

Antti Kangasperko

Robottikäyttöisten säteilysuojatulppien suunnittelu säteilylähteiden automatisoituun testaukseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

27.4.2016

Tekijä Otsikko	Antti Kangasperko Robottikäyttöisten säteilysojatulppien suunnittelu säteilylähteiden automatisoituun testaukseen
Sivumäärä Aika	68 sivua 27.4.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	Menetelmäsuunnittelija Jukka-Pekka Jokiahon Lehtori Heikki Paavilainen
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella testausvälineitä säteilylähteiden tuotannossa käyttöön otettavaan testausrobotisoluun. Aiemmin säteilylähteiden testaus on suoritettu tuotantotyöntekijöiden toimesta manuaalisesti. Automatisoituun testaukseen siirtyminen on luonut tarpeen suunnitella uusia testausvälineitä, jotka soveltuvat teollisuusrobotin käytettäväksi.</p> <p>Säteilylähteet käyvät läpi sarjan erilaisia testejä, joiden tarkoitus on varmistaa säteilylähteiden laatu ja turvallisuus sekä viranomaisten vaatimusten täyttyminen. Eräässä testivaiheessa säteilykeila peitetään säteilysojatulpalla, jotta voidaan mitata säteilylähteen kuoren läpi tunkeutuvan hajasäteilyn määrä. Tämän työn tavoite on suunnitella eri säteilylähteisiin kiinnittyvät robottikäyttöiset säteilysojatulpat sekä tulppatelineet, jotka mahdollistavat tulppien automaattisen käytön.</p> <p>Aluksi perehdytään työn teettäjän Planmeca Oy:n liiketoimintaan ja tuotteisiin, minkä jälkeen tutustutaan testausrobotisoluun ja käydään läpi pintapuolisesti röntgensäteilyn teoriaa. Varsinainen suunnittelutyö alkaa säteilysojatulppien mekaaninen toimintaperiaatteen hahmottelulla, jonka jälkeen keskitytään säteilysojatulppien tarttumismekanismeihin ja säteilynestokykyyn. Tämän jälkeen tutkitaan mahdollisia tulppatelineiden paikkoja testialueella ja suunnitellaan telineet.</p> <p>Työssä jouduttiin kiinnittämään erityistä huomiota säteilysojatulppien toimintavarmuuteen, robotin liikkeiden luonteeseen ja testauskaappien varusteluihin. Automaattisen testauksen aikana syntyviä mekaanisia vikatilanteita pyrittiin välttämään ja korjaamaan suunnittelun keinoin. Suunnittelussa käytettiin apuna 3D-mallinnusohjelmaa ja rakennettiin prototyyppijä, joiden toimintaa testattiin käsin, robotin kanssa ja säteilymittauksin. Tulppatelineen lujuus analysoitiin FEM-ohjelman avulla.</p> <p>Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin; neljä säteilysojatulppaa ja tulppatelineet saatiin suunniteltua. Valmiista suunnitelmista laadittiin valmistus- ja kokoonpanopiirustukset. Suunnitellut testilaitteet tilattiin alihankkijalta ja ne tullaan asentamaan testausalueelle.</p>	
Avainsanat	Mekaniikka, DFA, röntgen, säteilysoja, säteilylähte, putkipää, testaus, robotti, FEM

Author Title	Antti Kangasperko Design of Robot Usable Radiation Protection Plugs in Automatic Testing of Radiation Sources
Number of Pages Date	68 pages 27 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering and Production Technology
Specialisation option	Product Design
Instructors	Jukka-Pekka Jokiaho, Production Method Designer Heikki Paavilainen, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to design testing equipment for a new robotic testing cell in the production line of radiation sources. Formerly the testing of radiation sources was carried out manually by production line workers. Introduction of the robot cell has created a need to redesign the testing equipment to be suitable for robot use.</p> <p>Radiation sources go through a series of tests in order to ensure their quality and safety as well as the compliance with authority requirements. At one testing phase, the radiation beam is covered with a radiation protection plug so that the amount of leakage radiation penetrating the casing of the radiation source can be measured. The goal was to design these radiation protection plugs for all different radiation sources as well as the racks to hold the plugs.</p> <p>This thesis was commissioned by Planmeca Oy. After a short introduction of their business operations and products, the robot testing cell and some theory of X-ray radiation were reviewed. The design of radiation protection plugs began with sketching the mechanical principles of operation, followed by the design of grabbing mechanisms and radiation protection properties of each plug. Finally, the optimal locations for the plug racks were studied and the racks designed.</p> <p>During the design process, special attention was paid to the reliability of operation, nature of the robot's movement and other equipment of the testing cabinets. Possible mechanical faults were minimized by means of design. 3D CAD software was used to aid the designing process and prototypes were built to verify the functionality of the plugs and racks. Prototypes were tested manually and with the robot, and they were put to a radiation measurement test. The strength of the plug rack was analyzed with FEM software.</p> <p>As a result, four radiation protection plugs and three variations of plug racks were designed. Manufacturing and assembly drawings were drafted. The designed equipment was ordered from a subcontractor and the finished products are to be installed in the robot testing cell area.</p>	
Keywords	Mechanics, DFA, X-ray, radiation, protection, source, tube head, testing, robot, FEM

Sisällys

Lyhenteet ja yksiköt

1	Johdanto	1
2	Tausta ja tavoitteet	2
2.1	Planmecan esittely	2
2.2	Planmecan röntgenkuvantamislaitteet	3
2.3	Röntgensäteily ja säteilylähteet	6
2.4	Säteilylähteiden laadunvarmistus	11
2.5	Laadunvarmistuksen automatisointiprojekti	13
2.6	Työn lähtötilanne ja tavoitteet	15
3	Säteilysuojatulppien lukitusadapteri	18
4	Säteilysuojatulppien suunnittelu	20
4.1	ProMax-tulppa	20
4.1.1	Lähtötilanne	20
4.1.2	Tartuntamekanismin suunnittelu	21
4.1.3	Jousipainimen mitoitus	22
4.1.4	Tulpan rungon suunnittelu	29
4.2	ProOne-tulppa	30
4.2.1	Lähtötilanne	30
4.2.2	Tartuntamekanismin suunnittelu	31
4.2.3	Tulpan rungon suunnittelu	34
4.3	ProX-tulppa	36
4.3.1	Lähtötilanne	36
4.3.2	Tartuntamekanismin suunnittelu	37
4.3.3	Tulpan rungon suunnittelu	37
4.4	ProMax 120 kV -tulppa	39
4.4.1	Lähtötilanne	39
4.4.2	Tulpan rungon ja säteilyominaisuuksien suunnittelu	39
5	Tulppatelineen suunnittelu	42
5.1	Tulppatelineen vaatimukset	42
5.2	Tulppatelineen rungon suunnittelu	44

5.3	Pidikelevyn suunnittelu	48
5.4	FEM-analyysi	50
5.4.1	Rakenteen yleinen lujuus	50
5.4.2	Kosketuspaine ja hitsisauman lujuus	54
5.4.3	Päätelmät	60
6	Lopputulokset ja käyttöönotto	61
6.1	Työn tulokset	61
6.2	Asennusohjeita	62
6.3	Kunnossapito	64
7	Yhteenveto	65
	Lähteet	66

Lyhenteet ja yksiköt

DFA	Design for Assembly
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEM	Finite Element Method
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
PLM	Product Lifecycle Management
POM	polyoksimetyleeni
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm, ihmisen käsivarren kaltainen robottirakenne
STUK	Säteilyturvakeskus
c	valon nopeus
d	väliaineen paksuus
E	fotonin energia, kvanttienergia
e	Neperin luku
F	voima
h	Planckin vakio, uran syvyys
I	säteilyn intensiteetti
k	jousivakio

n	varmuusluku
R_e	myötöraja
$R_{p0,2}$	myötölujuus, 0,2 % venymäraja
r	säde
T	ulosvetovoima
u	siirtymä
v	värähtelytaajuus
x	kuulan painuma
y	kuulan korkeus
β	kosketuskulma
λ	aallonpituus
μ	säteilyn matkavaimennuskerroin
σ	normaalijännitys
φ	fotonien kertymänopeus

1 Johdanto

Tämän insinööri työn on teettänyt Planmeca Oy:n röntgendivisioona. Työ liittyy röntgenkuvantamislaitteiden tuotannossa meneillään olevaan säteilylähteiden laadunvarmistuksen automatisointiprojektiin. Tähän mennessä säteilylähteet on testattu ihmisten toimesta testikaapeissa. Automatisointiprojektin tavoite on toteuttaa laadunvarmistus automaatiojärjestelmän avulla ja tehostaa näin testausprosessia. Automaatiojärjestelmän keskiössä on teollisuusrobotti, joka käsittelee säteilylähteitä. Aiheesta on aiemmin tehty kaksi diplomityötä.

Eräässä testivaiheessa säteilylähteen sädeikkuna peitetään tulpalla ja mitataan rungon läpi tunkeutuvan säteilyn määrää. Työn tavoitteena on suunnitella eri säteilylähteisiin sopivat säteilysuojatulpat tätä testivaihetta varten sekä teline, joka pitelee tulppia. Tulppien ja telineen suunnittelussa on huomioitava se, että niitä käsittelee teollisuusrobotti ja että tulppien kiinnittymisen on oltava ehdottoman toimintavarmaa, jotta testausprosessi ei häiriintyisi. Suunnittelussa on otettava huomioon testauskaappien varusteet ja mahdolliset ongelmatilanteet.

Suunnittelu aloitetaan ideoinnista ja luonnostelusta kynällä ja paperilla. Ideoista valitaan parhaat, minkä jälkeen luodaan 3D-malleja käyttäen Pro/ENGINEER 3D-CAD ohjelmaa. Osien mittojen yhteensovittamiseksi 3D-malleista luodaan kokoonpanoja. Mitoituksessa käytetään tarvittaessa apuna myös laskentaa ja simulointiohjelmiä. Suunnitelmien pohjalta rakennetaan prototyyppejä, joiden avulla suunnitelmien toimivuutta voidaan arvioida käytännössä. Prototyyppien valmistuksessa palvelee Planmecan oma protopaja. Prototyyppien mekaanisia ominaisuuksia arvioidaan käsin ja robotin testiajojen avulla, kun taas säteilynestokykyä arvioidaan testikaapissa oikeilla testiohjelmissä. Testauksesta saatavaa tietoa käytetään hyväksi parempien suunnitelmien aikaansaamiseksi. Kun suunnitelmat ovat valmiit, kaikista tulpista ja telineestä laaditaan valmistus- ja kokoonpanopiirustukset, minkä jälkeen kaikki suunnitellut osat tilataan alihankkijalta.

2 Tausta ja tavoitteet

2.1 Planmecan esittely

Planmeca Oy perustettiin Helsingissä vuonna 1971. Ensimmäisiä tuotteita olivat hammashoitotuolit ja instrumenttikaapistot, joita valmistettiin aluksi vaatimattomasti autotalissa. Ensimmäiset vuodet menivät markkinoille asettumisessa ja tuoteryhmien suunnittelussa. Pian alkoi kuitenkin kansainvälinen laajentuminen; tytäryhtiöitä perustettiin Yhdysvaltoihin, Ruotsiin ja Italiaan. (Planmeca Oy 2016.)

Nykyään Planmeca Oy on yksi maailman johtavista hammashoitotuotteiden valmistajista. Perheyrityksen toimitusjohtajana toimii perustaja ja pääomistaja Heikki Kyöstilä. Yhtiön palveluksessa on noin 700 henkilöä ja pääkonttori sijaitsee Herttoniemessä, Helsingissä. Planmecan tuotteet valmistetaan Suomessa, ja yritys toimii tiiviissä yhteistyössä yliopistojen ja korkeakoulujen kanssa. Planmeca Oy toimii emoyhtiönä Planmeca Groupille, jonka tytäryhtiöitä ovat Planmed Oy, Plandent Oy, LM-Instruments Oy, Opus Systemer AS, Triangle Furniture Systems Inc, E4D Technologies ja Nordic institute of Dental Education Oy. Vuonna 2014 Planmeca Groupin liikevaihto oli noin 740 milj. euroa ja se työllisti noin 2 700 henkeä maailmanlaajuisesti. (Planmeca Group 2016.)

Planmecan kasvua ovat vauhdittaneet lukuisat hammashoitolaitteiden teknologiaainnovaatiot. Vuonna 1983 Planmeca toi markkinoille maailman ensimmäisen mikroprosessoriohjatun hoitotuolin ja kolme vuotta myöhemmin ensimmäisen röntgenlaitteensa, jossa oli myös mikroprosessoriohjaus. Vuonna 1995 esiteltiin digitaalikuvantamisjärjestelmä ja neljä vuotta myöhemmin hammashoitolan integroitu IT-järjestelmä, joka mahdollisti kaikkiin digitaalisiin potilastietoihin pääsyn hoitokoneen näyttöpaneelistä. 2000-luvulla hampaiden 3D-kuvantamisessa alettiin hyödyntää kartiokeilatomografiaa ja röntgenlaitteiden rakenteissa SKARA-robottimekanismia. Myös tuotteiden muotoiluun ja käyttöergonomiaan tehtiin merkittäviä panostuksia. Vuonna 2011 Planmeca esitteli Digital perfection -konseptin, jossa potilaan valokuva, röntgenkuva ja digitaalinen jäljennös voidaan yhdistää yhdeksi 3D-malliksi, mikä helpottaa kliinistä työskentelyä. Planmecalla on tehty myös paljon tieteellistä tutkimusta röntgenkuvantamisen aiheuttaman säteilyannoksen pienentämiseksi. (Planmeca Oy 2016.)

Nykyinen Planmeca Oy:n tuotevalikoima koostuu röntgenkuvantamislaitteista, hammashoitotuoleista, hoitokoneiden ohjelmistoista sekä hammasimplanttien CAD/CAM-jyrsinkeskuksista. (Planmeca Oy 2016.)

2.2 Planmecan röntgenkuvantamislaitteet

Planmecan hammaslääketieteellisiä röntgenkuvantamislaitteita ovat ProMax, ProOne ja ProX. Kaikki laitteet ovat digitaalisia, ja niissä on kosketusnäyttö. ProMax on panooramakuvantamislaitte, joka kykenee lukuisiin eri toimintoihin. Siitä on olemassa useita versioita erikokoisilla detektoripaneeleilla ja eri lisävarusteilla. Pienimmillä detektoripaneeleilla voidaan kuvata hampaita ja leukaluuta, mutta suurimmilla voidaan kuvantaa koko pääkallo kerralla. ProMax 3D-kuvantamislaitteet kykenevät ottamaan potilaasta digitaalisia 3D-röntgenkuvia, perinteisiä valokuvia ja kasvojen muodot ja korkeusdatan skannaavia digitaalisia jäljenteitä ja yhdistämään ne yhden 3D-mallin eri kerroksiksi. Tästä teknologiasta on huomattavaa hyötyä esimerkiksi kasvojen rekonstruktioleikkauksissa. Skannatun 3D-mallin avulla tuhoutuneen luuston tilalle laitettava, täydellisesti istuva implantti voidaan suunnitella ja valmistaa etukäteen (kuva 1), mikä säästää leikkauksiaikaa ja pienentää potilaalle aiheutuvien komplikaatioiden todennäköisyyttä.



Kuva 1. Potilaan vasen poskiluu on tuhoutunut syöpäkasvaimen takia. Kallon 3D-mallin avulla implantin suunnittelu on huomattavasti helpompaa kuin perinteisin menetelmin. (Planmeca Intranet 2016.)

ProMaxin Rungon SKARA-mekanismi mahdollistaa panoraamakuvien ottamisen; kuvantamislaitte pyörähtää potilaan pään ympäri seuraten samalla vakioetäisyydellä potilaan hampaita. Näin saadaan tasoon taitettu 2D-röntgenkuva, jossa jokainen hammas näkyy tarkasti. ProMax-tuotteisiin on saatavissa lisävarusteena myös kefalometrinen varsi, jolla potilaan kallo voidaan projektiokuvantaa (kuva 2).



Kuva 2. Planmeca ProMax 3D -röntgenkuvantamislaitte, johon on kiinnitetty kefalometrinen lisävarsi (vasemmalla) kallon projektiokuvantamista varten. (Planmeca Intranet 2016.)

ProOne on ProMaxiin verrattuna pelkistetympi röntgenkuvantamislaitte. Se kykenee ottamaan yksittäisiä röntgenkuvia sekä panoraamakuvia. Laitteessa on automaattinen tarkennus. Laitteen käyttöliittymän suunnittelussa on panostettu helppokäyttöisyyteen. ProOne on voittanut useita muotoilupalkintoja vuosina 2007–2009.

ProX on intraoraaliröntgenlaite eli kuvantaminen tapahtuu suun sisäisesti. Säteilylähde on liikuteltavan varren päässä ja se asetetaan sopivalle etäisyydelle potilaan pään ulkopuolelle (kuva 3). Potilaan suuhun kuvattavan hampaan taakse laitetaan ProSensor HD-anturi, jolle kuva valotettaessa muodostuu. Digitaalinen röntgenkuva on valmis lähes heti valotuksen jälkeen (Planmeca Oy 2016). ProX on malliston edullisin ja eniten myyty malli.



Kuva 3. ProX intraoraaliröntgenlaite käytössä. (Planmeca Intranet 2016.)

2.3 Röntgensäteily ja säteilylähteet

Röntgensäteily on sähkömagneettista säteilyä, kuten esimerkiksi näkyvä valo ja radioaallot, mutta se tapahtuu lyhyemmällä aallonpituudella. Röntgensäteilyä kuvaillaan joko sen kvanttien (fotonien) energian tai aallonpituuden ja värähtelytaajuuden avulla. Niiden välinen yhteys on

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

missä E on fotonin energia, h Planckin vakio, ν värähtelytaajuus, λ aallonpituus ja c valon nopeus. Fotonin energian yksikkö on eV, elektronivoltti. Röntgendiagnostiikassa energian suuruus on yleensä 10–150 keV. Mitä suurempi säteilyn kvantin energia on, sitä lyhyempi sen aallonpituus on ja sitä läpikäyvämpää eli kovempaa säteily on. Suurienerginen säteily vaimenee väliaineessa huomattavasti vähemmän kuin matalaenerginen eli pehmeä säteily, joka absorboituu voimakkaasti väliaineeseen. (Pukkila 2004.)

Aalto-hiukkasdualismin mukaan sähkömagneettisella säteilyllä on sekä aalto- että hiukkasominaisuuksia. Koska röntgensäteiden kvanttienergia on niin suurta, että niiden hiukkasominaisuudet korostuvat aalto-ominaisuuksiin nähden, niitä voidaan ajatella yksittäisinä hiukkasina, fotoneina. Fotonit kulkevat suoraviivaisesti, kunnes ne vuorovaikuttavat jonkin aineen kanssa, jolloin ne joko siroavat tai absorboituvat luovuttaen energiaa aineeseen. Vuorovaikutuksen seurauksena fotonista irtoaa elektroneja, jotka aiheuttavat vuorovaikutuskohdan ympärille ionisoituneita ja virittyneitä atomeja. Sirottuaan fotoni jatkaa matkaansa uuteen suuntaan ja mahdollisesti siroaa uudelleen, kunnes se lopulta absorboituu. (Pukkila 2004.)

Sironnasta voidaan erotella koherentti sironta eli niin sanottu Rayleghin sironta sekä Comptonin sironta eli epäkoherentti sironta. Koherentissa sironnassa energian luovutus aineeseen ja sirontakulma ovat hyvin pieniä, kun taas epäkoherentissa sironnassa fotonin suunta ja energia muuttuvat merkittävästi. Kun fotonin energia pienenee, sen absorboitumisen todennäköisyys kasvaa. Absorptiossa fotoni häviää ja sen energia siirtyy vuorovaikuttavalle atomille. (Pukkila 2004: 18–28.)

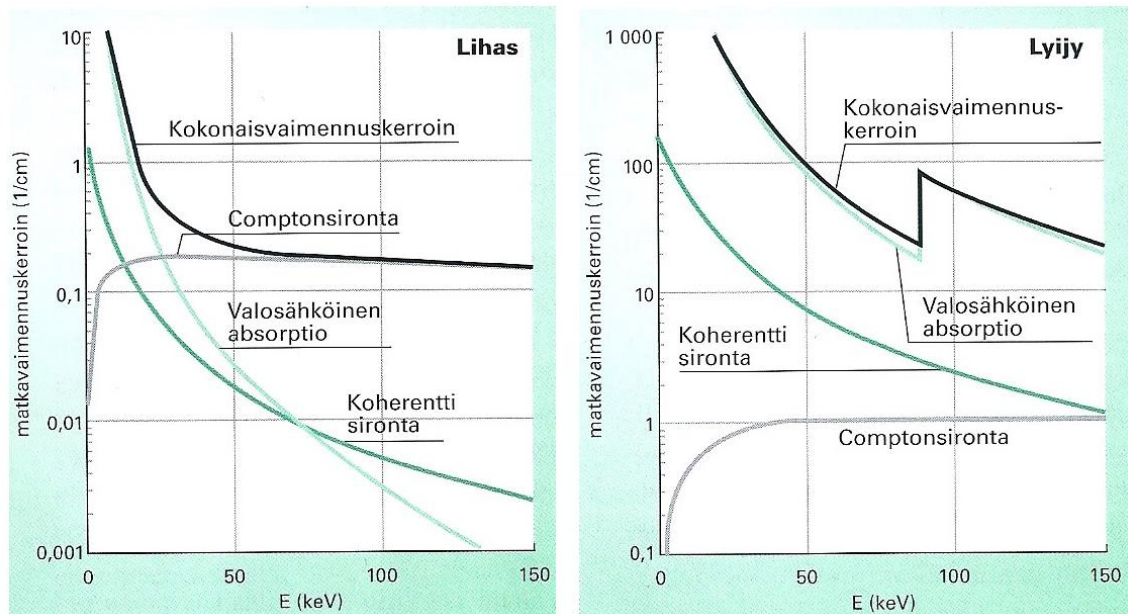
Kun elektroni törmää atomiin, atomin alemmilta elektronikuorilta saattaa irrota elektroni. Tätä kutsutaan ionisoitumiseksi. Jos irronnut elektroni korvautuu ylemmältä elektroni-

kuorelta tulevalla elektronilla, atomi nousee korkeampaan energiatilaan eli virittyy. Virittyneet atomit palaavat normaaliin tilaansa emittoimalla ympäristöönsä karakteristista säteilyä (Hatakka ym. 2007: 63). Karakteristisen säteilyn kvanttienergia on yhtä suuri kuin elektronikuorien energioiden erotus, joten se on riippuvainen aineesta, joka sen emittoi. Karakteristinen säteily näkyy röntgensäteilyn kvanttienergiajakaumassa eli spektrissä piikkinä. Karakteristinen säteily absorboituu yleensä lähellä olevaan aineeseen (Pukkila 2004: 29).

Ionisoituminen saattaa aiheuttaa elävissä soluissa DNA-muutoksia. Suurin osa näistä muutoksista korjautuu itsestään, mutta osa muutoksista saattaa jäädä pysyviksi ja periä uusia soluille. Kun pysyviä muutoksia kertyy paljon, seurauksena saattaa olla syöpäkasvain tai muu terveyshaitta. Näin ollen runsas säteilylle altistuminen muodostaa terveysriskin (STUK 2015). Pienillä säteilyannoksilla haitalliset terveysvaikutukset ovat kuitenkin hyvin epätodennäköisiä.

Röntgensäteilyn käyttö lääketieteellisissä ja teollisissa kuvantamissovelluksissa perustuu säteilyn erisuuruiseen vaimenemiseen eri tiheysisissä aineissa. Säteily vaimenee tiheissä kudoksissa, kuten esimerkiksi luissa, huomattavasti enemmän kuin kevyemmin rakentuneissa kudoksissa, kuten esimerkiksi lihaksissa. Koska kuvattavan kohteen läpi pääsee luiden kohdalla vähemmän säteilyä kuin lihan, muodostuu röntgenfilmille tai detektoripaneelille säteilyn intensiteettieroista muodostuva kuva.

Säteily vaimenee väliaineessa koherentin sironnan, Comptonin sironnan ja absorption ansiosta. Näiden ilmiöiden yhteisvaikutusta voidaan nimittää kokonaisvaimennuskertoimeksi. Kuvassa 4 on esitetty kokonaisvaimennuskertoimia sekä eri ilmiöiden osuuksia fotonin energian funktiona lihakselle ja lyijylle. Kuviosta nähdään, että lyijyssä absorptio on merkittävin vaimenemismekanismi kaikilla röntgendiagnostiikassa käytettävillä säteilyn taajuuksilla. Tästä syystä lyijyä käytetään usein säteilysuojusmateriaalina. Lihaksessa säteilyn koherentti siroaminen on merkittävin vuorovaikutusmekanismi alle 30 keV:n taajuuksilla ja Comptonin sironta sen jälkeen. Kuvista voidaan lukea myös matkavaimennuskertoimen, mikä ilmaisee vaimennuksen määrää säteilyä vaimentavan kerroksen läpi. (Pukkila 2004.)



Kuva 4. Matkavaimennuskertoimia lihakselle ja lyijylle. Kokonaisvaimennuskertoin on valosähköisen absorptio, koherentin sironnan ja Comptonin sironnan summa. (Pukkila 2004: 30.)

Tietyn energisen röntgensäteilyn eli niin sanotun monokromaattisen säteilyn vaimenemista väliaineessa voidaan kuvata yhtälöllä

$$\varphi_d = \varphi_0 e^{-\mu(E)d} \quad (2)$$

missä φ_0 on fotonien kertymänopeus alussa, φ_d fotonien kertymänopeus väliaineen jälkeen, d väliaineen paksuus ja $\mu(E)$ väliaineen matkavaimennuskertoin. Väliaineen matkavaimennuskertoin riippuu väliaineen materiaalista ja säteilyn aallonpituudesta eli kvanttienergiasta. Kaava 2 voidaan kirjoittaa myös intensiteetin mukaan

$$I = I_0 e^{-\mu(E)d} \quad (3)$$

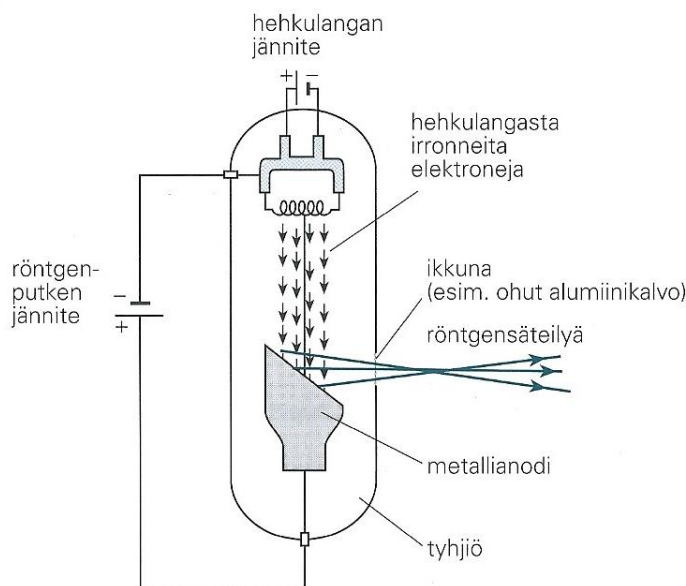
missä I_0 on säteilyn intensiteetti alussa ja I_d säteilyn intensiteetti väliaineen jälkeen.

Käytännössä röntgensäteily koostuu eri energiamäärän sisältävistä kvanteista, jolloin lauseke pitää integroida koko säteilyn energiajakauman yli. Kaava saa muodon

$$\varphi_d = \int_0^{E_{max}} \varphi_0(E) e^{-\mu(E)d} dE \quad (4)$$

Kaavoissa 2, 3 ja 4 oletetaan, että yksikään vuorovaikuttanut fotoni ei pääse mittauspisteelle asti. Kaavat eivät huomioi väliaineessa syntyvää sirontaa eivätkä karakteristista säteilyä, joten ne eivät sovi kovin hyvin kuvaamaan tilannetta, jossa säteilyä mitataan heti absorboivan väliaineen jälkeen. (Pukkila 2004: 26–32.)

Röntgensäteilyä voidaan tuottaa röntgenputken avulla. Röntgenputki on yleensä lasista valmistettu tyhjiöputki, jonka sisällä on anodi ja katodi. Katodissa on volframista valmistettu hehkulanka. Kun hehkulangan läpi kulkee sähkövirta eli hehkuvirta, hehkulanka kuumenee ja emittoi elektroneja. Elektronien määrää voidaan säädellä hehkuvirran avulla. Röntgenputken jännite muodostaa anodin ja katodin väliin sähkökentän, joka vetää hehkulangasta irronneet elektronit anodia kohti. Tyhjiön ansiosta elektronit saavuttavat suuren nopeuden ja kun ne törmäävät anodiin, syntyy lämpöä ja röntgensäteilyä (kuva 5). Anodin vino pinta suuntaa säteilykeilan poikittain putken nähden. Säteilyn tuottaminen loppuu välittömästi kun röntgenputken jännite kytketään pois. Röntgenputkea kutsutaan usein putkipääksi.

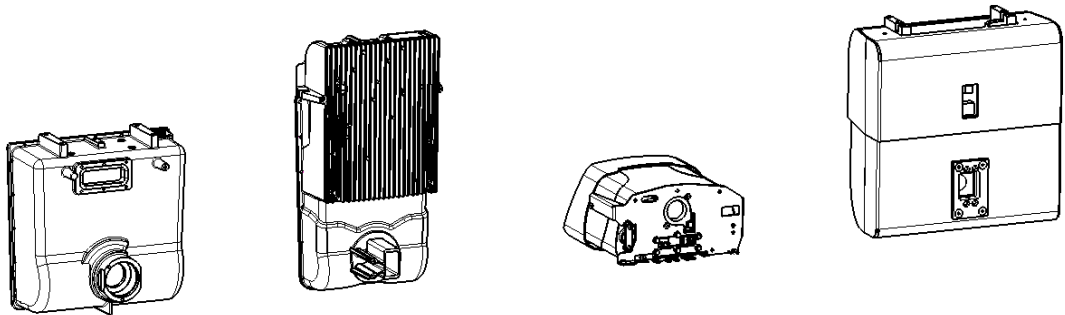


Kuva 5. Röntgenputken toimintaperiaate (Suvanto & Laajalehto 2011: 419).

Röntgensäteilyä syntyy röntgenputkessa kahden eri mekanismin avulla. Jarrutussäteilyä syntyy, kun elektronit hidastuvat anodin atomien ydinten lähellä menettäen nopeasti liike-energiaansa. Karakteristista säteilyä taas syntyy, kun atomien viritystilat purkautuvat, eli kun atomin oma elektroni hyppää elektronikuorelta toiselle. Karakteristisen säteilyn kvanttienergia riippuu anodimateriaalista ja sitä kutsutaankin ominaissäteilyksi.

Röntgenputken anodi on usein valmistettu volframista sen korkean lämpökestävyyden takia. Röntgenputket ovat päällystetty lyijyvaipalla, jossa on reikä primäärikeilan suuntaan. Lyijyvaipan tehtävä on säteilylähteen kuorien kanssa estää säteilyn kulkeutuminen muualle kuin primäärikeilan suuntaan. Primäärikeilan edessä on ohut alumiinilevy, joka suodattaa säteilyn pehmeimmän, eli matalaenergisen osuuden pois. Tämä tehdään sen takia, että pehmeä röntgensäteily ei kykene läpäisemään potilasta, joten se absorboituisi vain potilaaseen hyödyttämättä kuitenkaan itse kuvantamistapahtumaa. Säteilylähteessä on myös ensiökaihdin, joka rajaa säteilykeilan halutun muotoiseksi.

Planmecan säteilylähteiden maksimikäyttöjännitteet vaihtelevat 70–120 kV välillä. Sisäisesti ne ovat hyvin samankaltaisia, mutta ulkoisesti poikkeavat toisistaan paljonkin. Kevyin ja pienin säteilylähde on ProX, joka painaa noin 3,5 kg ja painavin on ProMax 120 kV, joka painaa yli 10 kg. Säteilylähteiden kuoret on valmistettu alumiinista, tina-sinkkivalusta tai muovista ja ne on lisäksi vuorattu lyijyllä osittain tai kokonaan. Säteilylähteen kuori on täytetty öljyllä. Öljyn tehtävä on siirtää lämpökuormaa röntgenputkesta pois ja toimia sähköeristeenä (Jokiaho 2014: 13). Säteilylähteiden ulkoiset eroavaisuudet ovat nähtävissä kuvassa 6.



Kuva 6. Planmecan röntgenkuvantamislaitteiden säteilylähteet vasemmalta oikealle: ProMax, ProOne, ProX ja ProMax 120 kV. Kuvasta puuttuu ProMax 3D Max, joka on ulkoisesti samanlainen kuin ProMax, mutta säteilyaukon kaula on jyrsitty lyhyemmäksi ja tilalle kierretty messinkinen rengas. Säteilylähteet ovat kuvassa oikeassa mittakaavassa keskenään.

2.4 Säteilylähteiden laadunvarmistus

Röntgensäteilyn terveydelle haitallisten vaikutusten vuoksi säteilyn käyttöä säädellään kansainvälisin standardein ja direktiivein. Lääketieteellisten röntgenkuvantamislaitteiden on käytävä läpi erilaisia testausprosesseja, jotta niiden laadusta ja turvallisuudesta voitaisiin varmistua. Suomessa säteilyn käyttöä valvoo Säteilyturvakeskus STUK.

Planmecalla säteilylähteet testataan ennen kuin ne kootaan osaksi kuvantamislaitteita. Testaus koostuu kolmesta vaiheesta: *kestotestistä*, *säteilyntuottotestistä* ja *vuotosäteilymittauksesta*. Kukin testivaihe tapahtuu omassa lyijyvuoratussa kaapissaan, koska testeissä tarvittavat mittalaitteet ovat hyvin erilaisia. Testien vaatimukset ovat osittain standardien sanelemia ja osittain yrityksen sisäistä laadunvalvontaa. Hyväksymisrajat on laadittu tiukimpien standardien mukaan, jolloin säteilylähteet ovat testit läpäistyään myös alemman vaatimustason standardien mukaisia.

Kestotesti on eräänlainen rasitustesti, jossa testataan säteilylähteen kykyä tuottaa säteilyä sen kaikilla eri säteilytysasetuksilla. Kestotesti ei ole viranomaisten määräämä, vaan se on Planmecan sisäinen testi, jolla varmistutaan siitä, että säteilylähde on koottu oikein ja sen komponentit toimivat moitteettomasti. Kestotestissä säteilylähteellä tuotetaan vaihtelevan pituisia säteilytysjaksoja nostaen samalla hehkuvirtaa ja -jännitettä eli laitteen tehoa. Testin aikana säteilylähde myös lämpenee suurimpaan sallittuun käyttölämpötilaansa. Jos testauksen aikana tapahtuu sähköisiä läpilyönnejä tai muita virheitä, se johtaa säteilylähteen hylkäykseen. Lopuksi säteilylähde tarkastetaan vielä silmämääräisesti öljyvuotojen varalta. (Romppanen 2012: 15.)

Säteilyntuottotestin tarkoituksena on testata säteilyn laatua. Säteilyn täytyy täyttää kolme standardeista tulevaa vaatimusta: säteilyn täytyy olla toistettavissa eli sen voimakkuus ei saa vaihdella liikaa eri toistoilla, säteilyn voimakkuuden on noustava lineaarisesti putkivirran funktiona ja säteilyn laadun pitää olla lääketieteellisen kuvantamiseen sopivaa (Romppanen 2012: 15–17). Säteilyn laadun sopivuutta tutkitaan puoliintumispaksuustestillä, jossa mitataan sen vaimenemista standardin mukaisen alumiinilevyn läpi. Säteilyn on oltava koostumukseltaan sopivan korkeaenergistä eli kovaa, jotta se kykenisi läpäisemään potilaan. Se ei saa kuitenkaan olla liian kovaa, koska jos säteilyä ei absorboidu potilaan tiheisiin kudoksiin riittävästi, detektoripaneelille ei muodostu säteilyn intensiteettieroista muodostuvaa röntgenkuvaa.

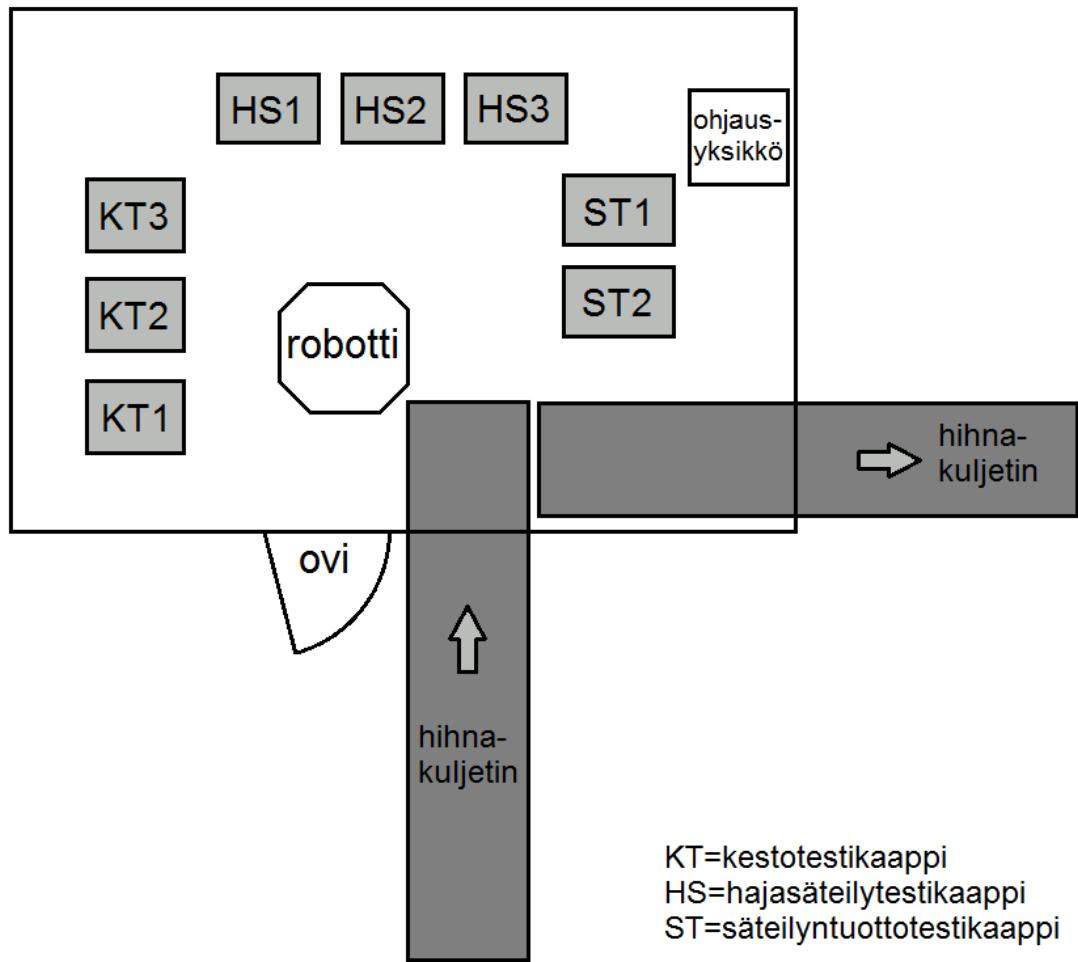
Vuotosäteilymittaus eli hajasäteilytesti on testi, jossa mitataan säteilylähteen rungon läpäisevän hajasäteilyn määrää. Testin ajaksi säteilylähteen sädeikkuna peitetään säteilysuojatulpalla, jolloin primäärikeila estyy. Tämän jälkeen laitteella tuotetaan säteilyä maksimikäyttöarvoilla ja mitataan putkipään rungon läpäisseen säteilyn määrä. Vuotosäteilymittauksen tarkoituksena on varmistua siitä, ettei säteilyä pääse leviämään hallitsemattomasti ympäristöön. Näin varmistetaan säteilytyötä tekevien ihmisten työturvallisuus. International Electrotechnical Commissionin standardin mukaan hajasäteilyn säteilyannosnopeus ei saa ylittää 0,88 mGy/h keskiarvotettuna millään 100 cm²:n kokoisella alueella 1 m:n etäisyydeltä mitattuna (IEC 60601-1-3 2008: 33). Standardin noudattaminen kirjaimellisesti edellyttäisi halkaisijaltaan 2 m:n levyistä ympyrän muotoista testaustilaa, jonka seinillä on toista tuhatta säteilymittausanturia. Tästä syystä Planmecan on teettänyt diplomityön, jonka tuloksena on kehitetty käytännöllisempi vaihtoehto vuotosäteilymittaukselle. Tässä mittaustavassa mittausetäisyys on 25 cm, mutta vaatimus sama. Säteilyn intensiteetin ollessa kääntäen etäisyyden neliöön verrannollinen, testi on 16 kertaa tiukempi kuin standardin vaatimus. Näin ollen Planmecan vuotosäteilymittauksen läpäissyt putkipää täyttää varmasti IEC:n standardin vaatimukset (Tuulos 2001). Mittaus suoritetaan yhdellä säteilymittausanturilla, joka kiertää putkipäätä varren päässä vaakasuoran akselin ympäri samalla, kun putkipää pyörii oman pystysuoran akselinsa ympäri. Näin saadaan mitattua vuotosäteilyn määrä joka puolelta putkipäätä.

2.5 Laadunvarmistuksen automatisointiprojekti

Säteilylähteiden testaus on yksitoikkoista ja puuduttavaa työtä, sillä työ on enimmäkseen odottelua. Säteilylähteet ovat raskaita käsitellä ja jatkuva lyijylevyjen kanssa työskentely muodostaa terveysriskin, koska lyijy on myrkyllistä nieltynä ja hengitettynä. Käytössä olevat, vanhan malliset testauskaapit soveltuvat kukin vain tietyn säteilylähteen testaamiseen, mikä on epäkäytännöllistä ja vie paljon tilaa. Lisäksi testauslinjasto on ainoa tuotantovaihe, jossa työskennellään osittain kahdessa vuorossa. Kyseessä on siis eräänlainen tuotannollinen pullonkaula, joka vie paljon aikaa ja sitoo resursseja. Samaan aikaan röntgenkuvantamislaitteiden tilauskanta on ollut jatkuvassa kasvussa ja tuotantokapasiteettia pitäisi nostaa. Tästä syystä Planmeca on käynnistänyt projektin säteilylähteiden testauksen automatisoimiseksi teollisuusrobotin avulla.

Automatisointiprojekti alkoi vuonna 2012, jolloin aiheesta teetettiin Timo Romppasen diplomityö. Työssä tutkittiin automatisointiprojektia konseptitasolla, tehtiin kustannusarvioita ja esiteltiin erilaisia layout-vaihtoehtoja automatisoidulle testausprosessille. Vuonna 2014 teetettiin Jukka-Pekka Jokiahon diplomityö, joka jatkoi automatisointiprojektia siitä, mihin Romppasen työssä oli jääty. Työssä suunniteltiin miten testilaitteiden mekaniikka ja automaatio käytännössä toteutetaan, tehtiin prototyyppejä ja arvioitiin projektin kokonaiskustannuksia ja takaisinmaksuaikaa. Projektiorganisaatio koottiin talon omasta henkilöstöstä ja suunnitelmia alettiin toteuttaa käytännössä. Automaattinen testausjärjestelmä on määrä ottaa käyttöön kesällä 2016.

Tällä hetkellä projekti on mekaanisesti loppusuoralla. Testausalue koostuu 4x6 m turvavapleksillä aidatusta alueesta, jonne vie kaksi hihnakuljetinta (kuvat 7 ja 8). Keskellä testausaluetta on robotti ja sen ympärillä testauskaapit. Kullekin testausvaiheelle on omat kaappinsa erilaisine varusteluineen. Testauskaappien kehikot ovat alumiiniprofiilia, ja niihin kiinnittyvät alumiini- ja lyijylevyt. Kussakin testauskaapissa on päällekkäin kaksi testauspaikkaa, joissa on molemmissa omat ovet. Testikaapin ovet liikkuvat pystysuunnassa sähkömoottorin pyörittämän trapetsiruuvin varassa käyttäen kiskoinaan testikaapin rungon alumiiniprofiileja. Automaatiojärjestelmä havaitsee oven olevan kokonaan auki tai kiinni, kun ovi painaa rullakytkimen pohjaan, jolloin sähkömoottorin ajaminen lopetetaan.



Kuva 7. Layout-kuva automatisoidusta testialueesta.



Kuva 8. Automatisoitu testialue. Ovessa on turvakytin, joka keskeyttää robotin liikkeitä ja säteilyn käytön, jos ovi avataan.

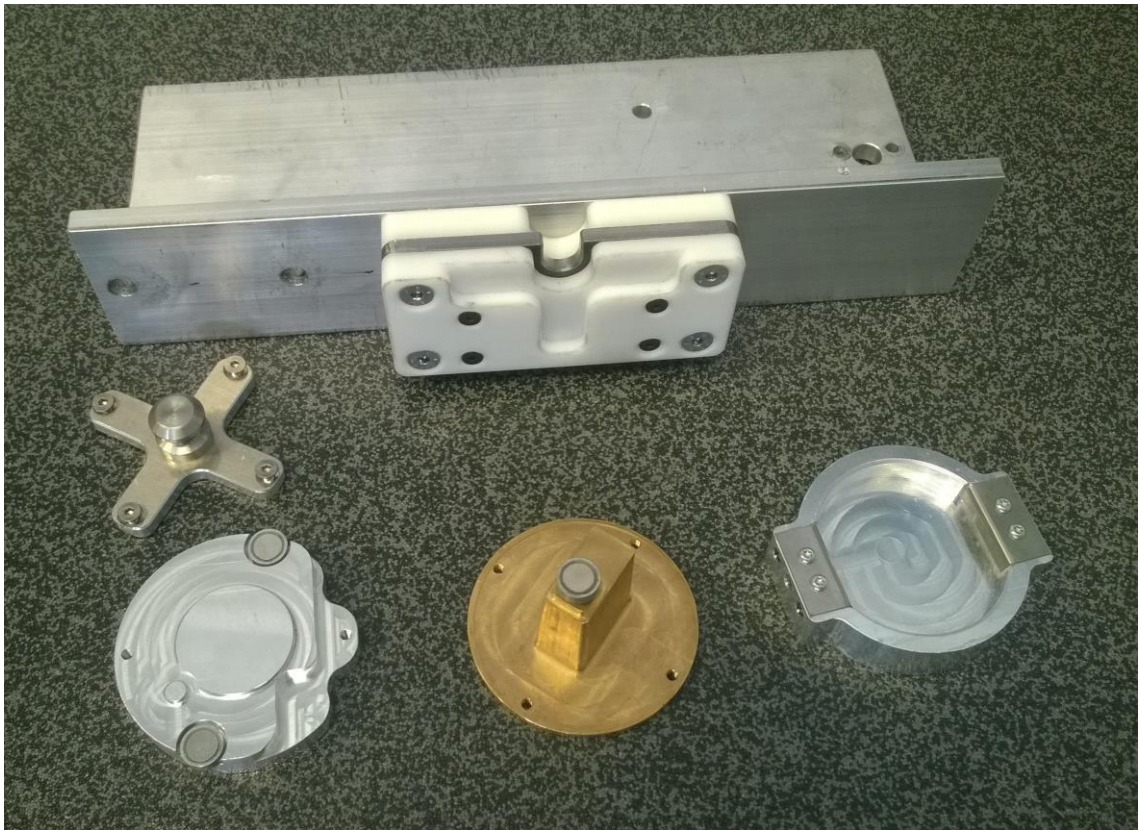
Robotin tehtävä on poimia hihnakuuljettimella olevia säteilylähteitä ja viedä niitä testi-kaappeihin. Robotti tarttuu säteilylähteisiin valmiiksi kiinni ruuvattuun jigiiin ja vie sen viivakoodin lukijalle, joka tunnistaa säteilylähteen. Tämän jälkeen robotti vie säteilylähteen vuorotellen kuhunkin kaappiin. Kaapissa jigi, joka on samanlainen kaikissa säteilylähteissä, kytkee sähköt säteilylähteeseen. Testien jälkeen robotti palauttaa säteilylähteen toiselle hihnakuuljettimelle, joka vie säteilylähteen pois testialueelta.

Robotiksi valittiin kilpailutuksen seurauksena Yaskawa Motoman MH50. Kyseessä on 6-akselinen tuotantorobotti, jonka massa on 550 kg. MH-50 kykenee käsittelemään maksimissaan 50 kg:n painoisia kappaleita ja sen liikkeen tarkkuus on $\pm 0,07$ mm (Yaskawa 2015). Robotin ohjelmointi tapahtuu opettamalla sille pisteitä ja määrittämällä pisteiden välisen reitin interpolointitapa ja liikenopeus. Pisteiden opettaminen tapahtuu siirtämällä robottia kauko-ohjaimella haluttuun paikkaan. Robottiin on mahdollista määrittää törmäyksenesto siten, että robotti pysähtyy kohdatessaan riittävän suuren, liikettä vastustavan voiman.

2.6 Työn lähtötilanne ja tavoitteet

Vanhanmallisessa säteilylähteiden testauksessa hajasäteilytestiin meneviin säteilylähteisiin on kiinnitetty säteilysuojatulpat manuaalisesti sormiruuvein tai jousitetun levyn puristamana. Testauksen automatisointiprojekti on luonut tarpeen suunnitella tulpat uudelleen, koska robotilla ei ole samanlaista kappaleenkäsittelykykyä kuin ihmisellä. Ruuvaustapahtuman toteuttaminen robotilla on vaativa tehtävä, eikä automatisoidun ruuvikiinnityksen toimintavarmuus ole riittävän hyvä. Robotti ei myöskään osaa sopeutua poikkeaviin tilanteisiin ja säätää voimaa sopivaksi, vaan noudattaa sokeasti ja tunnottomasti sille ennalta opetettuja liikeratoja.

Testauksen automatisointiprojektissa oli aiemmin mukana mekaniikkasuunnittelija Jukka Nenonen, joka oli aloittanut säteilysuojatulppien suunnittelun ja kehittänyt tavan, jolla tulpat roikkuivat telineessä, josta robotti kykenisi poimimaan tulpat ilman muita voimanlähteitä kuin robotti itse (kuva 9). Nenonen joutui kuitenkin vetäytymään projektista ja suunnittelutyö jäi kesken. Käyttökokeet osoittivat, että tulpat eivät olleet riittävän toimintavarmoja käytettäväksi automaattisessa testauksessa.



Kuva 9. Nenosen suunnittelun tuloksia. Etualalla on tulpat vasemmalta lukien: ProX, ProOne ja ProMax. Ristimäinen kappale on tulppien lukitusadapteri, joka kiinnittyy taka-alalla olevaan tulppatelineeseen.

Tämän insinööriyön tavoitteeksi määriteltiin joko viedä loppuun Nenosen keskeneräiset suunnitelmat tai suunnitella puhtaalta pöydältä kolme robottikäyttöistä säteilysuojatulppaa sekä niiden teline. Suunniteltavat säteilysuojatulpat olisivat ProMax, ProOne ja ProX -säteilylähteille, koska niitä valmistetaan eniten. Jos aikaa jäisi yli, suunniteltaisiin myös ProMax 120 kV ja ProMax 3D Max –säteilylähteiden suojatulpat. Työlle annettiin aikaa kolme kuukautta.

Säteilysuojatulppien on tartuttava säteilylähteisiin luotettavasti kiinni joka kerta, kun tulppa noudetaan tulppatelineestä, ja pysyttävä kiinni koko testin ajan. Kun tulppa palautetaan testin jälkeen tulppatelineeseen, tulpan täytyy jäädä telineeseen samaan asentoon kuin mistä se otettiin. Tulppien kiinnitystapojen täytyy olla erittäin toimintavarmoja, koska jos tulppa tipahtaa pois säteilylähteestä, niin testikaappi, johon kyseinen tulppa kuuluu, hylkää sen jälkeen kaikki siinä testattavat säteilylähteet, kunnes robottisolun toiminta keskeytetään ja tulppa nostetaan takaisin telineeseen. Tästä syystä tulppien tarttumismekanismit eivät saa perustua pelkkään kitkaan.

Kaikki säteilylähteet ovat ulkoisesti erilaisia ja vaativat erilaiset tartuntamekanismit. Joka testikaapille tulee omat tulppansa, yksi kutakin lajia. Tulppatelineen täytyy pidellä tulppia hyvin robotin saatavilla ja omalta osaltaan edesauttaa tulppien luotettavaa toimintaa. Suunnittelussa on huomioitava testikaappien muu varustelu, testauksen aikana mahdollisesti syntyvät vikatilanteet ja robotin liikkeiden luonne.

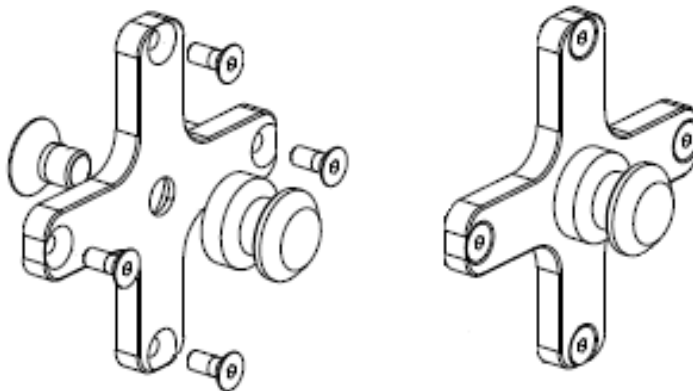
Tulppien säteilynestokyvylle ei määritelty selkeää rajaa, mutta tulppien pitää kyetä estämään säteilyä niin, että säteilylähde, joka on hyväksytysti läpäissyt vuotosäteilymittauksen vanhanmallisen manuaalisen tulpan avulla, läpäisee sen myös uudella tulpalla. Uuden tulpan säteilynestokyky ei saa olla myöskään merkittävästi huonompi kuin vanhan.

Kun suunnitelmat ovat valmiita, laaditaan kaikista osista 3D-mallit step-tiedostoina, valmistus- ja kokoonpanopiirustukset, ja mahdolliset vesi- tai laserleikkausprofiilit dxf-tiedostoina. Osat tilataan alihankkijalta. 3D-mallit ja piirustukset ladataan Planmecan PLM-järjestelmään. Myös kaikki tarvittavat osat kirjataan robottisolun osaluetteloon.

3 Säteilyuojatulppien lukitusadapteri

Lukitusadapteri on osa, joka ruuvataan jokaisen säteilyuojatulpan takapintaan kiinni. Adapterin tehtävä on tarjota tarttumapinta tulppatelineen ja tulpan välille. Jokaisessa tulpassa käytetään samanlaista lukitusadapteria, jotta tulpat voidaan asettaa myöhemmin mihin tahansa järjestykseen tulppatelineissä. Modulaaristen osien käyttö alentaa myös kustannuksia suurempien valmistuserien ja vähempien piirustuksien kautta.

Nenosen suunnittelema ristimäinen lukitusadapteri (kuva 10) oli mittasuhteiltaan sopivan kokoinen siihen nähden, minkä kokoisiksi säteilyuojatulppien voi olettaa tulevan eri putkipäiden säteilyikkunoiden koon perusteella. Lisäksi sen muoto on symmetrinen 90°:n välein, joten tulpan voi tarvittaessa aina kääntää 90° tai 180° toiseen asentoon. Käännettävyys nähtiin hyvänä ominaisuutena, koska tulpan ja säteilylähteen väliseen lukitusmekanismin toteuttamiseen ja robotin liikeratojen ohjelmoimiseen jäisi enemmän vaihtoehtoja vapaaksi. Päätettiin käyttää Nenosen suunnittelemaa lukitusadapteria sellaisenaan.

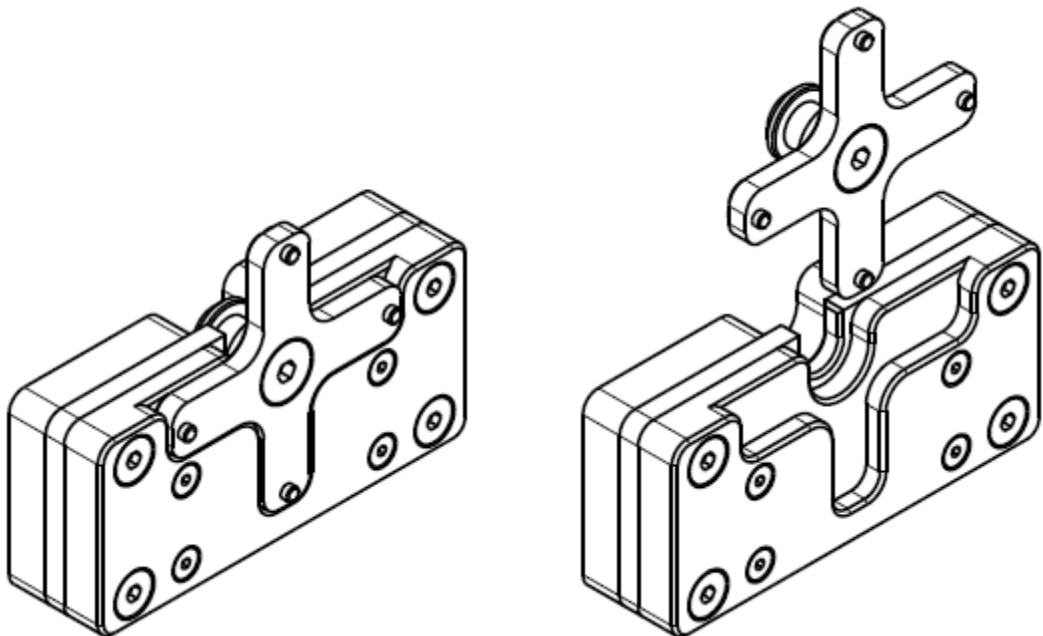


Kuva 10. Lukitusadapteri koostuu tukilevystä ja lukitustapista.

Lukitusadapteri koostuu ristimäisestä tukilevystä ja lukitustapista, jotka kiinnitetään DIN7991 M8x12 -kuusiokololuppokantaruuvilla yhteen. Tukilevy on valmistettu alumiinista jyrsimällä ja lukitustappi austeniittisestä ruostumattomasta teräksestä sorvaamalla. Tukilevyn päissä on neljä DIN7991 M4x10- tai M4x12-uppokantaruuvia, joilla lukitusadapteri kiinnittyy säteilyuojatulppaan. M4-ruuvien materiaali päätettiin vaihtaa sinkitystä, ferriittisestä teräksestä ruostumattomaan, austeniittiseen A2-teräkseen, jotta viereisten tulppien magneetit eivät vetäisi niitä puoleensa. Lämpökäsiteltyjen austeniit-

tisten terästen magneettisuus on hyvin heikkoa (Carpenter Technology Corporation 2006).

Lukitusadapteri toimii siten, että säteilylähde painetaan tulppaa vasten tulppatelineen pidikelevyyn nähden kohtisuoraan. Tulppa tarttuu säteilylähteeseen, minkä jälkeen säteilylähde ja tulppa nostetaan pidikelevyn suuntaisesti ylöspäin. Tulpan tapissa oleva kavennus pääsee pidikelevyn loven haarukkaotteesta irti ja säteilylähde tulppineen voidaan viedä hajasäteilytestiin. Tulpan palautus tapahtuu päinvastaisessa järjestyksessä. Säteilylähde tulppineen tuodaan pidikelevyn yläpuolelle ja lasketaan alas niin, että lukitustapin kavennus jää pidikelevyn loven haarukkaotteeseen. Säteilylähdettä vedetään kohtisuoraan ulospäin, jolloin tulppa irtaota siitä ja jää telineeseen. Kuva 11 havainnollistaa lukitusadapterin toimintaa.



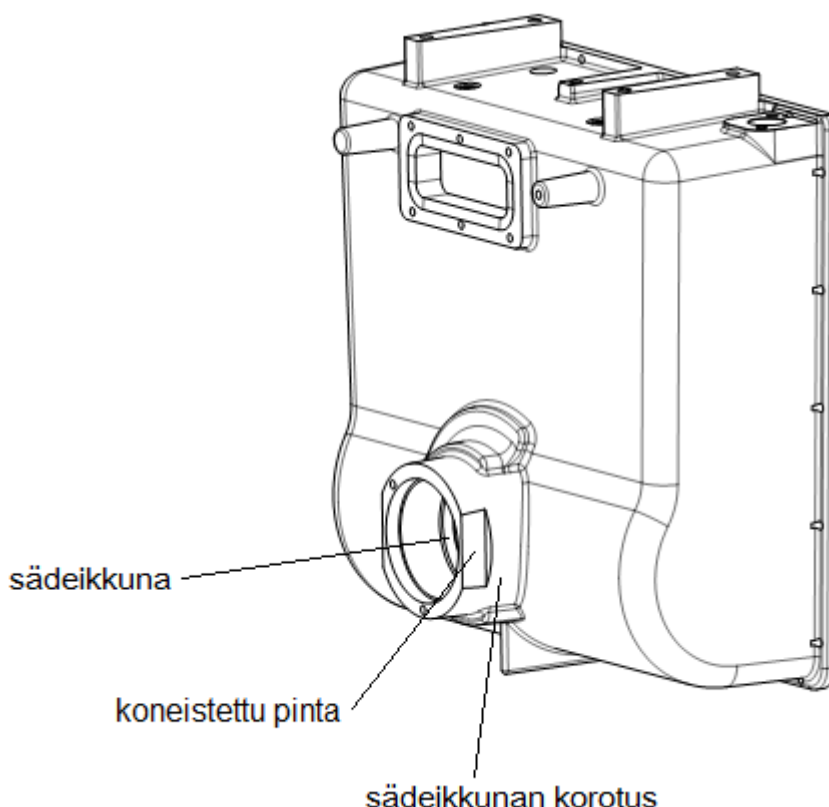
Kuva 11. Kuvassa näkyy Nenosen suunnittelema lukitusadapteri ja pidikelevy. Lukitusadapteri ruuvataan säteilysojatulppaan kiinni ja pidikelevy kiinnitetään johonkin pystysuoraan pintaan. Nostamalla lukitusadapteria se vapautuu pidikelevyn loven haarukkaotteesta.

4 Säteilysuojatulppien suunnittelu

4.1 ProMax-tulppa

4.1.1 Lähtötilanne

ProMaxin säteilylähteen kuori on valmistettu tina-sinkkiseoksesta valamalla. Kuori on maalattu valkoiseksi ja runkoon on tehty pieniä koneistuksia. Sädeikkunan korotuksessa on pieni koneistus, jonka tehtävä on väistää kaihdinlaitteistoa (kuva 12).



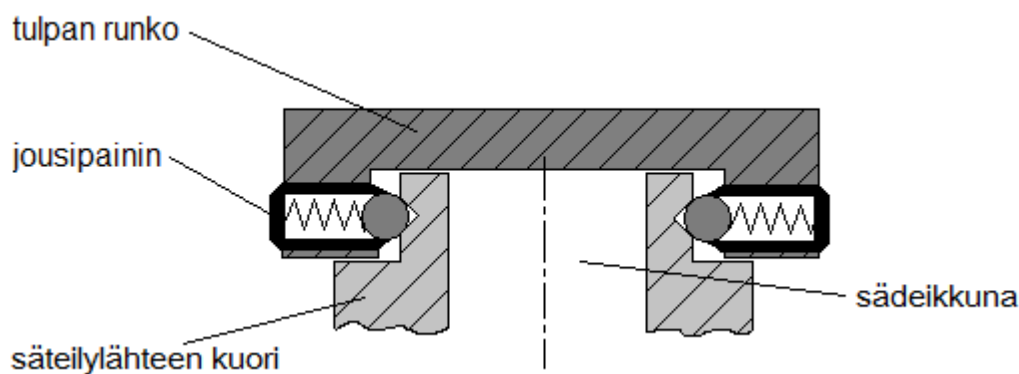
Kuva 12. Kuvassa on selitetty ProMax-säteilylähteen ulkokuorten tulpan kannalta keskeisimmät piirteet, joihin viitataan tekstissä usein.

Nenosen suunnittelema ProMax-tulppa on alumiinirunkoinen. Säteilyn absorbointi tapahtuu tulpan sisällä olevan lyijykiekon avulla. Alumiinirunko tulee kuppimaisesti säteilylähteen korotuksen päälle. Tulppa kiinnittyy säteilylähteeseen jousilevyillä, jotka puristavat sädeikkunan korotuksen koneistettuja pintoja. Jousilevyjen jäykkyyttä on lisätty asettamalla niiden alle kuulapääjousipainimia, siten että jousilevyt ja jousipainimet toimivat rinnakkain kytkettynä jousikokonaisuutena. Tulpan kiinnitys on todettu testeissä epäluotettavaksi.

4.1.2 Tartuntamekanismin suunnittelu

ProMaxin säteilyuojatulpan suunnittelu aloitettiin ideoimalla ja luonnostelemalla erilaisia tartuntamekanismeja. Erilaisia ideoita olivat lukkiutuva vipumekanismi, joka ei pääse kohokohtansa yli ja avautuu oikeasta kohdasta painamalla, puristavat kumiset pinnat sekä teräväreunaiset jouset, jotka pureutuvat sädeikkunan kaulaan. Nämä ideat kuitenkin hylättiin, koska ne perustuivat kitkaan, eikä niiden toiminta olisi riittävän luotettavaa. Myös kuoren yli ulottuvaa joustavaa pantaa mietittiin, mutta se hylättiin, koska panta saattaisi absorboida säteilyä ja vääristää näin vuotosäteilymittausta. Tehtävän haastavuutta lisäsi se, että kuoressa oli ainoastaan päästäviä muotoja. Kuoressa ei myöskään ollut mitään magneettista.

Tartuntamekanismiksi ideoitiin sädeikkunan korotukseen koneistettava ura, johon tulpan runkoon kiinnitetyt kuulapääjousipainimet lukittuisivat (kuva 13). Uran koneistamisesta olisi hyötyä myös tuotannon myöhemmissä vaiheissa, koska sädeikkunaan tarttuminen testilaitteilla on ollut ongelmallista myös esimerkiksi kohdistuksessa (Jokiaho 2016). Ura päätettiin jyrsiä sädeikkunan korotuksen vastakkaisin puolin koneistettuihin pintoihin, koska koneistuksen ansiosta pintojen välinen etäisyys tunnetaan melko tarkasti. Pintojen väliseksi etäisyydeksi on piirustuksissa ilmoitettu 52 mm. Kappaleen yleistoleranssin mukaan pintojen välinen etäisyys voi vaihdella $\pm 0,3$ mm (ISO 2768-1 1989: mK).



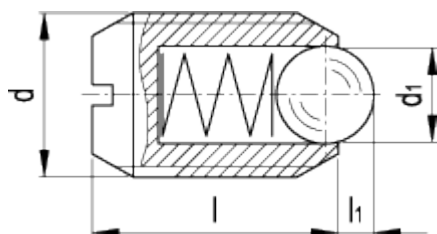
Kuva 13. ProMax-tulpan tartuntamekanismin periaatekuva.

Uran koneistamiselle saatiin alustava lupa tuotekehityksen suunnittelupäälliköltä ja konepajan verstpäälliköltä. Uran muodon valitsemiseksi käytiin tutustumassa konepajan työkaluvalikoimiin. Uran muodoksi valittiin suorakulmainen V-ura, jonka syvyydeksi päätettiin 0,9 mm mitoituslaskujen perusteella. Uran toimivuudesta varmistuttiin koneistamalla testikappale, joka simuloi ProMaxin sädeikkunan korotusta toleranssin ylä- ja alarajoilla. Testikappaletta testattiin tulpan prototyypin kanssa ja kiinnitysmekanismi todettiin toimivaksi ja toimintavarmaksi. Urasta laitettiin tuotemuutos vireille.

ProMax-säteilyuojatulpassa on neljä kuulapääjousipaininta. Ne sijaitsevat pareittain vastakkaisilla puolilla tulppaa, riittävän etäällä toisistaan. Näin tulppa pysyy parhaiten tasapainossa ja kykenee ottamaan vastaan pieniä asentovirheitä.

4.1.3 Jousipainimen mitoitus

Kuulapääjousipainin on kierteitetty holkki, jonka päässä on laakerinkuula ja sisällä jousi. Kuula pääsee painumaan holkin sisään jousen vastustamana. Kuulapääjousipainimia valmistetaan kaikille yleisimmille metrisille kierreko'oilte. Kierrekoon myötä kuulan koko ja jousen jäykkyys kasvavat. Jousipainimen keskeiset mitat on esitetty kuvassa 14.

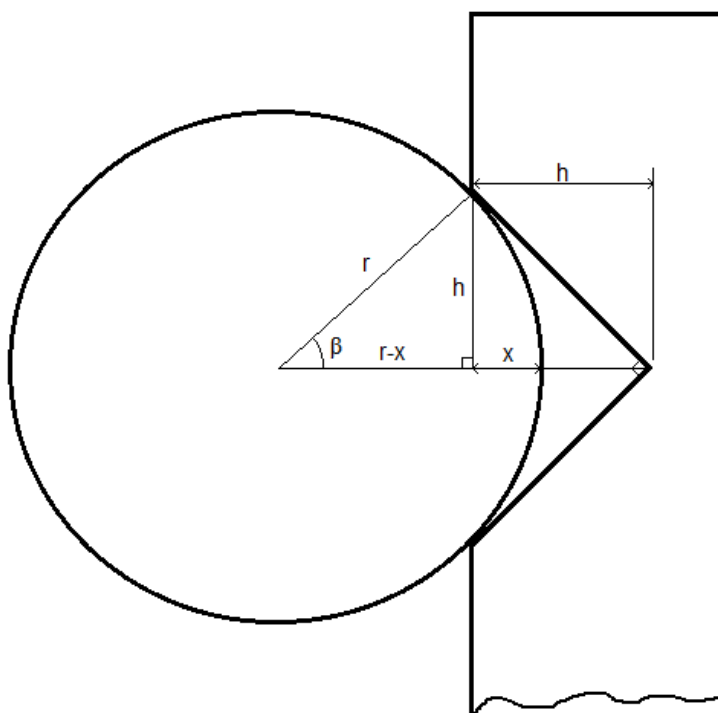


Kuva 14. GN 615 kuulapääjousipainimen rakenne ja suunnittelutekniset mitat (Elesa+Ganter 2016).

Keskeinen mitoitusperuste säteilyuojatulpassa on joustomatka. Kuulan joustomatkan tarve riippuu uran syvyydestä ja kuulan halkaisijasta, säteilylähteen kaulan koneistuksen toleranssivaihtelusta sekä kaulan ja tulpan välisestä välyksestä. Näiden yhteenlaskettu mitta ei voi ylittää kuulan maksimijoustomatkaa l_1 . Jousen pitää olla puristuksissa myös silloin, kun kuula on uran pohjassa, ettei tulppa pääse heilumaan.

Lasketaan jousipainimen joustomatkan tarve vertailemalla eri jousipainimia Excel-
taulukossa. Pidetään joustomatkaan vaikuttavat tekijät muuttujina mahdollisimman pit-
kään, jotta niitä voi taulukossa muokata paremmin yhteensopiviksi. Taulukon suuruu-
den takia esitellään tässä vain mitoituksessa käytetyt kaavat.

Piirretään kuva kuulasta ja urasta geometrinen riippuvuuden hahmottamiseksi (kuva
15). Kuvassa uran syvyys on h ja leveys $2h$. Kuulan säde on r ja kosketuskulma uran
reunaan on β . Kuulan painuma uraan on x .



Kuva 15. Kuulan ja uran geometriset riippuvuudet.

Kuulan kosketuskulma β voidaan laskea trigonometrian avulla

$$\sin \beta = \frac{h}{r} \quad (6)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{h}{r} \quad (7)$$

Kosketuskulman β avulla voidaan laskea kuulan painuma x

$$r \cos \beta = r - x \quad (8)$$

$$x = r - r \cos \beta \quad (9)$$

$$x = r(1 - \cos \beta) \quad (10)$$

$$x = r(1 - \cos(\sin^{-1} \frac{h}{r})) \quad (11)$$

Nyt kun tunnetaan kuulan painuma uraan, joka on kuulan säteen ja uran syvyyden funktio, voidaan laskea se taulukossa yhteen muiden vaikuttavien tekijöiden kanssa ja vertailla kunkin jousipainimen maksimijoustomatkiaan l_1 (taulukko 1). Koneistuksen toleranssvaihtelun suuruus on kiinteästi 0,6 mm. Tulpan ja säteilylähteen kaulan väliin halutaan vähintään 0,5 mm välystä, mutta mielellään enemmän.

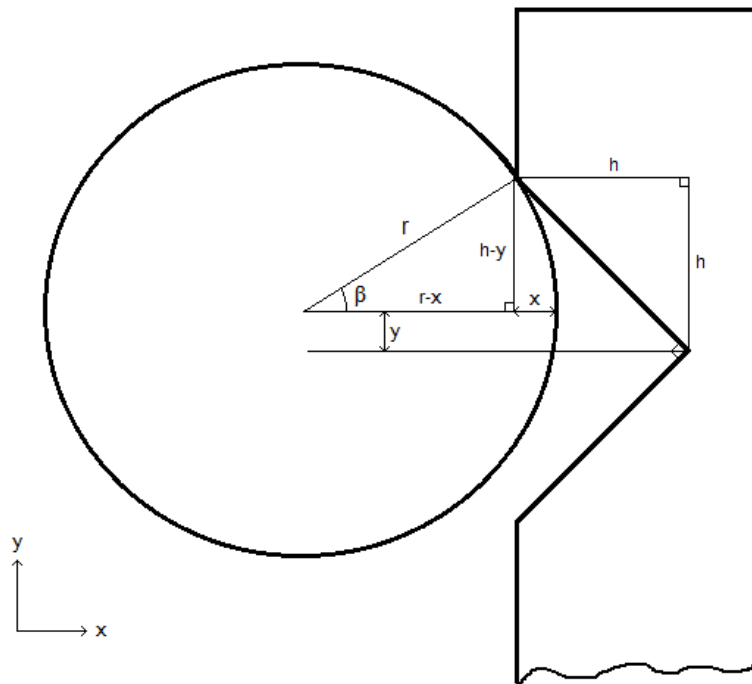
Taulukko 1. Taulukossa on vertailtu jousipainimien joustomatkojen tarvetta rakenteellisiin maksimijoustomatkoihin l_1 . Taulukko on supistettu versio laskentataulukosta.

Koko	h (mm)	x_{\max} (mm)	Toleranssi (mm)	Välys (mm)	Joustomatkan tarve (mm)	l_1 (mm)
M6	1,00	0,3139	0,6	0,5	1,41	1
M8	1,00	0,2344	0,6	0,5	1,33	1,5
M10	1,00	0,1716	0,6	0,5	1,27	2
M12	1,00	0,1270	0,6	0,5	1,23	2,5

M6-jousipainimen rakenteellinen maksimijoustomatka on liian lyhyt, joten se hylätään. M12-kokoa ei mielellään käytettäisi, koska sädeikkunan korotuksen koneistettu osuus on 11 mm pitkä. Jäljelle jäävät M8 ja M10. Valitaan M10, koska sen rakenteellinen joustomatka on niin suuri, että välystä voidaan kasvattaa.

Arvioidaan tulpan ulosvetovoiman suuruutta laskemalla. Tulpan ulosvetovoiman eli maksimi kiinnipysymisvoiman on oltava riittävän suuri, jotta tulppa pysyy paikallaan robotin suurillakin liikenopeuksilla. Ulosvetovoima tarvitsee selvittää myös tulppatelineen lujuusanalyysiä varten. Tulpan ulosvetovoima riippuu kuulan kosketuskulmasta β ja jousivoimasta F_j . Kohtaa, jossa jousivoima on suurimmillaan ei tiedetä, koska tulppaa ulos vetäessä jousivoima suurenee, kun kuula kiipeää urasta ylös. Toisaalta samalla kosketuskulma pienenee, mikä pienentää kuulan uran reunasta saamaa tukivoi-

maa. Piirretään uusi kuva kuulasta, joka on kiipeämässä ylös urasta (kuva 16). Kuvassa kuulun asema on ilmoitettu x ja y -suuntaisina siirtyminä. Kuulan asema määräytyy muuttujan y perusteella, koska jousi painaa kuulun x -suunnassa uraa vasten.



Kuva 16. Kuula on kiipeämässä pois urasta. Kuulan asema on ilmoitettu x ja y -suuntaisina siirtyminä.

Kuulan kosketuskulma β tulee riippuvaiseksi y :stä ja saa muodon

$$\beta = \sin^{-1} \frac{h-y}{r} \quad (12)$$

Vastaavasti kuulun x -suuntainen siirtymä riippuu y :stä voidaan lausua

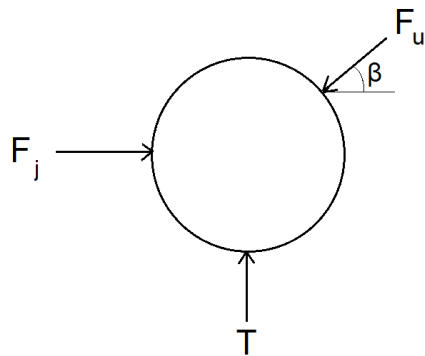
$$x = r(1 - \cos(\sin^{-1} \frac{h-y}{r})) \quad (13)$$

Kuulaa painava jousivoima noudattaa jousiyhtälöä

$$F_j = ku \quad (14)$$

missä F_j on jousivoima, k jousen jousivakio ja u siirtymä.

Piirretään kuulasta vapaakappalekuva ulosveto hetkellä, jolloin kuula ottaa tukea vain uran toisesta kyljestä (kuva 17). Oletetaan kuula massattomaksi ja kitkattomaksi.



Kuva 17. Vapaakappalekuva kuulapääjousipainimen kuulasta. Kuulaan vaikuttavat jousivoima F_j , ulosvetovoima T ja uran reunan tukivoima F_u .

Ratkaistaan ulosvetovoima T statiikan lakien avulla

$$\sum F_x = F_j - F_u \cos \beta = 0 \quad (15)$$

$$\sum F_y = T - F_u \sin \beta = 0 \quad (16)$$

Yhtälöstä 15 saadaan

$$F_u = \frac{F_j}{\cos \beta} \quad (17)$$

Yhtälöstä 16 saadaan

$$T = F_u \sin \beta \quad (18)$$

johon sijoitetaan 17

$$T = \frac{F_j \sin \beta}{\cos \beta} \quad (19)$$

$$T = F_j \tan \beta \quad (20)$$

Jousen siirtymä u muuttuu x :n verran kiivetessään ylös urasta, mutta u voi vaihdella 0,6 mm:n verran toleranssivaihtelun takia. Lisäksi jousen pitää olla jännittyneenä myös uran pohjassa, joten jännitetään sitä ylimääräiset 0,1 mm. Lasketaan kaksi eri esijännitysvoimaa.

$$F_1 = F_{pre} + k(0,1 + (x_{max} - x)) \quad (22)$$

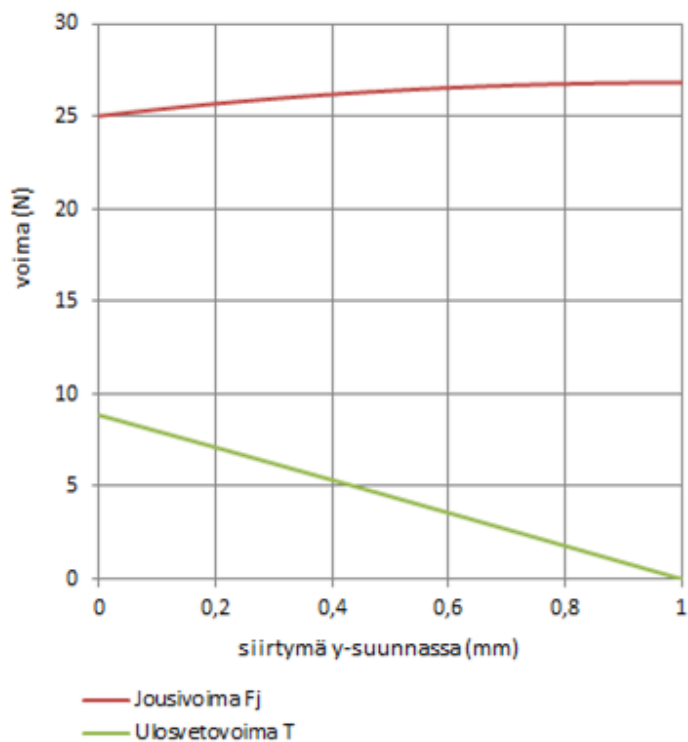
$$F_2 = F_{pre} + k(0,1 + 0,6 + (x_{max} - x)) \quad (23)$$

missä F_{pre} on valmistajan ilmoittama jousipainimen oma esikiristysvoima, x_{max} on suurin mahdollinen kuulun painuma uraan ja x kaavan 13 mukaisesti y :stä riippuva x -suuntainen siirtymä, joka saa arvoja välillä $[0; x_{max}]$. Lasketaan koordinaattipisteitä ja niistä riippuvia jousi- ja ulosvetovoimia 0,01 mm:n välein ja piirretään kuvaajat molemmilla esijännitysvoimilla (kuva 18). Kuvaajista nähdään, että ulosvetovoima on suurimmillaan kuulun ollessa aivan uran pohjalla. Esijännitysvoimalla F_1 suurin ulosvetovoima on noin 8,9 N ja esijännitysvoimalla F_2 11,1 N. Lasketaan näiden keskiarvo

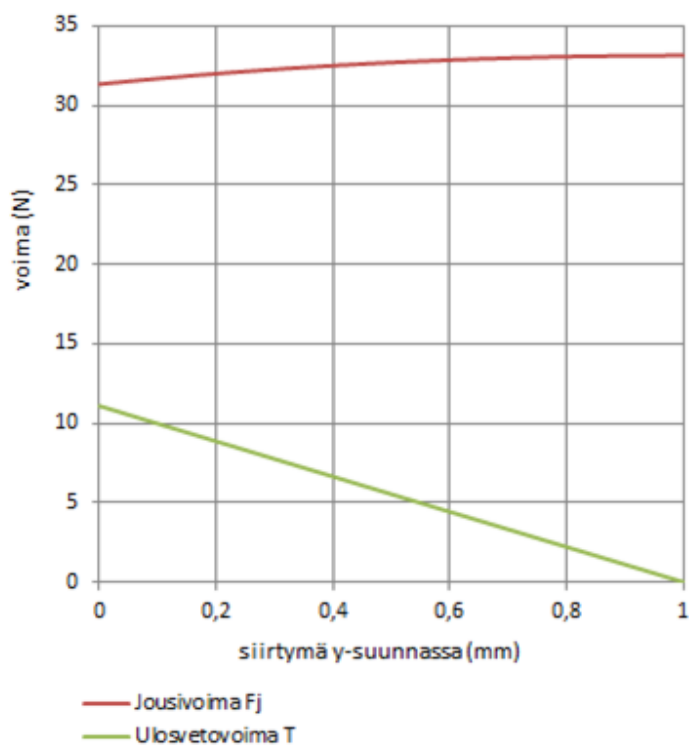
$$T = \frac{8,9 \text{ N} + 11,1 \text{ N}}{2} = 10 \text{ N} \quad (24)$$

Yhden jousipainimen keskimääräinen ulosvetovoima on 10 N. Koska jousipainimia on tulpassa neljä, koko tulpan ulosvetovoima on suuruusluokaltaan noin 40 N. Vastaavia kaavoja käyttäen laskettiin tulpan keskimääräiseksi kiinnilaittovoimaksi 41,5 N. Laskennassa ei huomioitu kitkaa, joten voimat ovat todellisuudessa hieman ilmoitettua suurempia. Laskenta perustuu siihen, että kuula on niin iso uraan nähden, että kosketus on aina uran reunalla. Tämä toteutuu aina kun $\beta < 45^\circ$.

Voimat y:n funtiona esijännitysvoimalla F_1



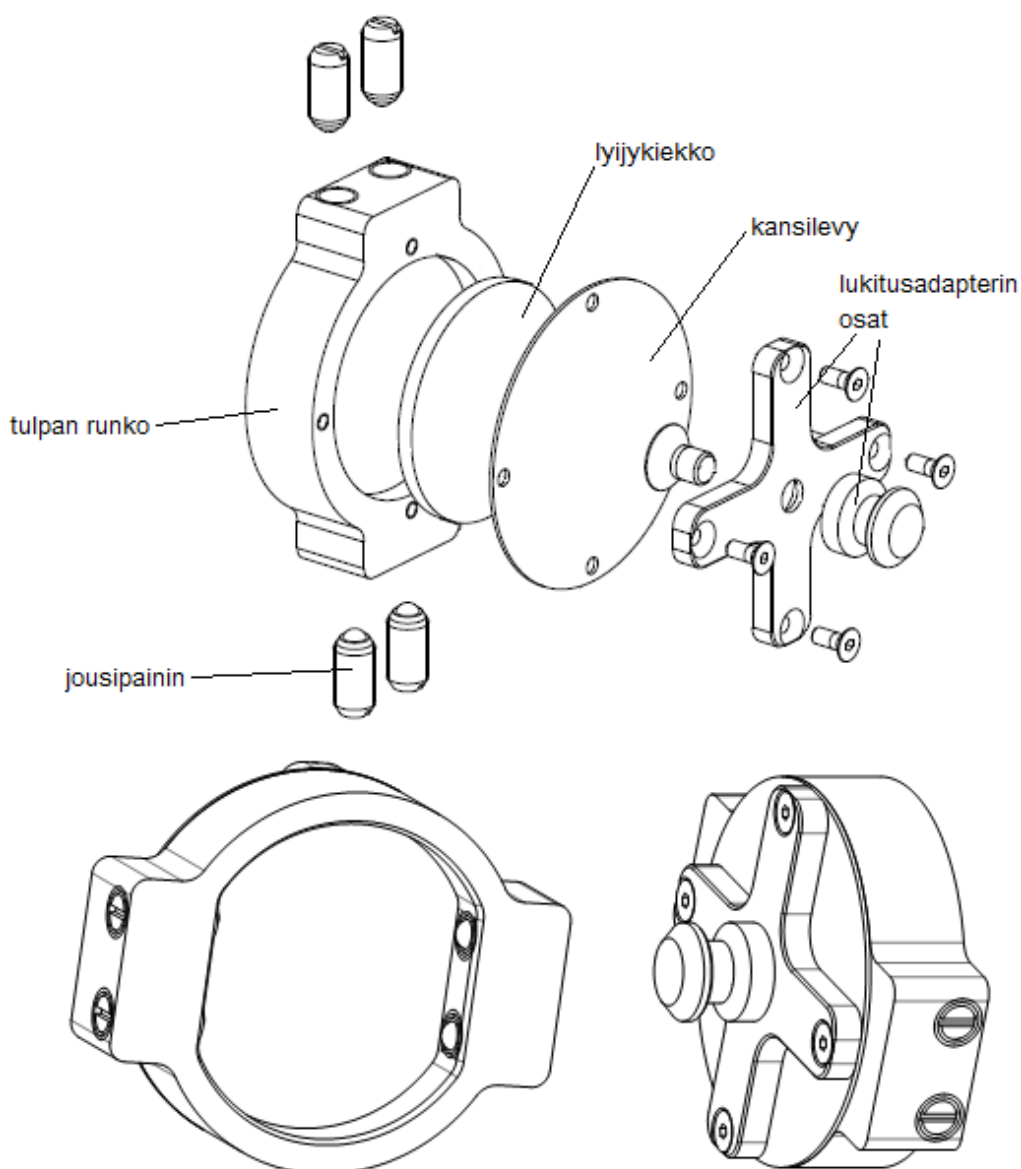
Voimat y:n funtiona esijännitysvoimalla F_2



Kuva 18. Jousi- ja ulosvetovoimien kuvaajat y-suuntaisen siirtymän funktiona kahdella eri esijännitysvoimalla.

4.1.4 Tulpan rungon suunnittelu

Tulpan runko on alumiinia, jossa on kierteitetyt reiät jousipainimien kiinnitystä varten (kuva 19). Runkoa on jatkettu jousipainimien kierteiden kohdalta riittävän jäykkyyden takaamiseksi. Sädeikkunan korotukselle on tasku, jonka reunoilla jousipainimien kuulat ovat. Taskun reunoilla on ohjaavat viisteet, joiden tehtävä on auttaa tulppaa asettumaan oikein. ProMax-tulpan säteily suojaus perustuu tulpan rungon sisällä olevaan 6 mm paksuun lyijykielekseen, joka absorboi säteilyä. Lyijykielekelle on koneistettu myös tasku, joka jää kansilevyn alle piiloon. Kansilevy kiinnittyy runkoon lukitusadapterin kiinnitysruuveilla.

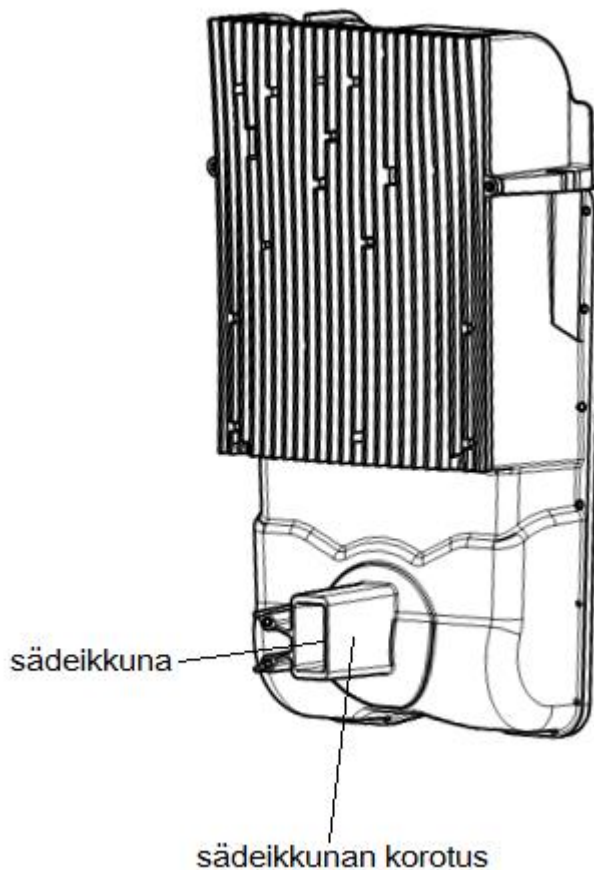


Kuva 19. ProMax-tulpan kokoonpanoon kuuluvat osat sekä valmis tulppa eri suunnista kuvattuna.

4.2 ProOne-tulppa

4.2.1 Lähtötilanne

ProOne-säteilylähteen kuori on valmistettu valamalla. Kaikki muodot ovat päästäviä. Sädeikkunan korotusosa on pitkä ja poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen (kuva 20). Kaulan sisällä on ontto tila, jonka pohjalla, sädeikkunan edessä, on pieni alumiinilevy, joka on kiinnitetty yhdellä DIN 912 M4x6 Zn -ruuvilla.



Kuva 20. ProOne säteilylähteen ulkokuoret ja tulpan kannalta keskeiset piirteet.

Nenosen suunnittelema ProOne-tulppa on valmistettu messingistä. Se koostuu pyöreästä kiekosta, johon lukitusadapteri kiinnitetään, sekä kiilamaisesta särmiöstä, joka mahtuu sädeikkunan korotuksen sisälle. Kiilamaisen särmiön muoto on kopioitu säteilylähteen kuoren 3D-mallista. Särmiön päässä on magneetti, joka tarttuu sädeikkunan vieressä olevaan ruuviin. Säteilyn absorbointi perustuu messingin seosaineiden kuparin ja sinkin kohtuullisen hyvään säteilyn absorptiokykyyn. Tulpassa ei ole lyijyä.

Nenosen tulppa toimi kohtuullisen hyvin, mutta tulpassa havaittiin vakava ongelma. Koska kiilamaisen särmiön muoto oli täsmälleen sama kuin sen vastinpinta säteilylähteen rungossa, tarttuu tulppa tiukasti kiinni, jos sitä painaa vähän kovempaa. Robotti ei tunne mitään, joten on täysin mahdollista, että tulppa jumittuu säteilylähteeseen lujasti kiinni. Kiinnitystä voi verrata esimerkiksi työstökoneiden kartioliitoksiin. Toinen ongelma oli se, että magneetti oli kiinteästi kiinni tulpassa. Valukappaleen mitoissa esiintyy aina pientä vaihtelua johtuen esimerkiksi muottien kulumisesta ja vaihtelevasta valuhiekan täyttymisestä. Kiilamaisesti kapenevassa kolossa, jonka kaltevuus on noin 2 %:n suuruusluokkaa, 0,01 mm:n lisäys rajapinnan korkeudessa voi estää kiilamaisen särmiön uppoamisen koloon 0,5 mm aiemmin. Koska magneettien vetovoima heikkenee voimakkaasti etäisyyden kasvaessa, ei tulpan kiinnittyminen ole riittävän luotettavaa.

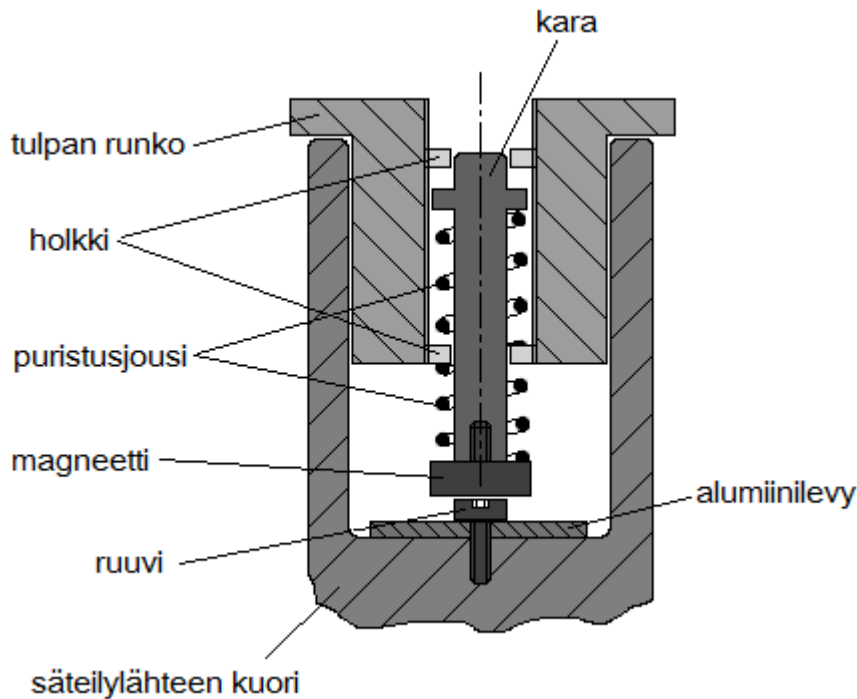
4.2.2 Tartuntamekanismin suunnittelu

Tartuntamekanismin suunnittelu aloitettiin tutkimalla säteilylähteen kuoren mahdollisia kiinnityskohtia. Erilaisia tartuntamekanismeja ideoitiin ja luonnosteltiin, mutta sädeikkunan juurella olevaan ferriittiseen ruuviin (kuva 21) tarttuminen magneetilla vaikutti parhaalta vaihtoehdolta.



Kuva 21. Sädeikkunan edessä on pieni alumiinilevy, joka on kiinni ferriittisellä ruuvilla.

Magneetti päätettiin sijoittaa jousitetun karan päähän (kuva 22). Jousituksen avulla tulppa kykenee sopeutumaan säteilylähteen valetun kuoren toleranssvaihteluihin. Kara on jousitettu molempiin suuntiin. Kuvassa ylempi jousi puristuu kasaan, kun magneetti kurottaa ruuviin kiinni. Alemman jousen tehtävä on estää tulppaa rikkoutumasta, jos kara törmää johonkin.

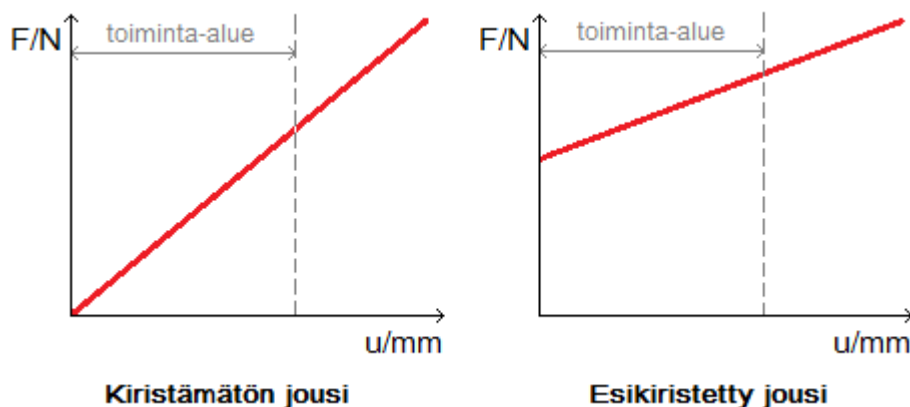


Kuva 22. ProOne-tulpan tartuntamekanismin periaatekuva.

Kara liikkuu kahden holkin varassa, tulpan rungossa olevan reiän sisällä. Holkki on POM-muovista valmistettu rengas, jonka ulkoreunalla on M12-kierteet. Vastaavasti reiässä on myös M12-kierteet. Kierteiden etuna on jousituksen portaaton säätö ja helppo valmistettavuus. Holkissa on ura ruuvimeisselille säätämistä varten.

Kara valmistetaan sorvaamalla austeniittisestä ruostumattomasta teräksestä. Karan liukupintojen pinnanlaadun on oltava riittävän hyvä, jotta se ei kuluttaisi muovisia holkkeja liikkuessaan. Liukupinta on hidasliikkeinen ja pienikuormitteinen pinta, joten pinnanlaaduksi valittiin R_a 1,6 käyttäen apuna erään koneteknisen kirjan taulukon ohje-arvoja (Hasari & Salonen, 2011: 169).

Kara on mitoitettu niin, että jouset eivät kokoonpanossa pääse vapaaseen pituuteensa, vaan niihin muodostuu esikiristystä. Esikiristysten ansiosta voidaan valita jousi pienemmällä jousivakiolla ja saadaan jousen jäykkyys toiminta-alueella tasaisemmaksi kuvan 23 mukaisesti. Näin karan jäykkyys ei ole alussa liian löysä ja lopussa liian jäykkä.



Kuva 23. Kiristämättömän jousen voima alkaa nolasta, kun taas esikiristetyllä jousella ei.

Karan päässä on voimakas neodyymimagneetti, joka kiinnittyy kierrepuikolla. Valmistaja ilmoittaa magneetin vetovoimaksi 60 N (Bauer & Böcker 2016). Kyseinen magneetti valittiin sen sopivan koon ja vetovoiman perusteella sekä sen takia, että se on Planmeccan varastonimike, mikä helpottaa saatavuutta.

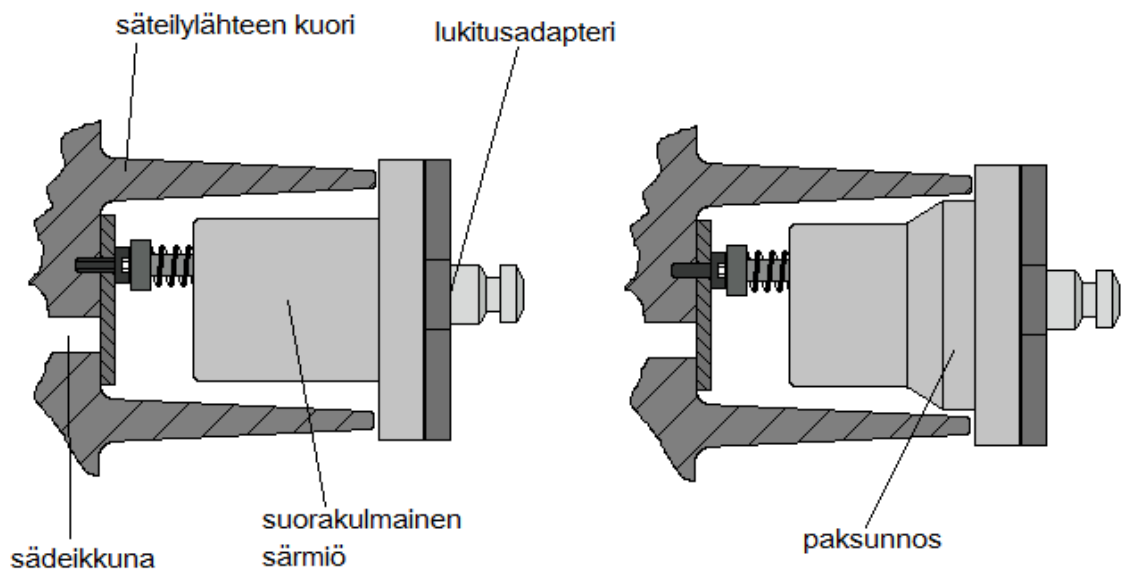
Magneetin vetovoimaa parannettiin vaihtamalla ruuvi, johon magneetti tarttuu. Magneetin vetovoimaa arvioitiin käsin vertaamalla kaikkiin saman kokoluokan ruuveihin, mitä oli varastonimikkeenä. Havaittiin, että magneetti tarttui paremmin DIN 7984 M4x6 Zn-ruuviin, kuin alkuperäiseen ruuviin. Kyseinen ruuvi on alkuperäisen ruuvien matalakan-tainen versio, jolloin sen kanta on myös leveämpi. Magneetti tarttui vielä paremmin DIN 7991 -kuusiokoloiseen uppokantaruuviin, mutta se ei soveltunut alumiinisen suodinle-vyn kiinnitykseen, joten sitä ei voitu käyttää. Uusi ruuvi päivitettiin tuotteen kokoonpa-no-ohjeisiin.

Jousien valinta jouduttiin tekemään manuaalisten testien perusteella, koska magneetin vetovoiman laskeminen vaatii asiantuntemusta. Magneetin ja ruuvien välinen vetovoima riippuu mm. molempien kappaleiden koosta ja muodosta, vedon kohtisuoruudesta, materiaaleista, magneetin laadusta ja permeabiliteetista (Goodier 2014). Tarvittavien jousien jäykkyyksien suuruusluokka arvioitiin karkeasti käsin ja yhtälön 14 perusteella.

Tämän jälkeen tilattiin pieni lajitelma eri vahvuisia, jäykkyydeltään kyseisen suuruusluokan jousia, ja etsittiin manuaalisesti kokeilemalla paras jousiyhdistelmä. Karan ulosvetämistä vastustavaksi jouseksi (kuvassa 22 ylempi jousi) valittiin Lesjöfors 0,75x15x7 -puristusjousi ja iskuja vaimentavaksi jouseksi Lesjöfors 0,75x10x7 -puristusjousi. Jousien valinnan jälkeen karan mittasuhteet oli tarkistettava uudelleen sopivan esikireyden saamiseksi.

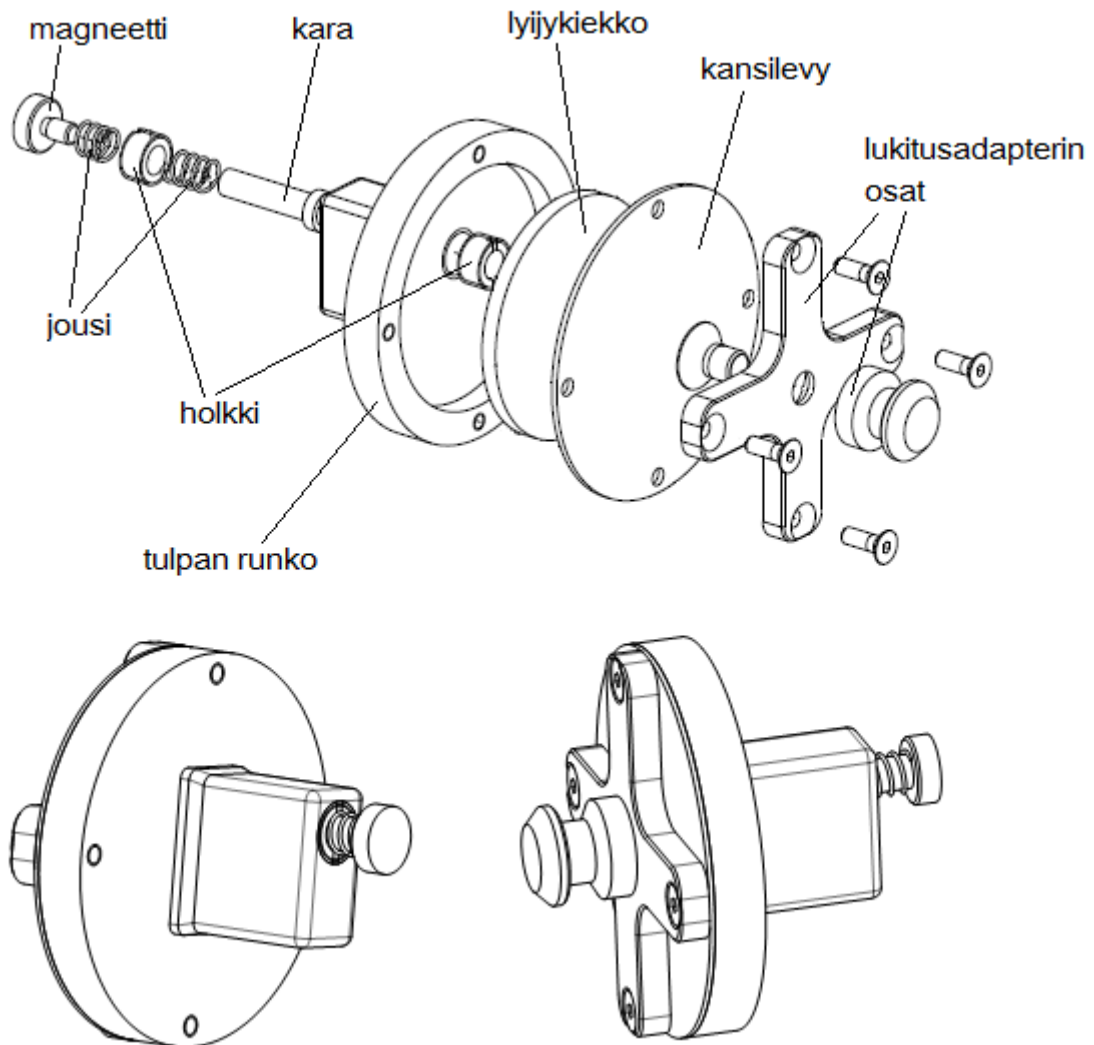
4.2.3 Tulpan rungon suunnittelu

Samojen rajapintojen takia uuden tulpan ulkomuoto muistuttaa Nenosen suunnittelemaa tulppaa. Kiilautumisen estämiseksi kiilamaisesta särmiöstä tehtiin suorakulmainen särmiö, eli siitä poistettiin kaltevuus. Särmiön pituutta lyhennettiin samalle tasolle etummaisena holkin kanssa, jolloin kierteitetty reikä on mahdollisimman lyhyt. Tulpan jousitus on säädetty sellaiseksi, että tulppaan jää aina pieni vetojännitys, kun magneetti on tarttunut ruuviin. Testeissä kävi ilmi, ettei magneetti jaksanut kannatella tulppaa suorassa, vaan tulppa nojasi säteilylähteen kauluksen reunaa vasten. Tästä syystä särmiön juureen lisättiin paksunnos, joka ottaa tukea säteilylähteen kuoren reunasta pitäen tulpan suorassa ja keskittäen sen oikeaan asentoon (kuva 24). Paksunnoksessa on ramppi tulpan vaivatonta paikalleen liukumista varten.



Kuva 24. Vasemmalla tulpassa oleva särmiö on suora, oikealla särmiön juureen on lisätty paksunnos, joka tukee tulpan sädeikkunan korotuksen reunaan. Paksunnoksen kokoa on liioiteltu kuvassa.

Tulpan runko on valmistettu alumiinista. Messingin käyttö ei ole mahdollista tulpan läpi menevän reiän takia. Säteilynsuojaus perustuu samaan lyijylevyyn kuin ProMax-tulpassa. Lyijylevy on samalla tavalla omassa taskussaan kansilevyn alla, jonka lukitusadapteri sulkee kiinnitysruuveillaan. Samojen, modulaaristen osien käyttö on järkevää, koska suunnitelmia tarvitaan vähemmän ja suuremmilla tuotantomäärillä päästään pienempiin kustannuksiin. ProOne-tulpan osat ovat nähtävissä kuvassa 25.

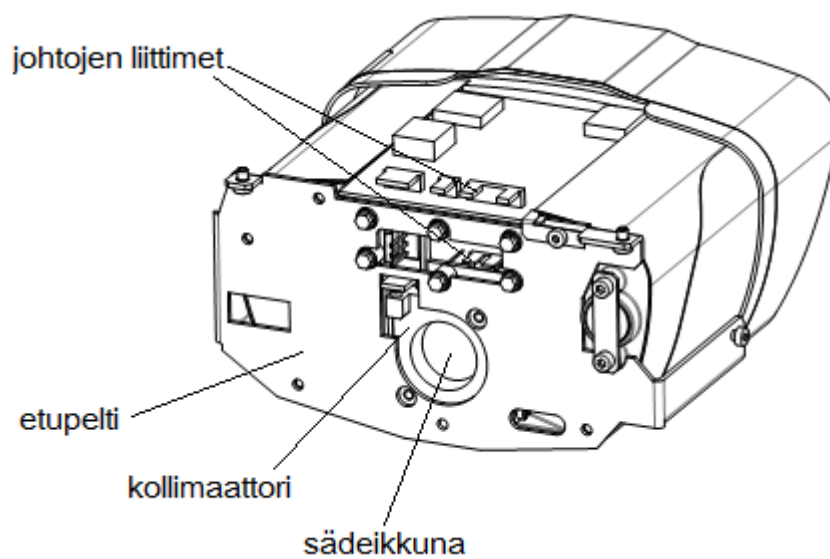


Kuva 25. ProOne-tulpan kokoonpanoon kuuluvat osat ja valmis kokoonpano eri suunnista kuvattuna.

4.3 ProX-tulppa

4.3.1 Lähtötilanne

ProX säteilylähteen kuori on muovia, joka on vuorattu suojamaalatulla lyijyllä (kuva 26). Säteilylähteen etupinnassa on sinkitystä teräslevystä valmistettu etupelti, josta säteilylähde kiinnitetään testin ajaksi erillisen kannatinpellin avulla jigisiin. Sädeikkunaa kehystää etupellin alla oleva messinkinen kollimaattori, jonka reikä on kartiomainen. Kuvaan merkityt johtojen liittimet yhdistyvät toisiinsa johdoilla. Sädeikkunan edessä on alumiini-levy.



Kuva 26. ProX säteilylähteen ulkokuoret ja tulpan kannalta keskeiset piirteet.

Nenosen suunnittelema tulppa on valmistettu alumiinista, ja se kiinnittyy kahdella magneetilla etupeltiin. Tulpan muotoon oli kopioitu etupellin piirteitä vastamuotoina siten, että ne tarjoavat tukea sivusuunnassa. Säteilyn absorbointi hoituu samanlaisen, rungon sisällä olevan lyijykiekon avulla kuin ProMax-tulpassa.

Nenosen tulppa istui hyvin etupeltiin kiinni, mutta kun etupelti yhdistettiin säteilylähteesseen, tulppa ei enää mahtunut paikalleen. Kollimaattorin eräs muoto jää kokoonpanossa etupeltiä korkeammalle, mikä estää tulppaa pääsemästä kosketuksiin etupellin kanssa.

4.3.2 Tartuntamekanismin suunnittelu

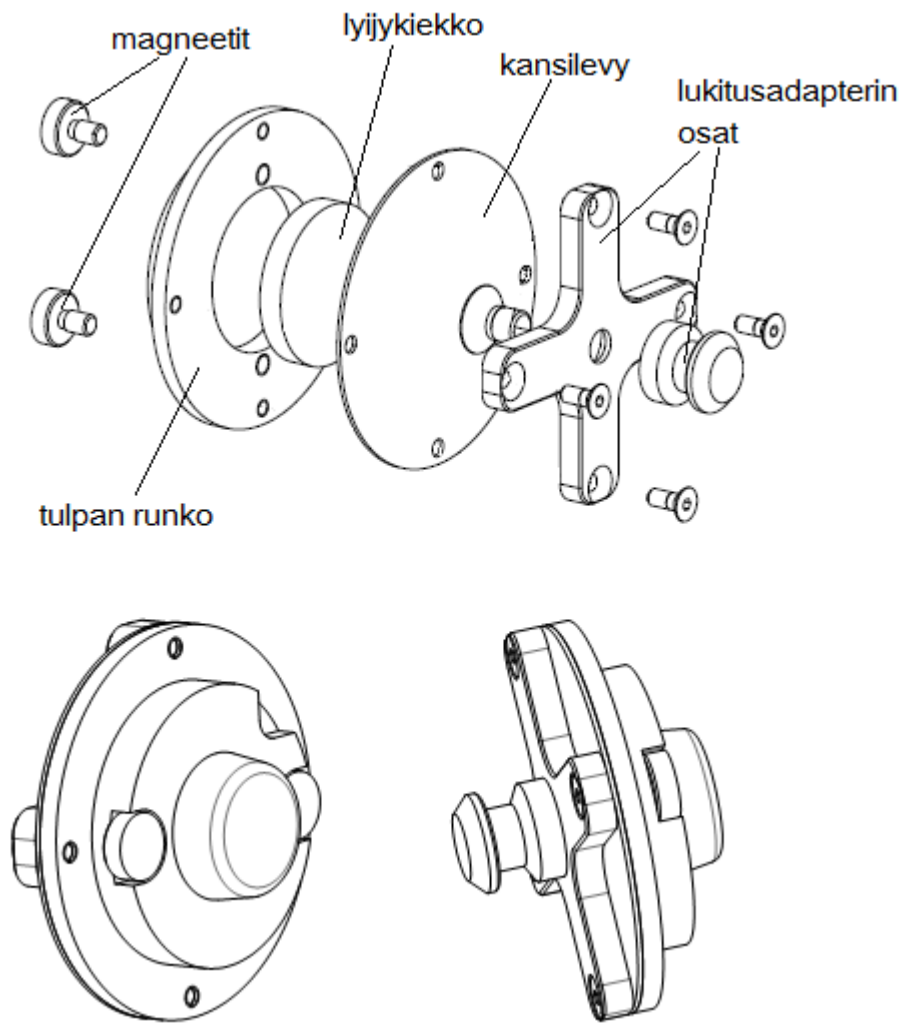
Tutkittaessa ProX-säteilylähteen mahdollisia tarttumapintoja havaittiin, että on helpointa tarttua magneeteilla ferriittiseen etupeltiin. Magneetin pitovoima on suurimmillaan tilanteessa, jossa sitä vedetään kohtisuoraan pinnasta pois päin. Pinnansuuntaista leikkauskuormitusta se kestää huonommin ja taivutusmomentilla kuormitettu magneetti irtoaa helposti. ProX-tulpan tapauksessa magneettia ei voi sijoittaa lähelle tulpan keskiakselia, koska sädeikkunan kohdalla ei ole etupeltiä. Yksi epäkeskeisesti sijoitettu magneetti altistuu puolestaan taivutusmomenttikuormitukselle esimerkiksi painovoiman ja robotin liikkeiden vuoksi. Tästä syystä tulppaan tarvitaan kaksi magneettia sädeikkunan vastakkaisille puolille.

Tulppaa varten tilattiin aluksi magneetteja, joiden pitovoimaksi ilmoitettiin noin 35 N, mutta magneetit osoittautuivat huomattavasti ilmoitettua voimakkaammiksi ja huonolaatuisiksi. Hyvän laadun ja saatavuuden takia päätettiin käyttää samoja magneetteja kuin ProOne-tulpassa. Tulpan irrotusvoima on siis 120 N. Tulppatelineeseen syntyvää kuormitusta voidaan kuitenkin vähentää merkittävästi ohjelmoimalla robotti irrottamaan tulppa pienellä kääntöliikkeellä, joka saa aikaan magneetteihin kohdistuvan momenttikuoormituksen.

4.3.3 Tulpan rungon suunnittelu

Tulpan runko on valmistettu alumiinista. Keskellä tulppaa on kartiomainen lieriö, joka hakeutuu kollimaattorin kartiomaiseen reikään. Lieriön ja reiän väliin on jätetty välys, joka huomioi valmistusteknisen toleranssvaihtelun. Kartiomainen lieriö hoitaa tulpan etulevyn suuntaisen asemoitumisen ja magneetit oikean korkeuden.

Tulpan runkoon on koneistettu väistö kollimaattorin ulostyöntyvää muotoa varten. Rakente on porrasmainen, jotta sädeikkunan vieressä olevat johdot eivät joutuisi puristuksiin, mutta tulppa olisi kuitenkin riittävän leveä lukitusadapterin kiinnitystä varten. Säteilyn absorbointi tapahtuu lyijykiekkon avulla, mutta lyijykiekko on pienempi kuin ProMax- ja ProOne-tulpissa, koska kiekon on oltava riittävän lähellä sädeikkunaa, ettei säteily siroa alumiinirungossa liikaa, ennen kuin se saavuttaa lyijykiekkon. Tulpan runko ja muut tulppaan tarvittavat osat on esitelty kuvassa 27.

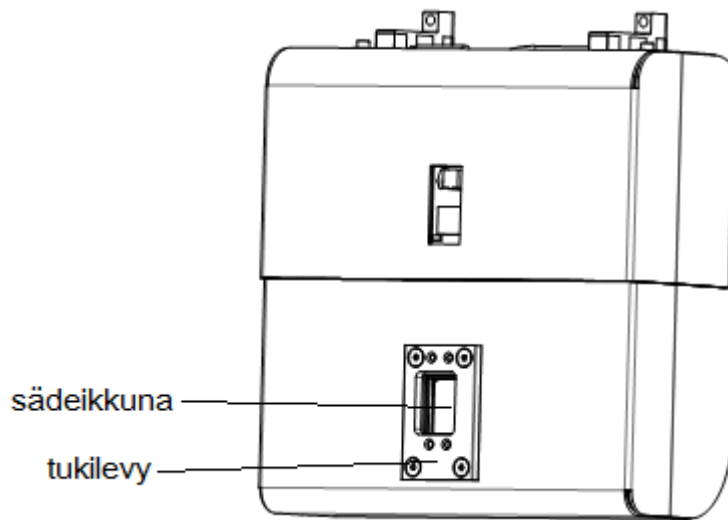


Kuva 27. ProX-tulpan kokoonpanoon kuuluvat osat ja valmis kokoonpano eri suunnista kuvattuna.

4.4 ProMax 120 kV -tulppa

4.4.1 Lähtötilanne

ProMax 120 kV -säteilylähteen kuoret on valettu, mutta säteilylähde koteloidaan liäsuojaan sisään, joka on valmistettu alumiini- ja lyijylevystä. Sädeikkunaa kehystää noin 8 mm paksusta, ferriittisestä teräslevystä valmistettu kollimaattorin tukilevy (kuva 28). ProMax 120 kV on Planmecan tuotannossa olevista säteilylähteistä voimakastehoisin. ProMax 120 kV -säteilylähteeseen ei ole aiemmin suunniteltu robottikäyttöistä tulppaa.



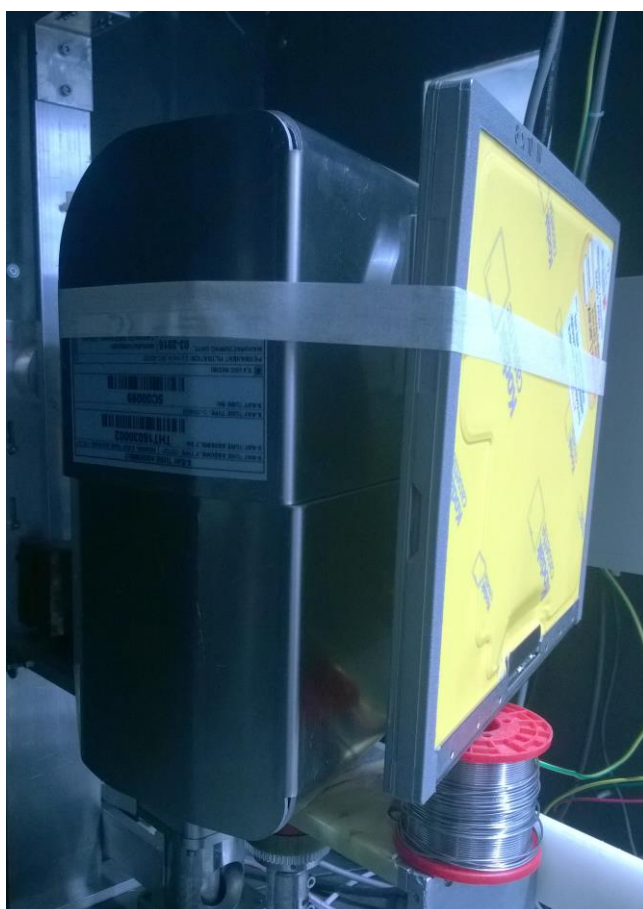
Kuva 28. ProMax 120 kV -säteilylähteen ulkokuoret ja tulpan kannalta keskeiset piirteet.

4.4.2 Tulpan rungon ja säteilyominaisuuksien suunnittelu

Tartuntamekanismiksi ideoitiin magneettikiinnitystä ProX-tulpan tapaan tai kynsiä, jotka tarttuisivat sädeikkunan koloon, joka on kotelon sisäpuolelta paikoitellen leveämpi. Magneettikiinnitys vaikutti lupaavammalta, joten se valittiin kiinnitystavaksi. Tulpassa on kaksi magneettia, jotka tarttuvat ferriittiseen kollimaattorin tukilevyyn sädeikkunan vastakkaisilta puolilta.

Tulpan rungon perusmuotona on lukitusadapterin levyinen kiekko, jonka etupintaan on lisätty pyöristetyn suorakaiteen muotoinen korotus, joka mahtuu tukilevyn aukkoon. Korotuksessa on viisteet, jotka auttavat tulpan asettumista oikealle paikalleen.

Tulpan säteilyn absorbointia yritettiin aluksi toteuttaa samaan tapaan kuin aiemmissa tulpissa alumiinirungon sisällä olevan lyijykiekkon avulla. Vuotosäteilytestit antoivat kuitenkin jatkuvasti hylätyn tuloksen. Tulpasta tehtiin useita prototyyppisiä, joissa lyijykiekkoa paksunnettiin ja tuotiin lähemmäs tukilevyä ja jopa sädeikkunaan kotelon sisäpuolelle tulpassa olevan puikon avulla. Testitulokset olivat silti hylättyjä, joten alettiin epäillä, säteilylähteen rungon vuotavan säteilyä. Vanhanmallisessa, manuaalisessa säteilysuojatulpassa lyijykiekko laitetaan sädeikkunaan kotelon sisään, jolloin se estää säteilyn laajan avaruuskulman alueelta. Vuotokohtaa yritettiin paikallistaa perinteisten röntgenfilmien avulla kuvan 29 mukaisesti. Säteilylähde laitettiin vuotosäteilytestikaappiin ja sillä tuotettiin säteilyä tulpan ollessa paikallaan.

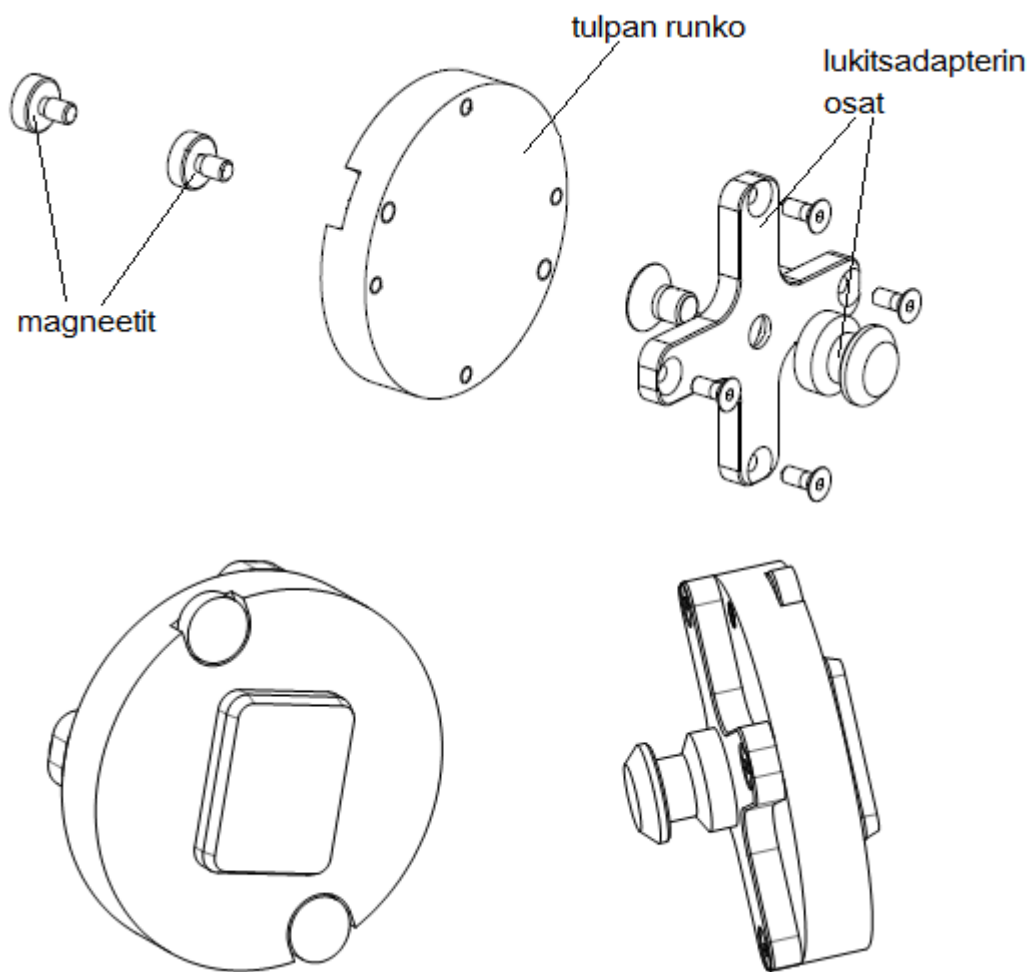


Kuva 29. Testiasetus. Röntgenfilmi on kasetin sisällä, joka on teipattu paikoilleen.

Valotuskokeiden avulla ei löytynyt selkeää vuotokohtaa. Filmien perusteella säteily tuli suoraan tulpan läpi, kun valotusaika säädettiin riittävän pitkäksi. Säteilylähteellä tehtiin vuotosäteilymittaus ilman tulpaa siten, että absorboivat lyijylevyt teipattiin suoraan kollimaattorilevyyn kiinni, jolloin testitulokset olivat hyväksytyt. Säteily ei siis vuotanut rungon läpi, vaan sirosi tulpan alumiinisessa rungossa ennen lyijykiekkoa. Tämän pääteltiin

johtuvan ProMax 120 kV:n tuottamasta, kvanttienergialtaan muihin säteilylähteisiin verrattuna voimakkaammasta säteilystä.

Tulppa päätettiin valmistaa kokonaan messingistä ilman taskua ja lyijykiekkoa, minkä jälkeen vuotosäteilymittaus tuotti hyväksytyt tulokset. Kokonaan messinkisen rungon etu on vähempien osien määrä, mutta tulppa on painavampi kuin alumiinirunkoiset tulpat. Tulpan kokoonpanoon tarvittavat osat on esitelty kuvassa 30.



Kuva 30. ProMax 120 kV -tulpan kokoonpanoon tarvittavat osat ja valmis kokoonpano kuvattuna eri suunnista.

5 Tulppatelineen suunnittelu

5.1 Tulppatelineen vaatimukset

Tulppatelineen suunnittelu aloitettiin miettimällä, mitä ominaisuuksia tulppatelineeltä vaaditaan. Vaatimuksista muodostettiin vaatimuslista, joka ohjasi tulppatelineen suunnittelua (taulukko 2).

Tulppatelineen tulee olla hyvin robotin ulottuvissa ja helposti käytettävissä. Säteilysuojatulppien on tartuttava luotettavasti säteilylähteeseen joka kerta, kun tulppa noudetaan telineestä ja jäätävä tulppatelineeseen joka kerta, kun tulppa palautetaan telineeseen. Toiminnan luotettavuus on välttämätöntä, koska testaus epäonnistuu, jos tulppa ei ole siellä missä sen pitäisi olla. Tulppatelineen on kyettävä ottamaan vastaan valmistus- ja kokoonpanoteknisiä toleranssivaihteluita.

Jokaista hajasäteilytestikaappia kohden tulppatelineissä tai -telineessä tulee olla paikat kuudelle säteilysuojatulpalle. Ulkoisesti erilaisia säteilylähteitä on tuotannossa tällä hetkellä viisi. Telineessä pitää olla yksi ylimääräinen paikka, jotta sen kapasiteetti ei heti loppuisi kesken, kun uusi röntgentuote otetaan tuotantoon. Tulpat on voitava laittaa telineeseen mielivaltaiseen järjestykseen ilman, että tulppaa noutavat säteilylähteet törmäävät viereisiin tulppiin. Yhdessä tulppapaikassa pitää olla enemmän tilaa kuin muissa siltä varalta, että tuotantoon otetaan uusi säteilylähde, joka on suurempi kuin muut säteilylähteet. Koska joissain tulpissa käytetään magneetteja, tulppatelineen materiaali ei saa olla magneettinen.

Tulppatelineen tulee olla riittävän luja kestääkseen käytöstä aiheutuvat rasitukset. Normaalista käytöstä aiheutuvien jännitysten on oltava niin pieniä, että rakenne ei vaurioidu heti, vaikka tulppa olisi esimerkiksi liikahtanut testauksen aikana ja tulpan palautus telineeseen tai ulosveto vaatisi tavallista enemmän voimaa. Myös robotin mahdolliseen törmäyksen takia on varattava varmuuskerrointa myötörajan nähden. Rakenteessa ei saa esiintyä suuria siirtymiä normaalin käytön seurauksena, koska tulppa saattaa kiillautua kiinni myötäävän rakenteen ja säteilylähteen väliin. Materiaalin luontainen iskutkeys olisi hyvä ominaisuus mahdollisen törmäyksen varalta.

Tulppatelineen olisi hyvä olla kohtuullisen helppo ja edullinen valmistaa. Edullisuus ei kuitenkaan ole ehdoton vaatimus, koska telineitä valmistetaan vain muutamia kappaleita. Pintakäsittelyä tulppateline ei tarvitse, koska sitä käytetään vain sisätiloissa. Asennettavuus on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa, koska kaappeja ei ole mahdollista siirtää tulppatelineitä asennettaessa. Ruuvikiinnitteisenä tulppateline olisi helppo asentaa sekä vaihtaa siinä tapauksessa, että se rikkoutuu käyttökelvottomaksi.

Taulukko 2. Tulppatelineen vaatimuslista. Vaatimukset ja toiveet on esitetty kategorioittain. Symbolit V (=vaatimus) ja T (=toive) ilmaisevat vaatimuksen tärkeyden.

Kategoria	Vaatimus tai toive	V/T
Sijainti	Telineen on oltava hyvin robotin ulottuvissa.	V
	Telineen on oltava lähellä testikaappia.	T
Dimensiot	Telineessä pitää olla kuusi tulppapaikkaa.	V
	Tulppien järjestys voi olla mielivaltainen.	V
	Yhdessä paikassa oltava muita enemmän tilaa.	T
Muotoilu	Pidikelevyn on kyettävä ottamaan vastaan toleranssivaihteluita.	V
	Muotoilun on oltava virheasentoja korjaava.	V
Lujuus	Varmuusluku myötörajaan nähden: $n=3$	V
	Kuormituksen aiheuttamat siirtymät: $u_{max} < 0,5 \text{ mm}$	V
Materiaali	Telineen materiaali on iskunkestävää.	T
	Telineen oltava lähes ei magneettinen.	V
Konstruktio	Telineen rakenteen on oltava yksinkertainen.	T
	Telineen on oltava edullinen valmistaa.	T
Asennettavuus	Telineen on oltava asennettavissa ahtaassa tilassa.	V
	Teline kiinnitetään ruuveilla.	T

5.2 Tulppatelineen rungon suunnittelu

Ennen kuin tulppatelinettä voi luonnostella ja suunnitella tarkemmin, on päätettävä mihin tulppateline tai -telineet sijoitetaan. Alkuvaiheessa harkittiin suurta, keskitettyä tulppatelinettä, joka pitelisi kaikkien hajasäteilytestikaappien tulpat. Testausalueella ei kuitenkaan ollut riittävästi tilaa niin suurelle tulppatelineelle. Robotti joutuisi myös tekemään suuremman matkan noutaessaan ja palauttaessaan tulppia, mikä ei olisi järkevää. Tästä syystä tulppatelineitä tarvittaisiin useita.

Tutkittaessa robottisolussa mahdollisia tulppatelineiden sijoituspaikkoja vaihtoehtoiksi muodostuivat testikaappien kyljet, testikaappien ovet ja lattia. Ovi hylättiin sijoituspaikkana, koska tulppien poimiminen vaatii kohtalaista tarkkuutta. Oven avausmekanismia ei ole suunniteltu tarkkoihin liikkeisiin, joten ovi saattaa pysähtyä hieman eri kohtaan joka kerta, kun se avataan tai suljetaan. Lisäksi tulppia poimittaessa oven pitäisi olla aina siinä asemassa, jossa robotti on opetettu tulppia poimimaan. Automaation kannalta on järkevää pitää tarpeettomat muuttujat ja epävarmuustekijät minimissään. Lattia hylättiin myös sijoituspaikkana, koska osa tulpista on magneettikiinnitteisiä ja ne saattavat ruveta keräämään magneettista roskaa, kuten esimerkiksi pieniä metallipartikkeleita, jotka heikentävät magneettien toimintaa. Lattialla oleva teline olisi myös tiellä kun testausalueella tehdään esimerkiksi huoltotöitä. Edellä mainitut seikat huomioon ottaen paras paikka tulppatelineelle on testauskaapin kyljessä. Kaappien oikealla puolella on oven avausmekanismi, joten tulppatelineelle sopiva paikka on kunkin testauskaapin vasemmassa kyljessä. Tulppatelineet voidaan kiinnittää testikaappien alumiiniprofiileihin ruuveilla.

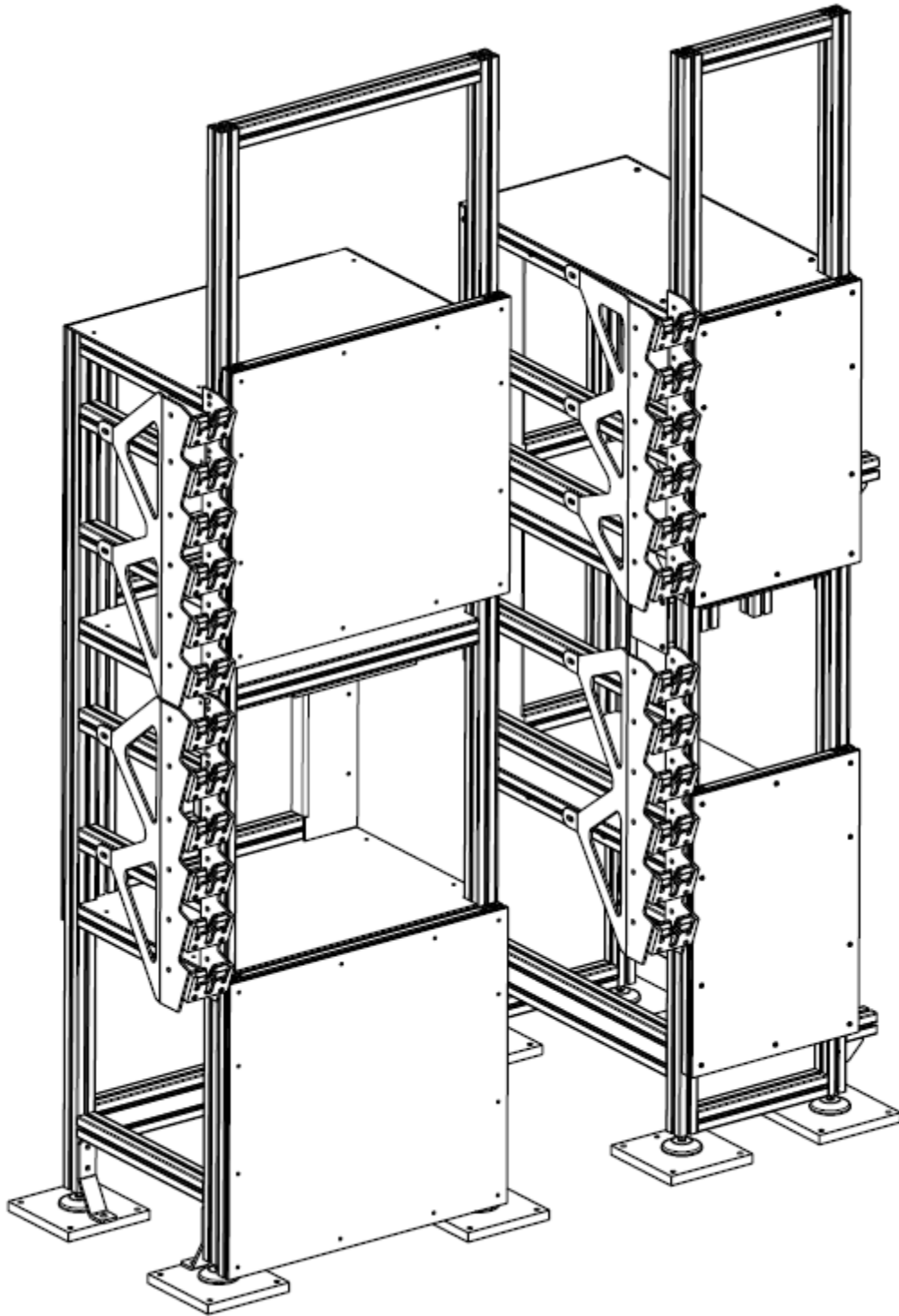
Tulppatelineen sijainnissa tuli huomioida myös robotin ulottuvuus. Kokeiltaessa robotin liikerajoja havaittiin, että robotti ei yllä vasemmanpuoleisen vuotosäteilytestikaapin vasemmalle puolelle, joten sinne ei voi sijoittaa tulppatelinettä. Testikaappien siirtäminen ei ole mahdollista enää tässä vaiheessa projektia, koska kaapit on pultattu kiinni lattiaan ja robotille on opetettu paljon liikeratoja, jotka perustuvat kaappien sijainteihin. Tulppateline on järkevää sijoittaa mahdollisimman lähelle testikaappia, jota se palvelee, jotta robotin liikematka olisi mahdollisimman lyhyt. Näistä syistä johtuen päätettiin, että kukin tulppateline sijoitetaan oman testikaappinsa oikeanpuoleisen kaapin vasempaan kylkeen. Oikeanpuoleisen vuotosäteilytestikaapin oikealla puolella on säteilyntuottotestikaappi. Koska säteilyntuottotestikaapin mittasuhteet ovat erilaiset verrattuna vuotosäteilytestikaappeihin, siinä ei voida käyttää samaa tulppatelinemallia. Lisäksi ylä- ja

alakaapille on suunniteltava erilaiset telineet hyvän tuennan takaamiseksi. Näin ollen tulppatelineestä oli suunniteltava yhteensä kolme erilaista mallia (kuva 31).

Tulppatelineen muotoon vaikutti merkittävästi se, että jigat, joista putkipäät roikkuvat, ulottuvat etupuolella pidemmälle kuin säteilylähteiden sädeikkunoiden korotus. Tulppatelineen pidikelevyt eivät voi siis olla samassa tasossa, koska muuten jigi törmää tulppatelineeseen ennen kuin tulppa kiinnittyy säteilylähteeseen. Ongelma korjattiin porrastamalla ja kääntämällä kallelleen tulppatelineen pidikelevyjen tasot. Koska tulppatelineet kiinnitetään eri testikaappeihin kuin mitä ne palvelevat, on niiden oltava riittävän ulkonevia, jotta niiden toiminta ei ole riippuvainen testikaapin oven asennosta. Jigi tai säteilylähde ei saa törmätä kiinni olevaan oveen tulppaa noudettaessa. Hajasäteilytestikaappien välissä on vain noin 22 cm tilaa. Samassa välissä on myös oven nostomekanismi, joka vie korkeudesta riippuen noin 6...10 cm tilaa. Päätettiin, että tulppateline saa olla maksimissaan 10 cm leveä, jotta se voitaisiin asentaa kaappien väliin.

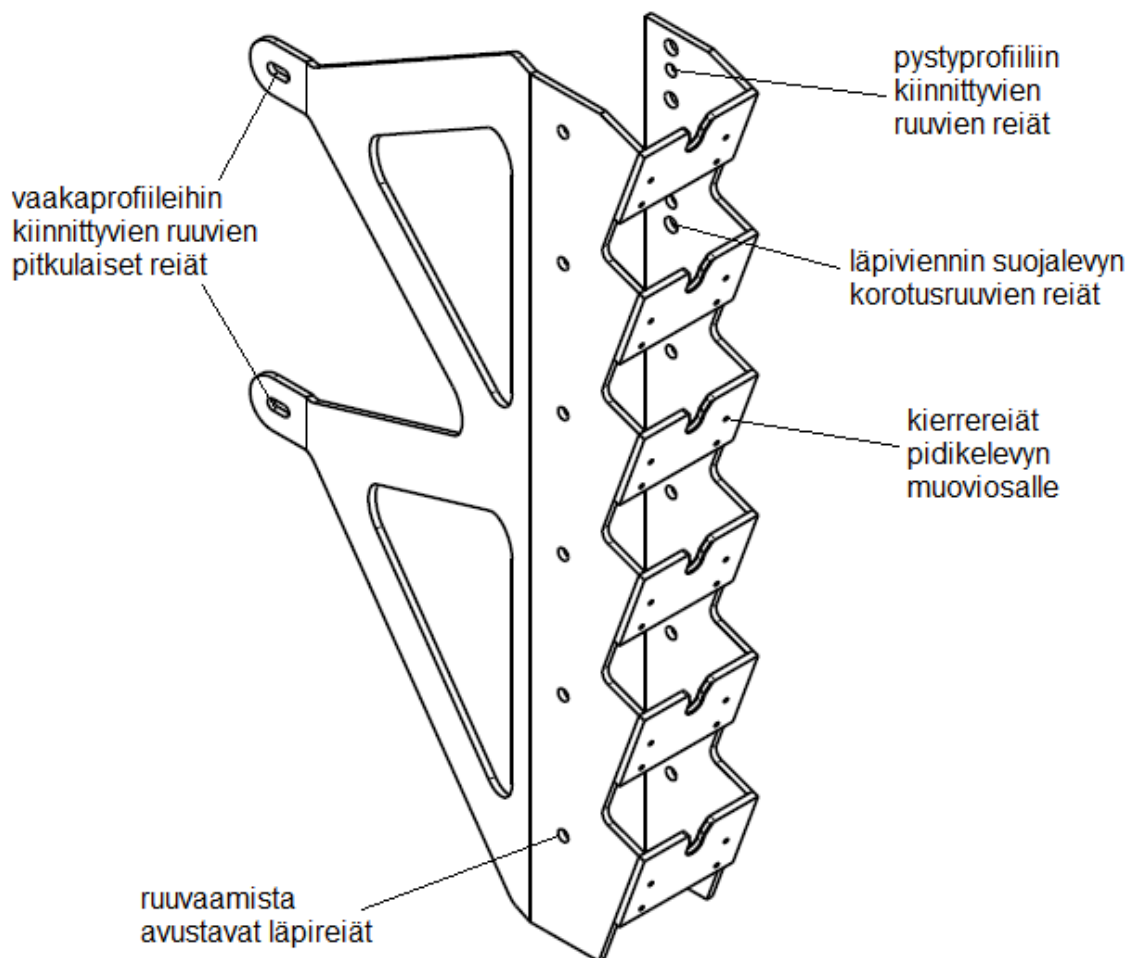
Luonnoksien myötä tulppatelineen konstruktio hahmottui kahdesta erilaisesta reisipalasta ja kuudesta pidikelevystä hitsatuksi rakenteeksi. Reisipalat valmistettaisiin vesileikkaamalla levystä ja toinen niistä kantattaisiin niin, että sen kiinnitysreiät tulevat samalle tasolle ensimmäisen kanssa. Pidikelevyt hitsattaisiin molempiin reisipaloihin piehahitsilla takapuolelta. Ensimmäinen reisi kiinnittyisi pystysuoraan alumiiniprofiiliin kuudella ruuvilla ja toinen reisi kiinnittyisi taaempaa testikaapin vaakasuoriin alumiiniprofiileihin. Asennuksen helpottamiseksi myös toiseen reisipalaan suunniteltiin reiät, jotta ruuvimeisselin voisi työntää reiästä läpi ja ruuvata kiinnitysruuvit tulppatelineen ulkopuolelta käsin. Lisäksi taaemmista rei'istä tehtiin pitkulaiset, jotta ruuvien reiän poraamisen vaikeissa olosuhteissa ei tarvitsisi olla niin tarkkaa.

Tulppatelineen materiaaliksi valittiin EN AW-5083 -alumiinilevy sen hyvän hitsattavuuden ja lujuuden vuoksi (Vartiainen 2014). Materiaalivalintaa puolsivat myös alumiinin iskutkeys ja ei-magneettisuus. Levyn paksuudeksi valittiin 5 mm FEM-analyysin perusteella ja siksi, että kierteitetyille rei'ille saataisiin riittävän pitkät kierteet. Levyn haluttiin myös olevan sopivan jäykkä vastustaakseen hitsauksen lämpölaajenemisvaikutuksesta johtuvaa vetelyä.



Kuva 31. Vasemmalla on hajasäteilytestikaappi ja oikealla säteilyntuottotestikaappi. Hajasäteilytestikaapissa voidaan käyttää samaa tulppatelinemallia (malli A) sekä ylä- että alakaapin kohdalla, mutta säteilyntuottotestikaapissa ylä- ja alakaapeille tarvitaan omat telinemallinsa (ylhäällä malli B ja alhaalla malli C) erilaisista mittasuhteista johtuen. Lyijy- ja alumiinilevyt on piilotettu kaappien vasemmista kyljistä, jotta alumiiniprofiilit, joihin tulppatelineet kiinnittyvät, näkyisivät.

Testikaappien lyijy- ja alumiinilevykuoriin oli tehty sähköjohtojen läpivientejä, joiden siirtäminen ei ollut enää mahdollista. Läpivienti koostuu reiästä ja sen peittävästä korokeruuveilla olevasta lyijyalumiinilevystä, joka absorboi reiästä tulevan säteilyn. Läpiviennin suojalevyn korokeruuvit piti huomioida tulppatelineessä muutamalla ylimääräisellä reiällä (kuva 32).



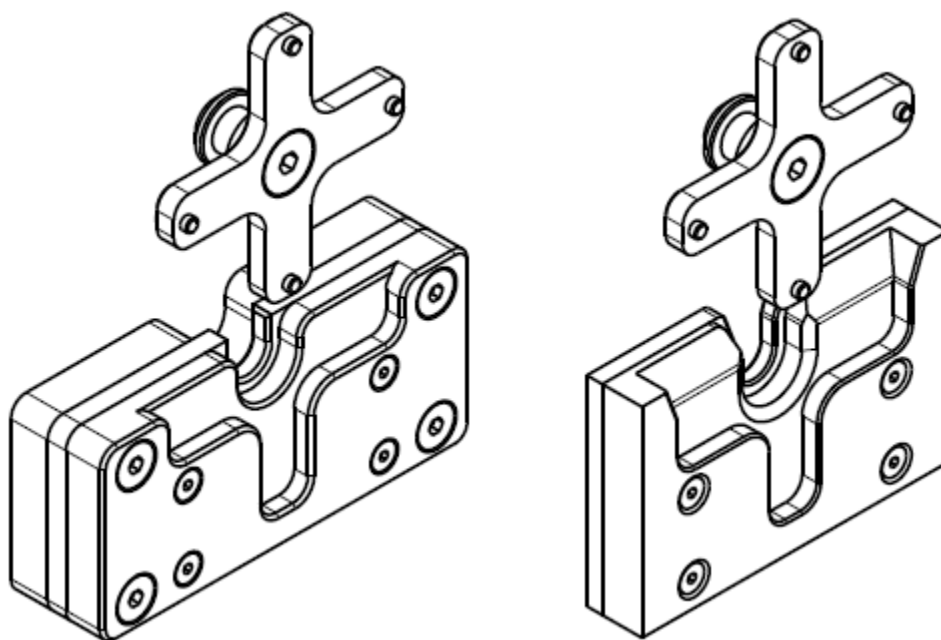
Kuva 32. Tulppatelineen runko on koottu hitsaamalla. Kuvasta puuttuvat pidikelevyjen muoviosat.

Tulppatelineen pidikelevyt ovat vakioetäisyydellä toisistaan. Yhden tulppapaikan suurempi tilantarve huomioitiin muuttamalla tulppateline malli A:n mittoja ja tuentapisteitä siten, että ylemmän telineen alimman pidikelevyn jälkeen on pidempi etäisyys alemman telineen ylimpään pidikelevyyn nähden. Näin ylimpänä tai alimpana olevaan pidikelevyyn voi sijoittaa suuremman säteilylähteen tulpan. Malleihin B ja C tätä ei tehty, koska telineet ovat valmiiksi etäällä toisistaan.

5.3 Pidikelevyn suunnittelu

Pidikelevy on se osa tulppatelinettä, johon tulpan lukitusadapteri tarttuu. Pidikelevy koostuu muovisesta osasta, johon on koneistettu lukitusadapterin tukilevyn ristimäinen muoto, sekä metallilevystä, jonka loveen lukitustappi jää haarukkaotteeseen.

Pidikelevyn toimintaperiaate päätettiin pitää samana kuin Nenosen suunnittelemassa pidikelevyssä, mutta sitä kehitettiin vaatimuslistan mukaisesti. Nenosen pidikelevy oli liian leveä, joten uusi pidikelevy suunniteltiin 100 mm leveäksi. Vanhassa pidikelevyssä oli tarpeettoman paljon ruuveja, joten niitä karsittiin. Pidikelevyyn lisättiin muotoja, jotka ohjaavat lukitusadapterin oikealle paikalleen, vaikka tulppa päätyisi jostain syystä lievästi virheelliseen asentoon. Osien valmistus- ja kokoonpanoteknisten toleranssi- vaihteluiden vastaanottamiseksi pidikelevyn ja lukitusadapterin väliseksi välykseksi valittiin 0,25 mm joka suuntaan. Vanhan ja uuden pidikelevyn eroavaisuudet näkyvät kuvasta 33.

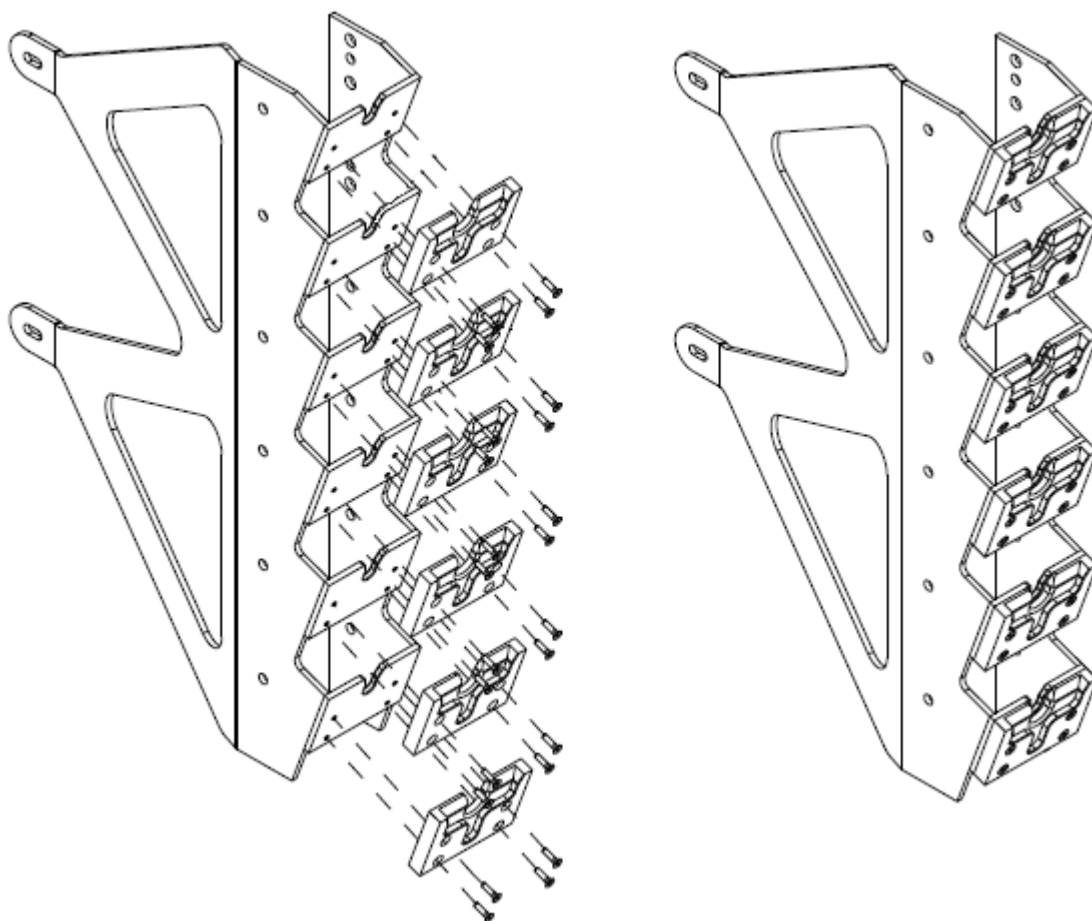


Kuva 33. Vanhan ja uuden pidikelevyn eroavaisuudet.

Vanhassa pidikelevyssä on muovinen korotusosa, jonka avulla pidikelevy voidaan kiinnittää pystysuoraan tasoon kiinni ruuveilla. Lukitusadapterin toiminnan kannalta kyseinen osa on täysin tarpeeton. Korotusmuovipala poistettiin pidikelevystä, koska uudessa tulppatelinesuunnitelmassa lovettu metallilevy on osa tulppatelineen kantavaa raken-

netta. Pidikelevyn muoviosat ruuvataan kiinni lovetuihin metallilevyihin kuvan 34 mukaisesti.

Metallilevyn materiaali oli alun perin 6 mm paksu rakenneteräs, joka vaihdettiin 5 mm:n alumiinilevyksi. Jotta tulppatelineen kokoaminen hitsaamalla olisi mahdollista, materiaalien pitää olla samoja. Alumiini ei ole magneettista, joten se soveltuu pidikelevyyn paremmin kuin ferriittinen rakenneteräs. Myös ruuvien materiaaliksi valittiin austeniittinen ruostumaton A2-teräs sen vähäisen magneettisuuden vuoksi. Muoviosan materiaaliksi valittiin polyoksimeteeni eli POM, koska se kestää hyvin kulutusta ja iskuja, on jäykkää ja erittäin joustavaa (Kotamies 2013: 26). POM:iä käytetään yleisesti esimerkiksi hihnakuljettimien törmäyslevyjen materiaalina.



Kuva 34. Pidikelevyjen muoviosat ruuvataan DIN7991 M4x16 A2-70 -ruuveilla kiinni tulppatelineen runkoon. Lovetut alumiinilevyt ovat kiinteä osa tulppatelineen rakennetta. Muoviosien kiinnittämisen jälkeen tulppateline on valmis asennettavaksi testikaapin kylkeen.

5.4 FEM-analyysi

Jotta tulppatelineen rakenteen riittävästä lujuudesta ja jäykkyydestä voitiin varmistua, rakennetta tutkittiin elementtimenetelmän avulla. Laskennassa käytettiin kaupallista FEM-ohjelmaa Abaqusta. Ensin tutkittiin tulppatelineen rakenteen yleinen lujuus mallintamalla koko rakennetta kuorielementein. Tuloksia käytettiin tulppatelineen levyn paksuuden ja materiaalin valinnan tukena. Kun levyn paksuus ja materiaali oli päätetty, tutkittiin kriittisten alueiden jännitykset ja siirtymät erillisellä laskentamallilla.

5.4.1 Rakenteen yleinen lujuus

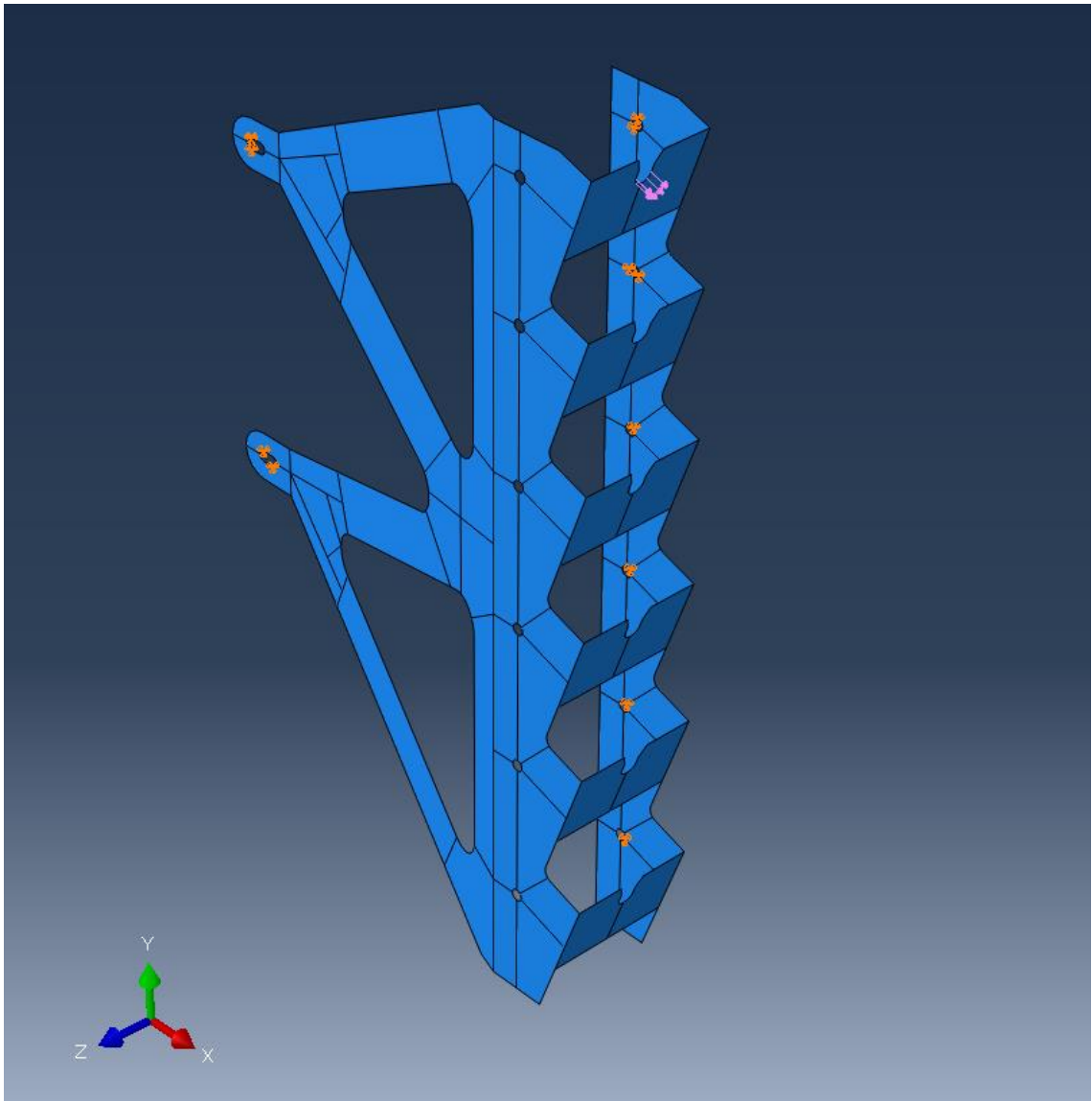
Mallinnetaan tulppatelineen rakenne kuorimallina. Kiinnitetään rakenne jäykästi kiinnitysruuvien reikien reunoista. Suurin tulpan irrotusvoima on 120 N. Oletetaan laskennassa, että pidikelevyjien POM:istä valmistetut osat eivät vaikuta telineen rungon lujuuteen. Kuormitetaan rakennetta ylimmän pidikelevyn loven pohjalta viivamaisella kuormituksella, jonka kokonaissuuruus on 120 N (kuva 35). Kuormituksen tulee olla vetoa, ei puristusta, koska tulpan magneettinen kiinnitys aiheuttaa rakenteeseen vetoa niin kiinnittäessä kun irrottaessakin. Ylin pidikelevy on kriittisin, koska sen tuenta on huonoin. Asia tarkistettiin siirtämällä kuormitus vuorollaan kuhunkin pidikelevyyn.

Mallinnetaan tulppatelineen rakenne neliöllisin, 8-solmuisin kuorielementein. Käytetään redusoitua integrointia. Elementin tyyppi on S8R5. Elementin paksuus on 5 mm. EN AW-5083 -alumiinin kimmokerroin on 70 GPa ja $R_{p0.2}$ -raja 115...125 MPa (Gleich Aluminiumwerk GmbH & CO 2015). Suppeumakerroin on 0,33. Tulppatelineen vaatimustilassa määriteltiin varmuusluvaksi myötörajan nähden $n=3$. Varmuusluku määritellään seuraavasti

$$n = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{sall}} \quad (25)$$

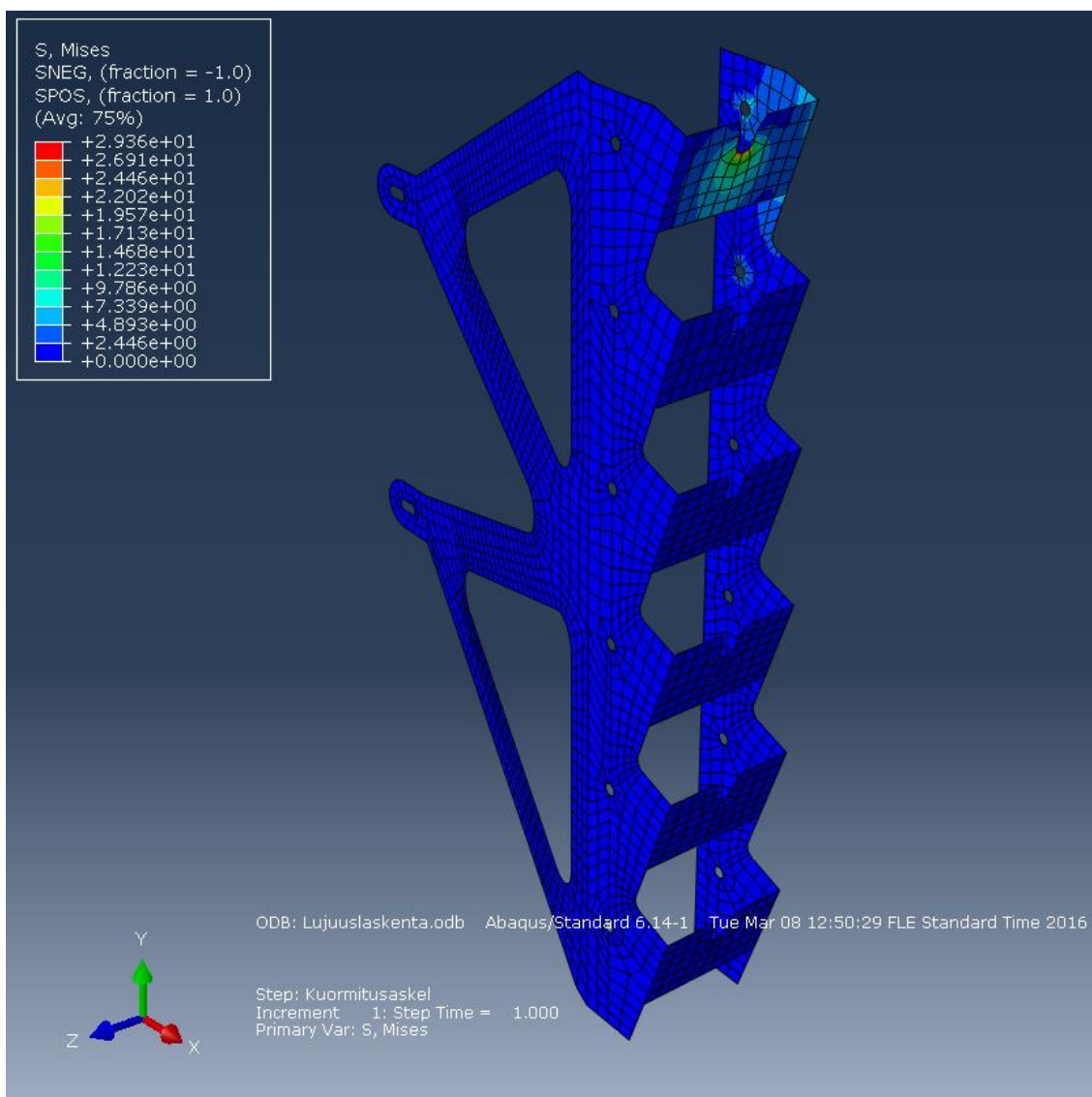
missä n on varmuusluku, σ_{kr} on kriittinen jännitys eli tässä tapauksessa myötöraja ja σ_{sall} sallittu jännitys. Koska tulppatelineen materiaalille ei ole määritelty myötörajaa, käytetään sen sijaan alinta $R_{p0.2}$ -rajaa. Sallittu jännitys on

$$\sigma_{sall} \leq \frac{R_{p0.2}}{n} = \frac{115 \text{ MPa}}{3} \approx 38,3 \text{ MPa} \quad (26)$$



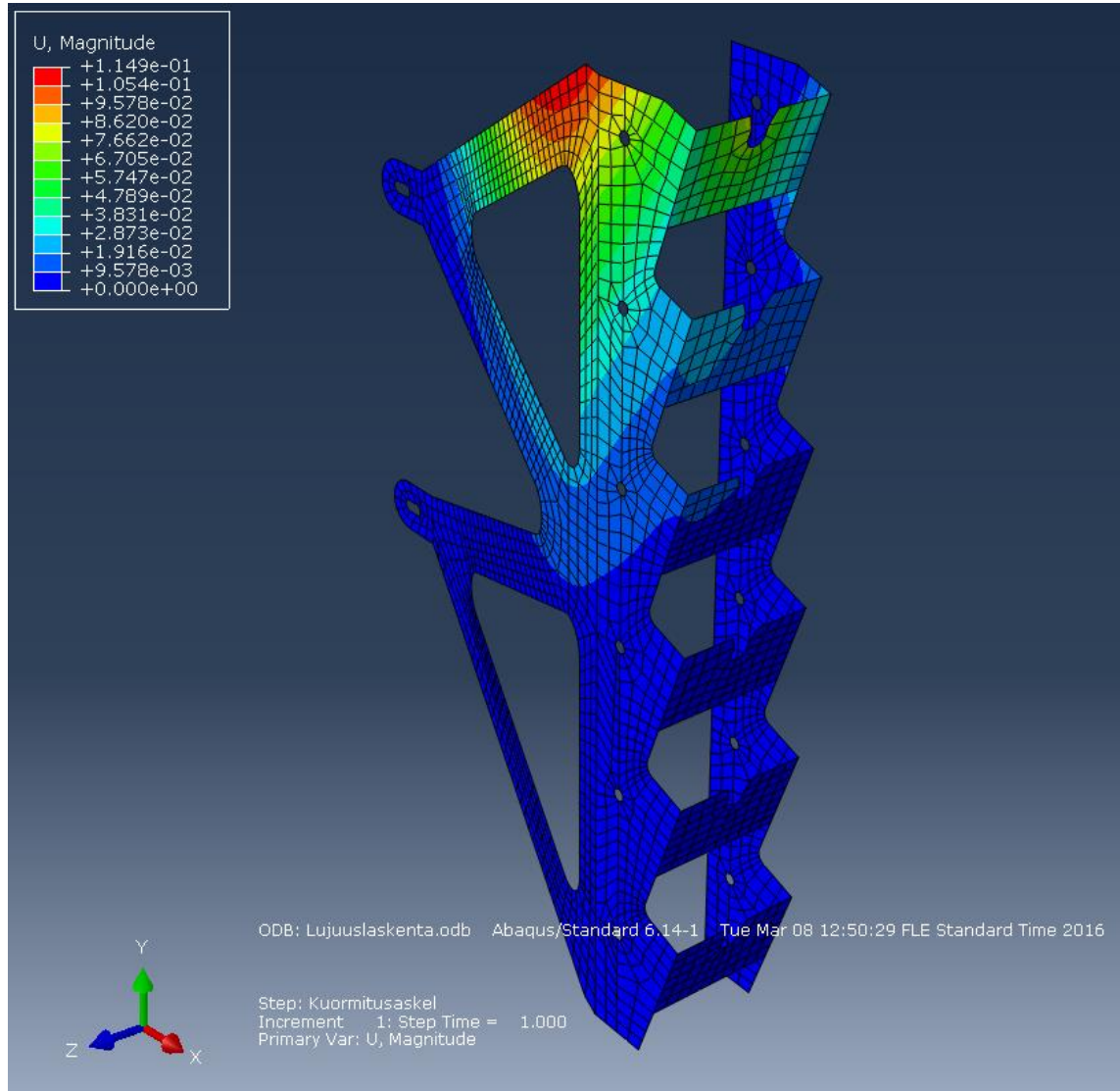
Kuva 35. Reunaehdot. Rakenne on kiinnitetty jäykästi ruuvien reikien reunosta ja kuormituksena on 120 N:n viivakuorma ylimmässä pidikelevyssä.

Tutkitaan laskennan tuloksia. Piirretään von Misesin vertailujännitykset tasa-arvokäyrästölle (kuva 36). Havaitaan että vertailujännitykset ovat sallitun suuruisia ja yleisesti ottaen hyvin pieniä rakenteen koko alueella. Suurimmat jännitykset ovat kuormitusten ja tukireaktioiden kohdalla. Saint Venantin periaatteen mukaisesti tulokset tukireaktioiden ja kuormitusten välittömässä läheisyydessä eivät kuitenkaan vastaa todellisuutta niiden ideaalisesta luonteesta johtuen. Kiinnitysruuvien aiheuttamat jännitykset ovat todellisuudessa pienemmät, koska ruuvien kanssa käytetään aluslevyjä, jotka jakavat jännityksen suurelle alueelle. Pidikelevyissä tapahtuvia jännityksiä tutkitaan myöhemmin hieman tarkemmin.



Kuva 36. Kuvaan on piirretty von Misesin vertailujännitykset tasa-arvokäyrästölle. Yksiköt ovat megapascalina.

Tutkitaan myös kuormituksen aiheuttamia siirtymiä tulppatelineessä (kuva 37). Suurimmat siirtymät ovat suuruudeltaan noin 0,15 mm, mikä täyttää vaatimuslistassa määritetyt vaatimukset. Pidikelevy taipuu oletetusti kuormituksen suuntaan. Suurin siirtymä tapahtuu tukivarressa, joka taipuu sisäänpäin eli Z-akselin miinussuuntaan.

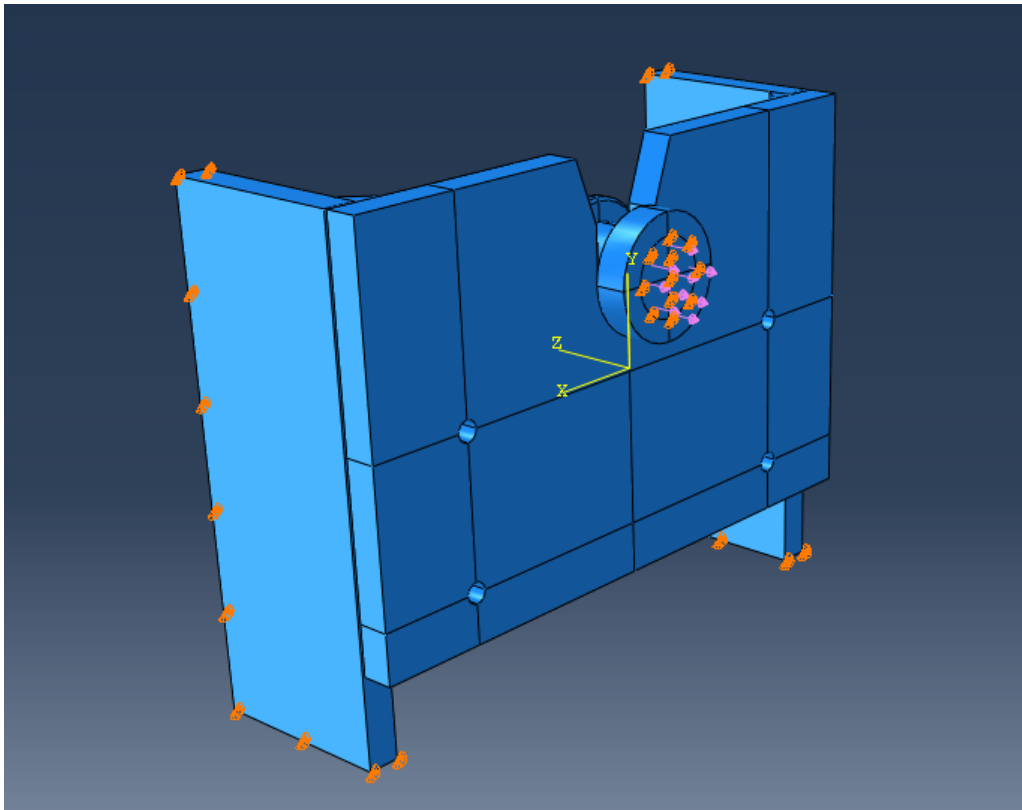


Kuva 37. Kuvaan on piirretty siirtymien suuruudet millimetreinä tasa-arvokäyrästäolle. Kuvassa ei oteta kantaa siirtymän suuntaan.

5.4.2 Kosketuspaine ja hitsisauman lujuus

Tutkitaan lukitustapin ja pidikelevyn välistä kosketuspainetta ja hitsisauman jännityksiä. Luodaan laskentaa varten kiinteä 3D-malli, jossa pidikelevy, reisipalojen osat ja hitsisauma on mallinnettuna yhdeksi, kiinteäksi kappaleeksi. Hitsisauman teoreettinen a-mitta on 3 mm. Oletetaan hitsisauman tunkeumaksi 0 mm. Jätetään pidikelevyn ja reisipalojen väliin 0,5 mm rako niin, että pelkkä hitsisauma kannattelee pidikelevyä.

Tehdään laskentaa varten luodusta kappaleesta ja lukitustapista kokoonpano (kuva 38). Luodaan kitkattomat kosketusparit pidikelevyn takapinnan ja lukitustapin kavennuksen otsapinnan sekä pidikelevyn loven pohjan ja lukitustapin kavennuksen pohjan välille. Kiinnitetään reisipalat jäykästi leikkauspinoista. Kuormituksena vedetään lukitustappia 120 N:n voimalla pois päin pidikelevystä.



Kuva 38. Kosketuspaineen tutkimiseksi lukitustapista ja pidikelevystä täytyy tehdä kokoonpano. Kuormitus on annettu tasaisena paineena ruuvien poikkileikkauksen kohdalta. Paineen vaikutusalan pintaan aiheuttaman voiman summa on 120 N.

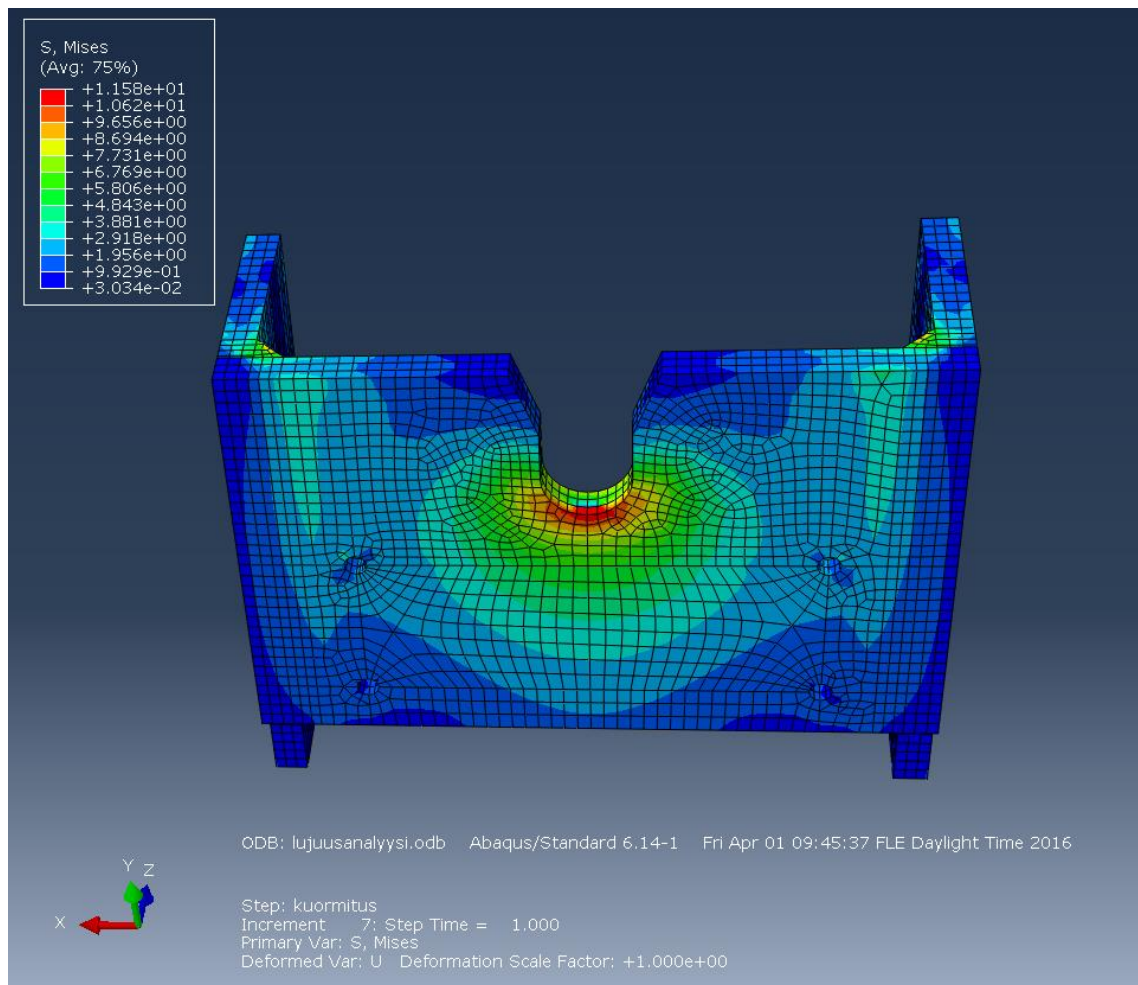
Lukitustappi on EN-10088-3 1.4305 ruostumatonta terästä ja sen kimmokerroin on 193 GPa, myötöraja on alimmillaan 190 MPa ja suppeumakerroin 0,3 (Aalco Metals Ltd 2016). Pidikelevylle käytetään samoja arvoja kuin koko rungon lujuutta laskettaessa. . Lasketaan lukitustapin sallittu jännitys

$$\sigma_{sall} \leq \frac{R_e}{n} = \frac{190 \text{ MPa}}{3} \approx 63,3 \text{ MPa} \quad (27)$$

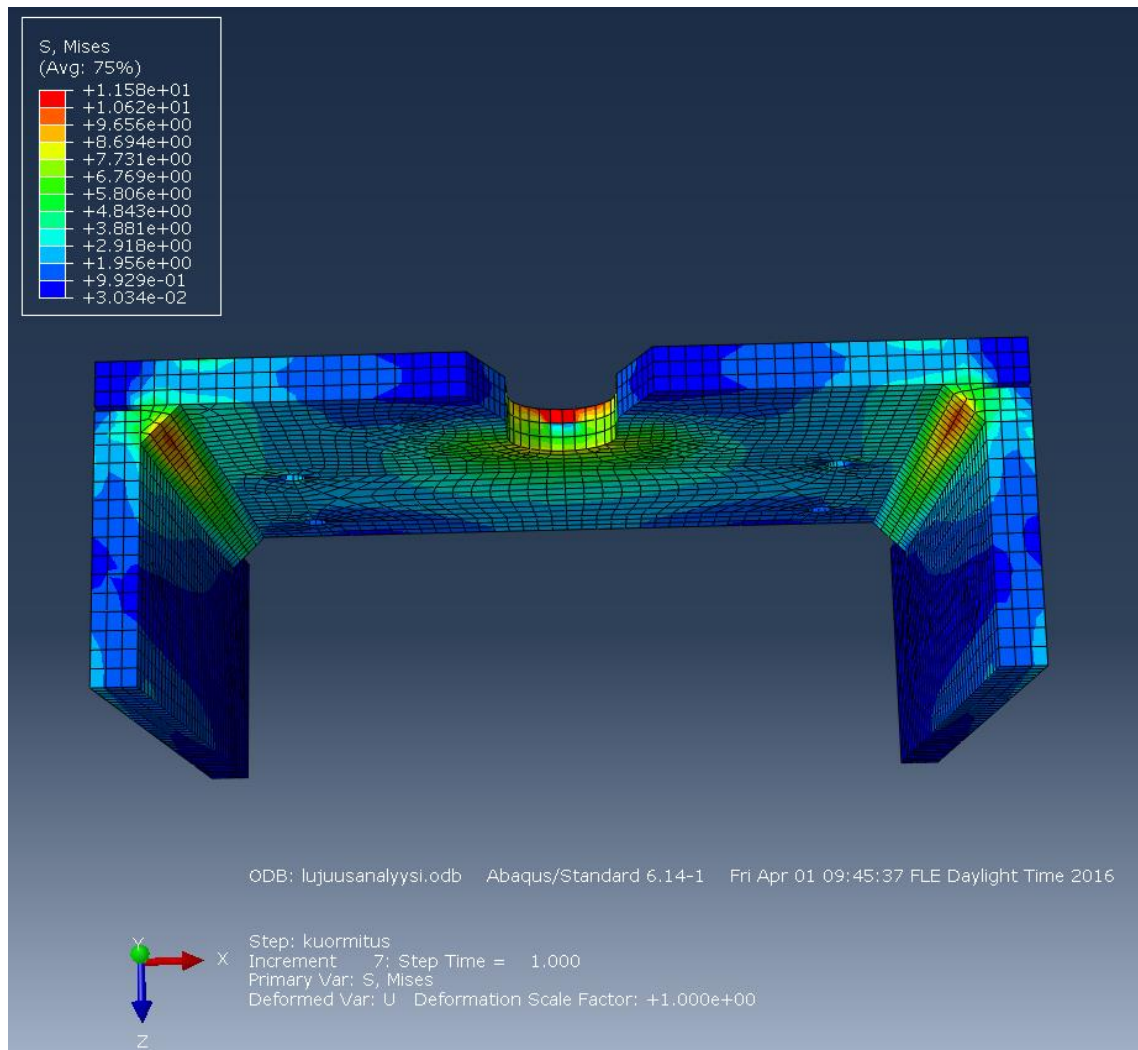
missä R_e on myötöraja.

Käytetään pidikelevyosassa 8-solmuisia 3D-elementtejä redusoidulla integroinnilla. Elementin tyyppi on C3D8R. Lukitustapissa käytetään modifioituja, 10-solmuisia, neliöisiä tetraedrielementtejä, joiden tyyppi on C3D10M.

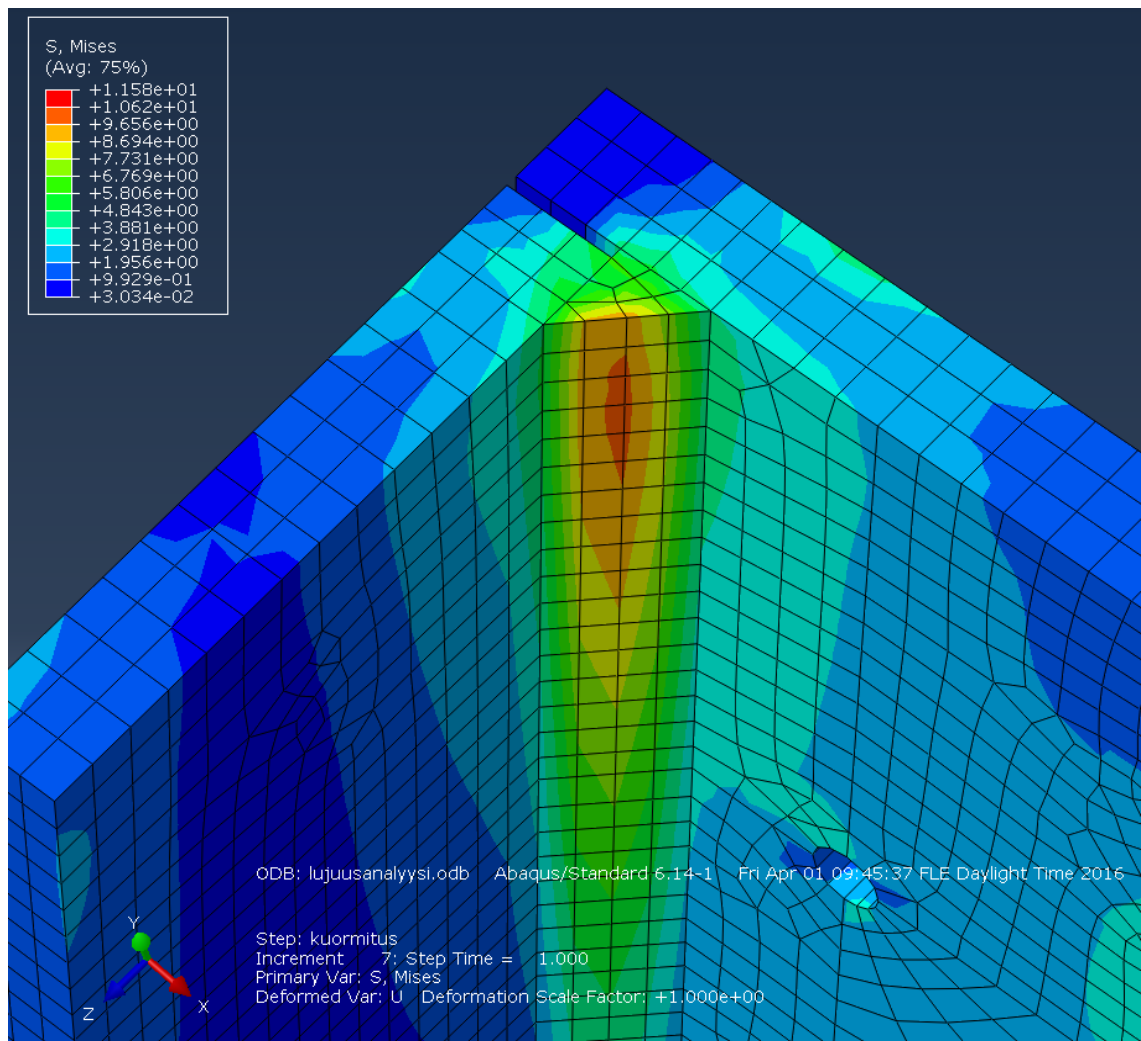
Tutkitaan ensin lukitustapin vedosta pidikelevylle aiheutuvia jännityksiä. Piirretään von Misesin jännitykset tasa-arvokäyrästölle (kuvat 39–41). Kaikki jännitykset koko kappaleen alueella ovat sallitun suuruisia. Suurimmat jännitykset ovat suuruudeltaan noin 11,6 MPa, ja ne esiintyvät hitsisaumassa ja pidikelevyn etupuolella, loven juuressa. Hitsisauman suurin jännitys on yläpäässä. Pidikelevyssä ja reisipaloissa jännitykset ovat kohonneet hitsisauman kiinnityspinnan läheisyydessä hitsisauman välittämän vedon ja momentin takia.



Kuva 39. Pidikelevyyn muodostuvat von Misesin jännitykset. Yksiköt ovat megapascalita.

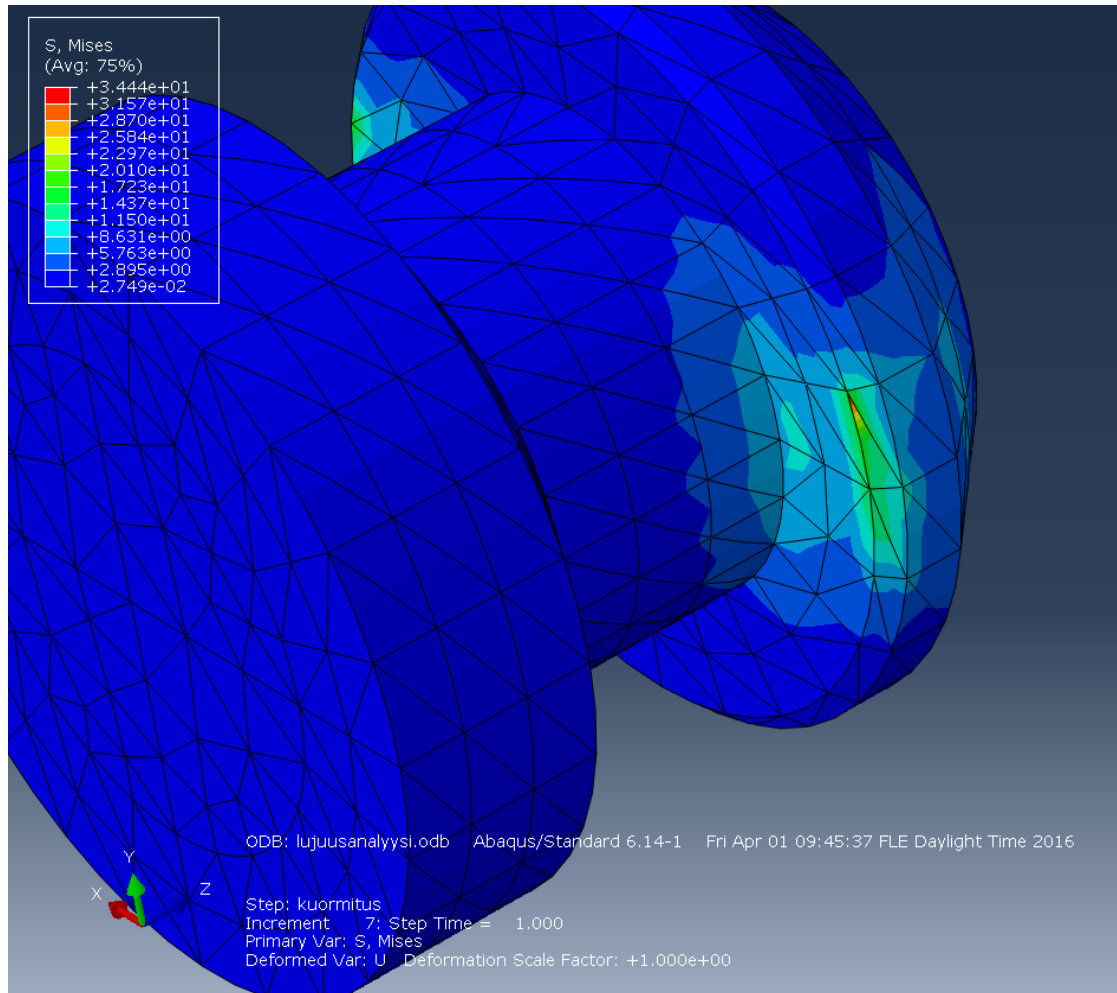


Kuva 40. Pidikelevyyn ja reisipaloihin muodostuvat jännitykset.



Kuva 41. Hitsisauman von Misesin jännitykset.

Tarkastellaan myös lukitustapin jännityksiä (kuva 42). Suurimmat jännitykset ovat suuruudeltaan noin 34,5 MPa ja ne esiintyvät kantavan pinnan ulkoreunoilla, vaakasuunnassa vastakkaisilla puolilla. Tästä voidaan päätellä, että pidikelevyn loven reuna myötäää kuormituksen seurauksena, jolloin kosketus pidikelevyssä siirtyy kauemmas reunasta. Lukitustapissa esiintyvät jännitykset ovat sallitun suuruisia.



Kuva 42. Lukitustapin kosketuksesta aiheutuvat von Misesin jännitykset.

5.4.3 Päätelmät

Tulppateline täyttää hyvin sille asetetut lujuusvaatimukset niin jännitysten kuin siirtymienkin osalta. Tulppatelineen jännitykset ovat todellisuudessa todennäköisesti lasketua suuremmat, koska hitsisaumoja ei lämpökäsitellä. Rakenteeseen jää hitsaustapah-tuman lämpölaajenemisesta aiheutuvia jännityksiä, jotka korostavat etenkin hitsisaumojen vetojännitystä. Varmuusluku on kuitenkin niin suuri ja lasketut jännitykset niin pieniä, että tästä tuskin on haittaa. Tulppatelineen olisi voinut valmistaa ohuem-mastakin levystä, mutta 5 mm:n alumiinilevy valittiin lopulta muiden ominaisuuksien sanelemana.

Lasketut tulokset perustuvat staattiseen voimaan. Robotin liikenopeus on ohjelmoitava riittävän pieneksi tulppatelinettä lähestyessä, ettei rakenteeseen synny merkittävän suuruista dynaamista kuormitusta. Rakenne kykenee ottamaan vastaan pieniä törmä-yksiä.

Muita tulppatelineen versioita ei ole tarpeen tutkia, koska versiot ovat tuentapisteitä lukuun ottamatta samanlaisia keskenään. Tutkitun tulppatelineversion (malli A) tuenta on huonompi kuin muissa versioissa, koska tukipisteet sijaitsevat kauimpana kuormi-tuksen suuntaisesta suorasta.

6 Lopputulokset ja käyttöönotto

6.1 Työn tulokset

Työn lopputuloksena saatiin suunniteltua neljä säteilyuojatulppaa sekä tulppatelineet. Tulppatelineistä on kolme eri variaatiota johtuen eri kiinnityspaikoista. Tulppien ja telineiden suunnitelmat verifioitiin testaamalla niiden mukaan valmistettuja prototyyppejä. Kaikkien tulppien säteilynestokyky todettiin riittäväksi vuotosäteilytestikaapeissa. Tulppia testattiin myös robotin testiajoissa ja tulpat kiinnittyivät säteilylähteisiin ja palautuivat telineeseen ilman ongelmia. Säteilyuojatulppien viimeisimmät prototyypit ovat nähtävissä kuvassa 43.



Kuva 43. Viimeisimmät säteilyuojatulppien prototyypit vasemmalta lukien: ProMax, ProOne, ProX ja ProMax 120 kV.

Säteilyuojatulpista ja tulppatelineistä laadittiin kokoonpanopiirustukset sekä tarvittavista osista valmistuspiirustukset. Kappaleista, jotka on tarkoitettu valmistettavaksi vesileikkaamalla, laadittiin myös 1:1 vesileikkausprofiilikuvat. Osat tilattiin alihankkijalta. Kun osat ovat valmiita, ne kootaan ja asennetaan testialueelle.

6.2 Asennusohjeita

Tulppia kootessa kaikissa kierteissä tulee käyttää kierrelukitetta. ProMax-tulpassa vastakkaisten kuulapääjousipainimien laskennallinen asennusetäisyys kuulien kärjestä kärkeen kuormittamattomana on 51,1 mm. ProOne-tulpan jousimekanismi kannattaa koota siten, että karaan laitetaan jouset, holkki ja magneetti kiinni ennen kuin karapaketti kierretään paikalleen. Etummainen holkki tulee etupinnan tasoon ja taaempi asetetaan siten, että karalla on muutama millimetri liikkumavaraa molempiin suuntiin. Tulpan kuuluu olla aina vetojännityksen alaisena kiinni olleessaan.

Tulppatelineet asennetaan testikaappien kylkiin ruuveilla. Yhden tulppatelineen asennukseen tarvitaan seuraavat tarvikkeet:

- 6 kpl DIN 912 M8x25 Zn -kuusiokoloruuveja
- 6 kpl M8- alumiiniprofiilin kiskomuttereita
- 2 kpl DIN 912 M8x70 Zn -kuusiokoloruuveja (3 kpl malli B)
- 2 kpl DIN 934-8 M8 Zn -kuusiomuttereita (3 kpl malli B)
- 10 kpl DIN 9021 M8 Zn -korialuslaattoja (12 kpl malli B)

Tulppatelineen asennus aloitetaan reikien paikkojen merkitsemisellä. Tulppatelineen oikea korkeus määräytyy vaakasuuntaisten profiilien mukaan siten, että takakiinnitysreiät tulevat vaakaprofiilien urien kanssa kohdakkain. Jos tämä ei onnistu, tulppatelineen malli on todennäköisesti kyseiselle testikaapille väärä. Etumaiset kiinnitysreiät tulevat pystysuuntaisen alumiiniprofiilin uran kanssa samaan linjaan. Telineiden oikeat paikat ovat nähtävissä kuvassa 31 sivulla 46. Porataan merkatut reiät 8,5...9,0 mm:n poranterällä. Ahtauden vuoksi takakiinnitysreiät saattaa joutua poraamaan kaapin sisäpuolelta. Tällöin kannattaa porata takaoven kautta. Etumaiset reiät porataan vain alumiini- ja lyijylevyistä läpi, kun taas taaemmat reiät porataan myös alumiiniprofiilin läpi.

Testikaapin alumiini- ja lyijylevyt ruuvataan irti etureunasta ja taivutetaan hieman. M8 kiskomutterit pujotetaan alumiiniprofiilin kiskoon reikien kohdille. Ruuvataan tulppateline etukiinnitysrei'istä alumiiniprofiiliin kiinni M8x25-kuusiokoloruuveilla käyttäen aluslevyjä ruuvien kannan alla. Takakiinnitysreiät ruuvataan M8x70-kuusiokoloruuveilla vaakaluumiiniprofiilien läpi. Sisäpuolelle laitetaan kuusiomutterit. Molemmilla puolilla käytetään aluslevyjä. Kun kaikki ruuvit ovat paikoillaan, kiristetään kaikki kunnolla. Kuvassa 44 näkyy testikaapin kylkeen asennettu tulppatelineen prototyyppi.



Kuva 44. Tulppatelineen prototyyppi asennettuna testikaapin kylkeen. Vasemmalla on kuva testikaapin ulkopuolelta ja oikealla sisäpuolelta.

6.3 Kunnossapito

Säteilysojatulppien ja tulppatelineiden kuntoa on tarkkailtava robottisolun käyttöönoton aikana usein. Jos suurempia ongelmia ei ilmene, kunnossapitotoimien taajuus harvenee käyttöönoton jälkeen merkittävästi. Oikea taajuus määräytyy kokemuksen perusteella.

Säteilysojatulppien ja tulppatelineiden kaikkien ruuviosien kireys on tarkistettava määräjain. Tulppien magneetit on puhdistettava mahdollisesta magneettisesta roskasta. Magneettien vetovoiman mahdollista heikkenemistä pitkällä aikavälillä on myös seurattava, koska säteilyllä on demagnetoiva vaikutus (Goodier 2014). Ilmiön syitä ei täysin tunneta. Testien aikana magneettisuuden vähenemistä ei havaittu.

Tulppien ulosvetovoiman mahdollista heikkenemistä ajan myötä voidaan mitata esimerkiksi jousivaa'an avulla.

7 Yhteenveto

Insinööriyön aikana suunniteltu testilaitteisto mahdollistaa neljän eri säteilylähdeyyppin vuotosäteilymittaukset testausrobotisolussa. Kun tulppatelineet ja säteilysuojatulpat on asennettu paikoilleen, säteilylähteitä voidaan testata kaikissa vuotosäteilytestikaapeissa.

Vaativasta toimintaympäristöstä huolimatta säteilysuojatulpat ja tulppatelineet kyettiin toteuttamaan suhteellisen yksinkertaisin ratkaisuin. Kaikki tarvittavat osat voidaan valmistaa melkein missä tahansa nykyaikaisessa konepajassa. Prototyypeillä suoritettut testiajot osoittivat, että tulppien ja tulppatelineiden toiminta on riittävän luotettavaa ja toisiinsa liittyvien pintojen muotoilu kykenee korjaamaan pieniä virheasentoja. Myös automaatio ja testikaappien muut varusteet otettiin suunnitelmissa hyvin huomioon. Vaikka yksi säteilysuojatulppa jäi ajan puutteesta johtuen suunnittelematta, saatiin insinööriyössä kuitenkin alkuperäistä tavoitetta enemmän testilaitteistoa suunniteltua.

Kun tulppatelineet ja säteilysuojatulpat ovat asennettu paikoilleen, robotisololu on mekaanisten osien puolesta valmis toimimaan. Automaatiojärjestelmän valmistuttua robotisololu voi aloittaa toimintansa, jolloin käy ilmi säteilysuojatulppien toimivuus pitkällä aikavälillä.

Lähteet

Aalco Metals Ltd. 2016. Stainless Steel 1.4305 Bar. [Tuotespesifikaatio]. Viitattu 6.4.2016. Saatavissa: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-14305-Bar_107.ashx

Bauer & Böcker. 2016. Flachgreifer Neodym 13 mm mit Außengewinde M5x8. [Tuotespesifikaatio]. Viitattu 9.4.2016. Saatavissa: <http://www.bauer-boecker.de/shop/artikel,bub,de/1,1-2,1-2-3,1-2-3-3,a58637e5a912de2cbbe2a1d4562a2764,Flachgreifer-Neodym-13-mm?pVariante=a58637e5a912de2cbbe2a1d4562a2764>

Carpenter Technology Corporation. 2006. Magnetic Properties of Stainless Steels. [Verkkodokumentti]. Viitattu 4.4.2016. Saatavissa: <https://www.cartech.com/techarticles.aspx?id=1476>

Elesa+Ganter. 2016. GN 615 Threaded ball spring plungers. [Tuotespesifikaatio]. Viitattu 7.4.2016. Saatavissa: <http://www.elesa-ganter.com/en/2/sp/7319/4/85/threaded-ball-spring-plungers/gn-615/eg/>

Gleich Aluminiumwerk GmbH & CO. 2015. EN AW 5083 Technical Data Sheet. [tuotespesifikaatio]. Viitattu 5.4.2016. Saatavissa: <http://gleich.de/en/products/aluminium-rolled-plates/al-rolled-plates-en-aw/en-aw-5083?pdf>

Goodier, E. 2014. Your Questions About Magnetics Answered Here By The Experts At Eclipse. [Verkkosivu]. Eclipse Magnetics. Viitattu 14.4.2016. Saatavissa: <http://www.eclipsemagnetics.com/row/useful-information-ask-the-expert/>

Hasari, H.; Salonen, P. 2011. Teknillinen piirtäminen. 1.–3. painos. Otavan kirjapaino Oy. Keuruu.

Hatakka, J., Saari, H., Sirviö, J., Viiri, J. & Yrjänäinen, S. 2007. Physica 8, Aine ja säteily. 1. painos. WSOY Oppimateriaalit Oy. Helsinki.

IEC 60601-1-3. 2008. Medical electric equipment – Part 1-3: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral Standard: Radiation protection in diagnostic X-ray equipment. [Standardi]. Geneve, Switzerland.

ISO 2768-1. 1989. General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications. [Standardi]. Geneve, Switzerland.

Jokiaho, J. 2014. Hammaslääketieteellisten röntgenkuvantamislaitteiden säteilylähteiden automatisoitu laadunvarmistus. Diplomityö. Oulun yliopisto, Konetekniikka.

Jokiaho, J. 2016. Menetelmäsuunnittelija. Planmeca Oy. Helsinki. Keskustelut 1.1.–31.3.2016.

Kotamies, J. 2013. Materiaalitekniikka 2: Tekniset muovit. Luentokalvot. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Konetekniikka.

Planmeca Group. 2015. Tervetuloa taloon. Esite. Viitattu 13.2.2016.

Planmeca Intranet. 2016. Kuvapankki. [Promokuva-arkisto]. Viitattu: 24.3.2016. Saatavissa: http://materialbank.planmeca.com/#1458802552877_2

Planmeca Oy. 2016. Yrityksen kotisivut. [Verkkosivu]. Viitattu 13.2.2016. Saatavissa: <http://www.planmeca.com/fi/>

Pukkila, O. 2004. Säteilyn käyttö, säteily- ja ydinturvallisuus 3. Säteilyturvakeskus. Karisto Oy:n kirjapaino, Hämeenlinna.

Romppanen, T. 2012. Hammaslääketieteellisten röntgenkuvantamislaitteiden säteilylähteiden säteilyntuotto- ja hajasäteilymittausten automatisointi. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikka.

STUK. 2015. Säteilyn terveysvaikutukset. [Verkkodokumentti]. Viitattu 24.3.2016. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on/sateilyn-terveysvaikutukset>

Suvanto, K & Laajalehto, K. 2011. Tekniikan fysiikka 2. 1.-4. painos. Edita Primera Oy. Helsinki.

Tuulos, E. 2001. Panoraamaröntgenlaitteen säteilyominaisuuksien automaattinen mittausmenetelmä. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. Espoo.

Vartiainen, S. 2014. Planmeca Design Handbook PDH025: Alumiiniosuhteet. [Suunnittelukäsikirja]. Planmeca Oy. Pro/E, suunnittelukäsikirjasto. Viitattu 23.2.2016.

Yaskawa America Inc. 2015. MH50 II, MH50 II-35. [Tuotespesifikaatio]. Viitattu 20.3.2016. Saatavissa: http://www.motoman.com/datasheets/MH50II_MH50II-35.pdf