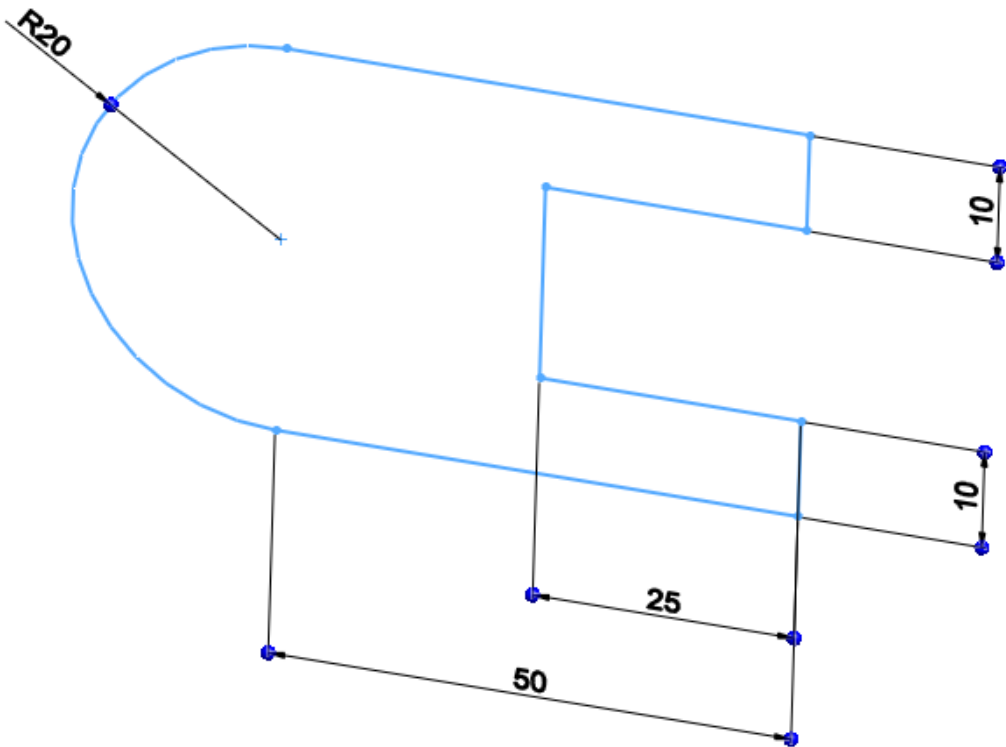
Pintamalli tarkoittaa kolmiulotteista geometrinen mallia, jonka avulla mallinnetaan erilaisia tasoja sekä pintoja. Pinnat voivat muodostua esimerkiksi erilaisten matemaattisten yhtälöiden sekä käyrien avulla. Pintamallin avulla on mahdollista esittää monimutkaisia geometrisia muotoja. Pintamalli ei kuitenkaan välttämättä ole yksiselitteinen, vaikka se on kehittyneempi versio graafisista malleista. [19] Pintamalleja voidaan hyödyntää esimerkiksi erilaisten 3D-rakenteiden hahmotelussa. Pintamalli sisältää kuitenkin informaatiota ainoastaan kappaleen pinnoista ja esimerkiksi runkorakenteen muodoista. Pintamallit eivät sisällä tietoa umpinaisista kappaleista, koska malli rakentuu yhtenäisistä tai erillisistä tasosta. Pintamallien avulla on kuitenkin mahdollista mallintaa myös tilavuusmalleja. Pintamallin käyttö soveltuu erityisesti kohteisiin, joissa pitää mallintaa esimerkiksi monimutkaisia valettuja tai taottuja malleja. [14][15]

Tilavuusmallit kehitettiin, jotta graafisten mallien epätäydellisyyteen pystyttäisiin vaikuttamaan. Graafisten mallien ongelmia saattoivat olla esimerkiksi epätäydellisyys sekä moniselitteisyys. Tilavuusmallien avulla pyritään tukemaan suunnittelua kokonaisvaltaisemmin, kuin käyttämällä pelkkiä rautalanka- tai pintamalleja. Tilavuusmallien avulla on mahdollista kuvata erilaisten kappaleiden rakenne hyvin tarkasti. Tilavuusmalli mahdollistaa kappaleen ulko- ja sisäpuolisten muotojen mallintamisen sekä esittämisen. Tilavuusmallien avulla on mahdollista selvittää useita kappaleen geometriaan liittyviä yksityiskohtia, kuten inertia, massa sekä massakeskipiste. Tilavuusmallit mahdollistavat erilaisten simulaatioiden tekemisen, joiden avulla voidaan tutkia kappaleen ominaisuuksia. [19] Suunnitteluohjelmistojen avulla tilavuusmallit voidaan esittää helposti hahmotettavassa muodossa ja tilavuusmalleihin on mahdollista liittää useita eri parametreja, joiden avulla kappaleen geometria voidaan esittää esimerkiksi halutussa mittasuhteessa [14].

Hybridimalli on geometrinen kappaleiden mallinnustapa, joka yhdistelee edellisissä kappaleissa esiteltyjä malleja. Hybridimallien avulla on mahdollista yhdistää esimerkiksi pintamalleja ja tilavuusmalleja toisiinsa sekä muodostaa loogisia kokonaisuuksia, jotka voidaan esittää virtuaalisesti. [15]

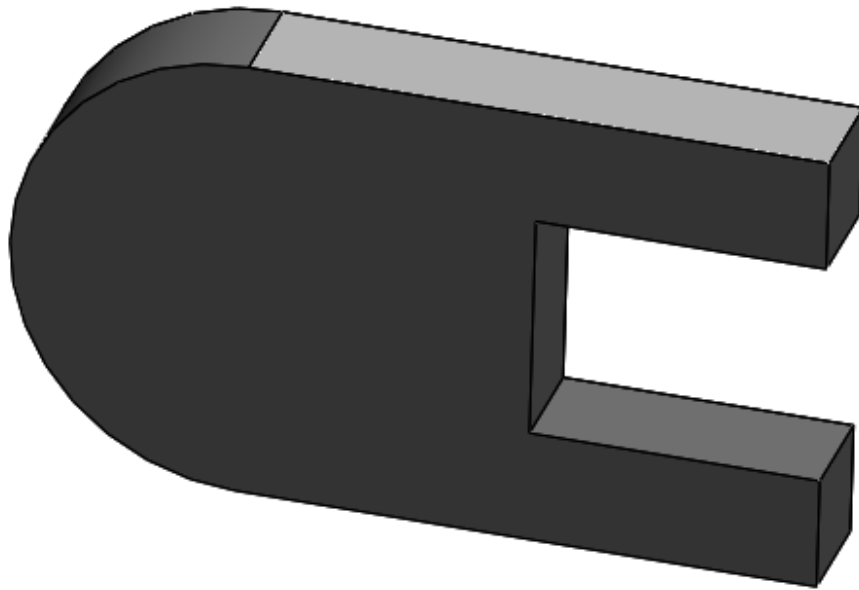
Projektin 3D-mallinnuksessa hyödynnettävällä *Solidworks*-suunnitteluohjelmalla on mahdollista yhdistää eri malleja toisiinsa ja jakaa suunnitteluprosessi useisiin eri osa-alueisiin. Usein mallinnus kuitenkin aloitetaan mallintamalla kaksiulotteinen kuva kappaleen profiilista. 2D-kuvan avulla pursotetaan varsinainen kappaleen tilavuusmalli, jota voidaan edelleen muokata. Suunnittelua voidaan nopeuttaa luomalla kappaleen piirteiden välille relaatioita, jotka tallentuvat malliin. Relaatioiden avulla on mahdollista käyttää uudestaan vanhoja 3D-malleja, koska niitä on yksinkertaista muokata, eikä mallia tarvitse luoda kokonaan uudestaan. Lisäksi yrityksen sisäinen yhteinen suunnittelustrategia helpottaa 3D-mallien uudelleenkäyttöä. [4].

3D-suunnitteluohjelmalla tilavuusmallin mallintaminen aloitetaan usein piirtämällä kaksiulotteinen muoto, joka mallinnetaan vaatimuksia vastaavaksi. Muoto voidaan määrittellä relaatioiden avulla, esimerkiksi merkitsemällä kaksi suoraa yhdensuuntaiseksi tai kohtisuoriksi toisiaan vastaan. Piirre voidaan määrittellä myös mitoituksen avulla, jolloin piirteen muokkaaminen on yksinkertaista. Lisäksi uusien konfiguraatioiden luominen onnistuu nopeasti ja näin pystytään mallintamaan esimerkiksi erikokoisia kappaleita. Kuva 1 esittää mallinnettua piirrettä, joka on määriteltä mitoituksen avulla.



Kuva 1. Mallinnettu 2D-piirre

Kaksiulotteisen piirteen avulla voidaan pursottaa kolmiulotteinen tilavuusmalli, joka voidaan lisätä esimerkiksi osaksi kokoonpanoa. Tilavuusmallin avulla voidaan tutkia kappaleen toiminnallisuutta ja varmistua, että suunniteltu kappale sopii sille varattuun tilaan. Lisäksi kolmiulotteisen tilavuusmallin avulla kappaleen visuaalinen tutkiminen ja rakenteen hahmottaminen helpottuvat. Kolmiulotteisen mallinnetun kappaleen avulla tuotteen mahdollista rakennetta voidaan esitellä esimerkiksi projektin muulle henkilöstölle. Lisäksi kuvia mallinnetuista kappaleista voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi erilaisissa käyttö- ja kokoonpano-ohjeissa. Kuva 2 esittää kaksiulotteisesta piirteestä pursotettua 3D-kappaletta.

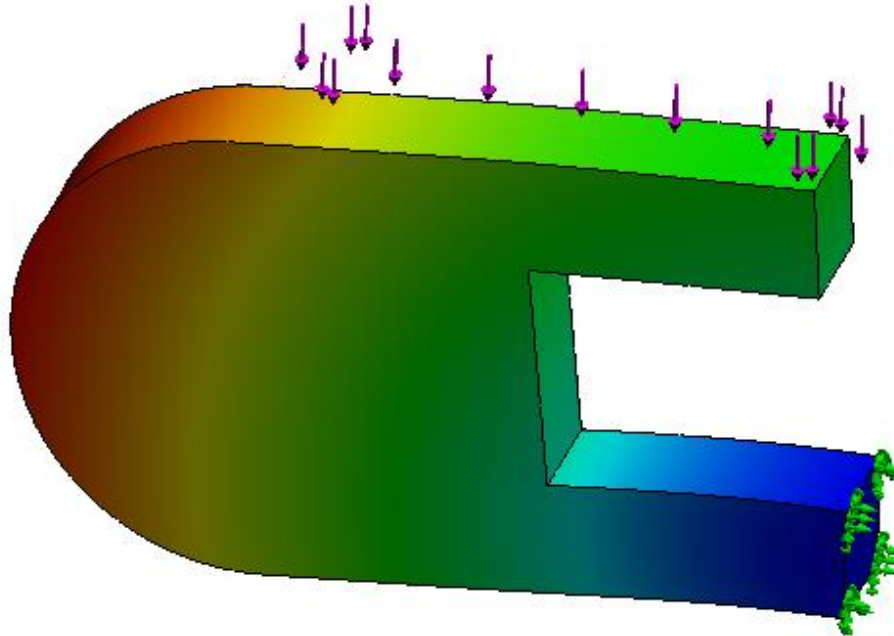


Kuva 2. Pursotettu 3D-kappale

Jos kappale soveltuu käytettäväksi osana kokoonpanoa ulkomuotojensa perusteella, niin seuraavaksi voidaan tutkia kappaleen kestävyyttä ja lujuutta, kun siihen kohdistuu erilaisia rasituksia. Suunnitteluohjelmalla voidaan muun muassa tutkia kappaleeseen eri suunnista kohdistuvien rasitusten ja jännitysten vaikutusta. Tämä auttaa materiaalivalinnoissa, sekä mahdollistaa heikkojen rakenteiden muokkaamisen jo ennen kappaleen valmistusta.

Kuva 3 esittää pursotettua kappaletta, johon kohdistuu yläpuolelta kohtisuora voima. Kappale on kiinnitetty paikalleen oikeasta alakulmasta, joten ylhäältä vaikuttava voima vääntää kappaletta tukipisteen suhteen. Kuvassa kappaleen rasitusta esitetään eri värien sekä muodonmuutosten avulla. Kuvan avulla havainnollistetaan suunnitteluohjelmien mahdollista käyttöä myös testauksen apuna. Kappaleen ominaisuuksia pystytään tutki-
maan jo ennen kappaleiden valmistusta ja tällä tavalla voidaan pienentää valmistuskustannuksia, koska osa mahdollisista ongelmista voidaan havaita jo mallinnuksen aikana. Suunnitteluohjelmalla pystytään analysoimaan erisuuruisten voimien vaikutusta kappaleeseen.

leeseen. Lisäksi voidaan vertailla eri materiaaleista valmistettujen kappaleiden käyttäytymistä erilaisissa rasituksissa. Simuloinnin avulla pystytään tutkimaan esimerkiksi erilaisien voimien, värähtelyn sekä lämpötilan vaikutusta kappaleisiin. Kappaleille pystytään muun muassa määrittämään ominaisvärähtelytaajuuksia, joilla saattaa olla todella suuri merkitys kappaleiden toiminallisuuden kannalta.



Kuva 3. Rasituksen vaikutus kappaleeseen

Kappaleen kustannuksiin vaikuttavat päätökset tehdään usein jo suunnitteluvaiheessa. Suunnittelijan mallintama geometria määrittelee tarvittavan materiaalin määrän ja suunnittelijalla on usein oma näkemys kappaleen valmistustavasta. Perinteisesti yrityksissä suunnittelu ja tuotanto ovat toimineet erillisinä yksikköinä, joka on saattanut kuitenkin johtaa uusiin suunnittelukierroksiin. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että tuotannolliset ongelmat selviävät vasta valmistusvaiheessa. Lisäksi suunnittelijalla ei välttämättä ole riittävää kokemusta erilaisista koneistus- ja valmistusmenetelmistä. Tämä voi aiheuttaa lisää suunnittelua ja lisätä kustannuksia sekä suunnittelu-aikaa. Tuotteen suunnittelussa pitäisikin huomioida kappaleen mahdollinen valmistustapa ja hyödyntää sitä jo mallinuvaiheessa. [19]

2.1.2 Suunnittelustrategia ja parametrisen piirremallinnus

Parametrinen piirremallinnus tarkoittaa tietokoneavusteista suunnittelua, jossa kohde mallinnetaan kolmiulotteisen geometrian avulla. Kolmiulotteisen mallin edut verrattuna kaksiulotteiseen malliin tulevat esille esimerkiksi tutkittaessa kappaleiden törmäystä toisiinsa. Rajapintojen hahmottaminen sekä mahdolliset kokoonpanojen virheet ovat hel-

pompia löytää 3D-mallin avulla. Käytännössä parametrisuus tarkoittaa, että mallin mittoja voidaan muuttaa suunnittelun edetessä ja samalla geometrinen malli muuttuu vastaavasti. Tämä helpottaa suunnittelua esimerkiksi tilanteissa, joissa osa kappaleen mitoista tarkentuu vasta myöhemmin. Piirremallinnus taas tarkoittaa sitä, että malli rakennetaan piirre kerrallaan. Mallinnus aloitetaan peruspiirteestä ja siihen liitetään uusia piirteitä, kunnes malli on valmis. [27]

Kappaleen mallintamisen aikana 3D-suunnitteluohjelman avulla on mahdollista määrittää kappaleen geometriaan erilaisia parametreja ja relaatioita. Nämä helpottavat ja tukevat mallin muokattavuutta ja toisaalta erilaisten mallien vertailu sekä mallintaminen ovat nopeampia toteuttaa, koska mallia voidaan muokata yksinkertaisesti muokkaamalla relaatioita tai parametreja. Yhdellä parametrilla mallilla pystytään esittämään useita samaa geometriaa noudattavia, mutta erikokoisia kappaleita. Tästä on hyötyä esimerkiksi sarjatuotannossa, jossa on tarve valmistaa samasta kappaleesta erikokoisia versioita. [19]

Parametrien avulla voidaan määrittää kappaleen geometria, esimerkiksi parametrismalla pisteet, joiden kautta taso tai käyrä kulkee. Parametrit voivat olla esimerkiksi asetus- tai viitearvoja, joiden avulla määritellään suunniteltavaa geometriaa. Kappaleen pitää siis noudattaa määriteltyjä parametreja, jotta kappale muodostaa vaaditun geometrian. Parametrit voivat liittyä esimerkiksi kappaleen muotoon tai mittoihin. 3D-mallinnuksessa yhden parametrin muuttaminen saattaa vaikuttaa koko kappaleen geometriaan ja toisaalta parametrien avulla kappale voidaan määritellä yksiselitteisesti. Parametrien käyttö edellyttää mallin ja eri parametrien välisen vuorovaikutuksen ymmärtämistä. Kokoonpanojen mallinnuksessa kappaleen yhden parametrin muutos voi vaikuttaa kokoonpanon muihin kappaleisiin ja myös kokoonpanon toiminnallisuuteen. 3D-mallin parametrisointi voi tarkoittaa esimerkiksi geometrinen ominaisuuksien määrittelyä loogisilla riippuvaisuuksilla tai relaatioilla, kuten yhdensuuntaisuudella tai samakeskisyydellä. [27]

Suunnittelustrategiaa voidaan yhtenäistää esimerkiksi menetelmien avulla, joita Bodein et al. esittelevät artikkelissaan [4]. Artikkelissa esitettävä prosessi on suunniteltu käytettäväksi sarjatuotannossa, mutta sitä voidaan soveltaa myös muuhun liiketoimintaan. Artikkelin mukaan suunnittelua olisi mahdollista yhtenäistää neliportaisen menetelmän avulla, jossa toimintaa muokattaisiin vaihe kerrallaan. Standardisointivaiheessa määriteltäisiin käytettävä CAD-ympäristö ja määriteltäisiin laadulliset minimivaatimukset, jotka jokaisen suunniteltavan kappaleen ja dokumentin pitää täyttää. Tämä edellyttää muun muassa standardien ja yhteisten suunnittelusääntöjen sopimista ja noudattamista. Tässä vaiheessa määriteltäisiin kaikki tuotteen oleelliset ominaisuudet, joihin halutaan suunnittelun avulla vaikuttaa. Lisäksi tässä vaiheessa edellytetään CAD-järjestelmien yhteensopivuutta tuotetiedonhallintajärjestelmien kanssa. Tämä vaihe tosin edellyttää muun henkilöstön työpanosta suunnittelijoiden lisäksi. Toisessa vaiheessa optimoidaan mallinnusprosessia esimerkiksi käyttämällä standardisoituja rakenteita sekä komponentteja. Vaihtuvien komponenttien määrä pyritään minimoimaan ja suunnittelussa keskitytään tuotteen kriittisiin ominaisuuksiin. Lisäksi eri kappaleiden suunnittelussa olisi havaittavissa

samanlaisia piirteitä, joiden avulla kappaleiden muokkaaminen ja kehittäminen olisi yksinkertaisempaa. [4]

Kolmas ja neljäs vaihe keskittyvät mallien tarkkaan tuntemiseen ja siihen, että CAD-malleihin integroidaan mahdollisimman paljon tietoa. Näissä vaiheissa suunnittelua pyritään automatisoimaan mahdollisimman paljon. Automatisointia voidaan edistää muun muassa mallien tarkalla määrittelyllä. Esimerkiksi malleissa olevien parametrien ja relaatioiden avulla voidaan edistää suunnittelun etenemistä. Tämä mahdollistaa mallien nopean muokkaamisen ja toisaalta näin pystytään varmistamaan kappaleiden yhteensopivuus tilanteissa, joissa kokoonpanossa muokataan vain yhtä kappaletta. Artikkelin mukaan yrityksen pitäisi myös investoida koulutukseen, jonka avulla kehitettäisiin suunnittelijoiden toimintaa ja samalla koko suunnitteluprosessia. Tämä on tärkeää prosessin onnistumisen kannalta, jotta uudet toimintatavat pystytään sisällyttämään kaikkien työntekijöiden ja samalla koko yrityksen toimintaan. Mallin mukaan oppimisen pitäisi olla progressiivista ja uusien toimintatapojen soveltaminen pitäisi varmistaa aktiivisella ohjauksella. Toisaalta artikkelin esittelemän mallin toteuttaminen on hyvin haastavaa, jos suunnittelu ja mallinnus keskittyvät kappaleisiin, jotka eroavat suuresti toisistaan. [4]

2.1.3 Tekniset piirustukset

Tekniset piirustukset muodostavat osan teknistä dokumentointia, joka on tärkeä osa kappaleiden valmistusprosessia. Nykyaikaisilla suunnitteluohjelmilla piirustukset pystytään luomaan suoraan suunnitellun 3D-mallin pohjalta. Piirustuksen luominen 3D-mallin pohjalta edellyttää, että 3D-malliin on määritelty riittävästi informaatiota liittyen kappaleen geometriaan, relaatioihin, mittoihin sekä mahdollisesti toleransseihin. [19] Teknilliseen dokumentointiin kuuluu piirustusten lisäksi muun muassa osa- ja materiaalilistat, mutta tässä luvussa keskitytään käsittelemään pääasiassa teknisiä piirustuksia. Piirustuksilla on merkittävä rooli tuotteen suunnitteluun ja valmistukseen liittyvien osapuolten kommunikoinnissa. Lisäksi kattavalla dokumentoinnilla pystytään tehostamaan informaation kulua tuotteen elinkaaren aikana. Vaikka suunnittelussa ja mallinnuksessa hyödynnetään paljon tietotekniikkaa, ei piirustusten merkitys suunnittelutyössä ole kuitenkaan vähentynyt. [14]

Tekniset piirustukset ovat ilmaisutapa, jonka avulla on mahdollista kuvata kappaleen rakenne sekä muoto yksiselitteisesti ja perusteellisesti. Piirustusten laatimista koskevat säännöt ovat kansainvälisiä sekä standardisoituja, joten piirustusten ymmärtäminen on mahdollista, vaikka piirustukset olisi laadittu toisessa maassa ja toisessa yrityksessä. Piirustusten tärkeimpiä ominaisuuksia ovatkin yksikäsitteisyys sekä selvyys, koska pienikin virhe tulkinnassa voi johtaa kappaleen virheelliseen valmistukseen. Virheellinen valmistus taas vaikuttaa kappaleen tai mahdollisesti jopa kokoonpanon toiminnallisuuteen. [22]

Piirustusten laatu ja yhdenmukaisuus ovat kehittyneet valtavasti viimeisten vuosikymmenien aikana ja tämä on mahdollistanut paremman laadun suunnittelussa sekä valmistettavissa kappaleissa. Paremman laadun avulla on mahdollista laskea kustannuksia, koska suunnitteluun käytetään vähemmän aikaa. Piirustustekniikan kehittymisen myötä ja erilaisten standardien avulla piirustuksista on tullut yksiselitteisempiä ja eri maiden suunnittelu- ja piirustusstrategiat ovat yhdenmukaistuneet. Standardit voidaan määritellä piirustuksia ohjaaviksi säännöiksi, joita kaikkien piirustusten pitää noudattaa. Teknisiä piirustuksia voidaan siis tulkita samalla tavalla, jos ne noudattavat samoja standardeja. [25]

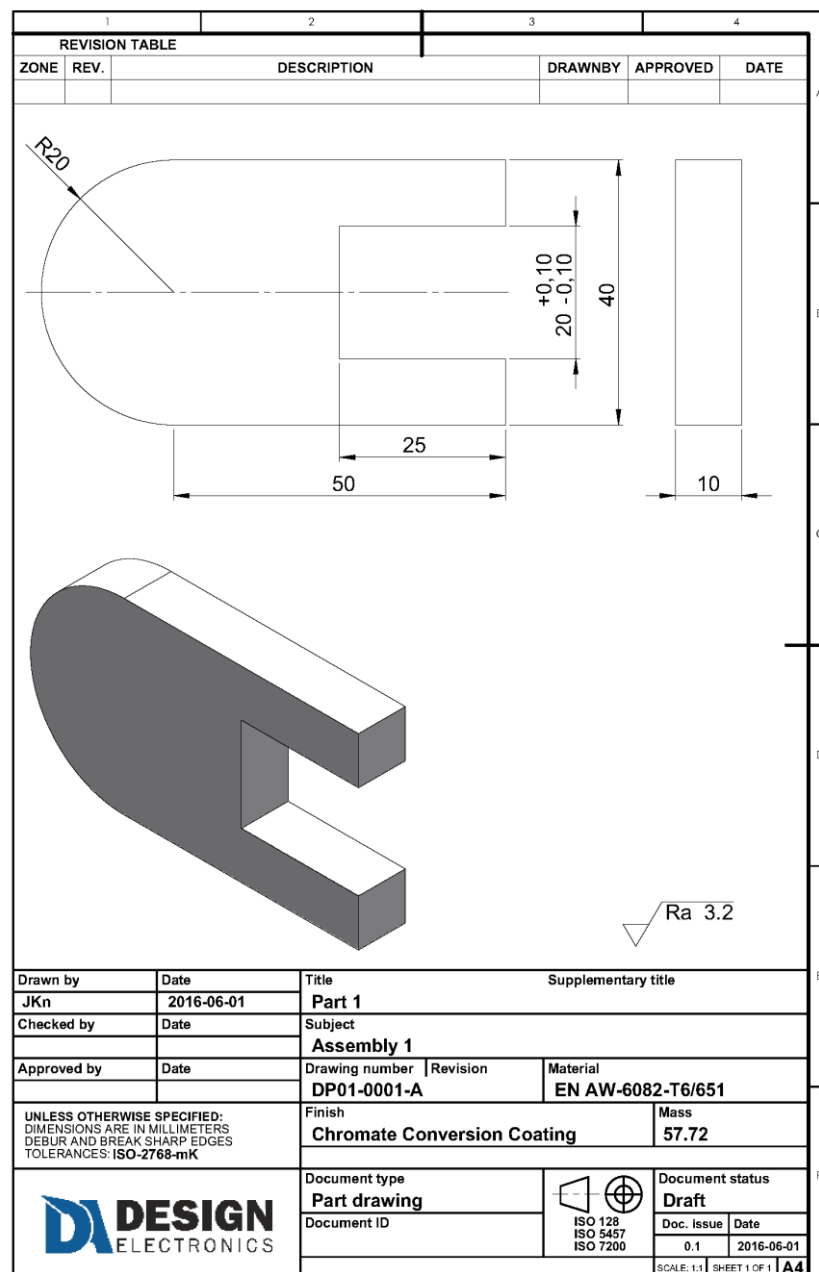
Tekniset piirustukset voidaan jakaa sisällön mukaan osakuviin ja kokoonpanokuvaan. Yksittäisessä osakuvassa esitetään riittävä määrä projektioita kyseisestä kappaleesta, jotta sen valmistaminen on mahdollista. Piirustuksen pitää olla riittävän yksityiskohtainen, jotta kappaleesta valmistetaan juuri sellainen, kuin suunnittelija on ajatellut. Kokoonpanopiirustuksissa esitetään joko kokonainen tuote tai mahdollinen osakokoonpano. Monet monimutkaiset tuotteet koostuvat useista alikokoonpanoista, jolloin ylimmän tason kokoonpanoa kutsutaan pääkokoonpanoksi. [22]

3D-suunnitteluohjelmissa piirustusten tekeminen perustuu siihen, että mallinnetun 3D-kappaleen avulla pystytään luomaan riittävän tarkka piirustus, jonka muodot vastaavat mallinnettua kappaletta. Suunnitteluohjelman pitää pystyä tarjoamaan riittävän tarkat geometriset muodot ja mittakaavat, jotta piirustukset vastaavat suunniteltua geometriaa.[7] Nykyisten mallinnusohjelmien avulla suunnittelua on pystytty nopeuttamaan huomattavasti, koska 3D-malleista pystytään luomaan automaattisesti projektioita piirustuksiin. Lisäksi mahdolliset muutokset mallissa tallentuvat automaattisesti myös piirustuksiin. Suunnitteluohjelmilla on mahdollista luoda tarkkoja leikkauksia ja projektioita kappaleesta, jolloin kappaleen hahmottaminen on helpompaa pelkän 2D-piirustuksen avulla. Leikkausten ja projektioiden luomisen jälkeen kuviin voidaan lisätä tarvittavat mitat sekä toleranssit, jotta kappale pystytään valmistamaan. [14]

Osakuviissa kappaleen rakenne esitetään projektioiden avulla mahdollisimman tarkasti ja yksiselitteisesti. Riittävällä määrällä projektioita pystytään esittämään kappaleen oleelliset muodot ja yksityiskohdat, jotta kappaleen valmistaminen on mahdollista. Piirustukset mallinnetaan usein vakiopohjalle, joka noudattaa yrityksen yleisiä käytäntöjä. Piirustuksessa on kappaleen tietojen lisäksi yleensä kerrottu muun muassa käytettävät standardit, mittakaava sekä projektiosuunta. Erityisen tärkeää on esittää kappaleen toiminnallisuuden kannalta oleelliset mitat ja muodot riittävän tarkkoilla toleransseilla, jotta kappaletta pystytään hyödyntämään sille suunnitellussa sovellutuksessa. Liian tarkkoja toleransseja kannattaa kuitenkin välttää, koska nämä tekevät kappaleen valmistuksesta monimutkaisempaa ja lisäävät samalla valmistuskustannuksia. [14]

Kappaleiden valmistuksessa hyödynnetään usein suunniteltua 3D-mallia, koska esimerkiksi erilaisten muotojen esittäminen pelkkien 2D-projektioiden avulla on lähes mahdo-

tonta. Siitä huolimatta teknisillä piirustuksilla on edelleen tärkeä rooli kappaleiden valmistuksessa. Kuva 4 esittää aikaisemmin mallinnetun kappaleen teknistä piirustusta, jonka avulla havainnollistetaan teknisen piirustuksen rakennetta. Piirustuksessa on esitetty kolme kappaleen projektiota. Kahden projektion avulla esitetään kappaleen geometriaa ja mittoja. Kolmas projektio on isometrinen ja se auttaa kappaleen visuaalisessa hahmottamisessa. Piirustuksen otsikkokentässä on esitetty tarpeelliset tiedot kappaleen valmistamiseen sekä tunnistamiseen. Otsikkokenttä sisältää muun muassa tiedot materiaalista, mahdollisesta pintakäsittelystä, toleransseista sekä mittakaavasta. Piirustuksen tavoite on mahdollistaa kappaleen valmistaminen niin, että se täyttää sille asetetut vaatimukset muun muassa toiminallisuuden suhteen.



Kuva 4. Mallinnetun kappaleen tekninen piirustus

Kokoonpanopiirustuksella tarkoitetaan piirustusta, jossa esitetään tuote tai kokoonpanoryhmä valmiiksi kasattuna. Kokoonpanopiirustuksessa ei välttämättä esitetä kappaleiden tai kokoonpanon tarkkoja toleransseja tai muotoja, vaan piirustuksesta löytyy viitteet alikokoonpanoihin tai osakuviin. Näissä alemman tason kuvissa esitetään tarkasti kappaleiden geometriat ja mitat. Kokoonpanokuvassa keskitytään esittämään tuotteen kannalta oleelliset ulkomitat sekä mahdolliset kriittiset rajapinnat. Kokoonpanokuvan avulla voidaan hahmottaa tuotteen tai sen osakokoonpanon rakennetta. Kokoonpanokuvassa esitetään yleensä myös kokoonpanoon kuuluvat kappaleet sekä alikokoonpanot. Lisäksi kokoonpanokuvien osalistojen avulla saadaan tietoa tarvittavista komponenteista sekä niiden kappalemääristä. Erityisesti kokoonpanokuvat auttavat tilanteissa, joissa kappaleet tai alikokoonpanot valmistetaan useiden eri alihankkijoiden toimesta. [22]

Mekaniikkasuunnittelu noudattaa usein kaavaa, jossa ensin mallinnetaan 3D-kappale ja siitä tehdään piirustus projektoiden avulla. Toleranssit esitetään usein vasta piirustuksessa, eikä 3D-malliin lisätä mitta- tai muototoleransseja. Tulevaisuudessa luultavasti yleistyy suuntaus, jossa 3D-malliin lisätään kaikki valmistukseen vaadittava informaatio, kuten toleranssit ja materiaalit. Tällainen suunnitteluprosessi voi yleistyä erityisesti tilanteissa, joissa koneistuksessa hyödynnetään suunnitteluohjelmalla mallinnettua 3D-kappaletta. Tällainen suunnittelu vähentäisi 2D-piirustusten käyttöä ja tehostaisi valmistusprosessia, jos kaikki informaatio saataisiin lisättyä 3D-malliin. Toisaalta tämä edellyttää, että myös valmistusosastolla on tarvittavat sovellukset 3D-mallien tulkitsemiseen. [15]

2.1.4 Suunnittelua ohjaavat standardit

Standardisointi sai alkunsa 1900-luvun puolivälissä, kun teollistuneet maat huomasivat, että standardisoimalla tuotteita ja kokonaisuuksia saavutettiin huomattavia etuja. Koneenrakennuksessa useat muuttujat ovat standardisoituja ja esimerkiksi kansainväliset kierre- ja ruuvikoot noudattavat samaa mitoitusta ympäri maailmaa. [22] Suomen standardisointiliiton (SFS ry) määritelmän mukaan standardit ovat yhteisiä toimintatapoja toistuvaan toimintaan. Luonteeltaan standardit ovat suosituksia, mutta viranomaiset saattavat vaatia niiden noudattamista. Standardit ovat aina standardisoinnista vastaavan viranomaisen tai järjestön hyväksymiä. Noudattamalla standardeja yritys voi saada sertifikaatin todistukseksi standardien noudattamisesta. [29]

Teknisissä piirustuksissa standardien noudattaminen mahdollistaa yksiselitteisen tulkitsemisen, koska kaikki suunnittelijat laativat piirustukset saman standardin mukaan. Lisäksi samanlaisten merkintöjen käyttö kansainvälisesti helpottaa piirustusten tulkitsemistä ja tehostaa suunnittelua. Piirustusten oikeaoppinen tulkitseminen vaatii kuitenkin lukutaitoa ja kokemusta teknisistä piirustuksista. Piirustusten tulkitseminen ja sen oppiminen yksinkertaistuvat kuitenkin standardisoinnin ansiosta, koska piirustuksissa käytetään samoja merkintöjä kaikissa standardeja noudattavissa yrityksissä. [22]

2.1.5 Toleranssit teknisessä suunnittelussa

Toleranssit muodostavat tärkeän osan teknistä suunnittelua, koska niiden avulla varmistetaan kappaleiden riittävä laatu sekä toiminnallisuus. Lisäksi toleranssien avulla varmistetaan kappaleiden yhteensopivuus kokoonpanoissa. Kappaleiden valmistuksessa eri muotoja on mahdotonta saada täysin tarkoiksi, joten mitoille ja muodoille täytyy määrittellä toleranssirajat. Kappaleen saavutettuun valmistustarkkuuteen vaikuttavat useat eri asiat. Esimerkiksi kappaleeseen koneistetun reiän valmistustarkkuuteen vaikuttavat muun muassa reiän koko, sijainti, muoto sekä suunta. Tästä syystä yksinkertaisenkin muodon valmistaminen saattaa vaatia hyvin tarkkoja toleransseja. [22]

Useissa suomalaisissa yrityksissä noudatetaan kansainvälisiä ISO-standardeja (engl. *International Organization for Standardization*), koska tämä helpottaa kansainvälistä toimintaa ja mahdollistaa yhdenmukaisen toiminnan muiden ISO-standardeja noudattavien yritysten kanssa. [29] ISO-standardeja noudattaa tällä hetkellä maailmassa yli 150 maata, joten tämän järjestelmän avulla yhteistyö teknisessä suunnittelussa on mahdollista ympäri maailmaa. Lisäksi monet yritykset edellyttävät muun muassa alihankkijoiltaan, että nämä noudattavat ISO-standardeja. [17]

Teknisissä piirustuksissa käytetään paljon mittatoleransseja, mutta myös geometriset toleranssit ovat yleistymässä teknisessä suunnittelussa. Geometrisia toleransseja hyödyntävän GPS-järjestelmän (engl. *Geometric Product Specification*) avulla on Metsta Ry:n (Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys) mukaan mahdollista pienentää suunnittelu- ja valmistusprosessin kustannuksia jopa 15–20 prosenttia. Laskelmat perustuvat siihen, että onnistunut mitoitus pystytään löytämään pienemmällä määrällä iteraatiokierroksia ja lisäksi GPS-järjestelmä vähentää tulkinnanvaraisuutta. Järjestelmän avulla voidaan asettaa väljempitä toleransseja niihin kohteisiin, jotka eivät ole kriittisiä toiminnallisuuden kannalta. Väljemmät toleranssit laskevat koneistuskustannuksia ja myös alihankinta helpottuu. GPS-järjestelmän tulkitseminen ja ymmärtäminen vaativat kuitenkin koulutetun lukijan, jotta järjestelmää osataan tulkita oikein. Kappaleiden valmistuskustannukset voivat myös nousta, jos GPS-järjestelmää käytetään tai tulkitaan väärin ja kappaleet valmistetaan esimerkiksi liian tarkkoilla toleransseilla. [21]

2.2 Avaruusteknologian vaatimukset ja standardit

Avaruusteknologialle asetetaan muusta suunnittelusta poikkeavia vaatimuksia, koska valmistettavien tuotteiden pitää kestää muun muassa todella kovaa räsitusta sekä suurta lämpötilavaihtelua. Satelliitin teknologian pitää esimerkiksi kestää jopa 300 °C lämpötilavaihtelut. Lämpötilavaihtelu vaikuttaa erityisesti elektronisiin komponentteihin, mutta sillä on vaikutusta myös mekaanisten kappaleiden rakenteeseen muun muassa lämpölaajenemisen kautta. Tämän lisäksi satelliitin pitää kestää voimakasta värinää erityisesti laukaisuvaiheessa. Tästä syystä suunniteltavat komponentit testataan huolellisesti ja näin varmistetaan, että ne kestävät kovat räsitukset. [2]

Avaruusteknologiaa on lähes mahdotonta tai ainakin todella kallista korjata jälkeenpäin, joten suunniteltavat tuotteet testataan tarkasti ennen satelliitin laukaisua. Satelliitin värinä ja värähtely voivat aiheuttaa esimerkiksi komponenttien irtoamista, joka voi johtaa suuriin ongelmiin. Komponentteihin kohdistuu voimakasta värähtelyä raketin laukaisussa. Erityisesti komponenttien ominaistaajuuksilla tapahtuva värähtely voi olla todella haitallista komponenteille. Ominaistaajuuksilla tapahtuvan värähtelyn ansiosta kappaleet saattavat resonoida ja se voi johtaa komponenttien irtoamiseen tai rakenteiden hajoamiseen. Kappaleiden suunnitteluvaiheessa pitää siis varmistua siitä, että kappaleisiin ei kohdistu värähtelyä, joka on suuruudeltaan lähellä niiden ominaisvärähtelytaajuutta. Kaikkien kappaleiden sekä komponenttien pitää myös läpäistä kattavat täristystestit. Lisäksi valmistettävien kappaleiden ominaisvärähtelytaajuuden suuruuden pitää noudattaa vaatimusmäärittelyssä annettuja raja-arvoja. [2]

2.2.1 Standardijärjestelmät avaruusteknologian suunnittelussa

Eurooppalainen avaruusteknologian suunnittelu pohjautuu ECSS-standardeihin (engl. *European Cooperation for Space Standardization*). ECSS toimii yhteistyössä Euroopan avaruusjärjestön kanssa ja kehittää yhteistyön avulla standardijärjestelmää. Eurooppalaisen standardijärjestelmän tavoitteet ovat minimoida elinkaarikustannukset ja samalla kuitenkin kehittää laatua, toiminnallisuutta sekä teknologian yhteensopivuutta. Useat ECSS-standardit perustuvat Yhdysvaltojen puolustushallinnon kehittämiin MIL-standardeihin (engl. *United States military standard*), mutta ECSS on kehittänyt standardeja soveltumaan erityisesti eurooppalaiseen avaruusteknologian suunnitteluun. Standardien kehittäminen perustuu usein aikaisemmissa projekteissa tehtyihin havaintoihin. Standardien kehitystyö on jatkuvaa, jotta standardit tukisivat ja ohjaisivat suunnittelutyötä yhä kattavammin. Standardien käytettävyyden ja toimivuuden kannalta on hyvin tärkeää, että uusimmat standardit ovat helposti saatavilla. Tästä syystä ECSS-standardit ovat kaikkien saatavilla ja lisäksi ECSS toimii yhteistyössä useiden eri avaruusteknologiavalmistajien kanssa standardien kehittämiseksi. [11]

2.2.2 ECSS-standardien vaikutus mekaniikkasuunnitteluun

ECSS on julkaissut useita mekaniikkasuunnittelua ohjaavia standardeja, joissa käsitellään muun muassa kappaleiden suunnittelua, materiaaleja sekä komponenttien luokittelua. Mekaniikkasuunnittelua käsittelevässä standardissa [9] on lueteltu testaukset, jotka pitää suorittaa mekaniikan komponenteille. Testauksen avulla varmistetaan kappaleiden toiminnallisuus sekä se, että kappaleet kestävät niihin kohdistuvan rasituksen. Standardissa on esitetty viisiportainen testausohjelma, joka kappaleiden pitää läpäistä. Testausohjelman eri vaiheita on käsitelty seuraavassa kappaleessa.

Toiminnallisuuden ja suorituskyvyn testaus tarkoittaa kappaleiden massan, mittojen sekä sähköisten ominaisuuksien testausta. Tämän avulla varmistetaan se, että kappale pystytään integroimaan sille varatulle paikalle varsinaisessa pääkokoonpanossa. Lisäksi kappaleen pitää pystyä täyttämään sille asetetut vaatimukset toiminnallisuuden suhteen myös integroinnin jälkeen. Mekaanisen testauksen avulla varmistetaan, että kappaleet kestävät niihin koko elinkaaren aikana kohdistuvat rasitukset. Tämä testaus toteutetaan muun muassa erilaisten syklisten rasitustestien sekä täristystestien avulla. Kappaleisiin kohdistuu suuria voimia sekä voimakasta värähtelyä erityisesti satelliitin laukaisuvaiheessa ja siksi erilaiset rasitustestit ovat hyvin tärkeitä. Olosuhdetestauksen avulla testataan kappaleiden toiminnallisuus avaruudessa olevien ympäristötekijöiden varalta. Kappaleista testataan korroosion kestoja sekä toiminnallisuutta tyhjiössä ja suurissa lämpötilavaihteluissa. Lisäksi varmistetaan, että kappaleet kestävät niihin avaruudessa kohdistuvan säteilyn. [9]

Kappaleet voidaan varastoida pitkiksi ajoiksi ennen niiden varsinaista käyttöönottoa. Lisäksi komponenttien käyttöönotto ja niiden varsinainen toiminnallinen käyttö saattaa alkaa vasta pitkän ajan kuluttua satelliitin laukaisusta. Satelliitilta voi kulua laukaisun jälkeen jopa useita vuosia, että se saavuttaa täyden toiminnallisuuden. Kappaleiden pitää siis kestää pitkäaikaista varastointia ja sen jälkeen niiden on edelleen toimittava vaatimusten mukaisesti. [9]

Monimutkaisissa projekteissa dokumentointi muodostaa tärkeän osan suunnitteluprosessia. ECSS-standardeissa käsitelläänkin laajasti suunnittelusta ja testauksesta tehtävää raportointia ja määritellään tarvittavat dokumentit. Huolellisen dokumentoinnin avulla työn edistymisen seuraaminen on helpompaa ja mahdollisiin ongelmakohtiin pystytään puuttamaan tehokkaammin. Monimutkaisia projekteja on lähes mahdotonta viedä läpi ilman tarkkaa dokumentointia. Lisäksi avaruusteknologian suunnittelussa testaus- ja suunnitteludokumentit ovat erityisen tärkeitä, jotta voidaan perustella toteutetut ratkaisumallit sekä niiden soveltuvuus avaruuskäyttöön.

Kappaleiden rakenteellisia ominaisuuksia on käsitelty omassa ECSS-standardissa [8]. Rakenteellisia ominaisuuksia ovat muun muassa kappaleiden materiaali, muoto sekä rajapinnat. Rajapinnat muodostavat tärkeän osan monia kappaleita ja ne mahdollistavat tehokkaan sekä toimivan integraation eri kappaleiden välillä. Kappaleiden standardisoinnin yksi tärkeimmistä tehtävistä onkin mahdollistaa eri valmistajien tekemien kappaleiden yhteensopivuus. Rajapinnat pidetään mahdollisimman yksinkertaisina, jotta varmistetaan kappaleiden yhteensopivuus kaikissa tilanteissa. Mekaanisten kappaleiden lisäksi myös esimerkiksi erilaisten sähköjärjestelmien rajapintojen pitää olla yhteensopivia, joten sähköiset rajapinnat vaikuttavat myös merkittävästi mekaniikkasuunnitteluun. Integraation onnistumiseksi erityisesti rajapintojen tarkka dokumentointi on mekaniikkasuunnittelussa hyvin tärkeää, jotta esimerkiksi kappaleiden kiinnitys pääkokoonpanoon onnistuu suunnitellulla tavalla. [8]

Materiaalivalinnat ovat tärkeässä roolissa kaikessa mekaniikkasuunnittelussa. Materiaalivalinnat luovat pohjan kappaleiden toiminnallisuudelle ja vaikuttavat useisiin kappaleiden ominaisuuksiin kuten massaan. Avaruusteknologian suunnittelussa myös materiaalivalinnoille on asetettu erityisiä vaatimuksia ja niitä käsitellään omassa ECSS-standardissa [10]. Käytettävät materiaalit pitää valita niin, että ne kestävät kaikissa määritellyissä olosuhteissa. Tästä syystä kappaleiden valmistuksessa käytetään muun muassa varmuuskerrotoimia, joilla varmistetaan kappaleiden riittävä lujuus koko niiden elinkaaren ajan. Käytettävien metallilaatujen pitää olla testattuja esimerkiksi kovuuden, jännityksen sekä väsymisen suhteen. Kappaleisiin voi kohdistua suuria voimia ja rasituksia erityisesti erilaisten ilmiöiden yhteisvaikutuksena ja näihin pitää pystyä varautumaan. Materiaalien pitää muun muassa kestää korroosiota ja siksi myös pintakäsittelyllä sekä erilaisilla pinnoituksilla on tärkeä rooli kappaleiden valmistuksessa. Lisäksi pinnoitusten laadun pitää täyttää tarkat laatuvaatimukset. Standardissa ei varsinaisesti määritellä käytettäviä materiaaleja, vaan standardissa on lueteltu erilaisia rasituksia ja vaatimuksia, joita valitun materiaalin pitää kestää. Materiaaleina voidaan käyttää esimerkiksi eri metalli- ja komposiittilaatuja, jos ne läpäisevät standardien mukaiset testit. Eri materiaaleille on määritelty omat testausohjelmat joiden avulla varmistetaan materiaalien soveltuvuus eri käyttökohteisiin. [10]

Tyhjiössä käytettävien kappaleiden materiaalivalinnoissa pitää huomioida mahdolliset massahäviöt. Rakenteiden sisällä olevista huokosista voi vapautua kaasua, kun kappale on tyhjiössä. Lisäksi kappaleiden pinnalle voi muodostua tyhjiössä kaasua, joka aiheuttaa massahäviöitä. Tästä syystä materiaalivalinnoissa pitää huomioida standardeissa sekä vaatimusmäärittelyissä esitetyt maksimi-arvot massahäviöille. Muodostuville kaasuille pitää suunnitella poistoreitit, joiden avulla kaasut pääsevät pois kappaleiden sisältä. Kappaleiden massahäviöitä on käsitelty erillisessä ECSS-standardissa [8]. Massahäviöiden suuruuksiin on mahdollista vaikuttaa erilaisilla pinnoituksilla ja tämä onkin yksi syy, että avaruuskäyttöön valmistettavat komponentit pinnoitetaan usein esimerkiksi kromatoinnalla. Eri materiaalit käyttäytyvät eri tavalla tyhjiössä ja testauksen avulla on selvitetty, että esimerkiksi eri teräs- ja alumiinilaaduilla on melko pienet massahäviöarvot. Tästä syystä nämä materiaalit ovat hyvin yleisiä tyhjiössä käytettävissä rakenteissa. [6]

Avaruusteknologia erottuu muusta teknologiasta erityisesti poikkeuksellisen käyttöympäristön takia. Avaruudessa kappaleisiin kohdistuu todella suuria lämpötilavaihteluja, jotka asettavat lisävaatimuksia suunniteltaville kappaleille. Useiden satojen asteiden lämpötilavaihtelut voivat vaikuttaa esimerkiksi alumiinista valmistettuihin kappaleisiin suuresti. Esimerkiksi lämpölaajeneminen voi olla hyvin merkityksellistä, jos kappaleita ei ole valmistettu tarkoilla toleransseilla. Suunnittelussa pitää myös huomioida eri materiaalien erot lämpölaajenemisen suhteen. Toisiinsa kiinnitettävien kappaleiden lämpölaajenemiskertoimien pitää olla lähellä toisiaan, jotta kappaleet laajenevat lähes samassa suhteessa. Muissa tapauksissa kappaleiden laajenemiselle pitää jättää ylimääräistä tilaa, jotta laajeneminen ei aiheuta ongelmia. Lisäksi lämpölaajenemisen aiheuttamat hyvinkin

pienet muutokset voivat vaikuttaa ratkaisevasti erilaisten elektroniikkakomponenttien toimintaan. Nämä syyt vaikuttavat siihen, että suunnittelussa käytetään ainoastaan avaruuskäyttöön luokiteltuja komponentteja.

ECSS-standardeissa määritellään erilaiset suunnittelumallit, joiden avulla avaruusteknologian suunnittelu toteutetaan. Suunnitteluprojekti koostuu usean eri mallin suunnittelusta ja valmistuksesta. Osa malleista toimitetaan asiakkaalle ja joitakin hyödynnetään ainoastaan omassa toiminnassa. Projekti etenee malli kerrallaan ja yhden mallin hyväksymisen jälkeen siirrytään suunnittelemaan seuraavaa. Mallien avulla projekti etenee ensimmäisistä prototyypeistä kohti lopullista tuotetta. Seuraavissa kappaleissa on esitelty avaruusprojektissa käytettäviä malleja.

Breadboard model (BB) on prototyyppimalli, joka mallintaa elektronisesti ja toiminnallisesti lopullista mallia. Tämän mallin avulla vahvistetaan uuden tai kriittisen ominaisuuden käyttö. Prototyyppien avulla testataan ja vertaillaan mahdollisia ratkaisumalleja, mutta tässä projektissa näitä versioita ei kuitenkaan toimiteta asiakkaalle. Engineering model (EM) eli insinöörimalli mallintaa tässä projektissa toiminnallisuudeltaan ja ulkomuodoltaan lopullista lentomallia. Tässä mallissa saatetaan kuitenkin käyttää eri standardien mukaisia komponentteja, materiaaleja sekä prosesseja kuin lentomallissa. Komponenttien valinnassa pitää kuitenkin huomioida, että insinöörimallia pystytään testaamaan yhdessä lentomallin kanssa. Insinöörimalli on yleensä ensimmäinen versio, joka toimitetaan asiakkaalle ja jonka avulla asiakas testaa eri komponenttien yhteensopivuutta. Qualification model (QM) valmistetaan samoilla standardeilla kuin lentomalli ja sen pitää täyttää lentomallin kanssa samat laatuvaatimukset. Mallissa pitää muun muassa käyttää samoja valmistajia sekä samoja testausmenetelmiä kuin lentomallissa. Tämän mallin perusteella varmistetaan erilaisten laatuvaatimusten täytyminen muun muassa suunnittelun, valmistuksen sekä erilaisten prosessien osalta.

Flight model (FM) eli lentomalli on lopullinen asiakkaalle toimitettava versio, joka lähetetään avaruuteen osana satelliittia. Lentomallin suunnittelun ja valmistuksen pitää noudattaa lentomallien standardeja ja siinä pitää käyttää lentomalleihin hyväksytyjä komponentteja. Insinöörimallin ja lentomallin lisäksi asiakkaalle toimitetaan sopimuksessa määritellyt varaosat. Flight spare (FS) mallit ja komponentit ovat lentomalleihin hyväksytyjä varaosia ja ne on valmistettu samojen standardien mukaan kuin lentomalli. Lentomallin komponentit voidaan siis suoraan korvata varaosilla mahdollisissa ongelmatilanteissa ennen satelliitin laukaisua.

2.3 RF-tehonjakaja

Institute of Electrical and Electronics Engineers:n mukaan radioaallot ovat sähkömagneettista säteilyä, jonka taajuus on 300KHz – 300GHz [16]. RF-tekniikassa (radiotaajuus, engl. *radio frequency*) tehonjakajia käytetään tehon jakamiseen tai yhdistämiseen. Tehonjakajat ovat passiivisia komponentteja, jotka koostuvat usein yhdestä sisäänmenoportista sekä kahdesta tai useammasta ulostuloportista. Sisäänmenoporttiin menevä teho jakautuu ulostuloportteihin joko tasaisesti tai jossakin muussa suhteessa. Yhdistämiseen käytettävässä tehonjakajassa sisäänmenoportteihin menevä teho yhdistyy yhteen ulostuloporttiin. Yksinkertaisimmillaan tehonjakaja voidaan toteuttaa T-liitoksella, jossa sisään menevä teho jakautuu kahteen ulostuloporttiin. [20]

Tässä projektissa suunniteltava radiotaajuinen tutkasignaalin tehonjakoverkko integroidaan osaksi satelliitin tutkaa. Tehonjakoverkossa käytettävät taajuudet ja tehonjakoverkon toiminnalliset vaatimukset ohjaavat RF-suunnittelua ja vaikuttavat näin myös tehonjakoyksiköiden mekaniikkasuunnitteluun. Tehonjakoyksiköiden mekaanisella rakenteella on suuri vaikutus yksiköiden RF-ominaisuuksiin, joten mekaniikkasuunnittelussa pitää huomioida useat eri RF-tekniikan asettamat vaatimukset.

2.4 Suunnitteluprojekti

Projektilla tarkoitetaan suunniteltua hanketta ennalta määritetyn päämäärän saavuttamiseksi. Projekti etenee yleensä kohti päämäärää selkeiden välitavoitteiden kautta, jolloin toiminnot suoritetaan vain kerran. Projektitoiminta tarkoittaa työskentelymuotoa, joka noudattaa elinkaariuonnetta. Tämä tarkoittaa, että projektilla on alku ja loppu. Projektille tyypillisiä piirteitä ovat muun muassa tilaaja, selkeä tavoite, jatkuva dokumentointi sekä tarkka aikataulu. Projektit voidaan luokitella niiden sisällön mukaan sisäisiin ja ulkoisiin projekteihin. Sisäisiä projekteja voivat olla esimerkiksi tutkimus- ja kehittämisprojektit, kun taas ulkoisia projekteja esimerkiksi erilaiset suunnittelu- ja valmistusprojektit. Hyvin toteutettuna projekti on erittäin tuottava tapa tehdä töitä. Työmuotona se on palkitseva ja tarjoaa arvokasta kokemusta projektin henkilöstölle. [1]

Projektin suorittaminen edellyttää tehokasta projektinhallintaa. Projektinhallinta tarkoittaa kokonaisuuksien ja resurssien hallitsemista sekä valvontaa. Projektinhallinta voi sisältää esimerkiksi suunnittelua, päätöksentekoa, toimeenpanoa sekä koordinoitua. Projektinhallinta alkaa tehtävän määrittelyllä ja tavoitteiden analysoinnilla. Resurssienhallinta on tärkeä osa projektinhallintaa, koska resurssit pitää pystyä kohdistamaan oikein, jotta tavoitteet pystytään saavuttamaan. [26]

Avaruusteknologian suunnittelu on usein hyvin projektiluonteista ja aikaisemmin toimiviksi havaitut toimintamallit ohjaavat toimintaa myös uusissa projekteissa. Tuotekehitys on kuitenkin tärkeä osa projektia ja erityisesti keskitytään aikaisemmissa projekteissa havaittuihin ongelmakohtiin. Ongelmien välttämiseksi suunnitellaan uusia ratkaisumalleja

ja kehitetään vaihtoehtoisia toteutustapoja. Suunnitteluprosessin aikana on mahdollista keskittyä myös tuotekehitykseen ja esimerkiksi 3D-mallinnuksen avulla pystytään vertailemaan erilaisia ratkaisumalleja sekä niiden ominaisuuksia. Avaruusteknologian suunnittelussa edetään vaiheittain kohti lopullista avaruuteen lähetettävää versiota. Ennen tätä suunnitellaan ja valmistetaan useita testattavia malleja, joiden avulla varmistetaan lopullisen mallin toiminnallisuus sekä luotettavuus. Avaruusteknologian suunnittelulle ja valmistukselle ominaisia piirteitä ovat muun muassa pienet kappalemäärät. Joitakin kappaleita saatetaan valmistaa ainoastaan yksi kappale. Tämä vaikuttaa myös mekaniikkasuunnitteluun, koska esimerkiksi sarjatuotannossa koneistuskustannukset sekä valmistusaika yritetään minimoida. Yksittäisiä kappaleita valmistettaessa nämä asiat eivät välttämättä ohjaa suunnittelua, vaan esimerkiksi kappaleen massalla ja muilla ominaisuuksilla on suurempi merkitys.

2.5 Suunnittelu osana tuotekehitystä

Onnistunut tuotekehitystoiminta on tärkeä osa menestyvän yrityksen liiketoimintaa. Jatkuvan tuotekehityksen avulla voidaan suunnitella ja valmistaa nykyaikaisia tuotteita, joilla pystytään vastaamaan muuttuviin asiakasvaatimuksiin. Tuotekehitys tarkoittaa toimintaa, jonka tavoitteena on kehittää uusi tai paranneltu tuote. Tuotekehityksen avulla pyritään täyttämään asetetut tavoitteet mahdollisimman hyvin, niin teknisesti kuin taloudellisesti. Tuotekehitys on kuitenkin monivaiheinen prosessi, joka voi olla käynnissä koko tuotteen elinkaaren ajan. [18]

Projektiliiketoiminnassa eri projektit voivat erota paljon toisistaan, mutta suunnittelu- ja tuotantoprosesseja voidaan kehittää siitä huolimatta. Eri projekteissa voi olla samanlaisia piirteitä, jolloin tuotekehitys on erityisen tärkeässä roolissa. Pienetkin parannukset ja kehitysideat voivat johtaa suuriin muutoksiin ja samalla tehostaa yrityksen toimintaa ja luoda kilpailuetua. Projektiliiketoiminnassa tuotekehitys voi olla kokonaan uusien tuotteiden suunnittelua tai vanhojen tuotteiden muuntelua ja kehittämistä. Tuotekehitysprojektia on kuitenkin hyvä suunnitella, eikä ainoastaan reagoida vastaantuleviin tilanteisiin. Prosessia suunnitteleamalla tavoitteet pysyvät selkeinä ja prosessin etenemistä sekä tuloksia on helpompi seurata. [18]

Tuotekehitysprosessi voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, jotka ovat käynnistäminen, luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely. Käynnistämävaiheessa tutkitaan kehittämiskustannuksia, markkinointinäkymiä sekä prosessista mahdollisesti saatavia tuottoja. Luonnosteluvaiheessa analysoidaan prosessia sekä asetetaan vaatimukset ja tavoitteet. Luonnosteluvaiheessa myös vertaillaan erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja ja tuloksena saadaan yksi tai useampi ratkaisumalli. Kehittämävaiheessa luonnostellaan kokoonpanomallia ja selvitetään mahdollisia ongelmakohtia. Lisäksi optimoidaan kokoonpanon eri kohteita, jotta tuotekehitysprosessi onnistuisi mahdollisimman hyvin. Kehitysvaiheen lopputuloksena on konstruktioehdotus. Viimeinen vaihe on viimeistely, jossa valmistetaan mahdollinen

prototyyppi, sekä dokumentoidaan kaikki valmistukseen ja kokoonpanoon tarvittava materiaali. Tosin prototyypin valmistaminen ei ole aina mahdollista, mutta pienissä ja edullisissa tuotteissa prototyypin valmistaminen on usein hyödyllistä. [18]

RF-tehonjakoverkon suunnittelu on monialainen projekti, jossa sovelletaan muun muassa mekaniikka-, RF- ja piirilevysuunnittelua. Projektin toteuttaminen vaatii yhteistyötä projektiin osallistuvilta henkilöstöltä ja tämä mahdollistaa ongelmien ratkaisun tiimityönä. Uusia ratkaisumalleja suunnitellaan sekä kehitetään projektin edetessä, joten tuotekehitys on jatkuvaa koko projektin elinkaaren ajan.

3. RF-TEHONJAKOVERKON SUUNNITTELU

DA-Design Oy on suunnitellut ja valmistanut myös aikaisemmin satelliiteissa käytettävää teknologiaa, joten yrityksellä on paljon kokemusta tämän alan suunnittelutyöstä. Kokeemukset vanhoista projekteista sekä niistä opitut asiat ohjaavat työskentelyä myös uusissa projekteissa. Toimintaa pyritään kuitenkin kehittämään ja tehostamaan jatkuvasti, joten uusien ratkaisumallien löytäminen ja oman toiminnan kehittäminen muodostavat tärkeän osan projektia. Suunnitteluprosessi seuraa asiakkaan kanssa tehtyä sopimusta niin aikataulun, kuin suunniteltavien tuotteiden osalta.

3.1 Toimintatutkimus

Tehonjakoverkon suunnitteluprojektissa hyödynnetään toimintatutkimusta, koska sen avulla on mahdollista kehittää yrityksen toimintaa sekä aikaisempia ratkaisumalleja. Toimintatutkimuksen avulla selvitetään mahdollisia ratkaisuja projektin ongelmiin hyödyntämällä aikaisemmista projekteista saatua kokemusta. Toimintatutkimus on laadullista tutkimusta ja tutkija on aktiivisesti mukana projektin suorittamisessa.

Toimintatutkimus etenee perinteisesti sykleissä, joissa kohdetta kehitetään vaihe kerrallaan. Erityisesti pitkissä ja vaativissa projekteissa voidaan tarvita useita syklejä, joten kehitys tapahtuu vähitellen. Toimintatutkimusta hyödynnetään usein käytännön ongelmien kehityksessä, joissa lähtökohtana olevaa ongelmaa pystytään kehittämään tutkimuksen avulla. Susman ja Evered [30] esittelevät teoksessaan syklisen toimintatutkimuksen viisi eri vaihetta, joiden avulla tutkimus etenee. Nämä viisi vaihetta ovat *ongelman määrittely*, *toiminnan suunnittelu*, *toiminnan toteutus*, *arviointi* sekä *opitun tunnistaminen*. Toimintatutkimus etenee näiden viiden kohdan mukaisesti ja kohdetta kehitetään asteittain jokaisen tutkimuskierroksen aikana. Viiden kohdan läpikäynnin jälkeen kierros voidaan toteuttaa uudestaan, jos kohde vaatii lisäkehitystä. Toimintatutkimusta jatketaan, kunnes saavutetaan haluttu lopputulos tai kehitysaste. [31]

Tehonjakoverkon suunnitteluprojektissa toimintatutkimusta hyödynnetään erityisesti tehonjakoyksiköiden rakenteen kehittämisessä. Ensimmäiset versiot suunnitellaan aikaisempien projektien mallien perusteella ja näitä versioita kehitetään projektin edetessä. Mekaanista rakennetta muutetaan projektin edetessä ja sitä kehitetään syklisen toimintatutkimuksen avulla. Tehonjakoyksiköiden suunnittelu aloitetaan ongelman määrittelyllä. Tässä vaiheessa tutustutaan asiakkaan toimittamaan vaatimusmäärittelyyn ja muihin toteutusta ohjaaviin sekä rajoittaviin tekijöihin. Aluksi selvitetään nykyiset ratkaisumallit projektin ongelmaan, jotta saadaan selville nykytilanne, johon tutkimuksen lopputulosta voidaan verrata. Toiminnan suunnittelu -vaiheessa hahmotellaan mahdollisia vaihtoeht-

toja, joiden avulla ongelma pystytään ratkaisemaan. Tässä suunnitteluprojektissa hahmotellaan mahdollisia toteutustapoja mekaniikan suunnittelulle ja tehonjakoyksiköiden toteutukselle. Uusien toteutustapojen avulla kehitetään aikaisempia ratkaisumalleja ja tässä hyödynnetään yrityksessä jo olevaa osaamista. Suunnitteluvaiheessa kerätään siis tietoa, jonka avulla seuraavat vaiheet ovat mahdollisia toteuttaa. Toiminnan toteutus -vaiheessa suoritetaan kappaleiden mallinnus aikaisemmin kerätyn informaation perusteella. Toteutuksessa huomioidaan erilaiset vaatimukset, jotka kohdistuvat suunnitteluun ja mallinnukseen. Mallinnuksen jälkeen ratkaisumalleja arvioidaan projektihenkilöstön kanssa ja keskustellaan mahdollisista kehityskohteista. Viimeisessä vaiheessa arvioidaan tutkimuskierroksen toteutusta ja sen lopputulosta. Jos tehonjakoyksikön suunnittelu tai mallinnus vaativat muutoksia, niin syklinen toimintatutkimus toteutetaan uudestaan. Syklinen kierros toteutetaan uudestaan, kunnes lopputulos täyttää sille asetetut vaatimukset.

3.2 Suunnitteluprosessi

Varsinainen suunnittelutyö käynnistyy sen jälkeen, kun asiakasyrityksen kanssa on tehty sopimus toimitettavasta kokonaisuudesta. Asiakasyritys toimittaa vaatimusmäärittelyn, joka sisältää vaatimukset muun muassa tehonjakoverkon toiminnallisuudelle sekä mekaniikkaosien mitoitukselle. Avaruusteknologian suunnitteluprojektit ovat usein hyvin pitkäkestoisia niiden monimutkaisuuden sekä tarkkojen vaatimusten johdosta. Projekti etenee erilaisten sopimuksessa määriteltyjen välivaiheiden kautta, joissa asiakkaalle toimitetaan sopimuksen mukaiset dokumentit ja lopulta myös tehonjakoverkon komponentit. Projekti sisältää useita dokumenttitoimituksia, jotka käsittelevät tehonjakoverkon ominaisuuksia sekä toteutusta. Lisäksi projektin aikana valmistetaan useita prototyyppisiä, joiden avulla testataan mahdollisia ratkaisumalleja sekä komponenttien toiminnallisuutta. Ennen lopullisen avaruuteen lähetettävän mallin toimitusta tehdään siis useita toimituksia, joiden avulla varmistetaan, että toimitettava tuote täyttää asiakkaan vaatimukset. Tässä diplomityössä keskitytään erityisesti teoriaosuudessa esitellyistä malleista insinöörimallin sekä lentomallin suunnitteluun ja toteutukseen. Nämä kaksi mallia vastaavat mekaanisilta ominaisuuksiltaan melko tarkasti toisiaan.

Avaruusteknologiaan keskittyvät projektit sisältävät perinteisesti pitkiä alihankintaketjuja, koska satelliitin suunnittelu ja valmistus vaativat todella monen eri alan erikoisosaamista. Pitkät alihankintaketjut saattavat hidastaa mahdollisten muutosten etenemistä, koska pienetkin muutokset voivat vaikuttaa moneen eri komponenttiin ja samalla ne vaikuttavat useaan eri toimijaan. Tästä syystä yhteisten standardien noudattaminen on hyvin tärkeää ja esimerkiksi mekaniikkasuunnittelussa rajapintojen dokumentointi sekä suunnittelu ovat erityisen tärkeässä roolissa projektin onnistumisen kannalta.

Avaruusteknologian suunnitteluprosessi eroaa muista projekteista huomattavasti, mutta suunniteltavien kappaleiden varsinainen mallinnustyö ei juurikaan eroa muusta mallinnuksesta. Suurimmat erot mekaniikkasuunnittelussa johtuvat suunniteltavien kappaleiden

vaatimuksista, jotka saattavat erota suurestikin muusta suunnittelusta. Avaruusteknologian suunnittelussa massa on hyvin merkittävä ominaisuus kappaleille, koska suurempi massa lisää myös satelliittien kantoraketien vaatimuksia. Tästä syystä mekaniikkasuunnittelussa päähuomio keskittyy toiminnallisuuden ohella kappaleen massaan. Toisaalta vaatimusmäärittelyn mukaan kappaleiden pitää täyttää erilaisia vaatimuksia muun muassa jäykkyyden ja lujuuden suhteen. Nämä vaatimukset ovat hieman ristiriitaisia mahdollisimman pienen massan kanssa. Suunnittelussa etsitään siis mahdollista ratkaisua, joka toteuttaa vaatimukset mekaanisten ominaisuuksien osalta, mutta pitää massan mahdollisimman alhaisena. Kappaleen massa pidetään mahdollisimman alhaisena muun muassa erilaisten rakenteellisten kevennysten avulla, vaikka nämä vaatisivat hyvin monimutkaisia koneistuksia. Tehonjakoyksiköiden toiminnallisuuteen vaikuttavat muun muassa todella tarkasti määritellyt mitat, jotka edellyttävät hyvin tarkkoja valmistustoleransseja. Pitkät toleranssiketjut johtavat tarkkoihin yksittäisiin toleransseihin, joiden huomiointi on tärkeää kokoonpanon onnistumisen kannalta.

Tehonjakoyksiköt muodostavat osan satelliitin yhdestä alikokoonpanosta, joten yksiköiden pitää täyttää niille asetetut mekaaniset vaatimukset. Tehonjakoyksiköiden pitää sopia niille varatuille paikoille, jotta muiden komponenttien integrointi on mahdollista. Tästä syystä tehonjakoyksiköiden maksimikoko sekä kiinnitystapa ilmoitetaan vaatimusmäärittelyssä useiden tehonjakoyksiköiden kohdalla hyvin tarkasti.

3.2.1 Avaruusteknologian suunnittelu

Avaruusteknologian suunnittelu on melko harvinaista ja Suomessa on vain muutama yritys, jotka suunnittelevat tai valmistavat avaruuskäyttöön soveltuvaa teknologiaa. Suomalaiset yritykset ovat keskittyneet erityisesti avaruuslaitteiden elektroniikkaan, ohjelmistoihin sekä erilaisiin hiilikuiturakenteisiin. Suomi rahoittaa Euroopan avaruusjärjestön toimintaa noin 20 miljoonalla eurolla joka vuosi. Suuri osa tästä rahasummasta tulee kuitenkin takaisin Suomeen erilaisten suomalaisille yrityksille kohdistuvien tilausten muodossa. [12]

Suomalaiset yritykset hyötyvät avaruusteknologiasta, koska yritysten on mahdollista hyödyntää satelliittien tuottamaa dataa omassa toiminnassaan. Tällaista dataa ovat esimerkiksi erilaiset sää- sekä paikkatietopalvelut. Yritysten lisäksi myös suomalaiset yliopistot ja tutkimuslaitokset voivat osallistua Euroopan avaruusjärjestön sekä Euroopan unionin tutkimushankkeisiin ja tällä tavalla kehittää omaa toimintaansa sekä saada lisää informaatiota avaruusteknologiasta. [28]

Avaruusteknologian suunnittelu on siis melko harvinaista ja tämä luo omat erityispiirteensä projektille. Esimerkiksi kaikkien suunnittelussa käytettävien komponenttien pitää olla hyväksytyjä avaruuskäyttöön. Avaruuskäytön mahdollistavien sertifikaattien saaminen on kallista ja vaatii paljon työtä komponenttivalmistajilta. Tästä syystä satelliitteihin

soveltuvia komponentteja valmistaa vain muutama yritys ja tämä taas nostaa komponenttien hintaa sekä pidentää toimitusaikoja. Avaruusteknologian erityispiirteenä voidaan pitää kappaleisiin kohdistuvia poikkeuksellisia olosuhteita, jotka ohjaavat koko suunnitteluprosessin kulkua. Kappaleita on lähes mahdotonta huoltaa satelliitin laukaisun jälkeen, joten testauksen täytyy olla hyvin kattavaa. Tästä syystä suunnitteluprosessi etenee vaiheittain kohti lopullista avaruuteen lähetettävää mallia. Eri vaiheissa ratkaisumalleja vertaillaan ja niiden toiminnallisuus varmistetaan muun muassa katselmointien sekä kattavan testauksen avulla.

3.2.2 Kokemukset aikaisemmista avaruusprojekteista

DA-Design Oy on osallistunut aikaisemmin useaan eri avaruusprojektiin, joten yrityksellä on vahva osaaminen avaruusteknologian suunnittelusta. Aikaisemmissa projekteissa tehtyjen havaintojen avulla pystytään kehittämään toimintaa uusissa projekteissa sekä ratkaisemaan aikaisemmin kohdattuja haasteita. Dokumentointi on muodostanut tärkeän osan myös aikaisempi projekteja, joten vanhoja dokumentteja pystytään hyödyntämään uusissa projekteissa.

Muissa projekteissa tehtyjen havaintojen perusteella mekaniikkasuunnittelua on pystytty kehittämään ja tässä projektissa sovelletaan toimiviksi havaittuja ratkaisuja. Esimerkiksi tehonjakoyksiköiden rakenteen perustana käytetään aikaisemmin hyväksi havaittuja ratkaisuja. Rakennetta kuitenkin kehitetään jatkuvasti, jotta yrityksen resursseja pystyttäisiin hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti ja mekaanisten ratkaisujen avulla tehonjakoyksiköt pystyvät täyttämään asiakasvaatimukset.

DA-Design Oy valmistaa tehonjakoverkossa käytettävät mekaniikkaosat suureksi osaksi itse, joten myös valmistuksessa pystytään hyödyntämään yrityksessä olevaa osaamista. Lisäksi omien tuotantotilojen käyttö helpottaa suunnittelun ja valmistuksen välistä yhteistyötä, joka taas tehostaa prosessia. Tiedonkulku sekä mahdollisten muutosten toteutus on nopeampaa, koska valmistus tapahtuu suunnittelun kanssa osaksi samoissa toimitiloissa. Muista projekteista saadun kokemuksen avulla osataan esimerkiksi varautua mahdollisiin viivästyksiin valmistusprosessissa ja suunnittelua osataan aikatauluttaa tarkemmin.

Aikaisempien projektien aikana on luotu paljon arvokkaita kontakteja muun muassa komponenttitoimittajiin, joita voidaan hyödyntää tässä projektissa. Erilaisten komponenttien tilauksissa osataan ottaa huomioon mahdolliset haasteet, joita on kohdattu aikaisemmissa projekteissa. Tällaisia haasteita voivat olla esimerkiksi tuotteiden laatu sekä pitkät toimitusajat.

3.3 Tehtävän määrittäminen

Tässä projektissa mekaniikkasuunnittelun tavoitteena on mallintaa ja dokumentoida asiakkaan vaatimukset täyttäviä tehonjakoyksiköitä. Tehonjakoyksiköiden mekaniikkaosat valmistetaan DA-Design Oy:n omilla työstökoneilla, joten myös koneiden asettamat rajoitukset pitää huomioida suunnittelussa. Tehonjakoyksiköiden mekaniikkasuunnittelua ohjaavat pääasiassa asiakkaan vaatimusmäärittely sekä DA-Design Oy:n suunnittelema RF-tekniikan toteutus. Suunniteltavien kappaleiden pitää noudattaa asiakkaan vaatimusmäärittelyssä esittämiä vaatimuksia, jotta tehonjakoyksiköt pystytään integroimaan varsinaiseen pääkokoonpanoon. Toiminnallisuuden lisäksi tärkeitä määrittelykysymyksiä projektissa ovat suunniteltavien kappaleiden massa, lujuus sekä tehonjakoyksiköiden kiinnityspisteet.

Tehonjakoyksiköiden suunnittelu vaatii muun muassa käytettävän materiaalin valintaa sekä sopivien kokonaismittojen selvittämistä, jotta kappaleet täyttävät vaatimuksen massan sekä ulkomittojen osalta. Tehonjakoyksiköiden sisälle tuleva RF-tekniikka asettaa myös omat vaatimuksensa yksiköiden rakenteelle, joten tämä piti ottaa suunnittelussa huomioon. RF-ominaisuuksien kannalta suunnittelussa kuitenkin hyödynnettiin melko paljon yrityksen aikaisempaa kokemusta saman alan projekteista. Suunnittelun pohjana pystyttiin siis käyttämään aikaisemmin tehtyjä havaintoja, joita kuitenkin kehitettiin projektin edetessä. Tehonjakoyksiköiden suunnittelua lähdettiin kuitenkin toteuttamaan aikaisemmin tehtyjen havaintojen sekä suunnitteluohjeiden pohjalta.

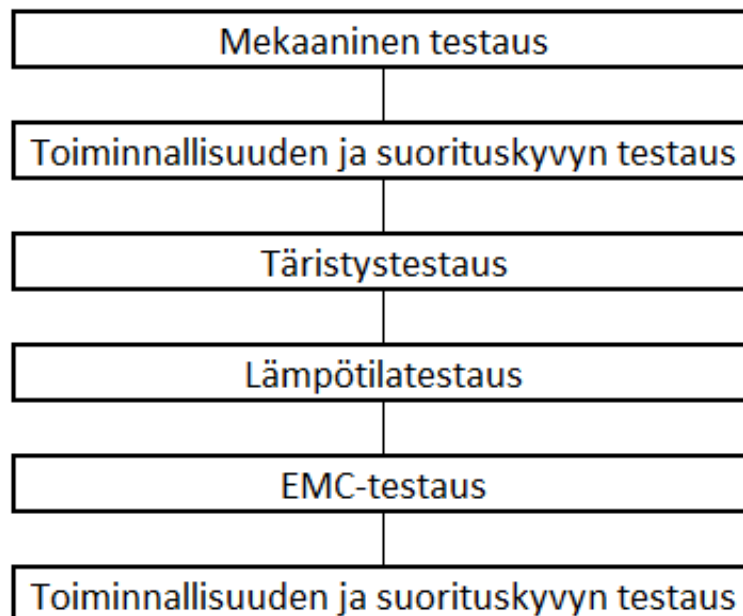
3.3.1 Mekaniikan asiakasvaatimukset

Mekaniikan asiakasvaatimuksia ohjaa asiakasyrityksen toimittama vaatimusmäärittely, jossa on kerrottu muun muassa tuotteen ulkomitat, käytettävät materiaalit, noudatettavat standardit, toleranssit sekä toiminnalliset vaatimukset. Mekaniikkasuunnittelun kannalta oleellisimpia vaatimuksia ovat kappaleen massa, ulkomitat, kiinnityspisteet sekä vaaditut toleranssit. Vaatimusmäärittelyn mukaan tehonjakoverkko pitää suunnitella niin, että sen käyttöikä on kolme vuotta maan päällä toimituksen jälkeen. Tämän jälkeen satelliitin ollessa kiertoradallaan tehonjakoverkon pitää pysyä toimintakykyisenä 10,5 vuoden ajan.

Tehonjakoyksiköt koostuvat pohja- ja kansikappaleesta, piirilevystä, liittimistä sekä kiinnitystarvikkeista. Jokainen tehonjakoyksikkö sisältää tarvittavan määrän liittimiä sekä kiinnitystarvikkeita, joiden massa ei voida vaikuttaa. Yksiköiden massa voidaan vaikuttaa ainoastaan yksikön kannen ja pohjan suunnittelulla, joten vaatimusmäärittelyssä annetut maksimimassat ohjaavat näiden kappaleiden suunnittelua ja rakennetta. Yksiköiden ulkomitoille on määritelty suurimmat sallitut arvot ja kiinnityspisteiden sijainti on määritelty tarkasti. Kiinnityspisteiden sijainti vaikuttaa suuresti yksiköiden ulkomuotoon, eikä yksiköistä voida suunnitella esimerkiksi täsmälleen piirilevyjen muotoisia. Yksiköiden mekaanista rakennetta ja suunnittelua on käsitelty tarkemmin luvussa 4.

Vaatimusmäärittelyssä esitetty kiinnityspisteiden sijainti on erityisen tärkeä tehonjakoyksiköiden integroinnin kannalta. Satelliitti valmistetaan yhteistyönä usean eri yrityksen kesken, joten on hyvin tärkeää, että rajapinnat ovat standardisoituja tai ne on määritelty erittäin tarkasti. Tästä syystä kiinnityspisteiden muutokset saattavat vaikuttaa useaan eri toimijaan ja kiinnityspisteiden tarkka määrittely projektin alkuvaiheessa helpottaa projektin etenemistä sekä eri komponenttien yhteensopivuutta. Tehonjakoyksiköt kiinnitetään satelliitin runkoon titaaniruuveilla, joten kiinnitysreikien sijainnin lisäksi myös reikien koko sekä käytettävien ruuvien malli on kerrottu vaatimusmäärittelyssä. Vaatimusmäärittelyssä ilmoitettujen toleranssivaatimusten avulla asiakasyritys pystyy laskemaan toleranssiketjuja ja selvittämään jokaiseen komponenttiin vaadittavat maksimitoleranssit, jotta satelliitin kokoonpanoprosessi pystytään suorittamaan.

Vaatimusmäärittelyssä on asetettu tarkat vaatimukset esimerkiksi mekaniikkaosien testaukselle. Mekaniikan komponentit pitää testata muun muassa täristys- sekä lämpötila-testauksen avulla. Täristytestaukseen kuuluu muun muassa sini-, satunnais- sekä shokkitestaus. Näissä testeissä kappaleita kuormitetaan erilaisella värähtelyllä. Lisäksi vaatimusmäärittelyssä on määritelty, että tehonjakoyksiköiden pienin ominaisvärähtelytaajuus pitää olla suurempi kuin 400 Hz. Suunniteltavat kappaleet testataan kattavan testausohjelman mukaisesti. Kuva 5 esittää kappaleille suoritettavaa testausohjelmaa, joka kaikkien suunniteltavien kappaleiden pitää läpäistä. Testausohjelma sisältää toiminnallisuuden sekä mekaanisiin ominaisuuksiin keskittyviä testejä. Kuten kuvasta nähdään, kappaleille suoritetaan toiminnallisuuden ja suorituskyvyn testaus kaksi kertaa projektin aikana. Näin varmistetaan, että muut testit eivät ole vaikuttaneet yksiköiden toiminnallisuuteen.



Kuva 5. Tehonjakoyksiköiden testausohjelma

Täristystestauksen osana kappaleille suoritetaan shokkitestaus, jossa kappaleita kuormitetaan erisuuruksilla kiihtyvyyksillä. Taulukko 1 esittää shokkitestin tasoja, joita suunniteltavien kappaleiden pitää kestää. Taulukossa on esitetty käytettäviä taajuuksia sekä suurimpia kiihtyvyyksiä. Shokkitestausta ei kuitenkaan suoriteta lentomallin kappaleille, vaan testaus suoritetaan aiempien mallien yhteydessä. Lisäksi suunnittelussa on tärkeä huomioida kappaleiden ominaisvärähtelytaajuudet, jotta kappale ei lähde resonoimaan satelliitin värähtelyn ansiosta.

Taulukko 1. Shokkitestauksessa käytettävät taajuudet ja kiihtyvyydet

Taajuus (Hz)	Kiihtyvyys (g)
10	15
100	20
2000	2000
10000	2000

Suunnittelussa hyödynnetään taulukossa sekä vaatimusmäärittelyssä esitettyjä rasitusarvoja, joita mekaanisten kappaleiden pitää kestää. Kappaleiden mekaanisille ominaisuuksille, kuten lujuudelle, on kuitenkin asetettu varmuuskertoimet, joita hyödynnetään suunnittelussa. Varmuuskertoimien avulla varmistetaan, että kappaleet kestävät niihin kohdistuvat voimat. Kappaleiden pitää siis olla riittävän jäykkiä ja lujia, mutta niiden massan on pysyttävä mahdollisimman pienenä. Eri suunnittelukohteille on asetettu erisuuruiset varmuuskertoimet. Taulukko 2 esittää suunnittelussa käytetyt varmuuskertoimet. Taulukosta huomataan, että kaikissa kohteissa käytetään varmuuskertoimena vähintään arvoa 1,5. Varmuuskertoimien avulla pystytään pienentämään riskiä kappaleiden rikkoutumisesta rasituksessa.

Taulukko 2. Suunnittelussa käytettävät varmuuskertoimet

Kohde	Varmuuskerroin
Kantavat rakenteet	1,5
Kiinnityselementit	2,0
Vakaus (nurjahdus)	2,0
Toissijaiset kiinnikkeet	2,0
Nostokohdat	3,0

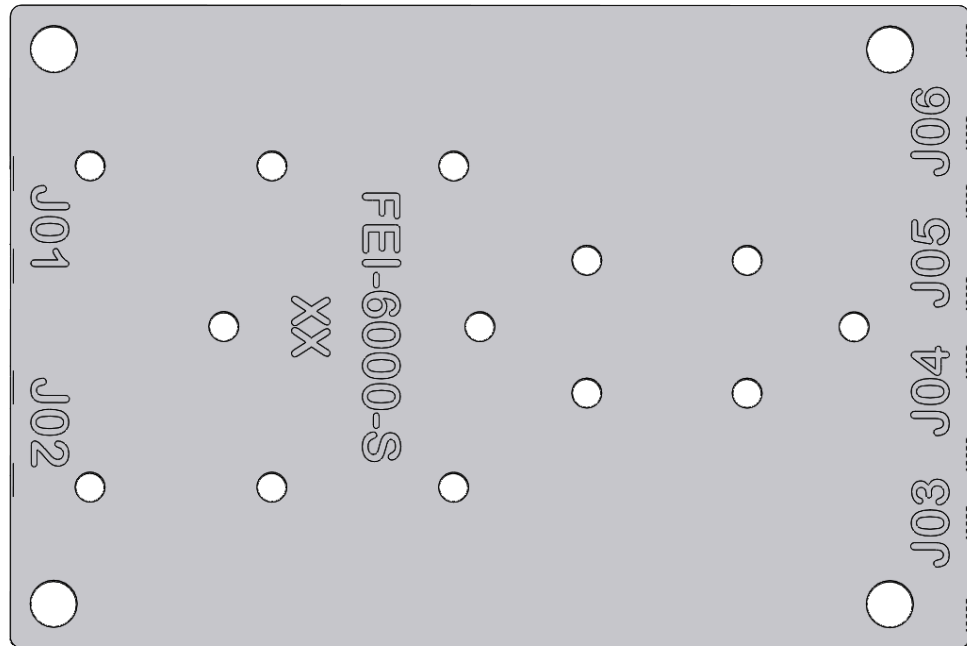
Lämpötilatestauksessa kappaleisiin kohdistetaan korkeita lämpötiloja sekä suuria lämpötilavaihteluita, jotta varmistetaan kappaleiden soveltuvuus avaruudessa vallitseviin olosuhteisiin. Syklisten lämpötilatestien avulla varmistetaan, että kappale kestävä suuret lämpötilavaihtelut ja pysyy tästä huolimatta toimintakykyisenä. Vaatimusmäärittelyssä on esitetty lämpötilarajat, joissa kappaleiden pitää toimia satelliitin elinkaaren eri vaiheissa. Taulukko 3 kuvaa kappaleille asetettuja lämpötilarajoja eri elinkaaren vaiheissa. Taulukosta huomataan, että tehonjakoyksiköiden pitää kestää suurempaa lämpötilavaihtelua silloin, kun se ei ole operatiivisessa tilassa.

Taulukko 3. Tehonjakoyksiköiden lämpötilarajat

Tehonjakoverkon tila	Alaraja (°C)	Yläraja (°C)
Lepotilassa	- 50	+ 70
Virrat kytkettynä	- 30	+ 50
Operatiivinen toiminta	- 25	+ 50

Vaatimusmäärittelyn mukaan yksiköiden pitää kestää suuria paineenvaihteluita niiden elinkaaren aikana. Yksiköt suunnitellaan kestävämaan paineen muutokset normaali ilmakehän paineesta merenpinnan tasolla (101,3 kPa) aina avaruudessa vallitsevaan tyhjiöön. Paineenvaihtelun takia yksiköihin suunnitellaan ilmareiät paineentasausta varten. Jokaiseen rakenteissa olevaan umpinaiseen osaan tehdään reikä paineentasausta varten. Ilman paineentasausta paineen muutokset saattaisivat vaikuttaa haitallisesti komponentteihin tai mekaniikkaosien rakenteisiin.

Vaatimusmäärittelyssä on määritelty, miten tehonjakoyksiköt pitää merkitä. Yksikköihin kaiverretaan tunnisteet jokaiselle liittimelle ja lisäksi yksikön oma tunnustekoodi kaiverretaan yksikön kanteen. Näiden lisäksi jokaiselle valmistettavalle yksikölle annetaan oma sarjanumero. Yksiköiden merkitseminen mahdollistaa niiden erottamisen toisistaan ja sarjanumeroiden avulla mahdollisissa ongelmatilanteissa vialliset komponentit on helpompi jäljittää. Yksiköt yhdistetään toisiinsa piidioksidi kaapeleilla ja kaapeleiden kytkeminen oikeaan liittimeen helpottuu, kun liittimet on merkitty yksilöllisesti. Kuva 6 esittää, kuinka liittimien sekä yksikön tunnustetiedot merkitään yksikön kanteen. Kuvassa on kyseessä 2:4 jakaja, jossa kuusi liittintä on merkitty juoksevilla numeroinnilla. Lisäksi kanteen on kaiverrettu yksikön tunniste ja merkintä "XX" korvataan juoksevilla sarjanumerolla.



Kuva 6. Tehonjakoyksikön merkintä

3.3.2 RF-suunnittelun asettamat vaatimukset

Tehonjakoyksiköihin asennettavat piirilevyt sisältävät RF-teknologiaa, jonka avulla yksiköt täyttävät niille asetetut toiminnalliset vaatimukset. RF-suunnittelu siis ohjaa piirilevyjen suunnittelua ja vaikuttaa näin mekaniikkasuunnitteluun. Piirilevyjen suunnittelussa otetaan huomioon myös tehonjakoyksiköiden vaaditut mitat, koska piirilevyn rakenne ohjaa suurelta osin mekaniikan suunnittelua. Piirilevyn muoto määrittää liittimien sijainnin sekä yksikön ulkomitat. Piirilevyn muoto ja paksuus ohjaavat yksikön pohjaan koneistettavia piirilevysyvennyksiä sekä massaa pienentäviä kevennyksiä. Yksiköiden pohjakappaleisiin jyrksitään urat piirilevyille, jotta piirilevy pysyy tiukasti oikealla paikalla. Uran pitää olla oikean syvyinen, jotta liittimien keskijohtimet asettuvat oikealle korkeudelle suhteessa piirilevyyn. Tämä mahdollistaa keskijohtimien juottamisen kiinni piirilevyyn. Lisäksi uran pitää olla oikean muotoinen, jotta piirilevy pystytään liimaamaan paikalleen ja se myös pysyy paikallaan vaadituissa olosuhteissa. Lisäksi piirilevyn muoto määrittelee sijainnin kannen kiinnitysruuveille.

Kannen kiinnitysruuvien pitää olla lähellä piirilevyä, mutta ne eivät saa kuitenkaan osua piirilevyyn. Kiinnitysruuvit sijoitetaan lähelle piirilevyä, jotta tehonjakoyksiköstä tulee RF-ominaisuksiltaan mahdollisimman tiivis. Tarkasta koneistuksesta huolimatta yksiköiden kannen ja pohjan välille saattaa muodostua rakoja, joiden kautta RF-signaali voi päästä ulos yksiköstä. RF-signaalin vuotaminen estetään sijoittelemalla kannen kiinnitysruuvit mahdollisimman lähelle piirilevyä. Tässä projektissa suunnitellaan passiivisia tehonjakoyksiköitä, joten yksiköiden tiiveys pystytään varmistamaan kiinnitysruuvien riittävällä määrällä sekä sopivalla sijoittelulla. Lisäksi kappaleiden pinnoituksella pystytään

vaikuttamaan yksiköiden tiiveyteen. RF-signaalin vuotaminen voisi aiheuttaa ongelmia muihin järjestelmän laitteisiin, joka olisi hyvin haitallista järjestelmän toiminnalle.

Piirilevyn suunnittelemisen jälkeen mekaniikkasuunnittelijalle toimitetaan tiedot piirilevyn ulkomitoista sekä paksuudesta. Näiden tietojen avulla on mahdollista luoda 3D-malli, jota pystytään hyödyntämään yksiköiden pohjan ja kannen mallinnuksessa. Yksikön pohjaan jyrsitään ura piirilevyä varten ja uran muodon on hyvin tärkeää vastata piirilevyn muotoa. Tästä syystä piirilevyn ulkomuodot toimitetaan mekaniikkasuunnitteluun Dxf-tiedostona (engl. *Drawing Exchange Format*), jolloin muoto pysyy täysin samana. Dxf-tiedostosta pystytään 3D-mallinnusohjelman avulla konvertoimaan mekaniikkasuunnittelussa hyödynnettävä 3D-malli. Tämän 3D-mallin avulla pystytään muokkaamaan yksiköiden pohjaan ja kanteen tehtäviä koneistuksia.

3.3.3 Tuotannon asettamat vaatimukset

Tehonjakoyksiköiden mekaniikkaosat valmistetaan hyödyntämällä DA-Design Oy:n omia resursseja, joten suunnittelussa pitää ottaa huomioon mahdolliset valmistustekniset asiat. Kappaleiden suunnittelussa pitää huomioida, että kappaleet on mahdollista valmistaa yrityksen omilla koneistuskeskuksilla. Kappaleiden suunnitteluun vaikuttavat muun muassa minimi ainevahvuudet, jotka pystytään koneistamaan. Lisäksi pitää huomioida koneistuskeskusten valmistustoleranssit, jotta valmiit kappaleet täyttävät niille asetetut vaatimukset. Käytettävät valmistusmenetelmät vaikuttavat myös materiaalivalintoihin, koska tehonjakoyksiköt vaativat hyvin tarkkoja ja monimutkaisia koneistuksia. Materiaalin pitää siis olla riittävän lujaa, mutta sitä pitää pystyä koneistamaan riittävällä tarkkuudella.

Tehonjakoyksiköissä on kyse melko pienistä kappaleista (esimerkiksi 50 x 50 x 15 mm), joten erilaiset koneistuksen asettamat reunaehdot vaikuttavat suunnitteluun. Esimerkiksi joidenkin piirteiden koneistuksessa pitää hyödyntää hyvin pienisäteisiä jrsinteriä, joilla ei kuitenkaan pystytä tekemään syviä geometrisia muotoja. Nämä tekijät rajoittavat suunnittelua ja asettavat omat haasteensa yksiköiden toteutukselle. Koneistuskeskusten lisäksi suunnitteluun vaikuttavat siis erilaiset työkaluvalinnat. Lisäksi monimutkaisten geometristen muotojen koneistaminen vie paljon aikaa, joka taas vaatii lisää resursseja. Resursien tehokkaan hyödyntämisen kannalta tehonjakoyksiköiden mekaniikka kannattaa siis toteuttaa koneistuksen kannalta niin yksinkertaisesti kuin mahdollista. Toteutus tehdään kuitenkin niin, että se täyttää kaikki sille asetetut vaatimukset.

Suunnittelussa hyödynnetään toimintatutkimuksen avulla saatua informaatiota aikaisemmista projekteista. DA-Design Oy on toteuttanut aikaisemmin monimutkaisia suunnittelu- ja valmistusprojekteja, joten yrityksellä on osaamista tältä aihealueelta. Esimerkiksi minimi ainevahvuuksina käytettiin aikaisemmissa projekteissa hyväksi havaittuja arvoja. Lisäksi tarvittavia mekaanisia ominaisuuksia, kuten lujuutta ja lämpötilan kestoa osattiin

arvioida aikaisempien projektien avulla. Vanhat projektit vaikuttivat siis oleellisesti yksiköiden suunnitteluun erityisesti projektin alkuvaiheessa.

Yksiköiden suunnittelussa toleranssiketjuilla on suuri merkitys yksiköiden toiminnallisuuden sekä kokoonpanon kannalta. Toleranssiketjut koostuvat eri kappaleiden valmistuksessa ja suunnittelussa käytettävistä toleransseista, jotka pitää laskea yhteen, kun varmistetaan, että yksiköiden kokoonpano onnistuu suunnitellusti. Toleranssiketju alkaa piirilevyjen valmistustoleranssista, joka pitää huomioida yksiköiden pohjakappaleiden suunnittelussa. Pohjakappaleisiin koneistetaan urat piirilevyille ja pohjakappaleiden suunnittelussa pitää huomioida sekä urien valmistustoleranssi että piirilevyjen valmistustoleranssi. Yksiköt kiinnitetään titaaniruuveilla satelliitin runkoon. Kiinnitys tehdään ruuveilla tehonjakoyksiköiden läpi, joten kansi- ja pohjakappaleisiin pitää koneistaa reiät ruuveille. Reikien suunnittelussa pitää huomioida reikien kokoon sekä sijaintiin vaikuttavat valmistustoleranssit, jotta kiinnitys onnistuu. Toleranssiketjujen huomioiminen on tärkeää aina, kun liitetään useita komponentteja toisiinsa. Vaatimusmäärittelyssä on kerrottu vaaditut toleranssit eri komponenttien eri piirteille, jotta myös asiakas pystyy huomioimaan yksiköiden toleranssit omassa suunnittelussaan. Pienikin heitto kriittisissä toleransseissa saattaa siis kertaantua projektin edetessä, koska tehonjakoyksiköt kootaan monesta eri kappaleesta. Lisäksi asiakasyritys käyttää satelliitin valmistuksessa useita eri alihankkijoita, joten eri yritysten valmistamien komponenttien pitää sopia yhteen, jotta pääkokoonpanon kasaaminen on mahdollista.

3.4 Tuoterakenteen suunnittelu

Tuoterakenne tarkoittaa kuvausta tuotteen komponenteista, alikokoonpanoista sekä niiden välisistä suhteista. Tässä projektissa tuoterakenne on laadittu projektin loogisten kokonaisuuksien avulla ja pääkokonpano on jaettu useaan eri alikokoonpanoon. Tuoterakenne auttaa eri alikokoonpanojen välisten suhteiden hahmottamisessa ja tuoterakenteen avulla on mahdollista jakaa suunnitteluprosessia pienempiin osiin. Selkeän tuoterakenteen avulla on helpompi hahmottaa projektin rakennetta ja näin projektin rakenteen sisäistäminen on nopeampaa. Lisäksi suunniteltavien mekaniikkaosien lukumäärää on helpompi arvioida selkeän tuoterakenteen avulla.

Tässä projektissa pääkokoonpano koostuu useista alikokoonpanoista, jotka taas koostuvat useista eri kappaleista ja komponenteista. Jokaisesta kappaleesta valmistetaan useita eri versioita eri käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi valmistettavat tehonjakoyksiköiden prototyytit saattavat erota suuresti lopullisista avaruuteen lähetettävistä versioista. Versiohistorian hallinnoinnin kannalta on hyvin tärkeää, että tuoterakenne on suunniteltu huolellisesti ja sitä ylläpidetään aktiivisesti. Tuoterakenteen avulla on myös mahdollista jäljittää aikaisemmin suunniteltuja tai valmistettuja kappaleita, jos niitä halutaan esimerkiksi kehittää tai käyttää lähtökohtana uusissa tuotteissa. Lisäksi viimeisimmän version löytäminen ja tunnistaminen on nopeampaa, jolloin mahdolliset sekaannukset eri versioiden välillä voidaan välttää.

Tässä projektissa luotiin tuoterakenne, jossa jokainen tehonjakoyksikkö muodostaa oman kokoonpanon. Kokoonpanoista tehtiin aina uusi versio, kun kokoonpanossa käytettäviä komponentteja vaihdettiin tai tehonjakoyksikköiden mekaanista rakennetta muutettiin. Tuoterakenne ja sen aktiivinen ylläpito mahdollistavat kokoonpanoon tarvittavien komponenttien hankinnan, koska tuoterakenteen avulla saadaan selville tarvittavat kappalemäärät. Tuoterakenteen avulla pystytään arvioimaan esimerkiksi tarvittavien kiinnitystarvikkeiden kappalemääriä sekä muita materiaalitarpeita.

Taulukko 4 esittää yhden projektissa suunniteltavan tehonjakoyksikön (2:4 jakaja) tuoterakennetta. Tämän tehonjakoyksikön mallinnusta ja suunnittelua on käsitelty tarkemmin luvussa 4. Taulukon vasemmassa reunassa on kerrottu kokoonpanon tuotekoodi, jonka alle sisältyvät kaikki tehonjakoyksikössä tarvittavat kappaleet ja komponentit. Kolmannessa sarakkeessa on eritelty valmistettavat kappaleet, sekä valmiina tilattavat komponentit. Kaikille valmistettaville kappaleille on annettu omat osanumerot, jotta kappaleiden tunnistaminen on mahdollista. Lisäksi tunnuksen kuudesta ensimmäisestä merkistä saadaan selville, mihin tuotteeseen kappale kuuluu. Komponentit on numeroitu omilla tunnuksillaan ja ne ovat löydettävissä yrityksen omasta komponenttikirjastosta. Osanumeroiden lisäksi kappaleilla ja komponenteilla on tunnistamista helpottava nimi. Taulukon oikeassa reunassa on esitetty yhteen tehonjakoyksikköön tarvittavat kappalemäärät. Kaikista valmistettavista kappaleista on taulukossa esitetty A-versio. Projektin edetessä taulukkoa kuitenkin päivitetään ja myös versiotunnukset muuttuvat, kun kappaleista suunnitellaan uusia versioita.

Taulukko 4. 2:4 Tehonjakoyksikön tuoterakenne

Tuote	Nimi	P / C	Osanumero	Nimi	Kpl
DA0150-00-A	2:4 Divider	-	-	-	1
DA0150-00-A	-	P	DP0150-0001-A	PCB, 2:4 Divider	1
DA0150-00-A	-	P	DP0150-0002-A	Frame, 2:4 Divider	1
DA0150-00-A	-	P	DP0150-0003-A	Lid, 2:4 Divider	1
DA0150-00-A	-	C	DC01493	SMA connector	6
DA0150-00-A	-	C	DC01413	Screwlock Helicoil, M2.5x1d	24
DA0150-00-A	-	C	DC01414	Screwlock Helicoil, M2.5x1.5d	13
DA0150-00-A	-	C	DC00556	Screw DIN 912 M2.5x5 A4	24
DA0150-00-A	-	C	DC01337	Screw DIN 912 M2.5x12 A4	13
DA0150-00-A	-	C	DC00494	Washer DIN 433 M2.5 A4	37

Tehonjakoyksiköistä valmistetaan muun muassa useita prototyyppisiä, insinöörimalli sekä lentomalli. Prototyyppien avulla testataan yksiköiden toiminnallisuutta sekä ominaisuuksia. Lisäksi prototyyppien avulla kehitettyjä ratkaisumalleja voidaan esitellä asiakkaalle. Varsinaisia prototyyppisiä ei kuitenkaan vielä toimiteta asiakkaalle, vaan niitä hyödynnetään omassa suunnittelussa. Taulukossa esitetty tuoterakenne kuvaa insinöörimallin

toteutusta. Insinöörimalli on asiakkaalle toimitettava kokonaisuus, joka vastaa mekaniikkaltaan suurelta osin lopullista lentomallia. Osa yksiköiden komponenteista eroaa varsinaisen lentomallin komponenteista, mutta rakenteeltaan yksiköt ovat mahdollisimman samanlaisia. Insinöörimallin avulla asiakas pystyy varmistamaan kappaleiden integroitavuuden sekä toiminnallisuuden. Projektin alussa on päätetty, mitä tehonjakoyksiköitä toimitetaan insinöörimallin toimituksen yhteydessä. Insinöörimallin mekaniikka pyritään suunnittelemaan ja valmistamaan niin, että se vastaa täysin lopullista lentomallia. Lentomalli on tuotteen lopullinen versio, joka lähetetään avaruuteen osana satelliittia. Lentomallin suunnittelussa ja valmistuksessa hyödynnetään prototyypin sekä insinöörimallin avulla tehtyjä havaintoja. Kaikki lentomallissa käytetyt komponentit ovat avaruuskäyttöön hyväksytyjä.

Tehonjakoyksiköistä suunnitellaan siis monta eri versiota, joten versiohistorian selkeä dokumentointi on hyvin tärkeää projektin etenemisen sekä onnistumisen kannalta. Tuoterakennetta päivitetään projektin edetessä, jotta rakenteesta pystytään tarkastamaan ajan-kohtainen versio suunnitelluista mekaniikoista sekä muista komponenteista.

3.5 Projektin dokumentointi

Tehonjakoverkon suunnitteluprosessi etenee sopimuksessa esitetyn aikataulun mukaisesti ja projektin suorittaminen koostuu erilaisista välivaiheista. Välivaiheiden suorittamiseen saattaa kuulua esimerkiksi dokumenttitoimituksia, selvityksiä projektin etenemisestä sekä projektin loppuvaiheessa varsinaisia tuotetoimituksia. Välivaiheiden jälkeen asiakas tarkastaa toimitetun materiaalin ja toimittaa mahdolliset korjauskehotukset liittyen suoritettuun suunnitteluun. Korjausten jälkeen projektin suorittamista jatketaan kohti seuraavaa välivaihetta.

Mekaniikkasuunnittelun osalta projektin alkuvaiheen dokumenttitoimitukset sisältävät suureksi osaksi suunnitelmia tehonjakoyksiköiden mahdollisesta rakenteesta. Yksiköistä toimitetaan muun muassa rajapintoja käsittelevä ICD-dokumentti (engl. *Interface control drawing*), jonka avulla asiakas pystyy varmistamaan yksiköiden mekaanisen soveltuvuuden satelliittiin. ICD-dokumenteissa esitetään muun muassa tehonjakoyksiköiden kriittiset mitat, kiinnityspisteiden toleranssit, kappaleiden materiaali sekä massa. ICD-dokumenttien lisäksi tehonjakoyksiköistä toimitetaan 3D-mallit asiakkaalle, jotta asiakas voi sovittaa yksiköitä alikokoonpanomalleihin sekä pääkokoonpanomalliin. 3D-mallin avulla asiakkaan on helpompaa hahmottaa ja huomata mahdolliset ongelmat esimerkiksi liittyen rajapintoihin tai yksiköiden integrointiin. Projektissa suunniteltujen tehonjakoyksiköiden ICD-dokumentit on esitetty liitteissä A, B ja C.

Asiakkaalle toimitetaan listat kaikista tehonjakoyksiköissä käytetyistä komponenteista, jotta asiakas pystyy varmistamaan, että kaikki käytetyt komponentit ovat avaruuskäyttöön hyväksytyjä. Komponenttilistoissa on esitetty yksityiskohtaisesti muun muassa kaikki käytettävät kiinnitystarvikkeet sekä niiden valmistajat. Avaruuskäyttöön tarkoitettujen

kappaleiden valmistaminen vaatii sertifiointin, joten komponenttivalmistajien määrä esimerkiksi Euroopassa on hyvin rajallinen.

Kaikki dokumentit katselmoidaan ja hyväksytään ennen niiden toimittamista asiakkaalle. Mekaanisten piirustusten osalta työnkierrossa yksiköiden 3D-mallit sekä niistä tehdyt dokumentit tarkastetaan ja hyväksytään, jonka jälkeen dokumenteista konvertoidaan viralliset versiot, jotka voidaan toimittaa eteenpäin. Jos esimerkiksi kappaleita muokataan jälkeenpäin, niin niistä luodaan uudet versiot ja versiomuutokset päivitetään myös tuoterakenteeseen. Mekaniikkasuunnittelun avulla mallinnetut kappaleet valmistetaan teknisten piirustusten sekä 3D-mallien avulla. Teknisistä piirustuksista saadaan selville muun muassa kappaleen kriittiset mitat ja muodot sekä käytettävä materiaali. Piirustukset saattavat sisältää myös muita valmistusohjeita, esimerkiksi liittyen pintakäsittelyyn tai valmistustapaan. Piirustuksista pitää löytyä tarkat tiedot kaikista asioista, joita ei voida päätellä pelkän 3D-mallin avulla. Tällaisia ovat esimerkiksi reikien ja kierteiden mitat, sekä valmistuksessa käytettävät toleranssirajat.

4. MEKANIKKASUUNNITTELUN TOTEUTUS

Tehonjakoyksiköiden mekaniikkasuunnittelu aloitettiin tutustumalla asiakkaan vaatimuksiin ja määritelmiin, jotka rajasivat jakajien mittoja sekä muotoja. Projektin edetessä vaatimukset muuttuivat ja yksiköiden mekaniikkaan tehtiin myös joitakin muutoksia. Diplomityössä tehtävä mallinnus toteutettiin Solidworks-suunnitteluohjelmalla, jota käytetään kansainvälisesti useissa eri yrityksissä. Solidworks-ohjelmalla on mahdollista mallintaa ja visualisoida monimutkaisia 3D-kappaleita sekä kokoonpanoja. Mallinnuksessa hyödynnettiin teoriaosuudessa esiteltyjä tilavuusmalleja ja niitä käytettiin hyväksi kappaleiden 3D-mallien suunnittelussa. Markkinoilla on useita erilaisia 3D-mallinnusohjelmia ja esimerkiksi asiakasyrityksessä käytettiin eri suunnitteluohjelmaa. Suunnitteluohjelmat eroavat toisistaan muun muassa ominaisuuksiltaan ja käyttöliittymiltään, mutta useissa ohjelmissa on havaittavissa samoja piirteitä. Eri suunnitteluohjelmilla pystytään kuitenkin hyödyntämään samoja tiedostomuotoja, joten mallinnettujen kappaleiden vertailu ja analysointi on mahdollista, vaikka yritykset käyttävät eri suunnitteluohjelmia.

Työssä suunniteltiin RF-tehonjakoverkossa käytettäviä tehonjakoyksiköitä. Tehonjakoyksiköt koostuvat SMA-tyypin (engl. *SubMiniature version A*) liittimistä, yksikön kannesta ja pohjasta, kiinnitystarvikkeista, piirikortista sekä mahdollisesti muista elektroniikkakomponenteista. Yksiköiden rakenne määräytyi suureksi osaksi käytettyjen liittimien vaatimien mekaanisten ominaisuuksien pohjalta. Liittimien kiinnitys sekä liittimen keskijohtimen sijainti ohjasivat yksiköiden suunnittelua koko projektin ajan. Yksiköiden mekaniikan suurimmat mahdolliset ulkomitat sekä suurin sallittu massa oli määritelty asiakkaan toimittamassa vaatimusmäärittelyssä. Lisäksi joidenkin yksiköiden kohdalla myös kiinnitystapa sekä kiinnitysreikien sijainti oli ennalta määritelty. Suunnittelun aikana oli kuitenkin mahdollista vaikuttaa tehonjakoyksiköiden lopulliseen toteutukseen muodon ja osaksi myös kiinnityksen osalta, koska myös vaatimusmäärittelyyn tehtiin päivityksiä. Asiakkaan määritelmien lisäksi myös piirikorttien ulkomitat rajoittivat yksiköiden suunnittelua. Suunniteltujen piirikorttien piti sopia yksiköiden sisälle ja sijaita oikealla korkeudella, jotta yksiköt toimisivat osana kokonaisuutta ja suunnitellulla tavalla.

Tässä projektissa tehonjakoverkkoon kuului kuusi erilaista tehonjakoyksikköä. Suurimmat erot tehonjakoyksiköiden mekaniikoissa aiheutuivat käytettävien liittimien määrästä sekä erilaisista vaatimuksista kiinnityksen ja ulkomittojen suhteen. Yksiköissä käytettävät liittimet sekä yksiköiden kiinnitystapa vaikuttivat omalta osaltaan koko tehonjakoyksikön suunnitteluun ja lopulliseen mekaniikkaan. Liittimien sijoittelu sekä kiinnitystapa vaikuttivat oleellisesti yksiköiden suunnitteluun ja käytettäviä SMA-liittimiä on tarkasteltu tarkemmin kappaleessa 4.2. Liittimet sekä yksikön kansi kiinnitettiin paikalleen kierre-elementtien avulla. Kierre-elementtien käyttö asetti kiinnitysreikien mitoitukselle erityisvaatimuksia ja näitä vaatimuksia on käsitelty kappaleessa 4.3.

Diplomityössä keskityttiin kolmen eri tehonjakoyksikön suunnitteluun. Diplomityössä suunniteltaviksi tehonjakoyksiköiksi valittiin 2:4 jakaja, 1:3 jakaja sekä 1:6 jakaja. Tehonjakoyksiköiden nimissä ensimmäinen numero kertoo tulosignaalien määrän ja toinen numero kertoo lähtevien signaalien määrän. Esimerkiksi 1:6 jakajassa yksi signaali jakautuu kuuteen eri lähtösignaaliin ja yksikössä on siis yhteensä seitsemän SMA-liitintä. Diplomityössä keskityttiin näiden kolmen yksikön suunnitteluun, koska ne eroavat toisistaan rakenteellisesti ja ne olivat lähtökohtaisesti haastavia suunnitella. Lisäksi näiden yksiköiden suunnittelu vaati kommunikointia asiakasyrityksen kanssa, koska yksiköiden rakenteeseen tuli muutoksia projektin edetessä. Rakenteen muutoksiin vaikuttivat muun muassa erilaiset kiinnitykseen liittyvät asiat sekä muutokset piirilevyjen ulkomuodoissa.

4.1 Tehonjakoyksiköiden materiaalit

Tehonjakoyksiköiden materiaalin valintaan vaikuttivat muun muassa asiakkaan vaatimukset sekä yrityksen omat kokemukset aikaisemmista projekteista. Yksiköiden massan piti pysyä mahdollisimman alhaisena, mutta rakenteen piti kuitenkin kestää hyvin lämpötilavaihteluja sekä erilaista räsitusta. Aikaisempien kokemusten perusteella sekä materiaalien ominaisuuksia vertailemalla oli alusta asti selvää, että käytettävä materiaali olisi alumiini. Materiaalivalinnassa keskityttiin suurimmaksi osaksi vertailemaan kahta eri alumiinilaatua, joita oli käytetty myös aikaisemmissa projekteissa.

Eri alumiinilaatujen väliltä yksiköiden materiaaliksi suunniteltiin 6082 ja 7075 alumiini-seoksia. Molempia alumiinilaatua oli käytetty yrityksen valmistamissa prototyypeissä myös aikaisemmin ja lisäksi alumiinilaadut ovat ominaisuuksiltaan melko lähellä toisistaan. Tehonjakoyksiköt oli tarkoitus valmistaa yrityksen omilla työstökoneilla, kuten myös aikaisemmissa projekteissa valmistetut yksiköt, joten materiaalin työstöominaisuudet vaikuttivat materiaalivalintaan. 6082 alumiini sisältää piitä ja magnesiumia, kuten kaikki 6000-sarjan alumiiniseokset. Pii laskee alumiinin sulamispistettä sekä juoksevuutta ja magnesium parantaa seoksen lujuutta sekä kovuutta. Yhdessä pii ja magnesium parantavat seoksen korroosionkestoa. 6000-sarjan seokset ovat lämpökäsiteltäviä ja lisäksi ne ovat helposti työstettäviä, mutta kuitenkin melko lujia. 6082 alumiiniseos on 6000-sarjan lujin alumiini ja se kestää hyvin kuormitusta. Lisäksi kaikilla 6000-sarjan alumiineilla on lisätyn magnesiumin ansiosta hyvä korroosionkestävyys, joka on tärkeä ominaisuus myös tässä projektissa. 7075 alumiiniseos kuuluu 7000-sarjaan, jonka keskeisin seosaine on sinkki. Kun sinkkiä lisätään 1-8 % ja magnesiumia lisätään tätä pienempi prosenttiosuus, niin saavutetaan vahvoja lämpökäsiteltäviä seoksia. 7000-sarjan alumiiniseoksia on usein käytetty erittäin kuormitetuissa kappaleissa. [32]

Valitulle alumiinille tehdään lämpökäsittelynä liuotushehkutus sekä keinovanhennus. Tästä lämpökäsittelystä käytetään tunnusta T6. Liuotushehkutuksen aikana materiaaliseos lämmitetään nopeasti liuotuslämpötilaan, joka riippuu alumiiniseoksen liuotussuhteesta. Tämä lämpötila on tavallisesti 500 °C – 530 °C. Liuotusaika riippuu kappaleen koosta sekä muodosta. Tämän jälkeen kappale jäähdytetään nopeasti veden avulla, jonka

lämpötila on 50 °C. Seosaineet pyrkivät kuitenkin erkaantumaan metalliyhdisteiksi ja tätä kutsutaan vanhenemiseksi. Keinovanhennuksen avulla pyritään estämään seosaineiden erkautuminen alumiinista. T6 lämpökäsittelyssä vanhentaminen tehdään nopeutetusti ja käsittely sisältää kolme vaihetta: liuotushehkus, jäähditys ja keinovanhentaminen, jonka jälkeen kappale viilennetään ilmassa. [5] Taulukko 5 esittää 6082 ja 7075 alumiiniseosten keskeisiä ominaisuuksia. Kuten taulukosta huomataan, 7075 alumiinin myötö- ja vetojännitykset ovat huomattavasti suurempia kuin 6082 alumiinilla. 6082 ominaisuudet havaittiin kuitenkin riittäviksi projektin käyttökohteisiin, joten materiaaliksi valittiin EN AW 6082 T6 alumiiniseos. Tehonjakoyksiköt päätettiin valmistaa EN AW 6082 T6 alumiinista muun muassa sen hyvien ominaisuuksien ansiosta sekä siitä syystä, että sen tiedettiin soveltuvan hyvin kyseiseen käyttötarkoitukseen. Lisäksi DA-Design Oy:llä on kokemusta EN AW 6082 T6 alumiiniseoksen työstämisestä, joten sen soveltuvuus tehonjakoyksiköihin tiedettiin jo ennen kappaleiden koneistamista.

Taulukko 5. Alumiiniseosten ominaisuudet [32]

Alumiiniseos	EN AW 6082 T6	EN AW 7075 T6
Myötöjännitys	255 MPa	450 MPa
Vetojännitys	310 MPa	510 MPa
Venymälujuus	6 %	8 %
Tiheys	2,70 g/cm ³	2,81 g/cm ³
Lämpölaajenemis-kerroin	24	24

Kiinnitystarvikkeina käytettiin suurimmaksi osaksi teräksestä valmistettuja komponentteja. Kiinnitystarvikkeisiin tehonjakoyksiköissä kuuluu suurimmaksi osaksi ruuveja sekä aluslevyjä. Niiden materiaaliksi valittiin A4-luokan teräs muun muassa sen keveyden ja lujuuden ansiosta. Lisäksi A4-luokan teräs kestää todella hyvin korroosiota. A4-teräsluokka tunnetaan myös haponkestävänä teräksenä, koska materiaali kestää useita happoja lämpötilasta riippuen. Vaatimusmäärittely ohjasi kiinnitystarvikkeiden valintaa sekä käytettäviä materiaaleja. Lisäksi kaikki kiinnitystarvikkeet piti hankkia hyväksytyiltä valmistajilta, joilla on sertifikaatit valmistaa avaruuskäyttöön soveltuvia komponentteja. Suurten rasitusten takia komponenttien valinnassa huomioitiin varmuuskertoimet muun muassa lujuuden suhteen. Lisäksi kiinnitystarvikkeiden sijoittelulla ja lukumäärällä on vaikutusta myös yksiköiden RF-ominaisuuksiin, joten myös nämä asiat piti huomioida yksiköiden suunnittelussa.

Tehonjakoyksiköissä käytettiin TMM6 (engl. *Thermoset microwave material*) materiaalista valmistettuja piirilevyjä. Piirilevyjen paksuus oli 0,635 mm ja niiden massa oli hyvin pieni suhteessa yksiköiden kokonaisuun. Tehonjakoyksiköstä riippuen piirilevyjen

massat olivat noin 0,5 – 1,5 grammaa. Piirilevyissä käytettävän materiaalin x-y-suuntainen lämpölaajenemiskerroin on 18 ja z-suuntainen lämpölaajenemiskerroin on 26 [24]. Lämpötilan kasvaessa piirilevy laajenee siis x- ja y-suunnissa alumiinia vähemmän. Z-suunnassa lämpölaajenemiskerroin taas on lähes sama kuin alumiinilla. Suunnittelussa pitää huomioida erityisesti x- ja y-suunnissa tapahtuvat lämpölaajenemiserot, jotta lämpötilamuutokset eivät aiheuta ongelmia.

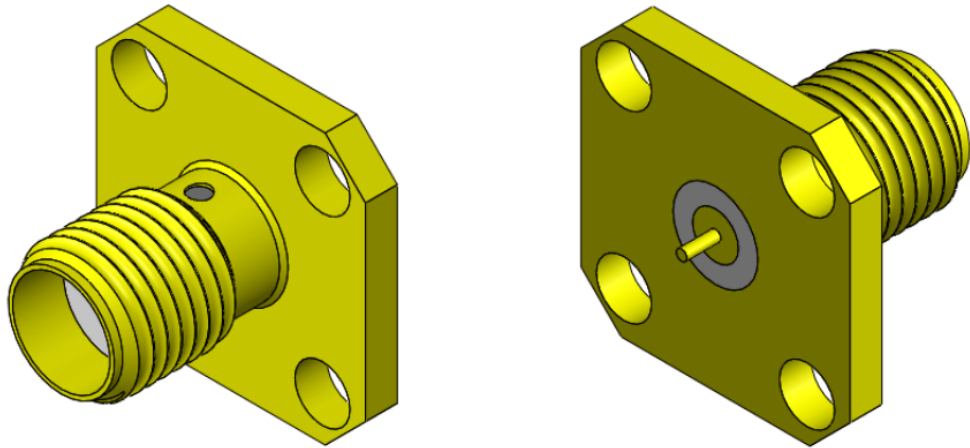
4.2 Yksiköiden SMA-liittimet

Tehonjakoyksiköissä käytettäväksi SMA-liittimiksi oli projektin alussa kaksi eri vaihtoehtoa. Eri valmistajien liittimet eroavat mekaanisesti hieman toisistaan ja tämä vaikuttaa myös yksiköiden mekaniikkasuunnitteluun. Molemmat liittintyyppit vaativat hieman erilaisen mekaanisen rakenteen, joten eri liittintyypeille pitäisi valmistaa omat yksiköt. Liittimet kiinnitetään tehonjakoyksiköihin neljällä ruuvilla niin, että yksikön kannessa ja pohjassa on molemmissa kaksi kiinnitysreikää. Tämä kiinnitystapa ohjasi yksiköiden mekaniikkasuunnittelua projektin alusta lähtien, koska liittimien kiinnitys neljällä ruuvilla vaati ennalta määritettyjä ominaisuuksia yksiköiden rakenteelta. Yksiköistä suunniteltiin diplomityössä vain toiselle SMA-liittimelle soveltuvat mallit, koska arvioitiin, että tämä liittintyyppi olisi käytössä myös lopullisissa versioissa. Tämä liitin on Radiall-nimisen yrityksen valmistama. Radiall on ranskalainen yritys, joka valmistaa muun muassa liittimiä erilaisiin elektronisiin sovellutuksiin ja se tarjoaa myös tuotteita, jotka ovat hyväksytyjä avaruuskäyttöön [23].

Kuva 7 esittää Radiall:n valmistaman SMA-liittimen 3D-mallia. Laippakantainen liitin kiinnitetään yksikön kanteen ja pohjaan yhteensä neljällä M2.5 koon ruuvilla. Kiinnitysreiat ovat symmetrisesti liittimen ympärillä ja korkeus sekä leveysuunnassa reikien etäisyys toisistaan on 8,64 mm. Yksiköiden rakenteesta johtuen liitin pitää kiinnittää yksikön pohjaan ennen kannen kiinnittämistä. Liittimen keskijohdin juotetaan kiinni yksikön sisällä olevaan piirilevyyn, joten liittimet pitää asentaa paikalleen ennen kannen asennusta. Kansi pitää siis pystyä asentamaan pohjakappaleen päälle, vaikka pohjakappaleen kahdella tai kolmella sivulla olisi jo liittimiä asennettuna. Kannen asentamisen jälkeen liittimet kiinnitetään vielä kahdella ruuvilla yksikön kanteen. Tämä asennustapa asettaa omat haasteensa kokoonpanon suorittamiselle, koska kantta asennettaessa liittimiä ei voi taivuttaa ulospäin. Tässä tilanteessa liittimien keskijohtimien juotossauma saattaisi revetä ja saumat pitäisi juottaa uudestaan.

Piirilevyille jyrksitään pohjakappaleisiin urat, jotta piirilevyt pysyvät paikallaan kovassakin rasituksessa. Käytettävien piirilevyjen paksuus on 0,635 mm ja aikaisemmin valmistettujen prototyyppien sekä testauksen avulla uran syvyydeksi on valittu 0,9 mm. Uran syvyyteen vaikuttaa myös käytettävien liittimien rakenne. Liittimien keskijohtimien pitää olla oikealla korkeudella suhteessa piirilevyyn, jotta liittimet pystytään juottamaan kiinni piirilevyihin. Liittimien keskijohtimien korkeuteen tosin voidaan vaikuttaa myös liitti-

mien kiinnitysreikien sijoittelulla. Valittu piirilevyn urasyvyys perustuu siihen, että piirilevyn ja liittimen välinen juotos saadaan riittävän lujaksi, kun juotokselle annetaan oikea määrä venymätilaa. Lisäksi liittimien keskijohtimet haluttiin sijoittaa tarkasti pohjakappaleen yläpinnan tasolle.

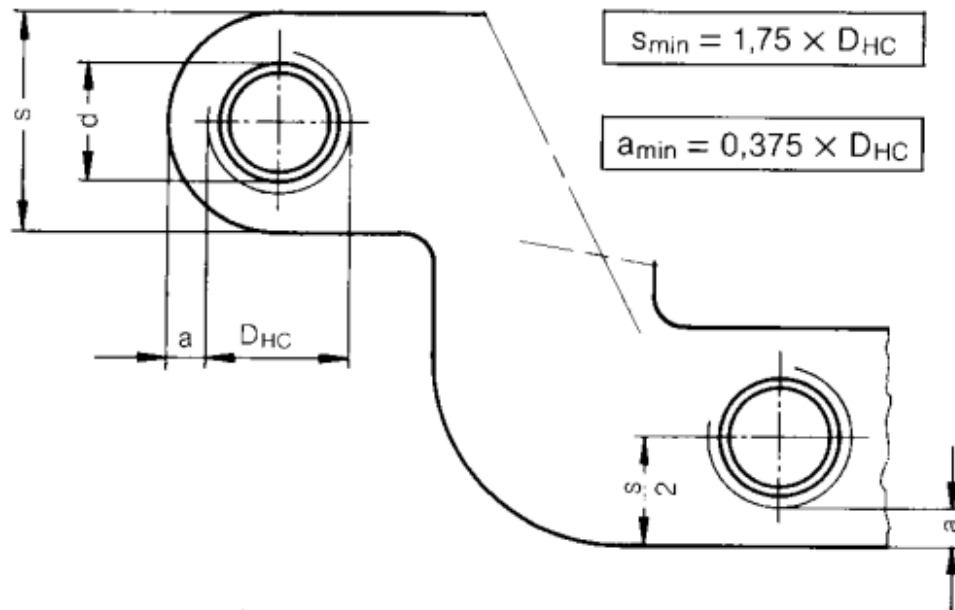


Kuva 7. Radiaal:n SMA-liitin

4.3 Liittimien ja kannen kiinnitys kierre-elementtien avulla

Liittimien sekä yksikön kannen kiinnityksessä käytettiin hyväksi Helicoil-kierre-elementtejä. Kierre-elementtejä käytettiin kiinnityksen varmistamiseksi sekä mahdollisten kierreiden rikkoutumisen estämiseksi. Esimerkiksi kokoonpanovaiheessa mahdollinen kierre-elementin rikkoutuminen voidaan korjata vaihtamalla uusi kierre-elementti. Ilman erillisiä kierre-elementtejä koko kierrereikää ei voisi käyttää kierteen vaurioitumisen jälkeen. Kierre-elementtien käyttö pitää ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa, koska elementit vaativat oikean kokoisen kierrereian. Lisäksi elementit vaativat riittävän seinämävahvuuden reiän ympärille. Yksiköiden kannet sekä SMA-liittimet kiinnitettiin DIN 912 M2.5 koon ruuveilla. Kiinnitystä varten kappaleisiin piti koneistaa kierre-elementeille soveltuvat reiät, jotta kierre-elementtien asennus oli mahdollista. Kierteen halkaisija sekä kierteen pituus mitoitettiin kierre-elementtien toimittajan ohjeiden mukaisesti.

Kuva 8 esittää Helicoil-elementin asennusreiän mitoitusta. Helicoil-elementtien käyttö edellytti, että reiän ympärillä olevan seinämän vahvuus s olisi vähintään $0,375 \times D_{HC}$, jossa D_{HC} on vastaanottokierteen ulkohalkaisija. M2.5 koon ruuvia käytettäessä kierteen ulkohalkaisija D_{HC} on 3,08 mm. Kuvassa esitetty s_{min} on tässä tapauksessa 5,4 mm. Asennusreiän keskipisteen etäisyys kappaleen reunasta pitää olla siis vähintään puolet s_{min} arvosta eli 2,7 mm. [13]



Kuva 8. Reikien mitoitusohje Helicoil-kierre-elementeille [13]

Kiinnityksessä käytettiin Helicoil Plus screwlock -mallia, jonka ruuvia puristava vyöhyke lukitsee ruuvin paikalleen. Screwlock-mallin avulla varmistettiin ruuvin lukittuminen paikalleen ja toisaalta estettiin sen aukeaminen erilaisissa rasituksissa. Käytettävät kierre-elementit on valmistettu AISI 304 teräksestä, joka kestää hyvin korroosiota. [13] Kierre-elementtien vaatimien reikien sijoittelua sekä suunnittelua on käsitelty tarkemmin seuraavissa luvuissa. Kierre-elementtien käyttö kuitenkin asettaa erikoisvaatimuksia erityisesti kannen kiinnitysreikien sijoittelulle, joten suunnitteluohjeiden huomioiminen on hyvin tärkeää. Kierre-elementtiä ei välttämättä pystytä asentamaan, jos asennusreikä on koneistettu liian lähelle kappaleen reunaa tai jos kierre-elementin asennuskierre ei ole tarpeeksi syvä.

Kansien kiinnityksessä käytettiin 3,75 mm (1,5 d) pitkiä kierre-elementtejä, koska näiden avulla saavutettiin luja ja vaatimukset täyttävä kiinnitys. Tätä pidempien kierre-elementtien käyttö ei lisäisi kiinnityksen lujuutta, koska käytettävien M2.5 kiinnitysruuvien murtojuuus aiheuttaisi kiinnityksen pettämisen ennen kierre-elementtien hajoamista. Pidempien kierre-elementtien käyttö mahdollistaisi pidempien kiinnitysruuvien käytön, mutta tällä ei siis saavutettaisi lujempaa kiinnitystä. Liittimien kiinnityksessä käytettiin 2,5 mm (1 d) pitkiä kierre-elementtejä, koska pidempien kierre-elementtien käyttö olisi vaatinut huomattavasti monimutkaisempia pohjakappaleita. Pohjakappaleiden muokkaaminen olisi kasvattanut yksiköiden massaa, jolloin vaatimusten täyttäminen olisi ollut huomattavasti vaikeampaa. Liittimien sekä kansien kiinnityksessä kiinnitysruuvien pituus valittiin käytettyjen kierre-elementtien mukaan. Kiinnitysruuvien pituuden piti riittää koko kierre-elementin matkalle, mutta tätä pidempien ruuvien käytöstä ei olisi ollut hyötyä kiinnityksen lujuuden kannalta. Lisäksi pidempien ruuvien käyttö olisi kasvattanut yksiköiden massaa.

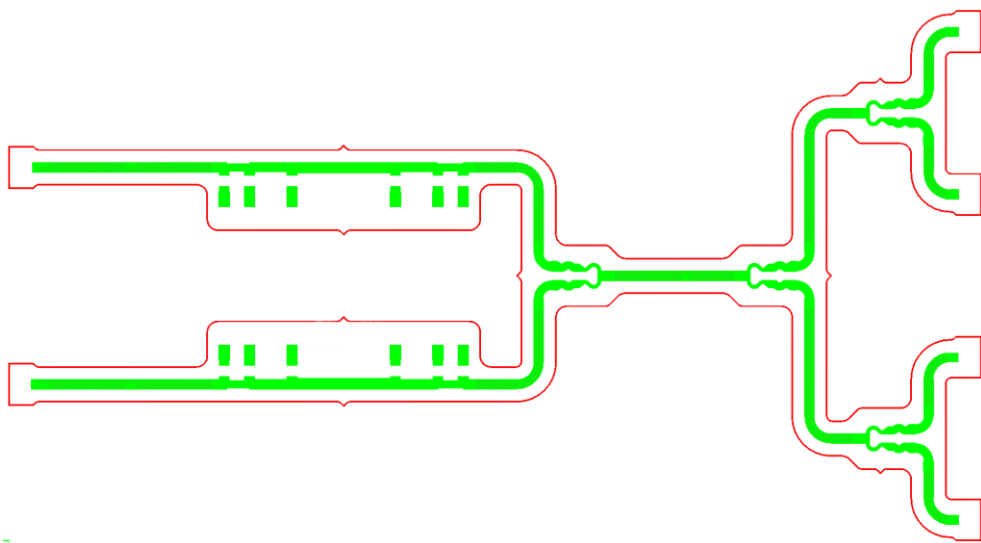
4.4 Tehonjakoyksiköiden pohjan ja kannen suunnittelu

Varsinainen mallinnustyö tässä projektissa liittyi yksiköiden pohjan sekä kannen suunnitteluun, koska muut yksiköissä käytettävät kappaleet olivat valmiita komponentteja. Yksiköiden suunnittelu aloitettiin konvertoimalla piirilevyn Dxf-tiedosto suunnitteluohjelmassa käytettäväksi 3D-malliksi. Piirilevyn 3D-mallin ympärille suunniteltiin tehonjakoyksikön pohjakappale. Tehonjakoyksikön pohjakappaleen suunnittelu aloitettiin pursottamalla umpinainen kappale piirilevyn 3D-mallin ympärille. Tämä pursotettu kappale mallintaa yksikön pohjakappaleen ulkoreunoja ja sen pitää täyttää vaatimusmäärittelyssä annetut vaatimukset suurimpien sallittujen mittojen suhteen. Mallinnetun pohjakappaleen perusteella voidaan mallintaa myös kansi, joka mukailee pohjakappaleen muotoja. Kolmen eri tehonjakoyksikön suunnittelua on kuvattu tarkemmin seuraavissa luvuissa. Kaikki projektioita sisältävät kuvat on esitetty eurooppalaisen projisointitavan mukaan ja kaikki kuvissa näkyvät mitta-arvot ovat millimetrejä.

4.4.1 2:4 Tehonjakoyksikkö

Tämän tehonjakoyksikön tehtävä on jakaa kaksi tulosignaalia neljäksi lähteväksi signaaliksi. Tässä jakajassa on siis yhteensä kuusi SMA-liitintä ja ne on sijoitettu niin, että yhdellä sivulla on kaksi liitintä ja vastakkaisella sivulla neljä liitintä. Vaatimusmäärittelyn mukaan tämä tehonjakoyksikkö piti kiinnittää satelliitin runkoon neljällä ruuvilla, mutta ruuvien sijainnille ei ollut tarkkaa määritelmää.

Kuva 9 esittää piirilevyn Dxf-tiedostoa, jonka avulla konvertoidaan 3D-malli. Kyseessä on siis 2:4 tehonjakoyksikkö, jossa kaksi tulosignaalia jaetaan neljälle ulostuloportille. Dxf-tiedostossa punaisella näkyvät piirilevyn ulkoreunat, joita hyödynnetään tehonjakoyksikön mekaniikkaa suunnitellessa.



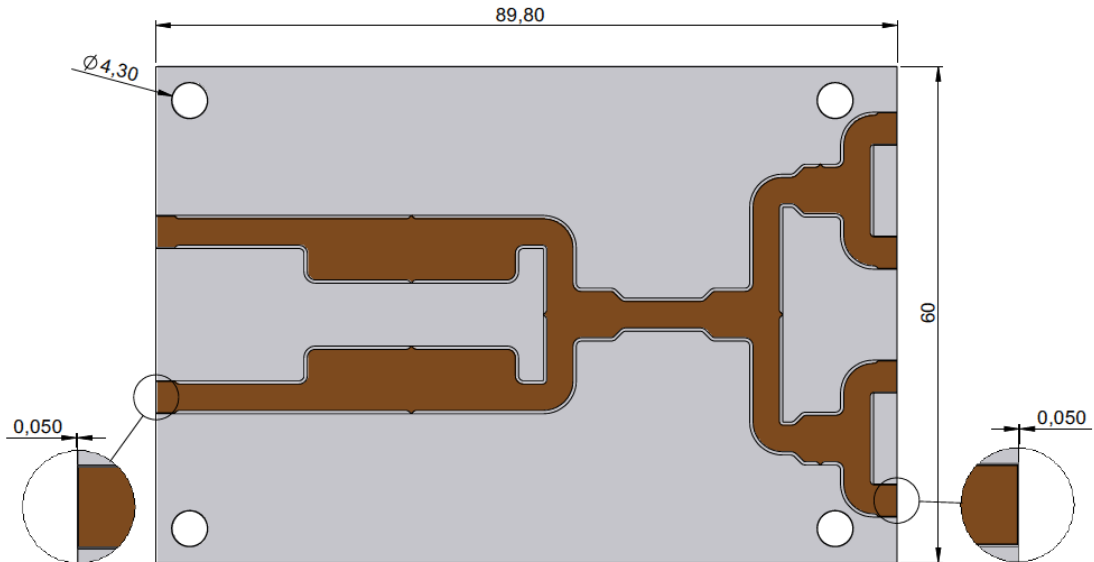
Kuva 9. 2:4 Tehonjakoyksikön piirilevyn Dxf-tiedosto

Pohjakappaleen suunnittelu aloitettiin pursottamalla sopivan kokoinen suorakulmainen kappale piirilevyn 3D-mallin ympärille. Pohjakappaleesta pursotettiin 8 mm korkea, koska tämä mahdollisti liittimien kiinnityksen oikealle korkeudelle. Vaatimusmäärittelyn mukaan liittimien keskijohtimien piti olla vähintään 8 mm korkeudella yksikön pohjasta. Liittimien keskijohtimien vaadittuun korkeuteen vaikutti se, että liittimiin piti myöhemmin pystyä kiinnittämään piidioksidi kaapelit. Tällä mitoituksella keskijohtimet asettuivat noin 8,2 mm korkeudelle yksikön pohjasta. Pohjakappaleen pursottamisen jälkeen piirilevyn 3D-malli asetettiin kappaleen keskelle. Tämän jälkeen yksikön pohjaan mallinnettiin piirilevyn muotoinen 4,0 mm leveä ura, johon piirilevy myöhemmin liimattiin. Liimauksen avulla varmistettiin, että piirilevy pysyy paikallaan kovassakin rasituksessa. Uran leveys valittiin niin, että piirilevy mahtui uraan ja lisäksi mitoituksessa huomioitiin mahdollinen lämpölaajeneminen. Käytettävässä piirilevyssä oli 0,94 mm leveä mikroliuska, jonka toiminnan kannalta oli tärkeää, että uran leveys oli ainakin 2,5-kertainen suhteessa mikroliuskan leveyteen. Liian leveä ura taas voisi aiheuttaa RF-signaalin kannalta haitallisia koteloresonansseja, jotka vaikuttaisivat yksiköiden toiminnallisuuteen. Uran syvyudeksi valittiin 0,90 mm, jotta liittimien keskijohtimet asettuisivat oikealle korkeudelle suhteessa piirilevyyn ja lisäksi juotoksille jäisi riittävästi venymätilaa.

Yksikön rakenne suunniteltiin niin, että pohjakappale on liittimien suunnassa 0,10 mm piirilevyä leveämpi. 2:4 jakajassa on liittimiä kahdella sivulla, joten pohjakappaleen reunan ja piirilevyn väliin jää 0,05 mm tilaa jokaisen liittimen kohdalla. Tämä väli suunniteltiin, jotta liittimien keskijohtimet asettuisivat oikealle kohdalle suhteessa piirilevyyn ja juotoksista tulisi riittävän lujia. Useissa yksiköissä liittimiä on ainoastaan kahdella sivulla, joten näissä tapauksissa piirilevyn koko vaikuttaa yksikön mittoihin vain toisessa suunnassa. Suunniteltu 0,05 mm väli piirilevyn ja yksikön reunan välissä vaatii hyvin tarkkaa valmistustoleranssia erityisesti yksikön pituuden kohdalla. 0,05 mm välin toteutumiseen vaikuttavat pohjakappaleen toleranssien lisäksi piirilevyn sekä koneistuskeskuksen toleranssit. Pohjakappaleen pituus liittimien suunnassa merkittiin tekniseen piirustukseen tarkoilla toleranssiarvoilla, jotta suunniteltu mitoitus toteutuisi mahdollisimman tarkasti.

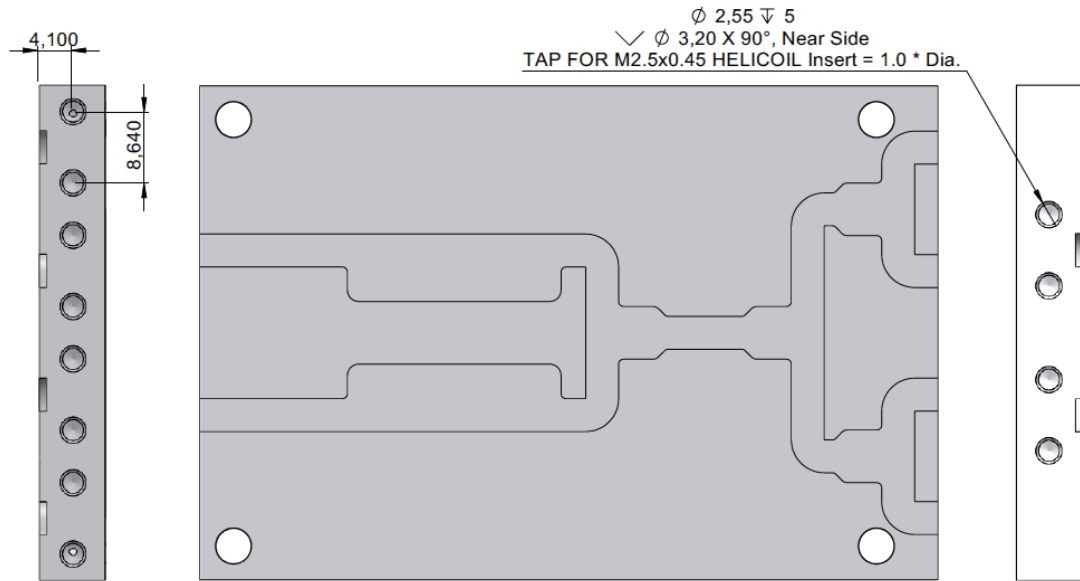
Pursotettuun pohjakappaleeseen mallinnettiin kaksi kiinnitysreikää molemmille puolille piirilevyä. Kiinnitys satelliitin runkoon tehdään vaatimusmäärittelyn mukaisesti M4 koon ruuveilla, joten kiinnitysreikien halkaisijaksi tuli 4,30 mm. Tässä yksikössä kiinnitysreikien sijaintia ei ollut määritelty vaatimusmäärittelyssä, joten massan minimoimiseksi kiinnitysreiät sovitettiin mahdollisimman lähelle piirilevyn uraa. Käytännössä kiinnitysreikien ja piirilevyllä jyrstävän uran väliin jätettiin minimissään 1,0 mm paksuinen seinämä, jotta kappaleen koneistus onnistuu ja kappaleen rakenne pysyy riittävän lujana. Yksikön pohjan ulkoreunat mitoitettiin 4 mm päähän kiinnitysreikien keskikohdista, jotta kiinnitykseen käytettävät M4 koon aluslevyt eivät ylitä yksikön reunaa. Kiinnitysreikien sijoittelussa huomioitiin aluslevyn halkaisijan lisäksi aluslevyn valmistustoleranssi.

Kuva 10 esittää tilannetta, jossa 2:4 jakajan piirilevyn ympärille on pursotettu suorakulmainen kappale, joka on 0,10 mm piirilevyä leveämpi. Lisäksi kappaleeseen on mallinnettu yksikön kiinnitysreiät. Kuvassa on esitetty myös kappaleen ulkomitat. Kuten kuvasta voidaan huomata, yksikön vasempaan reunaan asennetaan kaksi SMA-liitintä ja yksikön oikeaan reunaan neljä SMA-liitintä.



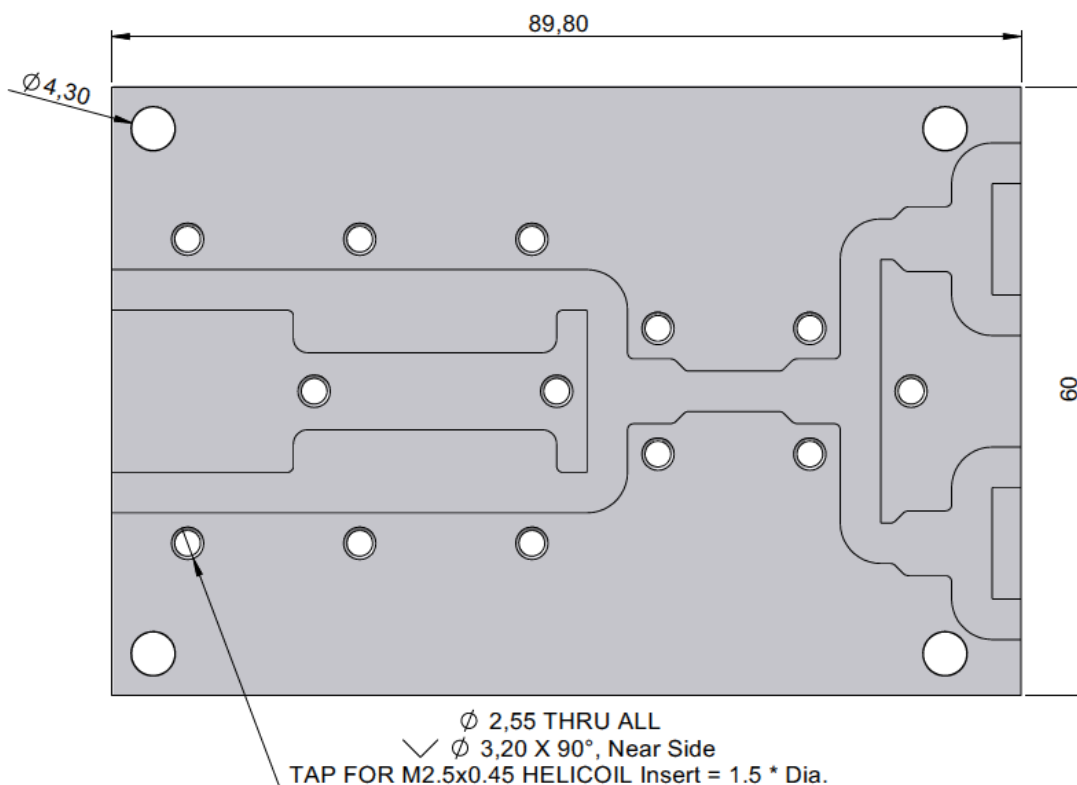
Kuva 10. 2:4 Jakajan pursotettu pohjakappale

Yksikön ulkomuotojen, kiinnitysreikien sekä piirilevyn uran mallintamisen jälkeen pohjakappaleeseen mitoitettiin liittimille tarvittavat kiinnitysreiät. Kiinnitysreikien mitoituksessa huomioitiin liittimien kiinnityslaipoissa olevat reiät ja näin kiinnitysruuvien kooksi valittiin M2.5. Pohjakappaleeseen mallinnettiin piirilevyä varten 0,90 mm syvä ura, jotta liittimien keskijohtimet asettuivat juuri oikealle korkeudelle suhteessa piirilevyyn. Prototyyppien sekä testauksen perusteella kiinnitysreiät mitoitettiin 4,10 mm etäisyydelle pohjakappaleen yläpinnasta. Liittimien kiinnitysreikien sijainti, piirilevyn paksuus sekä piirilevyn uran syvyys vaikuttivat siis kaikki toisiinsa. Kuva 11 esittää liittimien kiinnitysreikien mitoitusta. Kuvassa on esitetty kolme projektiota yksikön pohjakappaleesta. Kuvasta voidaan havaita myös kappaleeseen piirilevyä varten mallinnettu ura.



Kuva 11. Liittimien kiinnitysreikien mitoitus

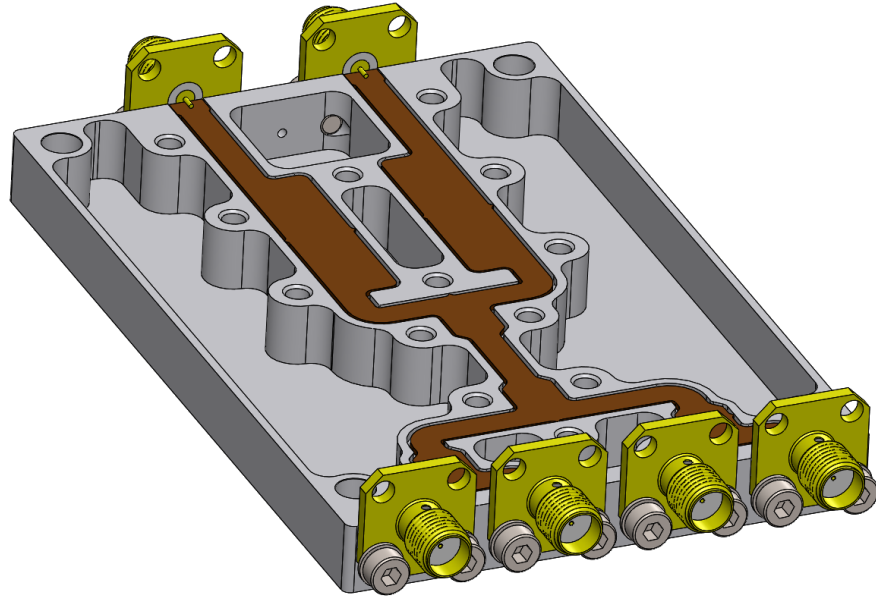
Yksikön ulkomittojen sekä yksikön ja liittimien kiinnitysreikien sijainnin mallintamisen jälkeen suunniteltiin kannen kiinnitys pohjakappaleeseen. Kiinnitys oli mahdollista suunnitella ennen kannen mallintamista, koska kannen muoto ja rakenne seuraavat hyvin tarkasti pohjan muotoja. RF-ominaisuuksien kannalta oli tärkeää, että kannen kiinnitysruuvit tulivat maksimissaan noin 20 mm etäisyydelle toisistaan. Jos mahdollista, kiinnitysreiät voisi sijoitella vielä lähemmäs toisiaan. Lisäksi kiinnitysreiät pitäisi sijoitella mahdollisimman lähelle piirilevyn uraa, jotta yksiköstä tulisi mahdollisimman tiivis, eikä RF-signaali pääsisi vuotamaan ulos yksiköstä. Kuva 12 esittää kiinnitysreikien sijoittelua pohjakappaleeseen. Näiden kiinnitysreikien avulla yksikön kansi kiinnitetään pohjakappaleeseen. Kiinnitysreiät sijoitettiin noin 15 mm etäisyydelle toisistaan, jotta yksiköstä tulisi RF-ominaisuuksien kannalta riittävän tiivis. Kannen kiinnitykseen käytettiin yhteensä 13 kappaletta M2.5 ruuvia ja lisäksi kansi kiinnittyy paikalleen yksikön läpi menevillä M4 koon ruuveilla. Näillä läpi menevillä ruuveilla yksikkö kiinnitetään satelliitin runkoon. Kuvassa on myös esitetty koneistusohjeet kiinnitysruuveille. Helicoil-elementit vaativat oikean kokoisen kierteen ja se on huomioitu reikien mitoituksessa. Yksiköissä käytettiin 3,75 mm pitkiä Helicoil-elementtejä, joten kierteistä piti tehdä riittävän pitkiä. Kierrereiät mitoitettiin Helicoil-elementtien valmistajan toimittaman ohjeen mukaisesti. Kiinnitysreiät tehtiin kappaleen läpi, jotta massa saatiin mahdollisimman alhaiseksi. Reikiin ei kuitenkaan koneistettu kierrettä koko matkalle, koska kierre-elementit vaativat minimissään ainoastaan 3,75 mm pitkän kierteen.



Kuva 12. Kiinnitysreikien mallinnus pohjakappaleeseen

Tehonjakoyksikön kansi mallinnettiin hyödyntämällä pohjakappaleen muotoja. Kannesta tehtiin kuitenkin liittimien suunnassa 0,10 mm kapeampi kuin pohjakappaleesta. Kavenus tehtiin, jotta kannen asennus liittimien väliin onnistuisi niin, että liittimien juotokset eivät vaurioituisi. Kannesta suunniteltiin 7 mm korkea, koska koko yksikön korkeus sai olla korkeintaan 15 mm. Tässä ei tarvinnut kuitenkaan huomioida yksikön päälle tulevia kiinnitysruuvien kantoja, jotka lisäsivät korkeutta noin 3 mm. Toisaalta kannen piti olla ainakin 6,5 mm korkea, jotta liittimien laipat eivät ylittäneet kannen yläreunaa. Kannen mallinnuksessa tärkeitä yksityiskohtia olivat muun muassa piirilevyn yläpuolelle tuleva ura sekä liittimien kiinnitysreikien sijoittelu. Piirilevyn yläpuolelle mallinnettiin 4 mm syvä ura, koska prototyyppien avulla tehdyn testauksen perusteella tämä uran syvyys oli optimaalinen RF-ominaisuuksien kannalta. Uran syvyyden piti olla ainakin 4-kertainen suhteessa piirilevyn paksuuteen. Toisaalta ura ei saanut olla liian suuri, koska tämä saattaisi aiheuttaa haitallisia signaalin resonansseja. Liittimien kiinnitysreiät mitoitettiin niin, että liittimet pystytään kiinnittämään kanteen sen jälkeen, kun kansi on kiinnitetty pohjakappaleeseen.

Kannen asennusvaiheessa kansikappaleen on tärkeä pysyä paikallaan, koska pohjakappaleeseen on kiinnitetty liittimet jo ennen kannen asennusta. Kuva 13 esittää tilannetta, jossa yksikkö odottaa kannen asennusta. Kansi pitää sovittaa tarkasti omalle paikalleen, koska liittimien keskijohtimet ovat jo juotettuina kiinni piirilevyyn. Liittimien liikuttelu saattaa johtaa juotosten repeämiseen, joten kannen kohdistus ja kiinnitys pitää suorittaa hyvin tarkasti.



Kuva 13. Liittimet ja piirilevy kiinnitettyinä jakajan pohjakappaleeseen

Käytettävien SMA-liittimien kannalta tehonjakoyksikön rakenne olisi optimaalinen, jos liittimet kiinnitettäisiin neljällä ruuvilla samaan kappaleeseen. Pohjakappaletta korotettaisiin esimerkiksi niin, että liittimien kaikki neljä ruuvia pystyttäisiin kiinnittämään pohjakappaleeseen. Tämä vaatisi kuitenkin hyvin monimutkaista kansikappaletta, joka saattaisi aiheuttaa ongelmia valmistuksen sekä kokoonpanon suhteen. Vaatimusmäärittelyssä oli määritelty yksikön maksimikorkeus, joten pohjakappaleen korottamisen jälkeen kannesta pitäisi suunnitella hyvin ohut. Liittimet olisi hyvin vaikea juottaa kiinni korotettuun pohjakappaleeseen ja ohuen kansikappaleen kiinnitys aiheuttaisi luultavasti ongelmia. Hyvien RF-ominaisuuksien takia yksiköissä käytetään laippakantaisia SMA-liittimiä, mutta tämä myös johtaa siihen, että tehonjakoyksiköiden suunnittelussa ei ole pystytty käyttämään optimaalisia mekaanisia ratkaisuja.

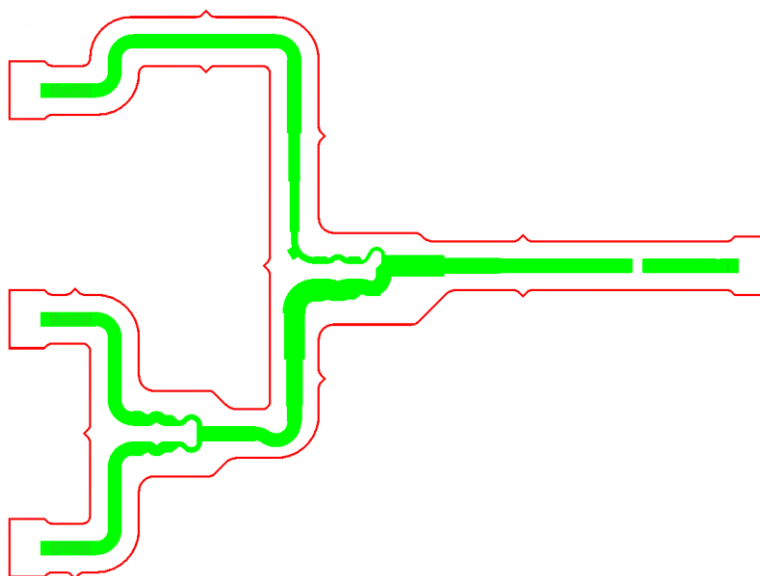
Yksiköiden massan minimoimiseksi kappaleisiin suunniteltiin kevennyksiä, joissa piirilevyuran ja yksikön reunojen välille jäänyt ylimääräinen materiaali koneistettiin pois. Piirilevyuran ympärille tehtiin siis kevennyksuria, joiden avulla yksiköiden massa saatiin vaatimusmäärittelyn vaatimalle tasolle. Yksiköihin suunniteltuja kevennyksiä sekä niiden vaikutuksia massaan on käsitelty tarkemmin luvussa 4.6, jossa käsitellään erityisesti kevennyksien vaikutusta 2:4 jakajan massaan. Kuvasta 13 voidaan havaita yksikön pohjakappaleen sisäpuolelle tehdyt neljä kevennyksuria. Lisäksi kevennyksurat tehtiin 2:4 jakajassa pohjakappaleen alapuolelle sekä kannen sisäpuolelle. Kuvan yläreunassa kahden liittimen väliin on mallinnettu halkaisijaltaan 1 mm ilmareikä, jonka avulla toteutetaan paineentasaus yksikön sisällä. Ilmareikä on toteutettu vaatimusmäärittelyn mukaisesti ja sen ansiosta yksikön sisäpuolinen paine pysyy samana yksikön ulkopuolisen paineen kanssa. Yksikön sisälle muodostuva alipaine saattaisi olla haitallista yksikön rakenteille, joten mallinnuksessa oli tärkeä huomioida myös kevennyksurien paineentasaus. Vaatimusmäärittelyn mukaan paineentasaus piti toteuttaa yksikön kyljessä olevan reiän avulla.

Liian suuri reikä saattaisi kuitenkin johtaa RF-signaalin karkaamiseen, joka olisi haitallista yksikön toiminnallisuuden kannalta. Ilmareikä on siis toteutettu niin, että se täyttää vaatimusmäärittelyn vaatimukset, mutta ei kuitenkaan vaikuta tehonjakoyksikön RF-ominaisuuksiin.

Kappaleen kanteen mallinnettiin vaaditut tunnistetiedot, kuten liittimien sekä yksikön numerointi. Merkintä toteutettiin vaatimusmäärittelyn mukaisesti ja näitä vaatimuksia on käsitelty kappaleessa 3.3.1. Jokainen liitin merkittiin omalla tunnisteellaan ja kanteen merkittiin lisäksi yksikön tunnus. Jokaiseen valmistettavaan kanteen merkittiin myös sarjanumero, joka toteutettiin juoksevan numeroinnin avulla. Nämä merkinnät toteutettiin jokaiseen valmistettavaan tehonjakoyksikköön.

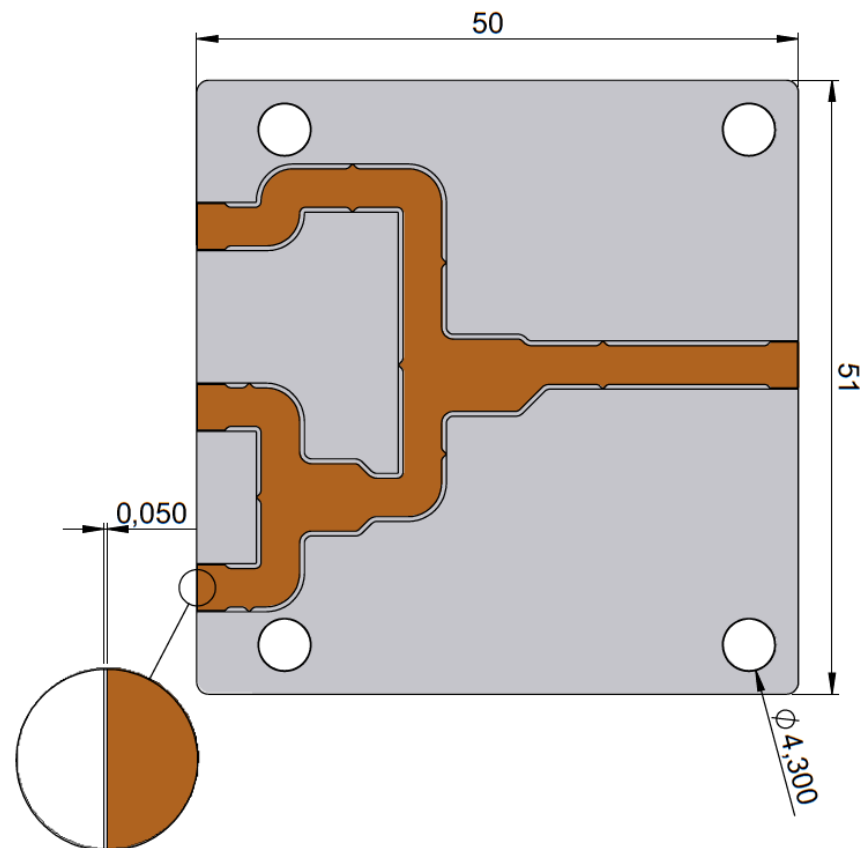
4.4.2 1:3 Tehonjakoyksikkö

Tämä tehonjakoyksikkö jakaa tulevan signaalin kolmeksi lähteväksi signaaliksi. Yksikön yhdellä sivulla on siis yksi SMA-liitin ja vastakkaisella sivulla on rinnakkain kolme SMA-liitintä. Vaatimusmäärittelyn mukaan yksikön maksimitat olivat 58x50x18 mm. Piirilevyn mitoitus suunniteltiin niin, että vastakkaisten sivujen liittimien etäisyys oli 50 mm, joka on yksikön maksimimita. Piirilevystä tehtiin siis 0,1 mm kapeampi, jotta piirilevyn molemmille puolille jäi 0,05 mm tyhjää tilaa. Mallinnetun yksikön leveydeksi tuli 51 mm ja korkeudeksi 15 mm, joten yksikkö täytti kokonsa puolesta sille asetetut vaatimukset. Yksikön maksimimassaksi oli määritelty 75 grammaa. Vaatimusmäärittelyssä oli määritelty myös kiinnitysreikien etäisyys sekä koko. Kiinnitysreikien etäisyyttä jouduttiin kuitenkin hieman muuttamaan, koska yksiköstä suunniteltiin vaatimusmäärittelyn maksimimittoja kapeampi. Yksikön suunnittelu aloitettiin samalla tavalla kuin 2:4 jakajan suunnittelu. Piirilevyn Dxf-tiedostosta konvertoitiin 3D-malli, jonka ympärille pursoitettiin yksikön pohjakappale. Kuva 14 esittää 1:3 jakajan piirilevyn Dxf-tiedostoa.



Kuva 14. 1:3 Tehonjakoyksikön piirilevyn Dxf-tiedosto

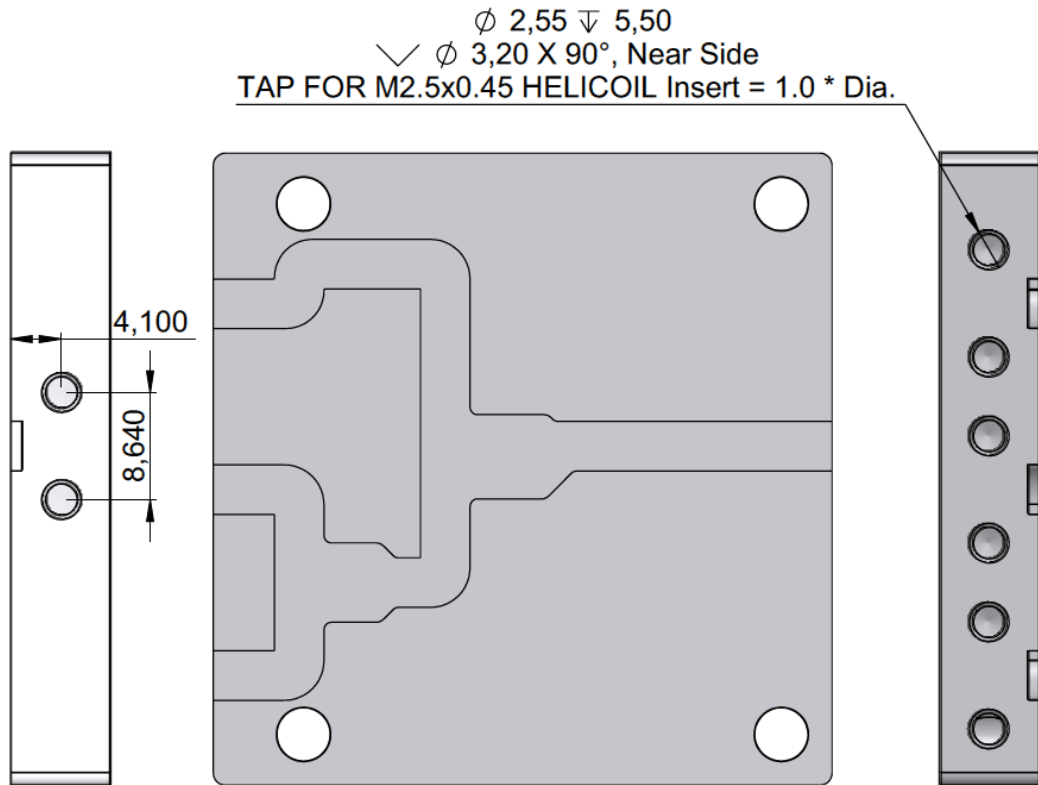
Yksikön pohjakappaleesta tehtiin mahdollisimman kapea, jotta yksikön massa pysyi mahdollisimman pienenä. Piirilevyn reunoille jätettiin kuitenkin riittävästi tilaa kiinnitysruuveille. Yksikön kiinnitys satelliitin runkoon toteutettiin myös tämän yksikön kohdalla M4 koon ruuveilla. Kuva 15 esittää jakajan pursotettua pohjakappaletta, jossa piirilevy on kohdistettu oikealle kohdalle. Pohjakappaleesta pursotettiin 8 mm korkea, koska se mahdollisti liittimien sijoittelun oikealle korkeudelle. Kuvasta voidaan havaita kappaleen ulkomitat sekä piirilevyn molempiin reunoihin jäävä 0,05 mm tyhjä tila. Piirilevyn uran mitoitus toteutettiin samojen ohjeiden mukaan, kuin 2:4 jakajassa.



Kuva 15. 1:3 Jakajan pursotettu pohjakappale

Pohjakappaleen pursottamisen jälkeen kappaleen reunoille mallinnettiin kiinnitysreiät neljälle SMA-liittimelle. Alkuperäisessä prototyypissä tulosignaalin liitin oli samassa linjassa vastakkaisen puolen keskimmäisen liittimen kanssa. EM-mallin yksikkö päätettiin kuitenkin toteuttaa niin, että liittimet eivät ole samassa linjassa. Tämä mahdollisti sen, että piirilevyyn ei jouduttu tekemään ylimääräisiä mutkia. Tämän ansiosta yksikön rakenne muuttui yksinkertaisemmaksi ja lisäksi yksikön massaa pystyttiin pienentämään vaatimusmäärittelyn vaatimalle tasolle. Piirilevyn uran mallintamisen jälkeen tehtiin reiät liittimien kiinnitystä varten. Liittimien kiinnitysreiät mitoitettiin samojen ohjeiden mu-

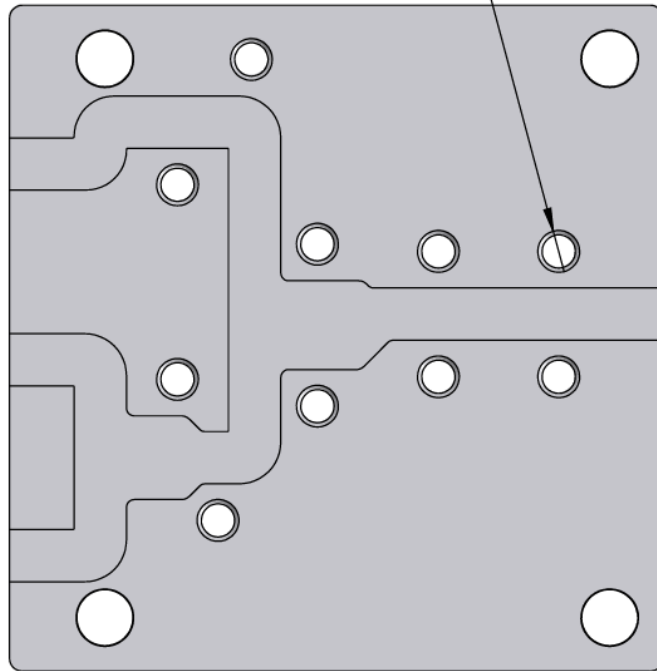
kaisesti jokaisen tehonjakoyksikön kohdalla. Myös tässä yksikössä liittimien keskijohtimien piti vaatimusmäärittelyn mukaan olla vähintään 8 mm korkeudella yksikön pohjasta. Kuva 16 esittää liittimien reikien sijoittelua ja mitoitus.



Kuva 16. Liittimien kiinnitysreikien mitoitus

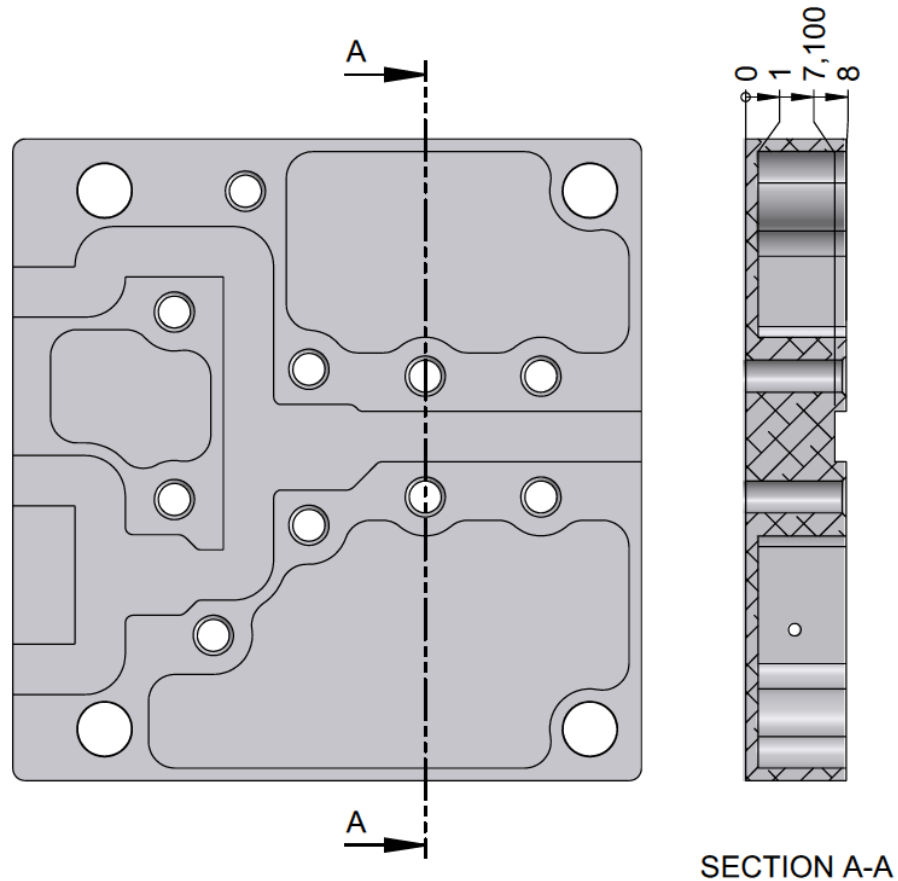
Liittimien kiinnitysreikien mitoituksen jälkeen suunniteltiin kannen kiinnitykseen tarvittavien ruuvien sijainti ja lukumäärä. Yksikön piti täyttää sille asetetut RF-vaatimukset, joten kiinnitysreikien sijainnissa huomioitiin, että yksiköstä tuli RF-ominaisuuksilta riittävän tiivis. Käytännössä tämä tarkoitti, että kannen kiinnitys toteutettiin niin, että kiinnitysruuvit tulivat piirilevyn ympärille noin 15 mm etäisyydelle toisistaan. Lisäksi kiinnitysreikien sijoittelussa huomioitiin, että yksikön sisäpuolelle pystyttiin tekemään mahdollisimman suuret kevennykset, joiden avulla yksikön kokonaisuudessa saatiin vaaditulle tasolle. Kiinnitysreikiä ei kuitenkaan voitu sijoittaa alle 10 mm etäisyydelle liittimistä, koska tässä tilanteessa liittimien kiinnitysruuvit olisivat törmänneet kannen kiinnitysruuveihin. Kuva 17 esittää kiinnitysreikien sijoittelua 1:3 tehonjakoyksikössä. Kiinnitykseen käytettiin 10 kappaletta M2.5 koon ruuveja. Kannen sekä liittimien kiinnityksessä hyödynnettiin Helicoil-kierre-elementtejä, kuten muissakin yksiköissä.

ϕ 2,55 THRU ALL
 \checkmark ϕ 3,20 X 90°, Near Side
 TAP FOR M2.5x0.45 HELICOIL Insert = 1.5 * Dia.



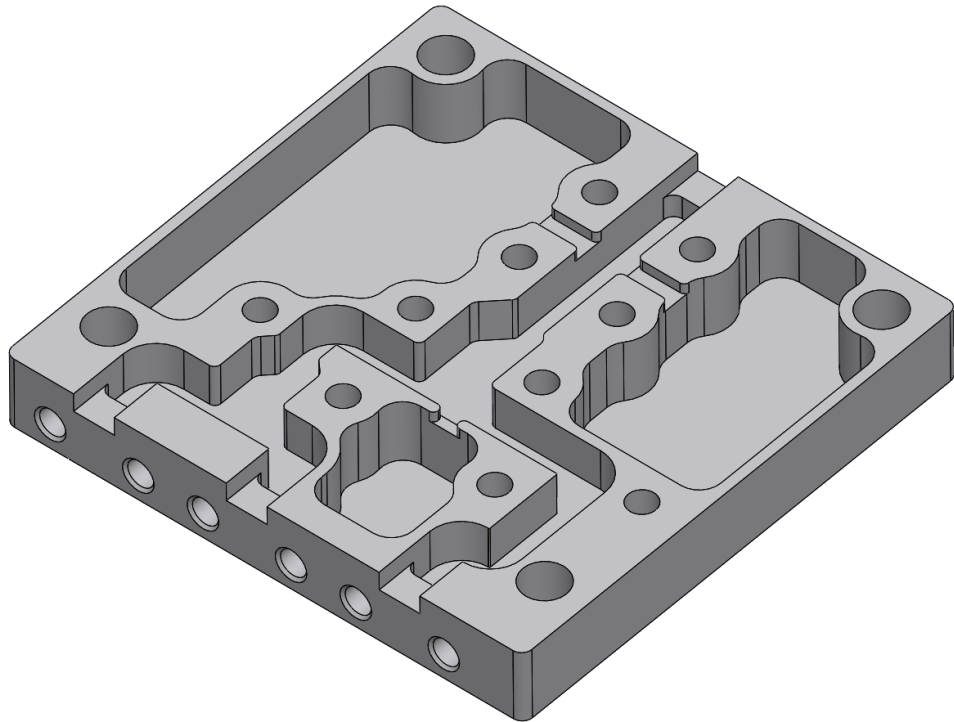
Kuva 17. Kiinnitysreikien mallinnus pohjakappaleeseen

Pohjakappaleeseen oli nyt mallinnettu kaikki toiminnallisuuden kannalta tärkeät piirteet, joten seuraavaksi minimoitiin yksikön massaa erilaisten kevennyksien avulla. Myös tässä yksikössä pohjakappaleen sisäpuolelle tehtiin kevennyksurajat, joiden avulla massaa saatiin pienennettyä. Kevennyksien toteutusta on analysoitu tarkemmin kappaleessa 4.6. Yksikön tehtävät sisäpuoliset kevennykset mallinnettiin ensin pohjakappaleeseen ja kannen muotojen sekä reikien mallinnuksen jälkeen sisäpuoliset kevennykset kopioitiin kannen rakenteeseen. Pohjakappaleen sisäpuolelle tehtiin kolme kevennyksuraa ja ne sijoiteltiin piirilevyn ympärille. Kuva 18 esittää yksikön pohjakappaleeseen mallinnettuja kevennyksuria. Kuvasta nähdään, että kevennyksurista mallinnettiin 7 mm syviä, jolloin pohjan ainevahvuudeksi jäi 1 mm. Tätä ainevahvuutta pidettiin projektissa minimiarvona, koska tällaisten kappaleiden valmistaminen oli onnistunut hyvin aikaisemmissa projekteissa. Tätä pienemmät ainevahvuudet olisivat luultavasti aiheuttaneet ongelmia valmistuksessa ja lisäksi tämä olisi vaikuttanut kappaleiden lujuuteen. Kuvasta 18 nähdään myös 0,9 mm syvä piirilevyn ura. Pohjakappaleen alapuolelle mallinnettiin lisäksi piirilevyn muotoja mukaileva kevennyksura, koska yksikön massa olisi muuten jäänyt vaatimuksia suuremmaksi. Ilman kevennyksiä 1:3 tehonjakoyksikön massa olisi ollut noin 123 grammaa, mutta sisä- ja ulkopuolisten kevennyksien avulla massa saatiin vaatimusmäärittelyn vaatimalle tasolle.



Kuva 18. 1:3 Jakajan kolme kevennysuraa ja niiden mitoitus

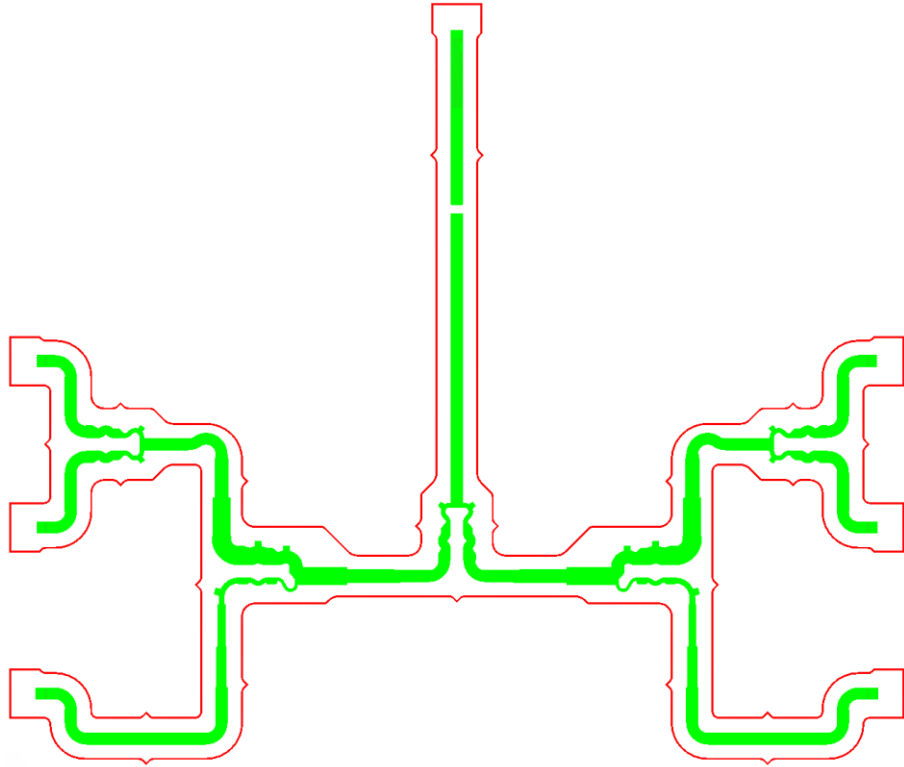
Yksikön kannen muodot vastasivat pohjakappaleen muotoja, mutta myös tässä yksikössä kannesta tehtiin liittimien suunnassa 0,10 mm pohjaa kapeampi. Kannen asennuksen aikana liittimet ovat kiinnitettyinä pohjakappaleeseen ja niiden keskijohtimet ovat juotettuina kiinni piirilevyyn. Tästä syystä kannen asennus on helpompi toteuttaa, kun kansi on hieman pohjaa kapeampi. Pohjakappaleen kevennysurien muoto sekä kiinnitysreikien sijainti kopioitiin yksikön kanteen ja lisäksi kanteen mallinnettiin piirilevyn syvennyksen muotoinen 4 mm syvä ura. Kuva 19 esittää mallinnettua 1:3 jakajan kantta. Kuvasta voidaan havaita rakenteessa olevat kevennysurat sekä piirilevyn muotoinen 4 mm syvä ura. Lisäksi kuvasta nähdään kevennysten välille tehdyt urat, joiden avulla varmistetaan paineentasaus yksikön sisällä. Yksikön pohjakappaleen ulkoreunaan mallinnettiin myös tässä yksikössä halkaisijaltaan 1 mm reikä paineentasauksa varten. Näin yksikön sisällä on jatkuvasti sama paine kuin yksikön ulkopuolella.



Kuva 19. 1:3 Jakajan kansi

4.4.3 1:6 Tehonjakoyksikkö

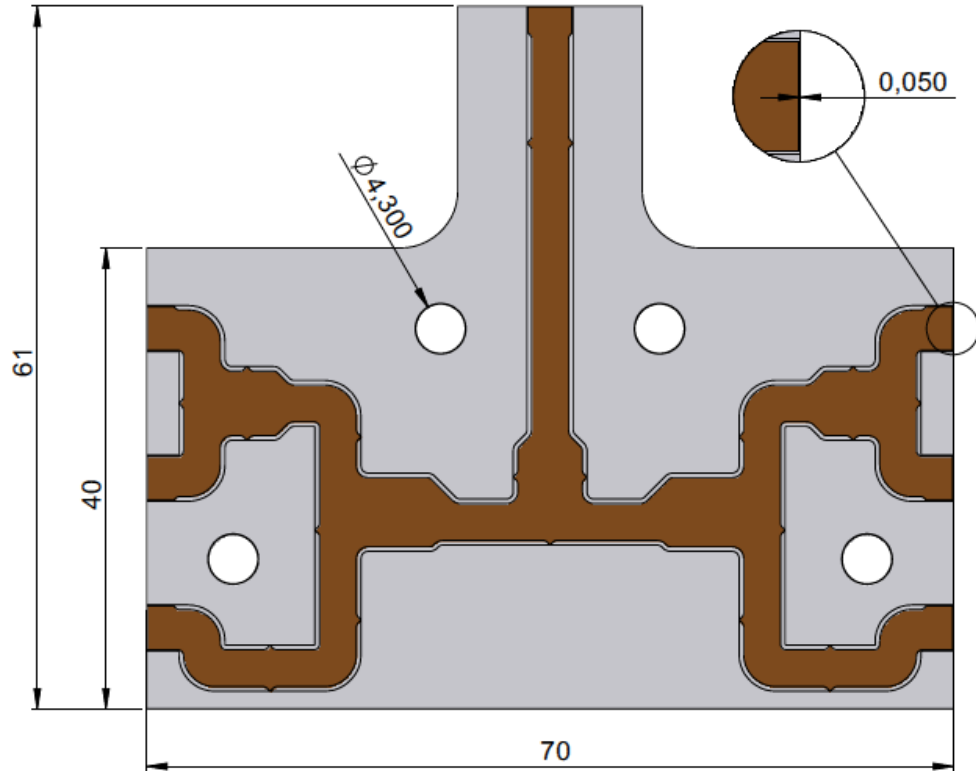
1:6 tehonjakoyksikön suunnittelu oli monimutkaisin jakajien suunnitteluprosesseista, koska yksikölle oli määritelty yksityiskohtaisemmat vaatimukset kuin muille jakajille. Tämä tehonjakoyksikkö koostuu muiden jakajien tapaan liittimistä, pohjasta, kannesta, piirilevystä sekä kiinnitystarvikkeista. Jakajan ulkomuodolle oli kuitenkin erilaiset vaatimukset kuin muissa yksiköissä. Esimerkiksi yksikön pohjaa ja kantta ei voitu suunnitella suorakulmion muotoiseksi, koska silloin yksikön asentaminen satelliittiin olisi ollut mahdotonta. Yksikölle oli varattu satelliitissa tarkasti määritelty tila, joten yksikön ulkomuotojen piti noudattaa tarkkoja vaatimuksia. Yksikön massan piti olla pienempi kuin 120 grammaa, joten myös tämän yksikön rakenteeseen piti suunnitella kevennyksiä. Tähän yksikköön kuului seitsemän SMA-liitintä. Yksi liittimistä oli omalla reunallaan ja kahdella muulla sivulla oli kolme liittintä. Tämän yksikön suunnittelu aloitettiin samalla tavalla kuin muidenkin yksiköiden suunnittelu. Kuva 20 esittää piirilevyn Dxf-tiedostoa, jonka avulla suunnittelu aloitettiin. Kuvasta nähdään, kuinka piirilevy koostuu seitsemästä liittimille menevästä johtimesta. Molemmilla reunoilla olevat kolme liittimen paikkaa ovat symmetrisesti keskimmäisen johtimen suhteen.



Kuva 20. 1:6 Tehonjakoyksikön piirilevyn Dxf-tiedosto

Piirilevystä konvertoidun 3D-mallin ympärille pursotettiin yksikön pohjakappale. Pursotuksessa huomioitiin kuitenkin ulkomitoille asetetut vaatimukset. Lisäksi pursotuksen yhteydessä piti miettiä yksikön kiinnitysreikien sijoittelua, koska niille jäisi luultavasti melko vähän tilaa. Kiinnitysreikien sijoittelussa piti myös varmistaa, etteivät ne tulleet liian lähelle piirilevyä. Kuva 21 esittää pursotettua pohjakappaletta, johon on mallinnettu kiinnitykseen tarvittavat reiät. Kuten kuvasta nähdään, kappaleen muoto poikkeaa muista tehonjakoyksiköistä ulkomuodon sekä kiinnitysreikien sijoittelun suhteen. Vaatimusmäärittelyn mukaan erityisen tärkeä mitta suunnittelussa oli kuvassa näkyvä pystymitta 40 mm. Leveän osuuden korkeus ei siis saanut ylittää tätä mitta, koska silloin yksikkö ei mahtuisi sille varattuun tilaan satelliitin kokoonpanossa. Myös tässä yksikössä pohjakappaleesta tehtiin 8 mm korkea. Pohjakappaleen reunan ja piirilevyn välille jätettiin 0,05 mm kokoinen tyhjä tila jokaisen liittimen kohdalla. Yksikön kiinnitykseen käytettiin M4 koon ruuveja, kuten muissakin yksiköissä.

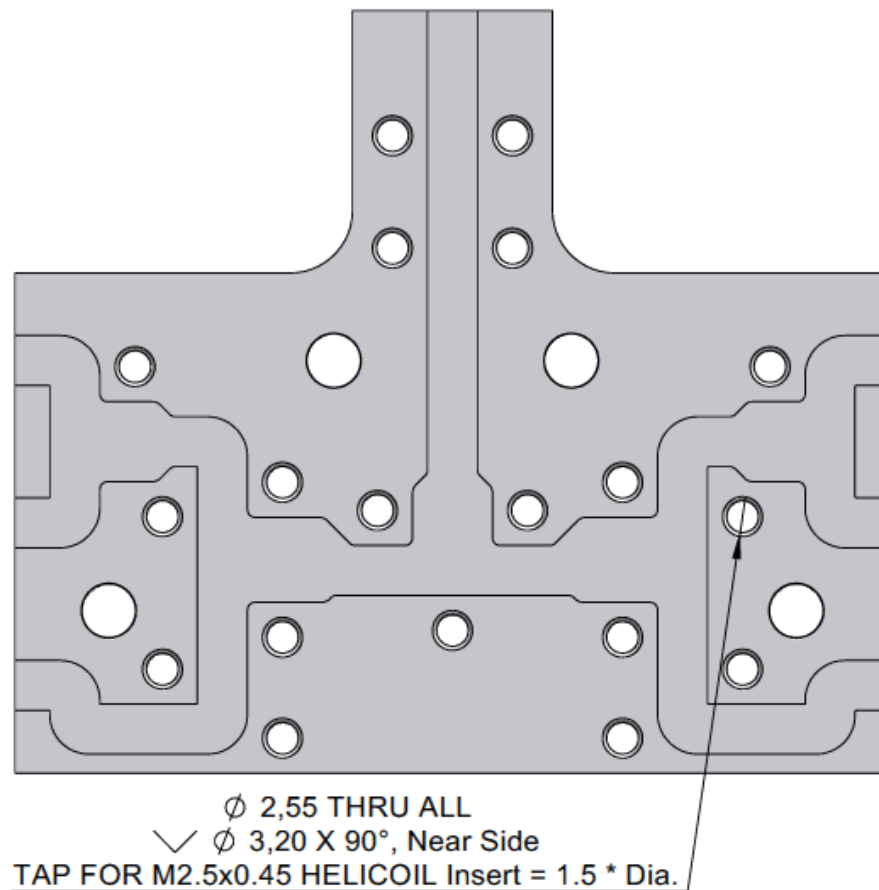
Alkuperäisen suunnitelman mukaan myös ylemmät kuvassa 21 esitetyt kiinnitysreiät piti sijoittaa lähemmäksi yksikön reunoja. Tämä ei kuitenkaan ollut mahdollista piirilevyn muodosta johtuen. Kuvassa näkyvät ylemmät kiinnitysreiät siirrettiinkin tästä syystä lähemmäksi yksikön keskustaa. Tämä kuitenkin vaikutti yksikköön myöhemmin tehtäviin kevennyksiin, koska kiinnitysreikien ympärille piti jättää materiaalia.



Kuva 21. 1:6 Jakajan pursotettu pohjakappale

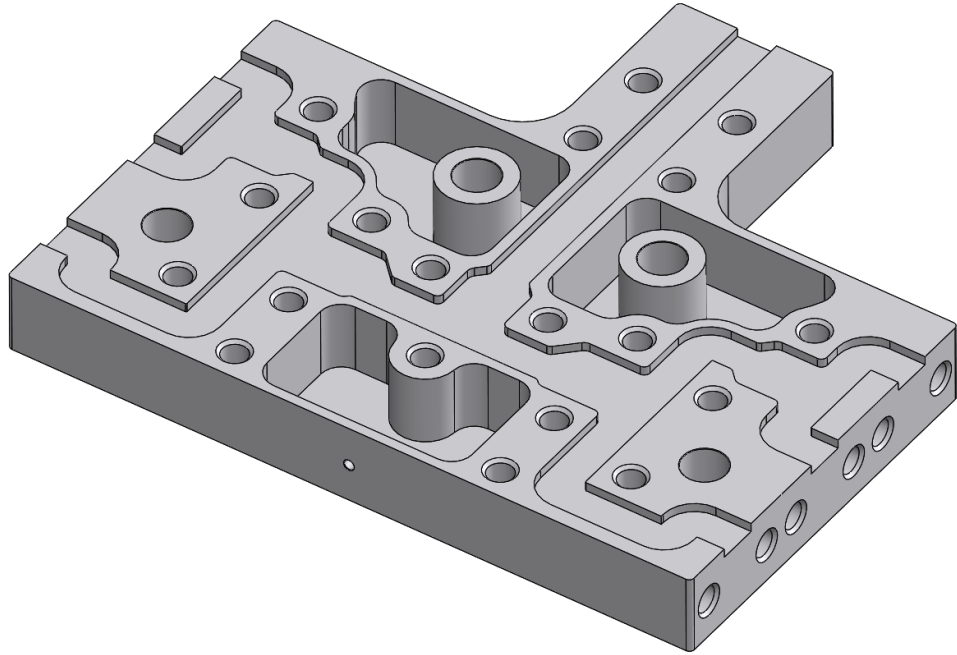
Pohjakappaleen pursottamisen jälkeen liittimille mallinnettiin kiinnitysreiät. Liittimien kiinnitysreikien suunnittelu toteutettiin samalla tavalla kuin muiden yksiköiden kohdalla. Tässä yksikössä liittimet aseteltiin kuitenkin lähemmäksi toisiaan, koska yksikön leveän osan korkeudeksi oli määritelty 40 mm. Muissa yksiköissä liittimien etäisyys toisistaan oli 15 mm, mutta 1:6 jakajan kohdalla etäisyydeksi tuli 13 mm.

Tämän jälkeen kappaleeseen sijoiteltiin kiinnitysreiät, joiden avulla kansi kiinnitetään. Kiinnitysreikien sijoittelussa noudatettiin samoja ohjeita kuin aikaisempien tehonjakoyksiköiden kohdalla. Kannen kiinnitys toteutettiin 19 kappaleella M2.5 koon ruuveja. Kuva 22 esittää kiinnitysreikien sijoittelua pohjakappaleeseen. Kuten kuvasta nähdään, kiinnitysreiät on sijoitettu mahdollisimman lähelle piirilevyä. Reikien sijoittelussa on huomioitu kierre-elementtien vaatimukset. Lisäksi on huomioitu kappaleeseen myöhemmin tehtävät kevennykset ja niille on jätetty tilaa kiinnitysreikien ympärille.



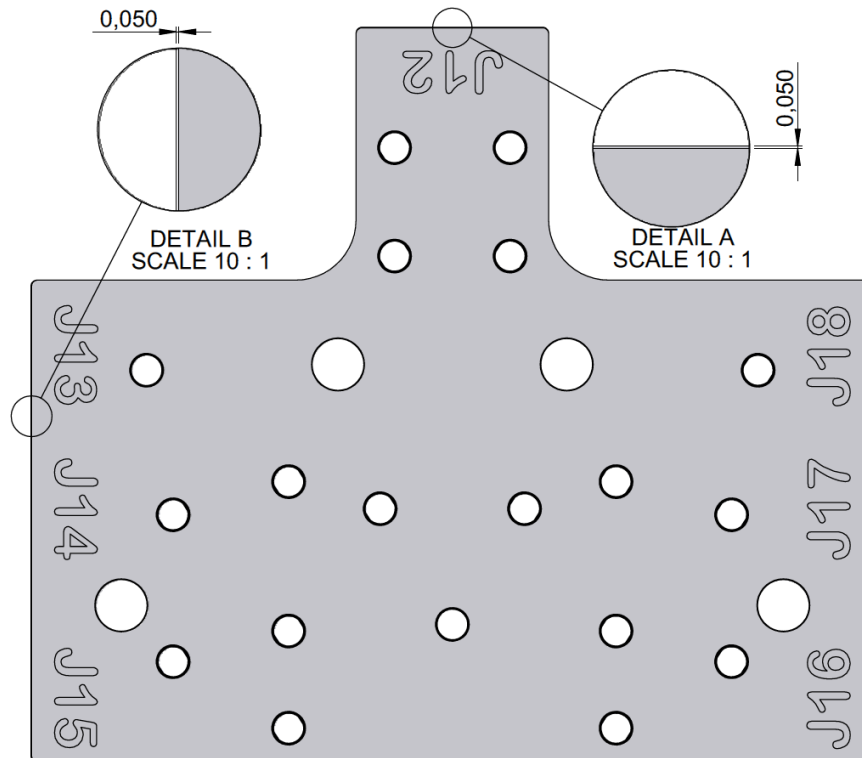
Kuva 22. Kiinnitysreikien mallinnus pohjakappaleeseen

Kiinnitysreikien mallintamisen jälkeen yksikköön tehtiin tarvittavat kevennykset. Vaatimusmäärittelyssä yksikön maksimimassaksi määriteltiin 120 grammaa, joten yksikköön piti toteuttaa vastaavat kevennykset kuin aikaisemmin esiteltyissä tehonjakoyksiköissä. 4,3 mm kiinnitysreikien sijoittelu sekä piirilevyn muoto kuitenkin vaikeuttivat kevennyksien suunnittelua, koska esimerkiksi kahden alemman kiinnitysreiän ympärille ei pystytty tekemään kevennyksiä, koska materiaalin minimivahvuus olisi jäänyt liian pieneksi. Pohjakappaleeseen päädyttiin mallintamaan kolme sisäpuolista kevennysuraa. Lisäksi mas-savaatimuksen täyttäminen vaati myös tämän yksikön kohdalla kappaleen pohjaan tehtävän kevennyksen. Kuva 23 esittää valmista 1:6 jakajan pohjakappaletta, johon on mallinnettu kevennysurat. Ilman kevennyksiä 1:6 jakajan massa olisi ollut noin 163 grammaa, mutta kevennysten avulla massa saatiin vaatimusmäärittelyn vaatimalle tasolle. Kahden kevennysuran sisäpuolelle jouduttiin kuitenkin jättämään materiaalia kiinnitysreikien ympärille. Kuvasta voidaan myös havaita kappaleen alareunaan tehty reikä, jonka avulla toteutettiin yksikön paineentasaus.



Kuva 23. 1:6 Jakajan pohjakappale

Yksikön kannen mallinnus toteutettiin samalla tavalla kuin muiden tehonjakoyksiköiden kohdalla. Tämä yksikkö kuitenkin eroaa muista jakajista, koska liittimet ovat sijoiteltuna kolmelle sivulle. Kannesta tehtiin liittimien suunnassa 0,10 mm kapeampi kuin pohjakappaleesta. Tässä yksikössä kavennus tehtiin kaikille kolmelle sivulle, joille liittimet asennettiin. Kuva 24 esittää 1:6 jakajan rakennetta, kun kansi on kohdistettu pohjakappaleen päälle. Kuten kuvasta huomataan, kansi on pohjaa kapeampi liittimien suunnassa ja tämä helpottaa kannen lopullista asentamista, kun liittimet on kiinnitetty pohjakappaleeseen. Kuvasta nähdään myös kanteen tehdyt merkinnät jokaisen liittimen kohdalla. Yksikön tunnus sekä sarjanumero mallinnettiin yksikön sivuun, koska kannessa ei olisi ollut riittävästi tilaa tarvittaville merkinnöille.



Kuva 24. 1:6 Jakajan kannen kavennukset

4.5 Yksiköiden rajapinnat ja kiinnitys

Suunnitellut tehonjakoyksiköt kiinnitetään satelliitin runkoon niin, että yksikön pohjakappale asetetaan satelliitin runkoa vasten. Yksiköiden pohjakappaleiden alapinnat muodostavat siis rajapinnat, joiden pitää olla yhteensopivia satelliitin kanssa. Tehonjakoyksiköt kiinnitetään satelliitin runkoon neljällä titaaniruuvilla. Kannen kiinnitysruuvien lisäksi myös nämä neljä ruuvia kiinnittävät yksikön pohjan ja kannen toisiinsa. Rajapintojen vaatimukset on kerrottu vaatimusmäärittelyssä, jotta tehonjakoyksiköiden integrointi osaksi satelliittia onnistuu. Asiakkaan toimesta on määritelty muun muassa kiinnitysreikien koko sekä sijainti. Kiinnitysreikien suunnittelussa piti huomioida niiden sijoittelun lisäksi muun muassa reikien mitta- sekä sijaintitoleranssit.

Kommunikointi asiakkaan kanssa liittyen rajapintoihin ja yksiköiden rakenteeseen tapahtui pääasiassa ICD-dokumenttien sekä yksiköiden 3D-mallien avulla. Asiakasyritys pystyi varmistamaan komponenttien yhteensopivuuden erityisesti 3D-mallien avulla. 3D-mallien avulla asiakkaan oli mahdollista mallintaa satelliitin lopullinen kokoonpano. Pääkokoonpanomallin avulla voidaan havaita mahdolliset ongelmat mekaanisessa rakenteessa ja toisaalta voidaan varmistaa, että eri komponentit sopivat mekaanisilta ominaisuuksiltaan kokoonpanoon. ICD-dokumentti sisältää oleelliset tiedot liittyen tehonjakoyksiköiden mekaaniseen rakenteeseen. Dokumentin sisältö on määritelty vaatimusmäärittelyssä. Dokumentit sisältävät tiedot muun muassa yksiköiden ulkomuodoista sekä tärkeimmistä mitoista. Yksiköiden kiinnitysreikien sekä liittimien sijainti on esitetty

myös dokumentissa. Dokumentit sisältävät tiedot käytetystä materiaalista, yksiköiden massoista, massakeskipisteistä sekä kiinnityspintojen pinta-aloista. Dokumentin mitoissa on hyödynnetty yleistoleranssia, mutta tärkeimmät mitat, kuten kiinnitysreikien sijainti sekä koko on esitetty vaatimusmäärittelyn mukaisilla toleransseilla. Kappaleiden referenssipisteeksi on valittu yhden kiinnitysreiän keskipiste ja kaikki mitat on esitetty suhteessa tähän referenssipisteeseen.

ICD-dokumenteissa on listattu myös yksiköiden mekaanisia ominaisuuksia, kuten kiinnityspinnan pinnankarheus sekä suoruus. Kiinnitykseen liittyvistä asioista on kerrottu muun muassa käytettävien kiinnitysruuvien koko sekä kiristysmomentti. Yksiköiden tunnistamiseen liittyen dokumenteista selviää jokaisen jakajan yksilöllinen tunnus sekä sarjanumero.

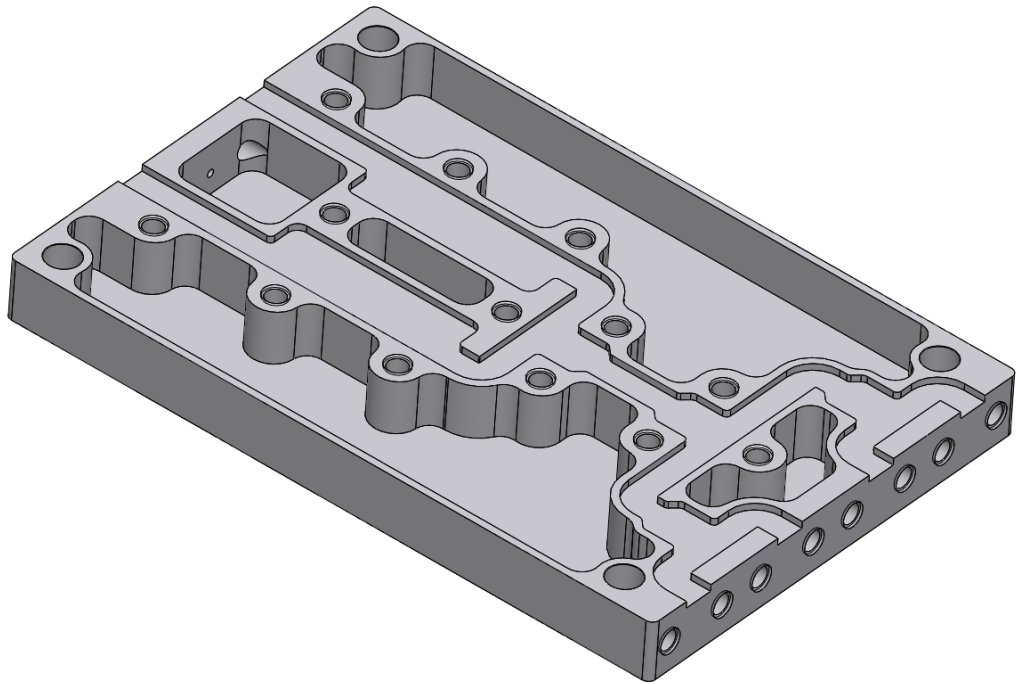
4.6 Yksiköiden kevennykset

Tehonjakoyksiköiden toiminnallisuuden kannalta mekaniikan tärkeimpiä piirteitä ovat rajapinnat, liittimien kiinnitys, piirilevyn upotus sekä kannen kiinnitys. Piirilevyn asentaminen vaatii pohjaan sekä kanteen jyrityksen uran. Uran sopiva syvyys on selvitetty aikaisempien projektien sekä prototyyppien avulla. Uran leveyteen vaikuttavat piirilevyn koko sekä erilaiset huomioitavat toleranssiketjut. Toleranssiketjuihin vaikuttavat tässä muun muassa piirilevyn sekä uran koneistuksen toleranssit. Liittimien ja kannen kiinnitykset vaativat oikealla etäisyydellä olevat kiinnitysreiät. Näiden piirteiden mallintamisen jälkeen yksiköiden massa oli kuitenkin liian suuri verrattuna vaatimusmäärittelyssä annettuihin arvoihin. Tästä syystä yksiköiden rakenteisiin piti suunnitella erilaisia kevennyksiä, joiden avulla massa saatiin vaatimusmäärittelyn vaatimalle tasolle.

Yksiköiden keventäminen aloitettiin mallintamalla yksikön pohjakappaleeseen piirilevyn ympärille jyritykset kevennykset. Kevennykset mallinnettiin niin, että ainevahvuudeksi kappaleen pohjassa jäi vähintään 1 mm. Kevennyksien suunnittelussa huomioitiin, että kiinnitysreikien ympärillä oli riittävästi materiaalia kierre-elementtien asentamista varten. Muissa projekteissa oli havaittu, että erilaisten muotojen sisästeenä kannattaa käyttää minimissään arvoa 2,1 mm. Tällaiset muodot pystytään koneistamaan huomattavasti nopeammin verrattuna muotoihin, joissa on käytetty pienempiä sisästeitä. Näin pystyttiin hyödyntämään valmistusresursseja huomattavasti tehokkaammin, koska yksiköiden valmistus onnistui nopeammin. Pieniä jyrityksiä käytettäessä joudutaan käyttämään myös pienempiä syöttönopeuksia, joten koneistus vie enemmän aikaa. Kevennykset mallinnettiin ensin pohjakappaleisiin, jonka jälkeen muodot kopioitiin yksiköiden kansiin. Näiden kevennyksien avulla yksiköiden massaa saatiin pienennetty huomattavasti, mutta massa oli edelleen liian suuri verrattuna vaatimusmäärittelyyn.

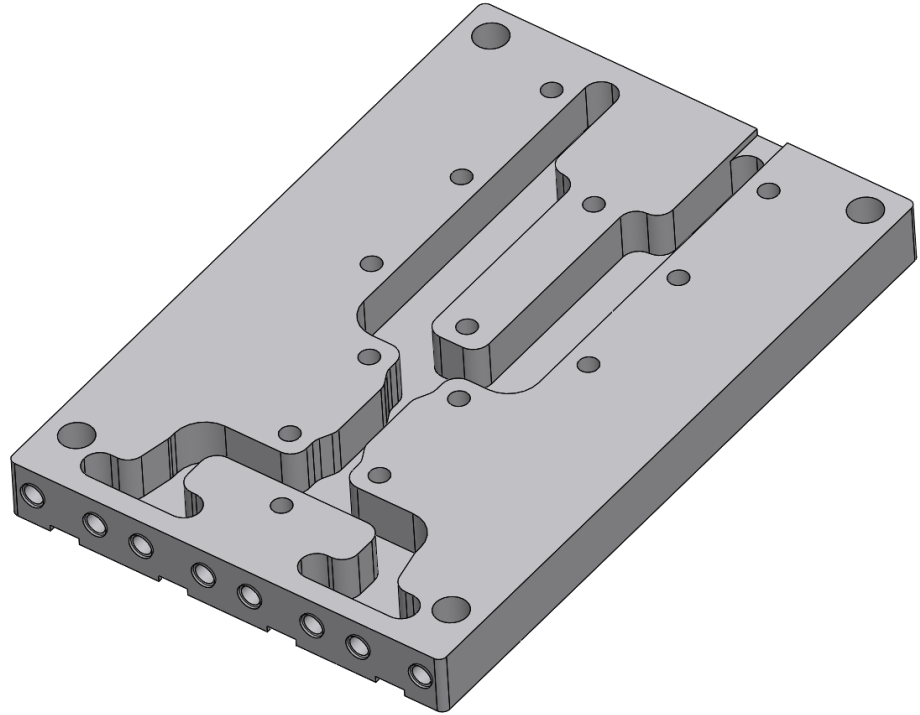
Massan pienentämiseksi päätettiin tehdä kevennyksiä myös pohjakappaleen alapintaan. Pohjakappaleen alapuolelle mallinnettiin ura, joka seurasi muodoiltaan piirilevysyvennyksen uraa. Kevennyksien syvyys määriteltiin niin, että minimiainevahvuutena pysyi

aina 1 mm. Näiden kevennysten mallintamisen jälkeen yksiköiden massat saatiin vaatimusmäärittelyn määrittelemälle tasolle. Kevennykset vaativat kuitenkin monimutkaisia koneistuksia, jotka pidentävät koneistusaikoja ja lisäävät koneistuskustannuksia. Seuraavissa kuvissa on esitetty 2:4 jakajan pohjaan ja kanteen tehtyjä kevennyksiä. Kuvista huomataan, että kappaleista on pitänyt koneistaa pois kaikki ylimääräinen materiaali, jotta massa on saatu vaatimusmäärittelyssä vaaditulle tasolle. Kuva 25 esittää yksikön pohjakappaleeseen sisäpuolelle tehtäviä kevennyksiä. Kuvassa näkyy myös piirilevylle tehty 0,9 mm syvä ura.



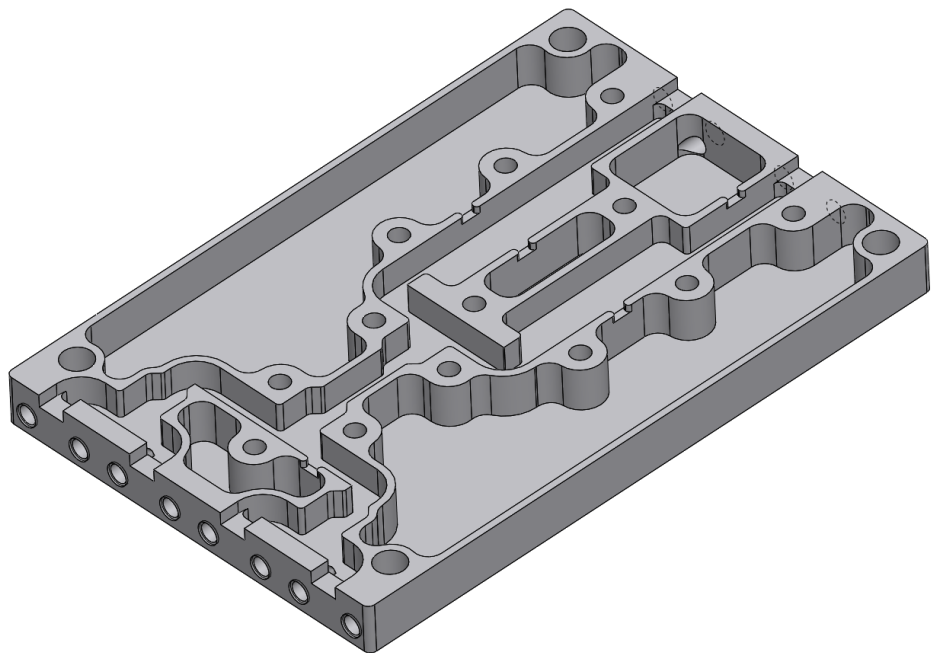
Kuva 25. 2:4 jakajan pohjakappaleen sisäpuoliset kevennykset

Kuva 26 esittää yksikön pohjaan tehtyä kevennysuraa. Kevennysura mallinnettiin niin, että piirilevyn uran ja kevennyksen väliin jäi minimissään 1 mm materiaalia. Näin varmistettiin se, että kappale on mahdollista koneistaa ja toisaalta rakenne pysyi riittävän lujana. Mallinnetun kevennyksen paineentasauksesta huolehdittiin yksikön reunan ja kevennyksen välille mallinnetulla uralla. Ura toteutettiin jatkamalla syvennyksen muotoa yksikön reunaan asti. Urasta tehtiin ainoastaan 1 mm syvyinen, mutta se riittää tasaamaan syntyvät paine-erot kevennyksen ja yksikköä ympäröivän paineen välillä.



Kuva 26. 2:4 jakajan pohjakappaleen alapuolelle mallinnettu kevennysura

Kuva 27 esittää yksikön kanteen tehtyjä kevennyksiä. Kevennysten muoto kopioitiin pohjakappaleesta, jotta ainevahvuudet säilyivät riittävän suurina myös kannessa. Lisäksi kuvassa näkyy piirilevyn yläpuolelle mallinnettu 4 mm syvä ura. Myös kannen syvennyksissä piti huolehtia paineentasauksesta. Tämä toteutettiin mallintamalla ura jokaisen kevennyksen sekä piirilevyn yläpuolelle tulevan osuuden välillä.



Kuva 27. 2:4 jakajan kannen sisäpuoliset kevennykset

Taulukko 6 esittää kevennysten vaikutusta 2:4 jakajan massaan. Liittimet ja kiinnitystarvikkeet muodostavat merkittävän osan yksiköiden massasta, mutta kuten taulukosta huomataan, mekaniikan suunnittelulla on hyvin merkittävä rooli yksiköiden massan kannalta. Taulukossa on selvitetty 2:4 jakajan massa ilman kevennyksiä sekä erilaisten kevennysten kanssa. Vaatimusmäärittelyssä tämän yksikön suurimmaksi sallituksi massaksi oli määritelty 120 grammaa. Taulukosta huomataan, että ilman kevennyksiä, yksikön massa oli huomattavasti suurempi, kuin vaatimusmäärittelyssä määritelty maksimiarvo.

Taulukko 6. Kevennysten vaikutus 2:4 tehonjakoyksikön massaan

2:4 Jakaja	Massa (g)		
	Ilman kevennyksiä	Sisäpuoliset kevennykset	Sisä- ja ulkopuoliset kevennykset
Pohja	110,4	57,0	38,0
Kansi	86,2	40,4	40,4
Muut komponentit	40,6	40,6	40,6
Yhteensä	237,2	138,0	119,0
Suurin sallittu massa	120,0	120,0	120,0

Taulukosta huomataan, että yksikön massaa onnistuttiin pienentämään yli 100 grammaa erilaisten kevennysten avulla. Prosentuaalisesti massa pieneni noin 50 % ja kevennysten avulla massa saatiin vaatimusmäärittelyn vaatimalle tasolle. Taulukosta huomataan myös, että yksiköiden sisäiset kevennykset eivät olisi keventäneet yksikköä riittävästi, joten kaikki suunnitellut kevennykset olivat välttämättömiä, jotta massa saatiin vaaditulle tasolle.

4.7 Ominaisvärähtelytaajuudet

Vaatimusmäärittelyn mukaan tehonjakoyksiköiden ominaisvärähtelytaajuuden piti olla suurempi kuin 400 Hz. Ominaisvärähtelytaajuuden selvittäminen oli tärkeää, koska rakenteiden värähtely yksiköiden ominaistajuudella olisi hyvin haitallista yksiköiden rakenteille. Ominaisvärähtelytaajuudet määriteltiin suunnitteluohjelman avulla ja taajuuksien määrittelyssä käytettiin hyväksi yksinkertaistettuja malleja. Tehonjakoyksiköiden rakennetta yksinkertaistettiin niin, että taajuuksien määrittelyssä hyödynnettiin ainoastaan yksiköiden pohja- ja kansikappaletta. Taulukko 7 esittää tehonjakoyksiköiden kolme pienintä ominaisvärähtelytaajuutta. Tässä tapauksessa pienimmän ominaistajuuden tarkastelu on tärkeintä, koska sen pitää olla suurempi kuin 400 Hz.

Taulukko 7. Tehonjakoyksiköiden ominaisvärähtelytaajuudet

	Ominaisvärähtelytaajuus (Hz)		
	1.	2.	3.
1:6 Jakaja	9687	13170	14192
2:4 Jakaja	6632	11900	13051
1:3 Jakaja	12810	20416	21812

Kuten taulukosta huomataan, ensimmäiset ominaisvärähtelytaajuudet ovat huomattavasti vaatimuksia suurempia. Tehonjakoyksiköiden rakenne täyttää siis vaatimusmäärittelyn asettamat vaatimukset ominaisvärähtelyn osalta.

4.8 Kokoonpanot

Suunniteltavien kappaleiden yhteensopivuus varmistettiin kokoonpanomallien avulla. Erillisten kappaleiden mallintamisen lisäksi suunnitteluohjelmistolla mallinnettiin myös kokoonpanomalli jokaisesta tehonjakoyksiköstä. Kokoonpanomallin avulla huomattiin mahdolliset ongelmakohdat sekä varmistettiin kappaleiden yhteensopivuus. Kokoonpanomallien avulla tehtiin osaluettelot ja selvitettiin tarvittavien komponenttien kappalemäärät. Lisäksi kokoonpanomallien avulla tehtiin räjäytyskuvat yksiköistä, jotta niiden kokoonpano onnistuisi vaivattomasti. 1:6 jakajan, 2:4 jakajan sekä 1:3 jakajan räjäytyskuvat on esitetty liitteissä D, E ja F.

Kokoonpanomallin avulla pystyttiin testaamaan, miten suunniteltavien kappaleiden muutokset vaikuttavat kokoonpanoon. Esimerkiksi selvitettiin, onko kaikkien komponenttien kiinnittäminen mahdollista, jos suunnitellut muutokset toteutetaan. Kokoonpanomallin avulla pystyttiin tutkimaan myös erilaisten muutosten vaikutusta tehonjakoyksiköiden kokonaisuudessaan. Yhden kappaleen muuttaminen saattoi vaikuttaa kokoonpanon mekaaniseen toiminallisuuteen, joten kokoonpanomallin mallintaminen aloitettiin heti, kun kokoonpanon rakenne sekä tarvittavat komponentit oli selvitetty.

Tehonjakoyksiköitä suunniteltaessa kokoonpanomallin mallintaminen aloitettiin pursottamalla yksikön pohjakappale mallinnetun piirilevyn ympärille. Kannen mallinnuksessa hyödynnettiin pohjakappaleen muotoja sekä piirilevystä ja pohjakappaleesta tehtyä kokoonpanomallia. Kokoonpanomallin avulla varmistettiin myös kiinnitysreikien kohdistukset. Suunnitteluohjelman avulla oli mahdollista havaita eri kappaleiden tai komponenttien törmäykset, joten esimerkiksi virheet kiinnitysreikien kohdistuksessa oli mahdollista havaita tällä tavalla. Tehonjakoyksiköistä tehdyt 3D-kokoonpanomallit toimitettiin myös asiakkaalle, jotta he pystyivät sovittamaan yksikköjä osaksi suurempaa kokonaisuutta.

4.9 Piirustukset

Diplomityössä tehtävät piirustukset voidaan jakaa kolmeen eri osa-alueeseen. Yksittäisistä kappaleista laadittiin tekniset piirustukset, kokoonpanomalleista tehtiin kokoonpanokuvat ja kokoonpanojen oleellisista rajapinnoista tehtiin rajapintakuvat eli ICD-dokumentit. Näiden piirustusten avulla mahdollistettiin kappaleiden valmistus sekä kokoonpano. Lisäksi dokumenttien avulla keskusteltiin asiakkaan kanssa rajapintojen yhteensopivuudesta ja esiteltiin suunniteltua rakennetta.

Jokaisen tehonjakoyksikön pohja- ja kansikappaleesta tehtiin tekninen piirustus sekä SAT-tiedosto (engl. *Standard Acis text*), joiden avulla kappaleet valmistettiin. Koneistuksessa pystytään hyödyntämään SAT-tiedostoja, koska koneistusradat voidaan määrittellä näiden tiedostojen avulla. Kappaleista tehtävät piirustukset sisältävät muun muassa tiedot kappaleen mitoista, toleransseista, pinnankarheudesta sekä materiaalista. Lisäksi piirustuksissa on esitetty informaatiota kappaleiden yksityiskohdista, joita ei pystytä päätelemään SAT-tiedostojen avulla. Tällaisia yksityiskohtia ovat muun muassa reikien sekä kierteiden mitoitukset. Piirustuksissa käytettiin ISO 2768-fK yleistoleranssia ja lisäksi erityistä tarkkuutta vaativat kohteet mitoitettiin erillisten toleranssien avulla. Esimerkiksi yksiköiden pituus liittimien suunnassa oli hyvin tärkeä mitoitaa tarkasti, jotta piirilevyn ja yksikön reunan väliin jäi 0,05 mm tyhjä tila. Liittimien sijainti oli toinen hyvin tärkeä ominaisuus, joten liittimien reikien mitoituksessa hyödynnettiin ISO GPS paikkatoleransseja. Paikkatoleranssien avulla varmistettiin liitinten oikea sijainti suhteessa toisiinsa sekä piirilevyyn. Pinnankarheuden yksikkönä piirustuksissa käytettiin Ra-arvoa, joka tarkoittaa profiilin aritmeettista keskipoikkeamaa. Yleispinnankarheutena tehonjakoyksiköille käytettiin Ra-arvoa 3,2. Piirilevyn uralta, liittimien kiinnityspinnoilta sekä yksikön rajapinnoilta vaadittiin kuitenkin tätä parempaa pinnanlaatua. Yksikön rajapinnoissa käytettiin Ra-arvoa 1,6. Erityisen hyvää pinnanlaatua vaadittiin liittimien kiinnityspinnoissa sekä piirilevyn urassa, joten näissä käytettiin Ra-arvoa 0,8.

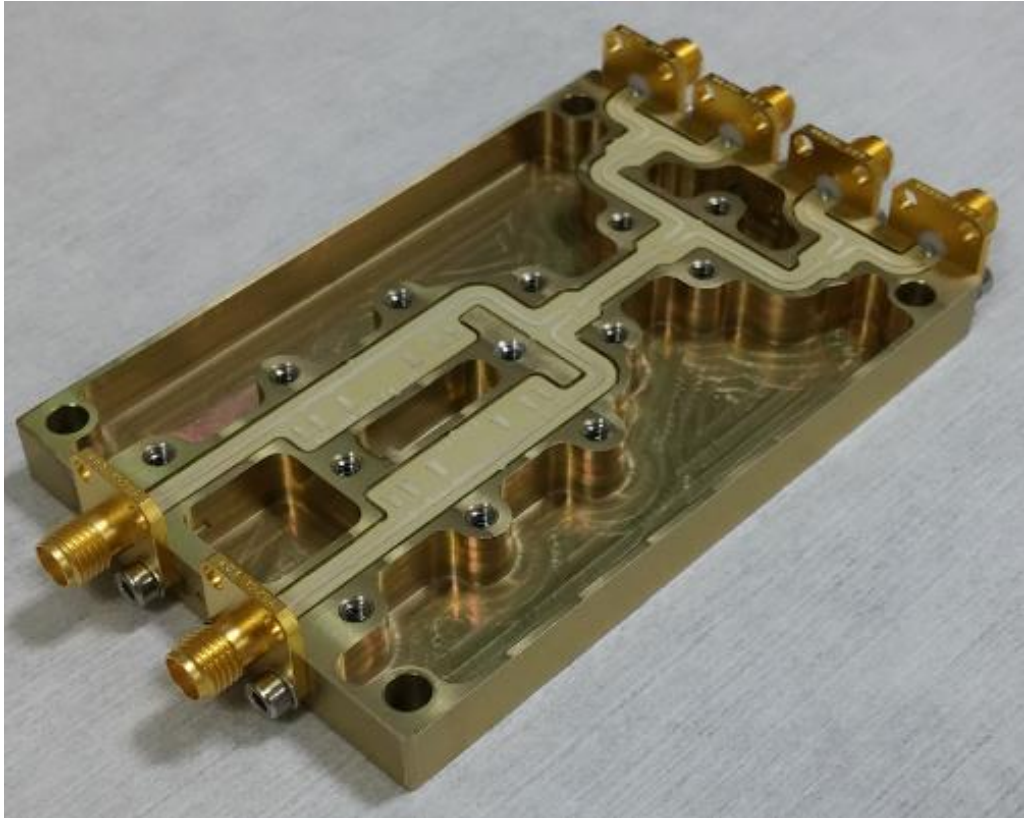
5. TULOKSET

Tehonjakoyksiköiden mallintamisen jälkeen yksiköiden pohja- ja kansikappaleet valmistettiin hyödyntämällä DA-Design Oy:n omia valmistusresursseja. Valmistuksessa hyödynnettiin suunniteltuja 3D-malleja sekä kappaleista tehtyjä teknisiä piirustuksia. Muut tehonjakoyksiköihin kiinnitettävät komponentit ostettiin ulkopuolisilta tavarantoimittajilta, mutta yksiköiden kokoonpano toteutettiin DA-Design Oy:n omilla resursseilla.

Pohjan ja kannen valmistamisen jälkeen kappaleet pinnoitettiin keltapassivoinnin eli keltakromatoinnin avulla. Keltapassivoinnin avulla kappaleen pinnalle muodostuu kullankeltainen korroosiota kestävä pinnoite. Hyvän korroosionkeston lisäksi keltapassivointi on myös RF-ominaisuuksien kannalta toimiva pinnoitus. DA-Design Oy oli käyttänyt keltapassivointia myös aikaisemmissa projekteissa, joten yrityksestä löytyi jo valmiiksi pinnoitusprosessissa tarvittava osaaminen.

Kappaleiden pinnoittamisen jälkeen pohjakappaleeseen kiinnitettiin kierre-elementit, joiden avulla kansi sekä liittimet kiinnitetään paikoilleen. Kierre-elementtien kiinnittämisen jälkeen piirilevy liimattiin sille suunniteltuun uraan ja samalla varmistettiin, että piirilevy kohdistuu oikealle kohdalle suhteessa pohjakappaleeseen. Liimauksen jälkeen liittimet kiinnitettiin pohjakappaleeseen kahdella ruuvilla ja liittimien keskijohtimet juotettiin kiinni piirilevyyn. Kannen asentamisen kannalta oli tärkeää, että liittimien laipat eivät taipuneet kohti yksikön keskustaa. Kannen asennusvaiheessa piti varmistua, että liittimien juotokset eivät vaurioituneet, kun kansi asennettiin liittimien väliin pohjakappaleen päälle. Kannen paikalleen asettamisen jälkeen kansi kiinnitettiin pohjakappaleeseen ja lopuksi liittimet kiinnitettiin kanteen. Liittimet sekä kannen kiinnitysruuvit kiristettiin suunnitellun momentin mukaisesti. Ruuvien lukitus varmistettiin käyttämällä erityisiä kierre-elementtejä. Yksiköiden kokoonpanon jälkeen niille suoritetaan toiminnallinen testaus, jonka avulla varmistetaan, että yksiköt täyttävät asiakkaan vaatimukset myös toiminnallisuuden osalta. Tämän jälkeen yksiköt voidaan toimittaa asiakkaalle osana ennalta määriteltyä toimituserää.

Tehonjakoyksiköiden kokoonpanovaiheessa useat suunnitteluvaiheen ratkaisut osoittautuivat onnistuneiksi. Piirilevyt sopivat hyvin niille suunniteltuihin uriin ja piirilevyt asetuivat sopivalle etäisyydelle kappaleiden reunoista. Lisäksi liittimien keskijohtimien korkeus osoittautui sopivaksi suhteessa piirilevyyn uraan ja keskijohtimet pystyttiin juottamaan kiinni piirilevyyn. Kuva 28 esittää 2:4 tehonjakoyksikön kokoonpanovaihetta. Yksikön pinnoitettuun pohjakappaleeseen on asennettu kierre-elementit ja lisäksi piirilevy on liimattu paikalleen. Yksikön sivuille on kiinnitetty kuusi kappaletta SMA-liittimiä, jotka on juotettu kiinni piirilevyyn. Seuraava työvaihe on kannen asennus liittimien väliin.

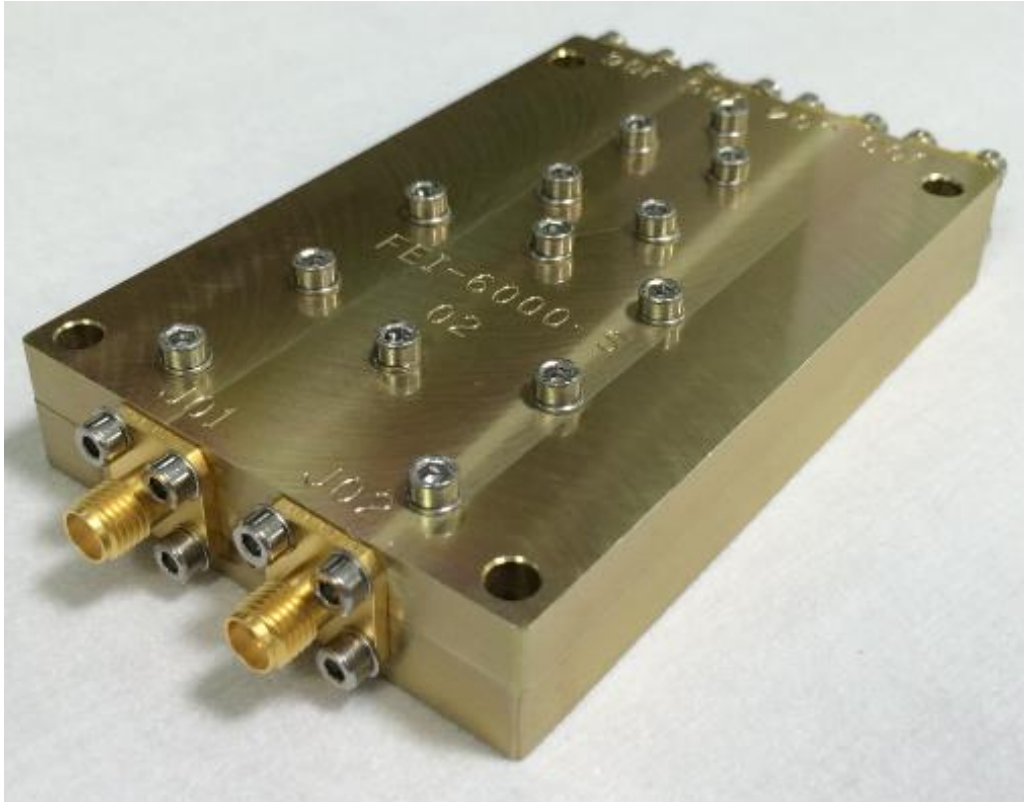


Kuva 28. 2:4 Tehonjakoyksikkö kokoonpanovaiheessa

Kansikappaleista suunniteltiin 0,10 mm pohjakappaleita kapeampia liittimien suunnassa. Tästä ratkaisusta oli hyötyä yksiköiden kannen kiinnityksessä, koska kansikappaleet sopivat paremmin paikalleen. Kansikappaleiden asennus olisi rasittanut liittimien juotoksia huomattavasti enemmän, jos kannet olisivat olleet yhtä suuria pohjakappaleiden kanssa. Kansi- ja pohjakappaleiden kohdalla osoittautui erityisen tärkeäksi, että koneistuksesta aiheutuneet purseet poistettiin huolellisesti ennen kokoonpanoa. Erityisesti liittimien kiinnitysreikien ympärille jääneet purseet saattoivat hankaloittaa kokoonpanoa, koska kansikappale ei mahtunut suunnitellusti liittimien väliin. Tämä ongelma pystyttiin kuitenkin välttämään kappaleiden huolellisella puhdistuksella ja tarkastuksella.

5.1 2:4 Tehonjakoyksikkö

2:4 tehonjakoyksikkö koostui kuudesta SMA-liittimestä, yksikön kannesta ja pohjasta, piirilevystä sekä kiinnitystarvikkeista. Vaatimusmäärittelyn mukaan tämän yksikön piti sopia 100 x 80 x 15 mm kokoiseen tilaan. Tässä mitoituksessa ei kuitenkaan ollut huomioitu liittimiä eikä kannen kiinnittämiseen käytettäviä ruuveja. Valmistetun yksikön ulkomitat olivat 89,8 x 60 x 15 mm. Valmistettu yksikkö täytti siis vaatimusmäärittelyn asettamat vaatimukset ulkomittojen osalta. Kuva 29 esittää valmistettua 2:4 tehonjakoyksikköä.



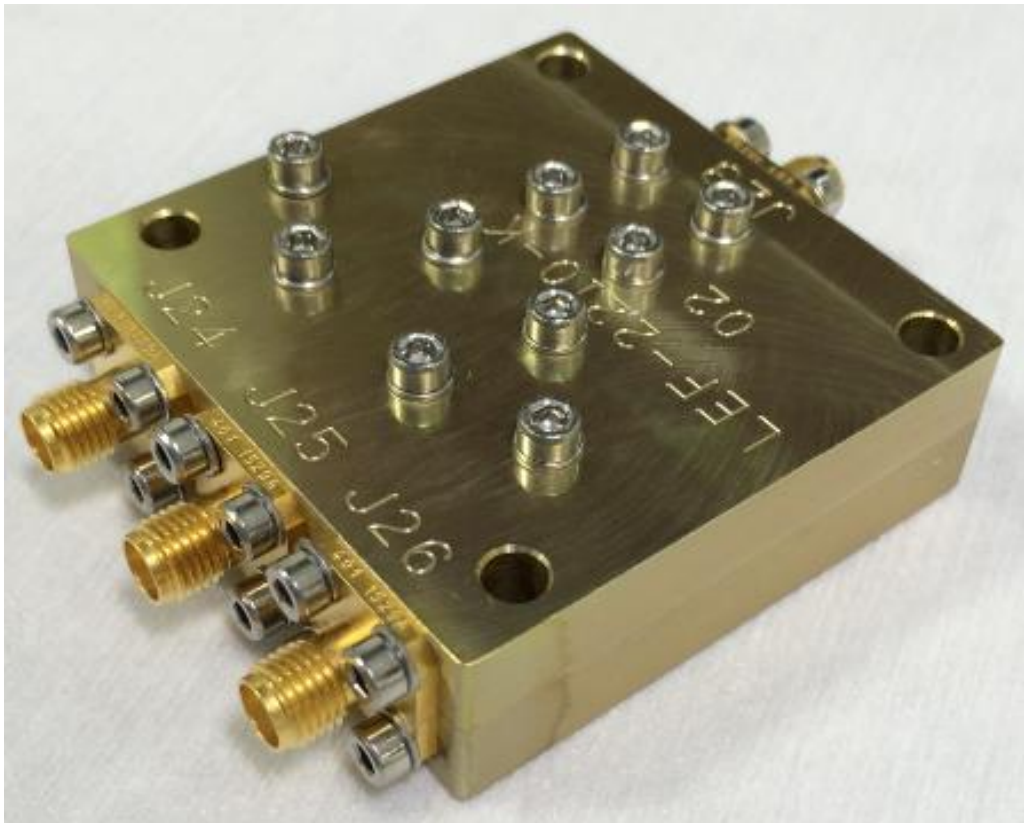
Kuva 29. 2:4 Tehonjakoyksikkö

Tämän tehonjakoyksikön maksimimassaksi oli määritelty 120,00 grammaa. Kokoonpanon jälkeen valmistetun yksikön massaksi mitattiin 113,65 grammaa. Yksikön massa saatiin siis vaatimusmäärittelyn vaatimaa maksimiarvoa pienemmäksi. Suunniteltujen kevennysten avulla pystyttiin vaikuttamaan huomattavasti yksikön massaan, mutta yksikön rakenne pysyi kuitenkin riittävän lujana. Yksikön massaa arvioitiin mallinnusvaiheessa suunnitteluohjelman avulla. 2:4 jakajan massaksi arvioitiin noin 120,50 grammaa. Tosin suunnitteluvaiheessa massan arviointi esimerkiksi erilaisten komponenttien osalta perustui ilmoitettuihin arvoihin, joten ero laskennallisessa ja todellisessa massassa johtuu luultavasti tästä. Suunnitteluohjelma laskee massat kappaleiden tilavuuden sekä tiheyden avulla, joten esimerkiksi pohja- ja kansikappaleiden massat ovat luultavasti hyvin lähellä arvioituja. Erot arvioidun ja todellisen massan välillä johtuvat luultavasti eroista kiinnitystarvikkeiden sekä liittimien massoissa.

Tehonjakoyksikön kanteen koneistettiin vaatimusmäärittelyn mukaiset merkinnät, jotta yksiköt pystytään tunnistamaan. Lisäksi yksiköiden kaapelit pystytään kiinnittämään oikeisiin liittimiin, koska liittimet on merkitty yksilöllisesti. Yksikköön suunniteltiin myös paineentasausta varten erillinen ilmareikä. Tämä halkaisijaltaan 1 mm ilmareikä toteutettiin yksikön pohjakappaleen sivulle kahden SMA-liittimen väliin.

5.2 1:3 Tehonjakoyksikkö

1:3 tehonjakoyksikkö koostui neljästä SMA-liittimestä, kansi- ja pohjakappaleesta, piirilevystä sekä kiinnitystarvikkeista. Tämän yksikön suurimmiksi mahdollisiksi ulkomitoiksi oli määritelty 58 x 50 x 18 mm. Näissä mitoissa ei kuitenkaan ollut huomioitu yksikköön kiinnitettäviä liittimiä, vaan nämä mitat olivat pohja- ja kansikappaleen maksimit. Valmistetun 1:3 jakajan ulkomitat olivat 51 x 50 x 15 mm, joten tämä yksikkö täytti vaatimukset ulkomittojen osalta. Kuva 30 esittää valmistettua 1:3 tehonjakoyksikköä.

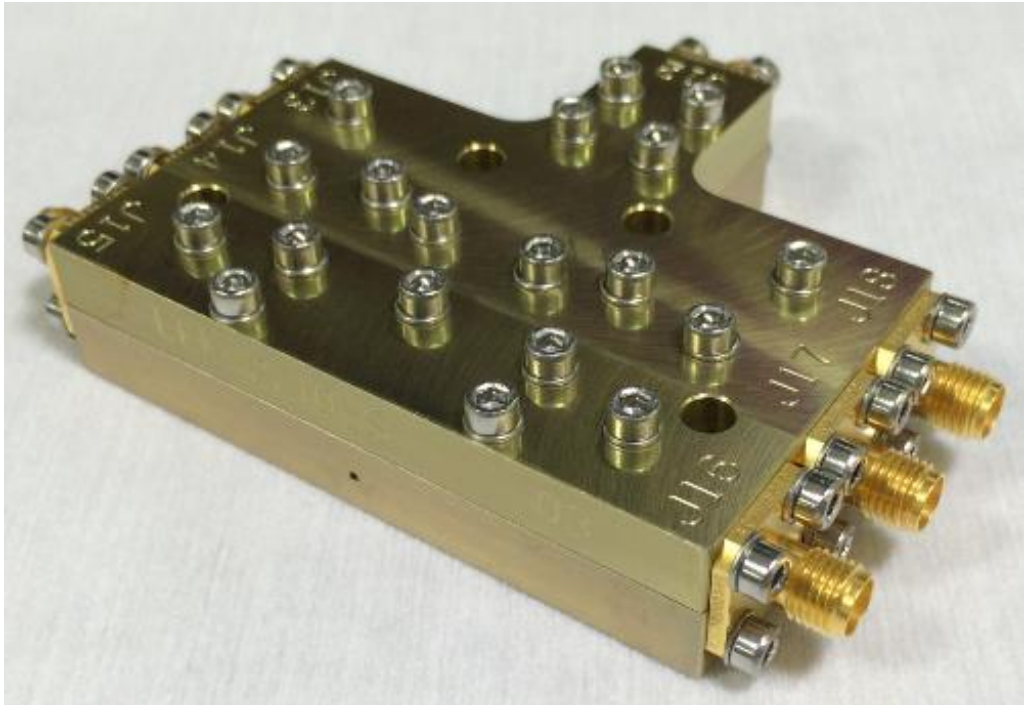


Kuva 30. 1:3 Tehonjakoyksikkö

Tämän tehonjakoyksikön maksimimassaksi oli määritelty 75,00 grammaa. Mallinnusvaiheessa yksikön massaksi arvioitiin noin 75,10 grammaa. Valmistuksen ja kokoonpanon jälkeen yksikön kokonaismassaksi mitattiin 69,95 grammaa, joka täyttää siis vaatimukset. Arvioidun ja todellisen massan erotus johtuu luultavasti samoista syistä kuin 2:4 jakajan kohdalla. Myös tässä yksikössä tunnistetiedot koneistettiin yksikön kanteen ja yksikön paineentasaus toteutettiin yksikön sivussa olevan ilmareiän avulla.

5.3 1:6 Tehonjakoyksikkö

1:6 tehonjakoyksikkö erosi muista yksiköistä ulkomuodoltaan ja sen ulkomitat olivat tarkasti määriteltyjä. Yksikön maksimitat olivat 72 x 72 x 20 mm ja lisäksi yksikön leveä osuus, johon kiinnitettiin kuusi SMA-liitintä, sai olla maksimissaan 40 mm korkea. Valmistetun tehonjakoyksikön ulkomitat olivat 70 x 61 x 15 mm, joten yksikkö täytti vaatimukset näiden mittojen osalta. Lisäksi määritellyn leveän osuuden korkeudeksi tuli 40 mm, joten yksikkö täytti myös tämän vaatimuksen. Yksikön sisälle asennettavan piirilevyn muoto ohjasi tässä yksikössä kiinnitysreikien sijoittelua ja tästä syystä kiinnitysreikiä ei voitu sijoitella yksikön kulmiin. Kuva 31 esittää valmistettua 1:6 tehonjakoyksikköä. Myös tämän yksikön kohdalla jokaisen liittimen tunniste kaiverrettiin yksikön kanteen. Yksikön tunnistenumero jouduttiin kuitenkin koneistamaan yksikön kylkeen, koska tunniste ei olisi mahtunut kannen yläpintaan.



Kuva 31. 1:6 Tehonjakoyksikkö

1:6 jakajan maksimimassaksi oli määritelty 120,00 grammaa. Mallinnuksen pohjalta valmistettavan yksikön massaksi arvioitiin noin 119,40 grammaa. Valmistetun yksikön massaksi mitattiin 111,45 grammaa, joten myös tämän yksikön kohdalla täytettiin asetetut vaatimukset massan osalta. Erot arvioidun ja todellisen massan välillä johtuvat luultavasti samoista syistä, kuin kahden muun tehonjakoyksikön kohdalla.

6. YHTEENVETO

Diplomityössä tutkittiin erilaisia ratkaisumalleja toteuttaa vaatimukset täyttäviä tehonjakoyksiköitä. Työn tavoitteena oli suunnitella ja mallintaa tehonjakoyksiköiden mekaniikka niin, että se täyttää asiakkaan asettamat vaatimukset. Mekaniikkasuunnittelu ja yksiköiden valmistus toteutettiin hyödyntämällä DA-Design Oy:n resursseja. Työssä keski-tyttiin kolmen erilaisen tehonjakoyksikön suunnitteluun, jotka integroidaan osaksi satelliitin tutkasignaalin tehonjakoverkkoa. Tehonjakoyksiköiden toteutukselle on olemassa useita erilaisia ratkaisumalleja, mutta tässä projektissa tarkat vaatimukset ohjasivat mekaniikkasuunnittelua. Mekaniikkasuunnittelun toteutuksessa hyödynnettiin kirjallisuustutkimusta, jonka avulla tutustuttiin erilaisiin mallinnustapoihin sekä suunnittelua ohjaviin standardeihin. Tutkimuksessa hyödynnettiin laaja-alaisesti avaruusteknologiaa sekä mekaniikkasuunnittelua käsittelevää kirjallisuutta ja kerättyä informaatiota hyödynnettiin yksiköiden suunnittelussa. Avaruusteknologian suunnittelu eroaa kuitenkin muusta suunnittelusta muun muassa poikkeuksellisten olosuhteiden ansiosta, jotka piti huomioida suunnitteluprosessin aikana.

Toimintatutkimuksen avulla kerättiin tietoa aikaisemmista avaruusteknologiaa käsittelevistä projekteista ja kehitettiin uusia ratkaisumalleja. Syklisen toimintatutkimuksen avulla tuotetta pystyttiin kehittämään vaihe kerrallaan ja muutosten seuraaminen oli helppoa. Tällaisessa projektissa toimintatutkimuksen käyttäminen on todella hyödyllistä, koska DA-Design Oy oli suorittanut hieman vastaavia projekteja myös aikaisemmin. Toimintatutkimuksen avulla kehitettiin samalla yrityksen toimintaa ja toisaalta kehitettiin uusia toteutustapoja tehonjakoyksiköille. Tutkimuskierrosten aikana tehonjakoyksiköiden rakenne muuttui ja yksiköt kehittyivät kohti lopullista mallia. Muutoksia yksikköihin aiheuttivat muun muassa muuttuneet vaatimukset sekä muutokset RF-tekniikan toteutuksessa. Muutoksiin pystyttiin kuitenkin reagoimaan ja tehonjakoyksiköistä muodostui vaatimukset täyttäviä.

RF-tekniikan toteutus vaikutti oleellisesti tehonjakoyksiköiden sisälle tulevien piirilevyjen muotoon. Piirilevyn muoto taas ohjasi merkittävästi mekaniikkasuunnittelua ja asetti rajoituksia mekaniikan toteutukselle. Mekaniikkasuunnittelun toteutusta olisi mahdollista yksinkertaistaa, jos mekaniikan toteutus huomioitaisiin aktiivisemmin RF-tekniikkaa sekä piirilevyjä suunniteltaessa. Toisaalta joissakin kohteissa vaatimusmäärittely ohjasi hyvin tarkasti RF-tekniikan suunnittelua ja näin mekaniikkasuunnittelu täytyi sovittaa näihin vaatimuksiin.

Tehonjakoyksiköiden mallinnuksessa hyödynnettiin Solidworks-suunnitteluohjelmaa, jonka avulla tutkittiin ja vertailtiin erilaisia vaihtoehtoisia toteutustapoja. Lisäksi ohjelman avulla tutkittiin yksiköiden erilaisia ominaisuuksia, kuten ominaisvärähtelytaajuuks-

sia sekä massaa. Mallinnus oli tehokas keino vertailla erilaisia toteutustapoja, koska mahdolliset ongelmatilanteet pystyttiin havaitsemaan jo ennen kappaleiden valmistusta. Lisäksi mallinnuksen avulla muutokset pystyttiin toteuttamaan melko nopeasti ja niiden vaikutusta pystyttiin arvioimaan myös kokonaisuuden kannalta. Suunnitellut tehonjakoyksiköt valmistettiin DA-Design Oy:n omilla työstökoneilla. Tämä helpotti projektin läpivientiä, koska yrityksellä oli kokemusta erilaisten tehonjakoyksiköiden valmistamisesta. Suunnittelussa pystyttiin hyödyntämään toimintatutkimuksen avulla kerättyä tietoa esimerkiksi käytettävien koneistuskeskusten ominaisuuksista sekä rajoituksista. Tutkimuksen avulla selvitettiin muun muassa RF-tekniikan toteutuksen kannalta optimaalista tehonjakoyksikön rakennetta. Toimintatutkimuksen avulla kerätty informaatio vaikuttikin suuresti yksiköiden mekaniikkojen toteutukseen ja valittuihin ratkaisumalleihin.

Diplomityössä suunniteltiin tehonjakoverkkoon integroitavat 2:4 jakaja, 1:3 jakaja sekä 1:6 jakaja. Nämä kolme tehonjakoyksikköä erosivat rakenteellisesti toisistaan, mutta yksiköiden suunnitteluprosessit olivat keskenään hyvin samankaltaisia. Jokaisessa yksikössä käytettiin samoja liittimiä sekä samasta materiaalista valmistettua piirilevyä. Liittimien sekä piirilevyn ominaisuudet ohjasivat myös omalta osaltaan suunnittelua, joten jokaisessa yksikössä oli havaittavissa useita samankaltaisuuksia. Taulukkoon 8 on koottu suunniteltujen tehonjakoyksiköiden keskeisimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 8. *Yhteenveto tehonjakoyksiköiden rakenteesta*

	Tehonjakoyksikkö		
	2:4	1:3	1:6
Materiaali	Alumiiniseos EN AW 6082-T6	Alumiiniseos EN AW 6082-T6	Alumiiniseos EN AW 6082-T6
Ulkomitat (mm)	89,8x60x15	50x51x15	61x70x15
Mitattu massa (g)	113,7	70,0	111,5
Määritelty maksimimassa (g)	120,0	75,0	120,0
Laskennallinen ominaisvärähtelytaajuus (Hz)	6632	12810	9687

Jokaisen yksikön laskennallinen ominaisvärähtelytaajuus täyttää vaatimusmäärittelyn asettamat vaatimukset. Yksiköiden ulkomuotoja ja rajapintoja koskevia vaatimuksia päivitettiin projektin edetessä ja valmistetut tehonjakoyksiköt täyttivät niille asetetut vaatimukset myös ulkomittojen osalta. Tehonjakoyksiköiden määritellyt maksimimassat osoittautuivat suunnitteluvaiheessa todella tiukoiksi. Suunnitteluohjelman avulla arvioit massat osoittautuivat kuitenkin hieman todellista korkeammiksi ja lopulta kaikki valmistetut yksiköt täyttivät niille asetetut vaatimukset massan suhteen. Taulukosta huoma-

taan, että jokaisen yksikön massa alittaa määritellyn maksimimassan. Massa saatiin vaaditulle tasolle useiden mekaanisten kevennysten avulla, jotka kuitenkin vaativat monimutkaisia koneistuksia. Monimutkaiset koneistukset taas pidensivät kappaleiden valmistusprosessia ja vaikuttivat tällä tavalla projektin aikatauluun.

Projektina tehonjakoverkon suunnittelu yhdisti useita eri tieteenaloja, joten projektihenkilöstön välisellä yhteistyöllä oli merkittävä rooli projektin onnistumisen kannalta. Aktiivisen yhteistyön avulla mekaniikkasuunnittelussa pystyttiin hyödyntämään monialaista osaamista ja uusiin ratkaisumalleihin saatiin erilaisia näkökulmia. Projektin läpivienti edellytti myös kattavaa dokumentointia. Mekaniikkasuunnittelussa dokumentointi käsitteli suurimmaksi osaksi valmistettavien kappaleiden valmistusohjeita. Tämän lisäksi dokumentointi sisälsi muun muassa räjäytyskuvien sekä rajapintakuvien tekemistä. Kattavan dokumentoinnin ansiosta projektin ratkaisumalleja on mahdollista hyödyntää ja kehittää myös tulevilla projekteilla.

Tehonjakoyksiköiden suunnittelu ja mallinnus onnistuivat mekaniikan osalta hyvin, koska valmistetut tehonjakoyksiköt täyttivät niille asetetut vaatimukset. Tehonjakoyksiköt pystyttiin kokoamaan ja kaikki suunnitellut komponentit pystyttiin kiinnittämään osaksi tehonjakoyksiköitä. Suunnittelu ja valmistus toteutettiin hyödyntämällä DA-Design Oy:n resursseja ja projektin aikana pystyttiin myös kehittämään yrityksen toimintaa muun muassa yhtenäistämällä mekaniikkasuunnittelun käytäntöjä. Projektin toteutuksesta saatiin kerättyä uutta tietoa liittyen tehonjakoyksiköiden suunnitteluun ja valmistukseen. Tätä tietoa voidaan hyödyntää myös tulevilla projekteilla.

LÄHTEET

- [1] P. Anttila, Se on projekti - vai onko? Hamina, Akatiimi, 2001
- [2] M. A. Aquirre, Introduction to Space Systems: Design and Synthesis, Springer New York, 2013
- [3] Y. Bodein, B. Rose, E. Caillaud, Explicit reference modeling methodology in parametric CAD system, Computers in Industry, 2014
- [4] Y. Bodein, B. Rose, E. Caillaud A roadmap for parametric CAD efficiency in the automotive industry, Computer-Aided Design, 2013
- [5] E. Carlholt, Alumiiniseokset, Painevaluseokset, Verkkolähde, Saatavissa (viitattu 26.5.2016): http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/metals_aluminum_FI.pdf
- [6] P. Chiggiato, Outgassing. Coatings, Chemistry and surfaces, Espanja, 2006
- [7] H. Colin, C.H. Simmons, D.E. Maguire, N. Phelps, Manual of engineering drawing. London: Newnes, 2009
- [8] ECSS standardi, Mechanical - Part 2A: Structural, ECSS-E-30 Part 2A. The Netherlands, 2000
- [9] ECSS standardi, Mechanical – Part 7A: Mechanical parts, ECSS-E-30 Part 7A. The Netherlands, 2000
- [10] ECSS standardi, Space engineering, Thermal control general requirements, ECSS-E-ST-31C, The Netherlands, 2008
- [11] European space agency, Requirements and standards, 2016, Verkkolähde. Saatavissa (viitattu 7.5.2016): http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Requirements_and_standards
- [12] European space agency, Suomi ja avaruus, 2016, Verkkolähde, Saatavissa (viitattu 7.5.2016): http://www.esa.int/fin/ESA_in_your_country/Finland/Suomi_ja_avaruus
- [13] Helicoil Plus kierre-elementit, Asennusreikien mitoitus, Masino Fastening Oy, Verkkolähde. Saatavissa (viitattu 7.6.2016): http://www.masino.fi/wp-content/uploads/2013/06/HELICOIL_Plus_Esite.pdf
- [14] E. Hietikko, Solidworks-Tietokoneavusteinen suunnittelu. Savonia-ammattikorkeakoulu, 2.painos, 2007

- [15] M. Hirz, W. Dietrich, A. Gfrerrer, J. Lang, *Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development*, Springer, 2013
- [16] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) standardi, 521-2002 - IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands, 2002
- [17] International Organization for Standardization ISO, 2016, Verkkolähde, Saatavissa: (viitattu 17.4.2016): <http://www.iso.org/iso/home/about.htm>
- [18] T. Jokinen, *Tuotekehitys*. Aalto-Yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, 2001
- [19] T. Laakko, *Tuotteen 3D-CAD-suunnittelu*, WSOY, 1998
- [20] A. Lehto, A. Räisänen, *RF- ja mikroaaltotekniikka*, Otatieto Oy, Espoo, 1994
- [21] Metalliteollisuuden standardisointiyhdistys Metsta ry, *ISO GPS-toleranssit, Opetusmateriaali*, 2016
- [22] A. Pere, *Koneenpiirustus 1 & 2*, Kirpe, 10. painos, 2009
- [23] Radiall, Verkkolähde, Saatavissa (viitattu 7.6.2016) <https://www.radi-all.com/about/brief-history-overview>
- [24] Rogers corporation, *Thermoset microwave materials*, Verkkolähde, Saatavissa (viitattu 29.8.2016) <https://www.rogerscorp.com/documents/728/acs/TMM-Thermoset-laminate-data-sheet-TMM3-TMM4-TMM6-TMM10-TMM10i-TMM13i.pdf>
- [25] E. Roviola, *Machines and Signs: A History of the Drawing of Machines*, Springer Netherlands, 2013
- [26] K. Ruuska, *Pidä projekti hallinnassa. Suunnittelu, menetelmät, vuorovaikutus*. 6. painos, Talentum media, 2007
- [27] J.J. Shah, M. Mäntylä, *Parametric and feature-based CAD/CAM: concepts, techniques, and applications*, J. Wiley, 1995
- [28] Space Finland, Tekes, Verkkolähde, Saatavissa (viitattu 8.5.2016) http://spacefinland.fi/liiketoiminta_tutkimus/yritykset/
- [29] Suomen standardisointiliitto SFS ry, 2016, Verkkolähde. Saatavissa (viitattu 7.5.2016) www.sfs.fi
- [30] Susman, G. I. and Evered, R. D. 1978, *An Assessment of the Scientific Merits of Action Research*, *Administrative Science Quarterly*

- [31] Tiainen, T., Aittoniemi, J., Haukijärvi, I. & Yli-Karhu, T. 2015, Toimintatutkimus tietojenkäsittelytieteen tutkimuksessa, Informaatiotieteiden yksikön raportteja 38/2015, Informaatiotieteiden yksikkö Tampereen Yliopisto,
- [32] Total Materia, Materiaalitietokanta, Verkkolähde, Saatavissa: (viitattu 30.5.2016): <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=AluminumGrades&LN=FI>

LIITE A: 1:6 TEHONJAKOYKSIKÖN ICD-DOKUMENTTI

Conn. No.	Type	Remarks
J12	SMA (f)	
J13	SMA (f)	
J14	SMA (f)	
J15	SMA (f)	
J16	SMA (f)	
J17	SMA (f)	
J18	SMA (f)	

THERMAL INTERFACES

1. Thermal heat capacity: N/A
2. Power dissipation:
Total: 0 W
3. Mounting contact area: 2046.96 mm²
4. Thermo optical properties:
Surface treatment: Chromate conversion coating
Emissivity: 0.1 (Estimate)
5. Temperature ranges:
-Non-operating: -50 °C ... +70 °C
-Switch-On: -30 °C ... +50 °C
-Operating: -25 °C ... +50 °C

MECHANICAL INTERFACES

1. Material: Aluminium 6082-T6/651
2. Contact surface roughness: < 3.2 Ra
3. Contact surface flatness: < 0.1 mm
4. Type of fixing screws: 4x DIN 912 M4x20 A4-70
5. Mounting torque for fixing screws: 2.6 ± 0.2 Nm
6. Total mass: 119.37 g
7. Center of gravity (CoG):
X = 11.52 ± 2 mm
Y = 27.48 ± 2 mm
Z = 8.63 ± 2 mm
8. Moments of inertia at the reference coordinate system:
I_{xx} = 17942.142 I_{yy} = 38747.66 I_{zz} = 11943.95
I_{yx} = 38747.66 I_{xy} = 60798.13 I_{yz} = 29021.51
I_{zx} = 11943.95 I_{zy} = 29021.51 I_{zz} = 217002.24

Reference hole

A Mounting surface (Reference plane)
Height: 0.00

B Cavity for venting
Height: -1.00

C Cavity for weight reduction
Height: -6.10

Drawn by:	2016-04-04	Title:	1:6 Divider	Supplementary file:	LEF-22-10-S EM1
Checked by:	2016-05-10	Subject:			
Approved by:	2016-05-10	Order number:	0A0148.00.0	Material:	Alu/Al
		Surface finishing:	Chromate Conversion Coating	Surface treatment:	
ICD DESIGN OY Puhelin: +358 9 25110000 Faksi: +358 9 25110001 www.icddesign.com			Document type:	document type	document type
			ICD	Released	Released
			18.05.2016	18.05.2016	20160511
			18.05.2016	18.05.2016	18.05.2016

LIITE C: 1:3 TEHONJAKOYKSIKÖN ICD-DOKUMENTTI

Conn. No.	Type	Remarks
J23	SMA (0)	
J24	SMA (0)	
J25	SMA (0)	
J26	SMA (0)	

THERMAL INTERFACES

1. Thermal heat capacity: N/A
2. Power dissipation:
Total: 0 W
3. Mounting contact area: 1996.51 mm²
4. Thermo optical properties:
Surface treatment: Chromate conversion coating
Emissivity: 0.1 (Estimate)
5. Temperature ranges:
- Non-operating: -50 °C ... +70 °C
- Switch-On: -50 °C ... +50 °C
- Operating: -25 °C ... +50 °C

MECHANICAL INTERFACES

1. Material: Aluminium 6082-T61651
2. Contact surface roughness: $\leq 3.2, Ra$
3. Contact surface flatness: ≤ 0.1 mm
4. Type of fixing screws: 4 x DIN 917 M4x20 A4-70
5. Mounting torque for fixing screws: 2.6 ± 0.2 Nm
6. Total mass: 75.09 g
7. Center of gravity (CoG):
X = 10.52 \pm 2 mm
Y = 12.83 \pm 2 mm
Z = 8.45 \pm 2 mm
8. Moments of inertia at the reference coordinate system:
Ixx = 48511.82 Iyy = 19345.65 Izz = 13812.71
Ixy = 19345.65 Iyz = 55406.20 Ixz = 8420.02
Iyz = 13812.71 Izy = 8420.02 Izz = 86999.45

∅ 1.75
Venting hole

A Mounting surface (Reference plane)
Height: 0.00

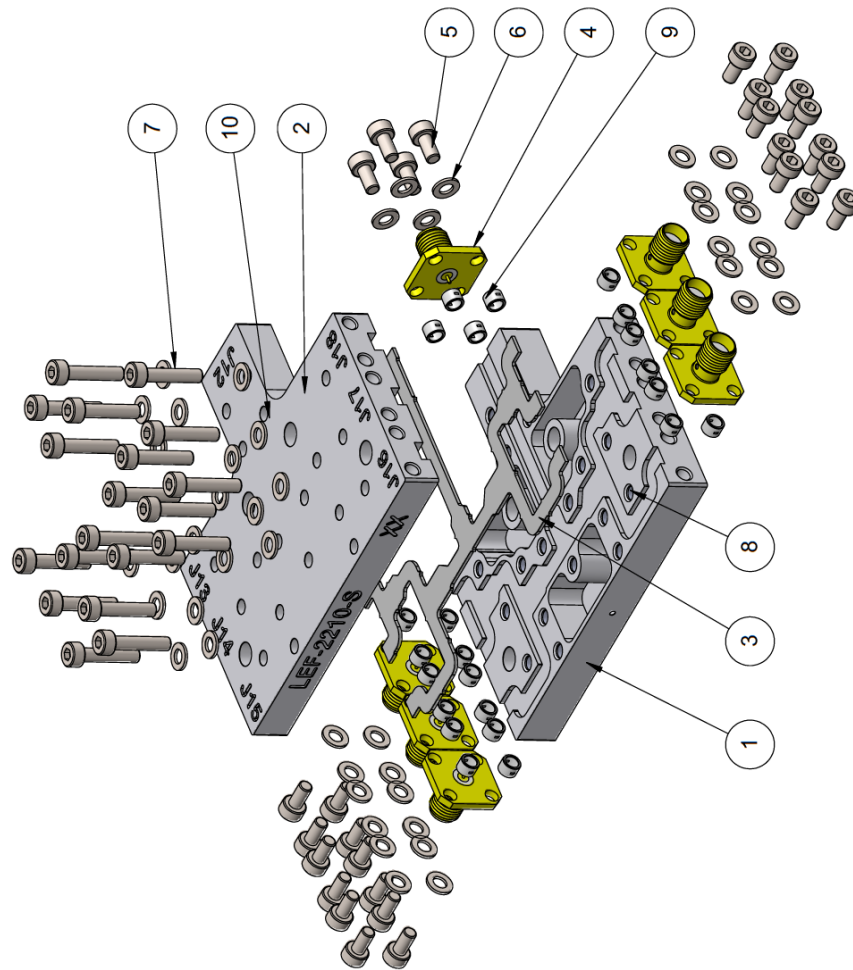
B Cavity for venting
Height: -1.00

C Cavity for weight reduction
Height: -6.10

Drawn by:	2018.05.02	Checked by:	2018.05.02
Approved by:	2018.05.02	Material:	DA0152-00-B
Part name:	1:3 Splitter	Surface treatment:	Chromate Conversion Coating
Part number:	LEF-2210-K-EM1	Material spec. specified:	
Revision:	01	Document type:	Assembly drawing
Drawn by:	2018.05.02	Document no.:	7722
Checked by:	2018.05.02	Released:	
Approved by:	2018.05.02	Doc. name:	
Part name:	1:3 Splitter	Doc. no.:	
Part number:	LEF-2210-K-EM1	Doc. date:	
Revision:	01	Doc. size:	

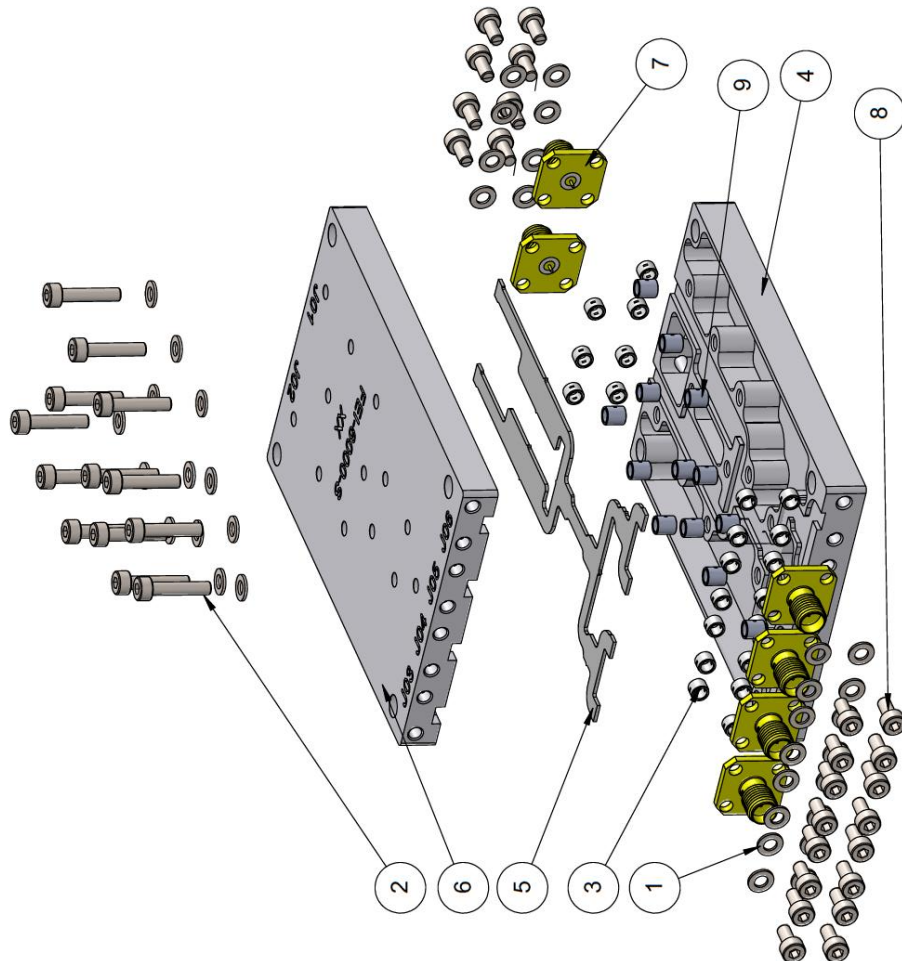
LIITE D: 1:6 TEHONJAKOYKSIKÖN RÄJÄYTYSKUVA

ITEM NO.	PART NUMBER	SW-Title(Title)	QTY.
1	DP0148-0002-C	1:6 Divider Frame	1
2	DP0148-0003-C	1:6 Divider Lid	1
3	DP0148-0001-B	1:6 Divider PCB	1
4	DC01580	SMA (F) connector R126 414 600	7
5	DC00556	Screw - DIN 912 M2.5x5 A4	28
6	DC00494	Washer - DIN 433 M2.5 A4	47
7	DC01337	M2.5x12 Socket cap screw DIN 912 A4	19
8	DC01464	Helicoll - Screwlock M2.5x0.45x1.5d	19
9	DC01413	Helicoll - Screwlock M2.5x0.45x1d	28
10	DP0148-0004-A	M4 Custom washer, DC01xxx	7



LIITE E: 2:4 TEHONJAKOYKSIKÖN RÄJÄYTYSKUVA

ITEM NO.	PART NUMBER	SW-Title(Title)	QTY.
1	DC00494	Washer - DIN 433 M2.5 A4	37
2	DC01337	M2.5x12 Socket cap screw DIN 912 A4	13
3	DC01413	Helicoll - Screwlock M2.5x0.45x1d	24
4	DP0150-0002-B	4:2 Central Cal Divider Frame	1
5	DP0150-0001-B	2:4 Central Cal Divider PCB	1
6	DP0150-0003-B	4:2 Central Cal Divider lid	1
7	DC01580	SMA (F) connector R126 414 600	1
8	DC00556	Screw - DIN 912 M2.5x5 A4	24
9	DC01464	Helicoll - Screwlock M2.5x0.45x1.5d	13



LIITE F: 1:3 TEHONJAKOYKSIKÖN RÄJÄYTYSKUVA

ITEM NO.	PART NUMBER	SW-Title(Title)	QTY.
1	DP0152-0002-B	1:3 Splitter Frame	1
2	DC01580	SMA (F) connector R126 414 600	4
3	DC00494	Washer - DIN 433 M2.5 A4	26
4	DC00556	Screw - DIN 912 M2.5x5 A4	16
5	DP0152-0003-B	1:3 Splitter Lid	1
6	DC01337	M2.5x12 Socket cap screw DIN 912 A4	10
7	DC01413	Helicoil - Screwlock M2.5x0.45x1d	16
8	DP0152-0001-B	1:3 Divider PCB	1
9	DC01464	Helicoil - Screwlock M2.5x0.45x1.5d	10

