



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Ville-Petteri Koskinen

Hammasröntgenlaitteen pilarin testilaitteen suunnittelu ja valmistaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriytyö

10.02.2020

Tekijä Otsikko	Ville-Petteri Koskinen Hammasröntgenlaitteen pilarin testilaitteen suunnittelu ja valmistaminen
Sivumäärä Aika	39 sivua 10.02.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Yliopettaja Jyrki Kullaa Vanhempi mekaniikkasuunnittelija Antti Karhunen
<p>Tämän insinööryön tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa hammasröntgenlaitteen osan testilaitte KaVo Kerr Group Finlandin tuotantoon. Testilaitteella varmistetaan röntgenlaitteen korkeussäädön toteuttavan osan, pilarin toiminta. Testauksella todetaan, että pilari on kokoonpantu oikein ja että sen osat eivät sisällä valmistusvirheitä. Röntgenlaitteen tuotantokonsepti on suunniteltu siten, että pilari ja röntgenlaitte kokoonpannaan erillään toisistaan, joten pilarin toimivuutta ei testata röntgenlaitteeseen kiinnitettynä. Laatuvaatimuksista johtuen 100 % pilareista pitää testata ennen toimitusta. Näistä syistä johtuen pilarille tarvitaan testauslaitte, jolla saadaan luotettavia ja toistettavia tuloksia pilarin toiminnasta ja jonka toimintavarmuus on korkea. Testauslaitteen vikaantuessa pilarin tuotantolinja pysähtyy.</p> <p>Insinööryö rajattiin testilaitteen mekaniikan suunnitteluun ja toimivan testilaitteen valmistamiseen. Pilarin testausprosessi haluttiin automatisoida mahdollisimman pitkälle, joten mekaniikan lisäksi tarvittiin ammattitaitoa esimerkiksi elektroniikan, ohjelmoinnin ja laadunvarmistuksen osalta. Työ aloitettiin tutustumalla pilarin rakenteeseen, määrittämällä alustavat vaatimukset testilaitteelle ja suunnittelemalla testilaitteen perusrakenne pienryhmissä ideointimenetelmiä käyttäen.</p> <p>Testilaitteessa käytettiin jousia, laakereita, vaihteistoa ja moottoria, joten suunnittelu aloitettiin laskemalla laakeri- ja jousivoimia, laakereiden kitkamomenteja sekä vaihteiston välityssuhdetta valitulle moottorille. Testilaitte suunniteltiin käyttämällä 3D-mallinnusohjelmaa ja sen osat valmistettiin laadittujen piirustusten pohjalta KaVo Kerrin koneistamossa. Kokoonpanon jälkeen laitteen toimivuus testattiin ja vaadittavat parannukset tehtiin, jotta pilarien testaus olisi mahdollisimman luotettavaa ja laitteen käytettävyys optimaalinen.</p> <p>Lopputuloksena saatiin toimiva testilaitte, johon tarvittavat elektroniikkakomponentit ovat helposti lisättävissä. Ohjelmoinnin sekä verifiointin ja validoinnin jälkeen testilaitte siirretään yrityksen tuotantolinjalle, jossa se korvaa vanhan testilaitteen. Vanha testilaitte ei enää vastaa pilarin testausvaatimuksia siihen asennettavan röntgenlaitteen uudesta tuoteversiosta johtuen.</p>	
Avainsanat	Röntgenlaitte, pilari, testilaitte

Author Title	Ville-Petteri Koskinen Test Device for a Column of a Dental X-ray Machine
Number of Pages Date	39 pages 10 February 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer Antti Karhunen, Senior Mechanical Engineer
<p>This thesis was commissioned by KaVo Kerr Finland Group, and the objective was to design and manufacture a test device for the company's production. The test device is used to ensure the quality of a dental X-ray machine's column and its reliable operation. The column's main purpose is to adjust the height of the X-ray unit according to the patient's height, and therefore its correct assembly and performance are important for the effective use of the X-ray machine. The objective was to design a test device that accurately simulates the load exerted on the column by the X-ray unit.</p> <p>The product concept of the X-ray machine is designed so that the column is not attached to the X-ray unit in the production phase. Quality regulations dictate that a hundred percent of the columns must be tested before they can be sent to customers. For these reasons, the need for a test device that performs consistent and accurate tests is great.</p> <p>The thesis was limited to the mechanics of the test device. Most of the test device's functions were to be automated, requiring expertise from electronics and programming. Firstly, the structure of the column was examined, then the preliminary requirements were drafted, and the basic structure of the test device was decided as well.</p> <p>The test device included bearings, springs, transmission and a motor. Therefore, the design work was started with the calculation of bearing and spring forces, bearing friction moments and the required gear ratio for selected motor. The device was designed using 3D modelling software, and also a FEM analysis was performed for the critical components and assemblies. Parts for the test device were made mainly in KaVo Kerr's machine shop, and finally, the device was assembled. The functionality was tested with columns, and in addition, improvements were made to ensure reliable results and optimal usage.</p> <p>As a result, a functioning test device was built. After the installation of electronics, programming, verification and validation, the device will be added to the company's production line and it will replace the older test device.</p>	
Keywords	X-ray machine, column, test device

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta ja tavoitteet	1
1.2	Hampaiden röntgenkuvaus	2
1.3	KaVo Kerr	3
2	Hammasröntgenlaite ja pilarin testaus	4
2.1	Hammasröntgenlaitteen toiminta ja uusi tuoteversio	4
2.2	Pilari	5
2.3	Pilarin testauksen yleiskuvaus ja vanha testilaite	6
2.4	Vaatimukset	8
3	Suunnittelu	11
3.1	Alustava suunnittelu	11
3.1.1	Ideointimenetelmät	12
3.1.2	Tulokset ja valintakriteerit	12
3.2	Mekaniikka	16
3.2.1	Pilarin alalaipan kiinnitys	16
3.2.2	Pilarin ylälaipan ja kuorman kiinnitys	22
3.2.3	Testilaitteen runko	23
3.2.4	Moottori ja vaihteisto	25
3.3	Elektroniikka	30
4	Kokoonpano, testin kulku ja käyttöönotto	31
4.1	Kokoonpano ja testilaitteen toiminnan varmistaminen	31
4.2	Pilarin testauksen kulku	33
4.3	Käyttöönotto	36
5	Yhteenveto	37
	Lähteet	39

1 Johdanto

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Tämän insinööriyön toimeksiantaja on KaVo Kerr Group Finland, ja työn tarkoituksena on suunnitella ja valmistaa testilaitte yhtiön tuotantoon. Laitteella testataan OP 3D -nimisen hammasröntgenlaitteen pilarin toimivuutta. Pilarin päätehtävä on röntgenlaitteen korkeuden säätäminen potilaan pituuden mukaan, ja sen testauksella todennetaan, että pilari on kokoonpanttu oikein ja että osat eivät sisällä rakennetta heikentäviä valmistusvirheitä. Kuvassa 1 on esitetty OP 3D -röntgenlaite sekä testattava pilari.



Kuva 1. OP 3D -röntgenlaite, pilari ympyröity kuvassa [1].

Pilarin toimivuuden testaus on ainoa vaihe kokoonpanon sekä pakkaamisen ja asiakkaalle toimituksen välissä, joten luotettavalla ja tarkalla testauksella on suuri merkitys. Testauksella simuloidaan pilarin todellista käyttöä röntgenlaitteeseen kiinnitettynä. Testauksen aikana teleskooppirakenteista pilaria ajetaan sen ääriasentojen välillä röntgenlaitetta vastaavalla kuormalla. Samalla mitataan esimerkiksi pilarin moottorin ottaman virran suuruutta, kallistuskulmia ja ajonopeuksia pilarin sähköisen ja mekaanisen toimivuuden varmistamiseksi.

Insinööriä rajataan testilaitteen mekaniikan suunnitteluun ja toimivan prototyypin valmistamiseen. Testilaitteesta ja testausprosessista tehdään mahdollisimman automaattinen, joten mekaniikan lisäksi tarvitaan erilaisia elektroniikkakomponentteja, tietokoneita ja laiteohjelmistoa. Testilaitteelle pitää myös luoda testiohjelma, joka ohjaa testin kulkua, tallentaa tulokset tuotannon tietokantaan ja ohjeistaa operaattoria käyttöliittymän välityksellä.

Testilaitteella on tarkoitus korvata vanhempi, vuonna 2017 suunniteltu ja käyttöön otettu laite. Korvaustarve johtuu pilariin asennettavan röntgenlaitteen uudesta tuoteversiosta, jonka takia myös pilarin testausvaatimukset täytyy päivittää. Röntgenlaitteen muutos ei kuitenkaan aiheuta muutoksia pilarin toimintaan tai rakenteeseen, joten uudelle ja vanhalle testilaitteelle asetetut vaatimukset ovat pitkälti samoja ja niissä voidaan käyttää useita samoja elektroniikkakomponentteja sekä ohjelmakoodia. Tästä johtuen työ on luonteeltaan testilaitteen mekaniikan muutosprojekti. Projektissa on myös tarkoitus kokeilla suunnittelun aikana erilaisia ideointimenetelmiä, joiden avulla saataisiin monipuolinen määrä toteutuskelpoisia ratkaisuja testilaitteen rakenteesta. Samalla myös arvioidaan menetelmien toimivuutta verrattuna yrityksessä käytössä oleviin ideointimenetelmiin.

1.2 Hampaiden röntgenkuvaus

Hammasröntgen on tutkimusmenetelmä, jossa tarkasteltavaa kohdetta säteilytetään röntgensäteilylähteellä. Potilaan hampaisiin kohdennetaan pieni määrä läpitukevaa röntgensäteilyä ja kuva tallennetaan hampaiden vastakkaisella puolella olevalle kuvailmaisimelle. Menetelmä perustuu säteilyn läpäisevyyden muutoksiin ihmisen eri kudoksissa. Kovakudos, kuten hammas- ja leukaluu, absorboivat enemmän säteilyä kuin

pehmytkudos, mikä kuvailmaisimelle tallentuvassa kuvassa ilmenee alueiden tummuuden vaihteluina. [2.]

Yleisin hampaiden röntgentutkimus on periapikaalikuvauks, jota käytetään yksittäisten hampaiden kuvantamiseen. Siinä kuvailmaisim tai röntgenfilmi asetellaan potilaan suuhun kuvattavan alueen kohdalle ja säteilylähde eli röntgenputki tuodaan potilaan posken viereen.

Koko hampaiston ja leuan kuvantamiseen käytetään panoraamatomografia- sekä kartiokeilatietokonetomografialaitteita (KKTT). Panoraamalaitteella otetaan kaksiulotteisia ja KKTT-laitteilla kolmiulotteisia kuvia. Molemmissa laitteissa potilaan pään ympärillä kiertää vastakkaisilla puolilla vaakatasossa säteilylähde ja kuvailmaisim ympyrän muotoista rataa. Panoraama (PAN)- ja KKTT-kuvantamistoiminnot on usein yhdistetty samaan laitteeseen. Panoraamakuvauksessa säteily on rajattu kapeaksi pystysuuntaiseksi keilaksi ja KKTT-kuvauksessa keila on nimensä mukaisesti kartion muotoinen. KKTT-kuvauksessa otetuista 2D-projektioista voidaan rekonstruoida tarkkoja kolmiulotteisia kuvia. [3.]

Panoraama- ja 3D-kuvantamislaitteen yhteyteen voidaan lisätä kefalostaatti, joka on kallon lateraalikuvantamiseen käytettävä lisälaitte. Sitä voidaan käyttää apuna esimerkiksi hampaiden oikomishoidossa sekä uniapnean tutkimuksissa.

1.3 KaVo Kerr

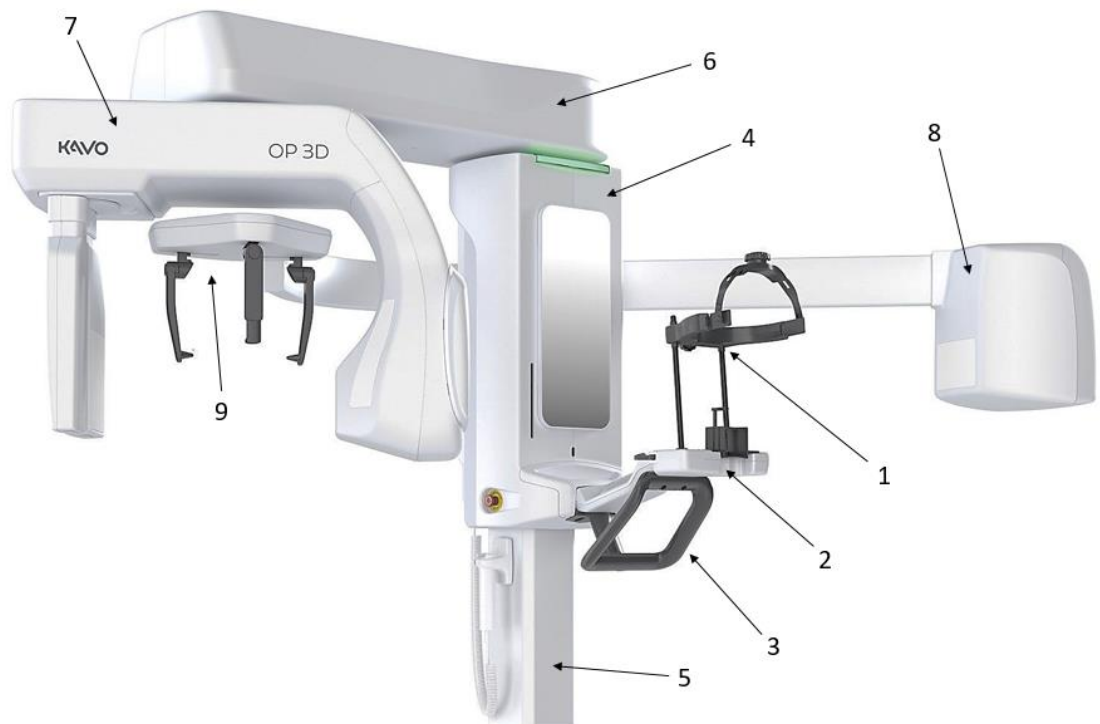
Työn toimeksiantaja KaVo Kerr on erikoistunut hammaslääketieteelliseen kuvantamiseen ja se on yksi Suomen suurimmista terveysteknologian vientiyrityksistä. KaVo Kerrin Tuusulan tehtaassa työskentelee noin 450 henkilöä muun muassa tuotekehityksen ja kokoonpanon tehtävissä. KaVo Kerr kuuluu kolmen hammaslääketieteellisen yrityksen muodostamaan kokonaisuuteen, Envistaan, jonka toiminta perustuu EBS – Envista Business System – liikkeenjohtojärjestelmään. EBS on joukko toimintatapoja, prosesseja ja työkaluja jatkuvan kehityksen mahdollistamiseksi. KaVo Kerr soveltaa Lean-periaatteita kaikessa toiminnassaan, ja yritys onkin tältä osin johtavia toimijoita Suomessa. Eri puolilla maailmaa käytettävien panoraama- ja 3D-kuvantamislaitteiden lisäksi yrityksen tuotevalikoimaan kuuluvat esimerkiksi

intraoraaliröntgenlaitteet, kuvalevynlukijat sekä ohjelmistotuotteet. Tuotteiden loppuasiakkaita ovat hammas- ja erikoishammaslääkärit, suu- ja leukakirurgit, hammasradiologit ja röntgenhoitajat. KaVo Kerr tekee tiiviisti yhteistyötä asiakkaidensa kanssa, minkä avulla käyttäjäkokemukset ja palaute saadaan hyödynnettyä tuotekehitysprojekteissa. [4.]

2 Hammasröntgenlaite ja pilarin testaus

2.1 Hammasröntgenlaitteen toiminta ja uusi tuoteversio

Röntgenlaitteen uuden tuoteversion myötä myös pilarin testaukselle on tullut uusia vaatimuksia. Uusi tuoteversio on esitetty kuvassa 2, johon pääkomponentit on numeroitu.



Kuva 2. Pilarin kiinnitettävän hammasröntgenlaitteen uusi tuoteversio [1].

Röntgenkuvauksessa potilas asetellaan 3D/PAN-pääntuennan (1) kohdalle. Päätuenta on kiinnitetty alatisiin (2), jossa on käsikahvat (3) potilaalle. Alatisi on kiinnitetty vaunuun (4), joka myös kytkee röntgenlaitteen pilariin (5). Ylähyly (6) kääntyy potilasta kohti, ja siihen kiinnitetty pyörjä (7) kuvaa potilasta pyörimällä tämän pään ympärillä. Pyörjä liikkuu myös ylähylyn suuntaisesti ja sisältää röntgensäteilylähteen, putkipään. Voidaan todeta, että 3D/PAN-kuvauksen aikana röntgenlaitteen massakeskipisteen sijainti pilarin suhteen ei juurikaan liiku vaan se pysyy joka hetki pienellä alueella pilarin etupuolella. Röntgenlaitteen uuteen tuoteversioon on lisätty kefalolisälaite (8), mikä tarkoittaa, että kefalokuvauksessa ylähyly ja pyörjä kääntyvät noin 90 astetta kefalokuvauksen pääntuennan (9) kohdalle. Tämä kääntyminen muuttaa pilariin kohdistuvaa kuormitusta ja on suurin syy uuden testilaitteen tarpeelle, sillä vanhalla laitteella kuormituksen sijainti ei ole muutettavissa.

2.2 Pilari

Pilari on röntgenlaitteen osa, jonka päätehtävä on laitteen korkeuden säätäminen potilaan pituuden mukaan. Pilarin molemmissa päissä on kuvan 3 mukaisesti laipat, joista toiseen kiinnitetään röntgenlaite ja toinen pultataan kiinni lattiaan. Pilari kiinnitetään myös seinään erillisen telineen avulla. Teleskooppirakenteinen pilari koostuu kolmesta sisäkkäisestä alumiiniprofiilista, jotka liukuvat toistensa suhteen röntgenlaitteen korkeutta säädettäessä.



Kuva 3. Testattava pilari.

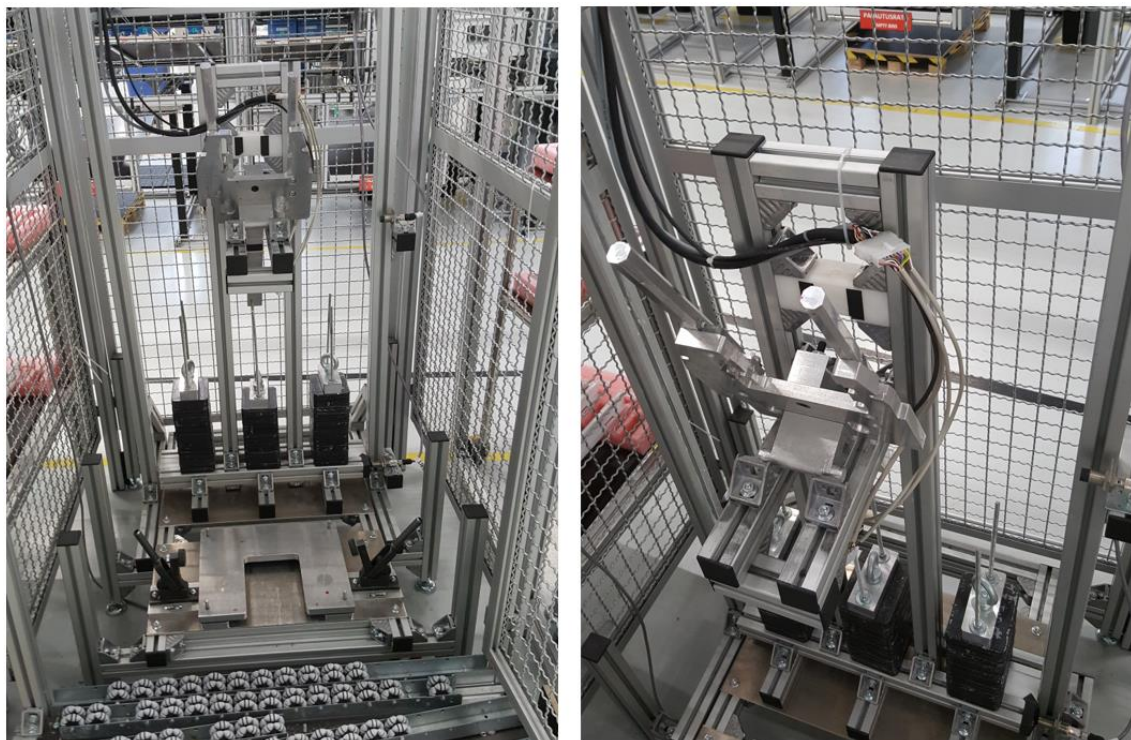
Laitteen korkeussäätöalue on 750 mm, ja se toteutetaan kuvassa 3 näkyvällä, pilarikokoonpanoon kuuluvalla lineaarisella karamoottorilla. Pilarin kotiaseman tunnistus ja synkronointi toteutetaan optokytkimen avulla ja etäisyys kotiasemasta mitataan laskemalla pulsseja Hall-anturista. Nostokorkeuden mekaaninen rajoitus toteutetaan pilarin moottorin avulla, jonka akselin päähän on asennettu ruuvi, joka pilarin yläasennossa osuu vastinkappaleeseen. Pilarin sisäkkäiset alumiiniprofiilit erotetaan toisistaan muoviliuskoilla, jotka keskittävät profiilit ja mahdollistavat niiden liukumisen toistensa suhteen.

2.3 Pilarin testauksen yleiskuvaus ja vanha testilaite

Pilarin toimivuus testataan KaVo Kerrin tuotantolinjalla kokoonpanon jälkeen. Röntgenlaitetta ei asenneta pilariin testauksen ajaksi vaan testaus toteutetaan erillisellä,

tarkoitukseen soveltuvalla laitteella. Testauksen päätarkoitus on ajaa pilaria ääriasetojen välillä röntgenlaitetta vastaavalla kuormalla. Tällä tavalla saadaan parhaiten simuloitua todellinen käyttötilanne ilman röntgenlaitteen asentamista pilariin. Testaaminen röntgenlaitteeseen kytkettynä ei ole kannattavaa kahdesta syystä. Laitteen tuotantokonsepti on suunniteltu siten, että röntgenlaite ja pilari kootaan ja toimitetaan erillään toisistaan. Testaaminen röntgenlaitteeseen kytkettynä aiheuttaisi siten ylimääräistä työtä kokoonpanon ja purkamisen takia. Toiseksi, pilarin virheellinen kokoonpano tai valmistusvirheet aiheuttaisivat riskin röntgenlaitteelle.

Vanha testilaite on esitetty kuvassa 4. Testilaitteessa röntgenlaitetta vastaava kuorma toteutetaan erillisillä painoilla, jotka kytketään pilarin ylälaippaan.



Kuva 4. Vanha testilaite.

Kuvasta selviää laitteen perusrakenne. Pilarin alalaippa liu'utetaan kuvassa näkyvän jousikuormitteisen laipan alle, johon se lukitaan vipukiinnittimillä. Tämän jälkeen pilarin ylälaipan muotoja myötäilevä varsikokoonpano kiinnitetään pilarin ylälaippaan, johon se lukitaan ruuveilla. Varsikokoonpanon kiinnitys kytkee pilariin kelkan, jossa painot sijaitsevat, ja pilaria ääriasetoihin ajettaessa se liikuu kiskoilla pilarin mukana.

2.4 Vaatimukset

Ennen suunnittelun aloittamista testilaitteelle määritettiin alustavat vaatimukset. Vaatimukset sisältävät turvallisuuteen, käytettävyyteen ja toiminnallisuuteen liittyviä kohtia, ja ne laadittiin yhdessä tuotteen pääinsinöörin, tuotannon ja laadun henkilöstön sekä tuotteen tuntevien mekaniikkasuunnittelijoiden kanssa. Vaatimukset on listattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Testilaitteelle määritetyt alustavat vaatimukset.

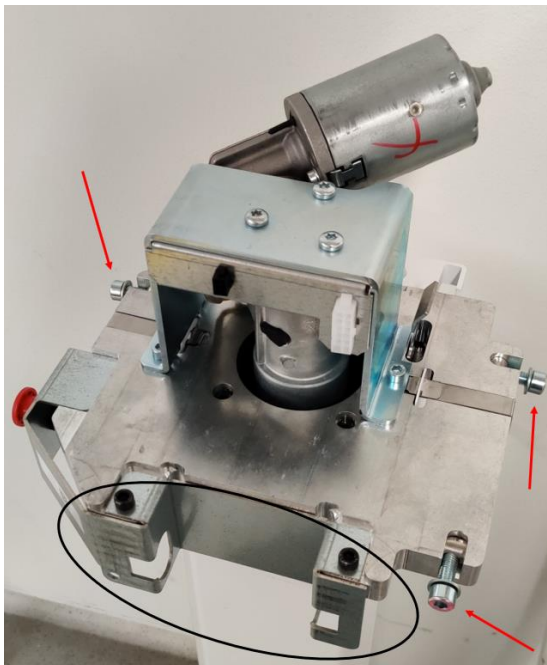
Nro.	Vaatus	Kuvaus
1	Pilarin kuormitus	Pilariin kohdistuvan voiman ja momentin pitää olla 1,1-kertainen röntgenlaitteeseen verrattuna
2	Pilarin ajo	Pilari pitää ajaa ylä- ja ala-asentoon (ääriasentoihin) 3D/PAN-sekä kefaloasennossa
3	Röntgenlaitteen nosto	Pilarin saranalevyn testaus
4	Röntgenlaitteen lukitus	Pilarin ja röntgenlaitteen välisen lukituksen testaus
5	Hätäseis	Hätäseis-painikkeen toimivuuden testaus
6	Pilarin ajonopeus	Pilarin ajo molempiin suuntiin maksiminopeudella, nopeuksien mitta
7	Virta	Pilarin moottorin ottaman maksimi ja keskimääräisen virran mitta
8	Välyksien siirto	Pilarin sivu- ja pituussuuntaisten välysten pitää siirtyä puolelta toiselle kuormituksen aikana
9	Kallistus	Pilarin kallistuskulmat on mitattava kuormituksen aikana 3D/PAN-sekä kefaloasennossa
10	Värähtely	Pilarin epätavallisen ääntelyn ja kolinan mitta
11	Ergonomia 1	Pilaria testilaitteeseen siirrettäessä operaattorin ei tarvitse nostaa pilaria yli 20 cm:n korkeuteen
12	Ergonomia 2	Operaattorin ei tarvitse kumartua pilaria testilaitteeseen kiinnitettäessä
13	Tila	Testilaitteen mahduttava 1 m x 1 m kokoiselle alueelle
14	Turvallisuus 1	Pääsy testilaitteen välittömään läheisyyteen testauksen aikana on estettävä
15	Turvallisuus 2	Testilaitteen rikkoutuminen tai vikaantuminen ei saa aiheuttaa vaaratilanteita

Vaatimuksen 1 mukaisesti pilariin täytyy kohdistaa testauksessa röntgenlaitteen kuorma 1,1-kertaisena. Tällä huomioidaan potilaan mahdollisesti aiheuttama lisäkuorma

kuvantamistilanteessa, kun potilaan pää on tuettu päätukeen ja kädet käsikahvoille. Röntgenlaitteen massa on 117,4 kg ja sen pilariin kohdistama momentti on suurimmillaan, kun ylähylly on 3D/PAN-kuvausasennossa, pyörijä ääriasennossaan ja putkipää kääntyneenä mahdollisimman kauas pilarista. Tällöin pilariin kohdistuva momentti on 452,5 Nm. Kuorma 1,1-kertaisena on 1267 N ($1,1 \times 117,4 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2$) ja momentti 497,8 Nm.

Vaatus 2 aiheutuu kappaleessa 2.1 käsittelystä kefalostaattisäyksestä. Ylähyllyn ja pyörijän kasvanut liikerata tarkoittaa, että röntgenlaitteen massakeskipiste liikkuu aikaisempaa suuremmalla alueella. Ylähyllyn ja pyörijän suurien massojen takia röntgenlaitteen massakeskipisteen liikerata seuraa kyseisten osakokoonpanojen asentoa eli se liikkuu kaarevan muotoisella alueella 3D/PAN- ja kefalokuvausasentojen välillä. Vaatimuksen mukaisesti pilari täytyy ajaa ääriasentoihin kuormittamalla sitä molempien kuvausasentojen mukaisesti.

Vaatimukset 3 ja 4 liittyvät röntgenlaitteen asentamiseen ja kiinnittämiseen. Pilarissa on kuvan 5 mukaisesti saranalevy, jonka avulla röntgenlaite käännetään paikoilleen pilarin päälle asennuskohteessa. Kiinnitys toteutetaan kuvaan 5 merkityillä pilarikokoonpanoon kuuluvilla ruuveilla.



Kuva 5. Pilarin saranalevy ja kiinnitysruuvit.

Näiden testauksella varmistetaan, että pilarikokoonpano sisältää kyseiset osat ja että ne toimivat tarkoituksenmukaisesti. Pilarissa on myös hätäseis-painike, jonka toiminta täytyy testata vaatimuksen 5 mukaisesti. Vaatimukset 6 ja 7 liittyvät pilarin moottorin toimintaan. Testilaitteen pitää mitata ajonopeudet sekä moottorin ottaman virran maksimi- ja keskiarvot, tarkistaa että ne ovat sallituissa rajoissa ja tallentaa tulokset tuotannon tietokantaan. Jos mitatut arvot eivät ole sallitujen rajojen sisällä, testilaitteen täytyy ilmoittaa siitä operaattorille ja keskeyttää testi.

Vaatimukset 8, 9 ja 10 koskevat pilarin teleskooppirakennetta. Kappaleessa 2.2 kerrottiin, että pilari koostuu sisäkkäisistä alumiiniprofiileista ja niiden välissä olevista liukupaloista. Pilarin nosto- ja laskuliikkeet sekä siirtyminen kuvausasentojen välillä aiheuttavat pilarin kallistumista, värähtelyä sekä välysten siirtymistä puolelta toiselle. Kallistuskulman ja värähtelyn mittauksella saadaan tärkeää tietoa kokoonpanon onnistumisesta ja mahdollisista osien laatuongelmista. Pilarin liikkeessä tapahtuu luonnollista värähtelyä, mutta virheellisen kokoonpanon tai laatuviikojen takia tämän värähtelyn amplitudi voi kasvaa silmin havaittavaksi sekä aiheuttaa pilarin ääntämistä. Nämä täytyy karsia käyttäjäkokemuksen parantamiseksi.

Vaatimukset 11 ja 12 liittyvät ergonomiaan ja ovat melko yksiselitteisiä. Pilarin massa on noin 30 kg, joten sen manuaalinen liikkuttaminen täytyy minimoida. Testilaitteen operaattorin kumartelua testin aikana halutaan välttää, ja käytännössä se tarkoittaa, että pilarin kiinnitys testilaitteeseen optimoidaan. Vaatimus 13 perustuu siihen, että testilaitte sijoitetaan tuotantolinjalle vanhan laitteen paikalle. Tuotantolinja on suunniteltu siten, että testilaitteen sijainti ja koko on tarkasti määritetty. Turvallisuusvaatimukset 14 ja 15 takaavat, että laitteen operaattorille tai muulle lähellä olevalle henkilöstölle ei aiheudu vaaraa testilaitteen käytöstä. Vaatimukset voidaan täyttää sijoittamalla testilaitte häkkiin, jonka sisäpuolelle ei pääse testauksen aikana. Häkissä voisi olla esimerkiksi anturi, joka tunnistaa häkin oven asennon ja keskeyttää testin, jos ovi avataan testin aikana.

3 Suunnittelu

Alustavien vaatimusten selvityksen jälkeen testilaitteen suunnittelu voitiin aloittaa. Kun laitteen tarkempi rakenne ja toiminta alkoi hahmottumaan, vaatimuksia pystyttiin tarkentamaan ja samassa vaiheessa muiden osa-alueiden, kuten elektroniikan ja ohjelmoinnin henkilöstö pääsivät aloittamaan suunnittelutyönsä.

3.1 Alustava suunnittelu

Testilaitteen suunnittelu aloitettiin selvittämällä erilaisia tapoja toteuttaa pilarin kuormitus sekä kuormituspisteen siirto pilarin suhteen. Tätä varten pidettiin kaksi ideointitilaisuutta, joissa käytetään eri ideointimenetelmiä ongelmanratkaisun apuna. Yrityksessä on aikaisemmin käytetty pääasiassa yhtä menetelmää ideoinnin apuna, ja tämä työ tarjosi hyvän tilaisuuden vertailla eri menetelmien toimivuutta.

Tilaisuudet toteutettiin aivoriihen periaatteiden mukaisesti eli perusideana oli tuottaa mahdollisimman monta ja erilaista ratkaisuvaihtoehtoa. Aluksi kaikki erikoiset ja mahdollomatkin ehdotukset otettiin vastaan, ilman kritiikkiä, ja ideointimenetelmästä riippuen jollain tavalla jalostettiin syntyneitä ratkaisuehdotuksia ja valittiin niistä parhaat. Ideointitilaisuuksiin osallistui 4–5 henkilöä, eri henkilöt kummassakin tilaisuudessa. Osallistujille esiteltiin aihe eli pilarin kuormituksen toteutustapa ja siirto. Kuten todettua, vanhassa testilaitteessa röntgenlaitteen kuormaa oli simuloitu ylimääräisillä painoilla. Tarkoituksena oli saada ratkaisuvaihtoehtoja, joissa kuormitus ja siirto toteutetaan painojen lisäksi mahdollisimman monella eri tavalla. Näitä voisivat olla esimerkiksi erilaiset hydrauliset ja pneumaattiset järjestelmät. Tehtävän luonteesta johtuen ryhmät koostuivat pääosin mekaniikkasuunnittelijoista sekä tuotannon henkilöstöstä, laitteen loppukäyttäjistä. Vanhan testilaitteen tuntemuksen osalta ryhmiin pyrittiin saamaan henkilöitä laidasta laitaan. Ihanteellisessa tapauksessa osa henkilöistä tuntisi sen toiminnan hyvin, osa tietäisi pääpiirteittäin mistä on kyse ja osalle laite olisi tuntematon. Tämän ansiosta ideointipalaverien tuloksena olisi parhaimmassa tapauksessa paljon pitkälle vietyjä ja toteutuskelpoisia ratkaisuehdotuksia sekä täysin vanhasta järjestelmästä poikkeavia ideoita. Syntyneet ratkaisuehdotukset pisteytettiin erilaisten kriteerien ja niiden painotuksien avulla. Seuraavassa kappaleessa on kuvattu lyhyesti käytettyjen ideointimenetelmien toimintaperiaatteita.

3.1.1 Ideointimenetelmät

Ensimmäinen käytetty ideointimenetelmä oli versio brainwriting-menetelmästä [5]. Aiheen esittelyn jälkeen osallistujat piirtävät ja kirjoittavat ratkaisuehdotuksia itsenäisesti paperille. Muutamien minuuttien jälkeen paperit kerätään ja jaetaan satunnaisesti osallistujille takaisin. Tehtävänä on jälleen keksiä uusia ratkaisuehdotuksia tai kehittää eteenpäin paperilla jo olevia ideoita. Tätä toistetaan useampi kerta, kunnes uusia ideoita ei enää synny. Lopuksi käydään ratkaisuehdotukset läpi, jotta kaikki ideat tulevat ymmärretyiksi ja keskustelun pohjalta voi vielä syntyä uusia ideoita.

Toinen menetelmä poikkesi enemmän aivoriihen perusideasta. Edellisen menetelmän tavoin osallistujille esitellään aihe mutta puolen tunnin tai tunnin ideointiajasta poiketen heille annetaan vuorokausi aikaa keksiä erilaisia ratkaisuehdotuksia. Tällä tavalla ongelma voi jäädä alitajuntaan ja uusia ideoita voi syntyä vielä seuraavanakin päivänä. Tässä menetelmässä on kuitenkin riskinä, että osallistujat eivät kirjaa ideoitaan ylös ongelman esittelytilaisuuden jälkeen ja tulokset jäävät heikommaksi kuin ohjatussa ideointitilaisuudessa. Vuorokauden jälkeen edellisen menetelmän tavoin käydään ratkaisuehdotukset läpi ja kirjataan ylös mahdollisesti vielä syntyvät ideat.

3.1.2 Tulokset ja valintakriteerit

Ideointimenetelmien käytöllä saatiin kattavasti ratkaisuehdotuksia annettuun ongelmaan. Varsinkin brainwriting-menetelmä osoittautui tehokkaaksi ja hyödylliseksi. Monissa käytetyissä ideointimenetelmissä perusideana on, että osallistujat kehittävät itsenäisesti ratkaisuehdotuksia ja ideointituokion lopuksi nämä ehdotukset käsitellään ryhmässä. Parhaimmat ideat syntyvät usein juuri tässä vaiheessa, kun ratkaisuehdotuksia käydään yhdessä läpi, ideoita yhdistetään keskenään ja kehitetään eteenpäin. Tällainen menetelmä toimii hyvin, jos kaikki ryhmän jäsenet ovat luovia ja pystyvät itsenäisesti tuottamaan laajasti erilaisia ehdotuksia. Jos taas itsenäisen työskentelyn tulos jää laihaksi, lähtökohdat ideoiden jatkokehitykselle ryhmätyöskentelyn avulla eivät ole parhaimmat mahdolliset. Brainwriting-menetelmässä tätä ongelmaa pystytään minimoimaan tehokkaasti kierrättämällä itsenäisesti laadittuja ratkaisuehdotuksia ryhmän jäsenten kesken. Suurella todennäköisyydellä osallistujat

saavat ideoita, miten parantaa jo keksittyjä ratkaisuja tai miten ongelman voisi ratkaista jollakin toisella tavalla.

Lopputuloksena oli iso joukko toisistaan poikkeavia ratkaisuehdotuksia, joista suurin osa voidaan jakaa neljään ryhmään toteutustavan mukaisesti. Näitä ovat:

1. Väkipyöräsysteemit
2. Vakiovoimajouset
3. Hydrauliset ja pneumaattiset sylinterit
4. Kuormitus erillisellä massalla

Jokaiseen ryhmään saatiin toisistaan poikkeavia ideoita. Toteutettavan kuormitustavan valinnassa käytettiin apuna konseptien pisteytysmatriisia, jossa ratkaisuehdotukset pisteytettiin painotettujen valintakriteerien avulla asteikolla 0–5 [6]. Eniten painoarvoa saivat testilaitteen käytettävyys, turvallisuus ja kestävyys. Testilaitteen käytön pitää olla nopeaa ja sujuvaa, eikä se saa aiheuttaa vaaratilanteita. Kestävyydellä on suuri painoarvo, sillä pienenkin vian ilmaantuessa pilarin tuotantolinja hidastuu tai pysähtyy. Mekaanisen vian ilmaantuessa korvaavien osien täytyy olla nopeasti saatavilla ja asennettavissa. Valintakriteereihin kuului myös kustannukset, jolla oli edellä lueteltuja kriteereitä pienempi painotus, koska kyseessä on yksittäinen laite eikä sarjatuotanto. Valintakriteerit ja ideoiden pisteytykset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kuormitustapojen pisteytys.

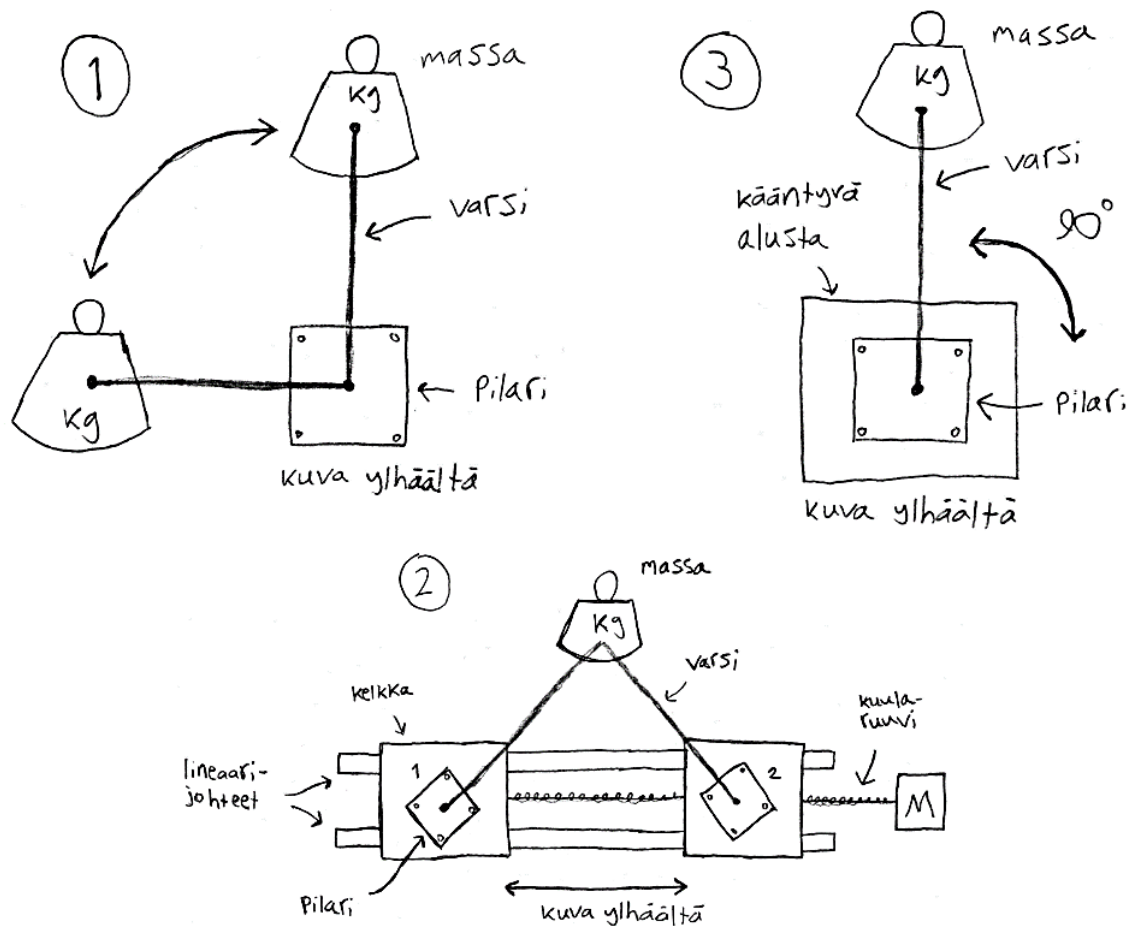
Valintakriteeri	Painotus (%)	Väkipyörä-systeemit		Vakiovoimajouset		Hydrauliset- ja pneumaattiset sylinterit		Erillinen massa	
		Arvo	Painotettu arvo	Arvo	Painotettu arvo	Arvo	Painotettu arvo	Arvo	Painotettu arvo
Käytettävyys	25	2	0,5	3	0,75	4	1	4	1
Korjaus/huolto	15	3	0,45	3	0,45	3	0,45	3	0,45
Turvallisuus	20	3	0,6	3	0,6	4	0,8	3	0,6
Kestävyys	20	3	0,6	3	0,6	3	0,6	3	0,6
Osien saatavuus/valmistettavuus	15	3	0,45	3	0,45	3	0,45	4	0,6
Kustannukset	5	3	0,15	3	0,15	2	0,1	4	0,2
	Tulos	2,75		3		3,4		3,45	
	Sijoitus	4		3		2		1	

Taulukosta selviää, että sylinterit sekä erillinen massa kuormitustapana saivat suurimmat pistemäärät. Näistä erilliseen massaan perustuvassa ratkaisussa lähes kaikki

testilaitteen osat olisivat valmistettavissa KaVo Kerrin koneistamossa. Ryhmien 1, 2 ja 3 toteutustavat vaatisivat enemmän osto-osia. Esimerkiksi ryhmässä 2 pilarin kuormitus toteutettaisiin vakiovoimajousilla, mutta tarvittavien jousien määrä vaaditun suuruiselle kuormalle olisi suuri ja ne olisivat osto-osia. Vikatilanteessa uusien osien tilaus ja saapuminen kestäisi liian kauan. Käytännössä tämä tarkoittaisi osien ostamista varastoon, mikä ei ole ideaalisin vaihtoehto. Taulukosta 2 näkee, että toteutustapojen tulokset olivat melko tasaisia, joten osien valmistettavuuden perusteella ryhmä 4 valittiin toteutustavaksi. Tähän ryhmään myös keksittiin eniten vaihtoehtoisia toteutustapoja ja niiden pohjalta suunniteltiin testilaitteen yksityiskohtaisempi rakenne. Valitun kuormitustavan ideat voidaan edelleen jakaa kahteen ryhmään:

- Kuorma, joka liikkuu kuvausasentojen välillä pilarin pysyessä paikoillaan.
- Kuorma, joka pysyy paikoillaan pilarin kääntyessä tai liikkeessä kuvausasentojen välillä.

Kuvassa 6 on esitetty havainnekuvat näistä vaihtoehdoista. Vaihtoehdossa 1 pilarin alalaippa lukitaan kiinteästi testilaitteeseen ja siihen kiinnitetään vaaditun suuruinen kuorma ylälaippaan laakeroidun varren avulla. Kuorman sijaintia pilarin suhteen muutetaan automaattisesti 90 astetta eri kuvausasentojen mukaisesti.



Kuva 6. Vaihtoehtoiset toteutustavat valitulle kuormitusmenetelmälle.

Vaihtoehdossa 2 pilarin ylälaippaan kiinnitetään kuorma, mutta ensimmäisestä vaihtoehdosta poiketen kuormituspisteen siirto tapahtuu pilaria liikuttamalla. Pilari lukitaan lineaarijohteilla liikkuvan kelkan päälle kuvan mukaisessa asennossa, jolloin tietyn mittaisella kelkan liikkeellä saadaan kuormituspistettä siirrettyä 90 astetta. Kelkan liike on automaattinen, esimerkiksi kuularuuvien ja askelmoottorin avulla. Varsi laakeroidaan pilarin ylälaippaan sekä kuormaan. Vaihtoehdossa 3 pilari kiinnitetään pyörivälle alustalle ja kuorman varsi laakeroidaan sen ylälaippaan. Kuormituspiste siirtyy, kun alustaa käännetään automaattisesti 90 astetta.

Vaihtoehdossa 1 kuorman liikuttamiseen tarvittava moottori ja vaihteisto pitäisi sijoittaa kokoonpanoon, joka kytketään pilarin päälle. Tämä tarkoittaa, että kyseisen kokoonpanon täytyisi olla manuaalisesti liikutettavissa. Kokoonpanosta tulisi moottorin ja vaihteiston takia melko raskas. Vaihtoehdossa 2 pilarin ja kuorman etäisyys ei pysyisi vakiona, joten kuorman kytkemiseen käytettävän varren pituuden täytyisi olla

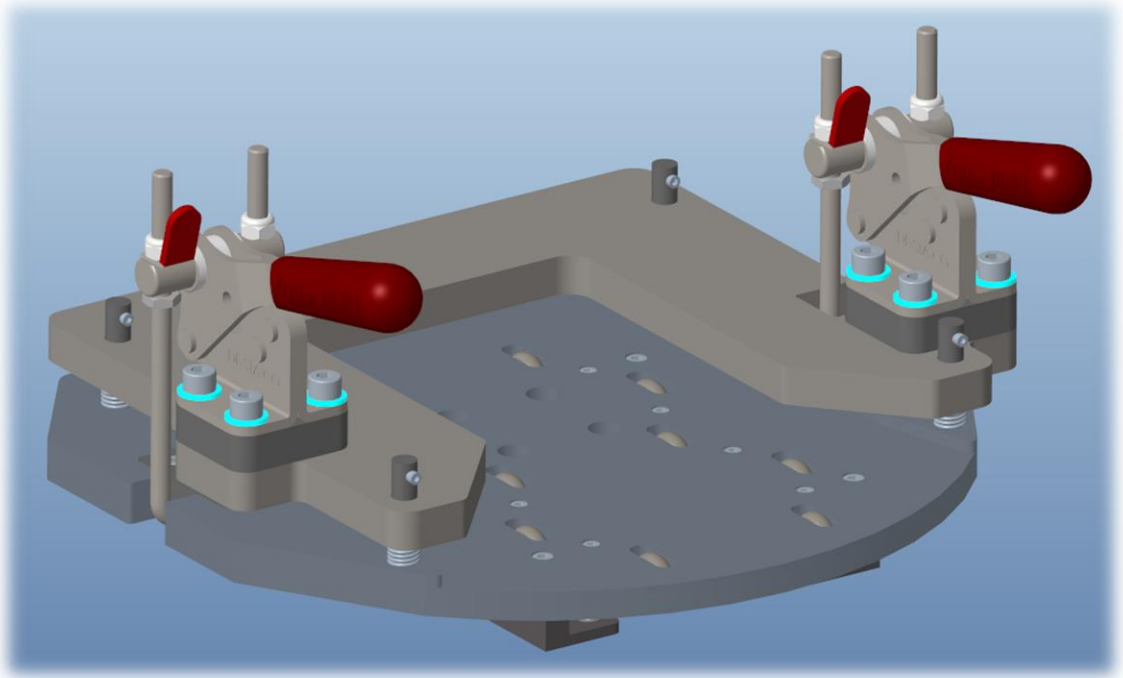
muuttettavissa. Tämä pituuden muuttamiseen tarvittava mekanismi sekä lineaariliikkeen komponentit vaatisivat paljon osia, jotka pitäisi sisällyttää testilaitteen huolto-ohjelmaan. Lisäksi kyseiset osat olisivat osto-osia, joten niitä pitäisi tilata useampi kappale varastoon rikkoutumisien varalle. Testilaitteen vikaantuessa korvaavien osien pitää olla saatavilla tuntien sisällä rikkoutumisesta. Vaihtoehto 3 valittiin toteutettavaksi kuormitustavaksi sen yksinkertaisuuden takia.

3.2 Mekaniikka

Kuormituksen toteutustavan valinnan jälkeen aloitettiin testilaitteen mekaniikan yksityiskohtainen suunnittelu. Mahdollisuuksien mukaan pyrittiin käyttämään osia ja komponentteja, joita yrityksellä oli entuudestaan käytössä sen tuotteissa ja tuotannon muissa testilaitteissa. Tämä mahdollisti nopean prototyyppien rakentamisen, ja tuotannon yhteydessä toimiva koneistamo nopeutti eri vaihtoehtojen kokeilua entisestään. Valittu kuormitusmenetelmä sisältää neljä osakokonaisuutta, jotka käydään läpi seuraavissa kappaleissa.

3.2.1 Pilarin alalaipan kiinnitys

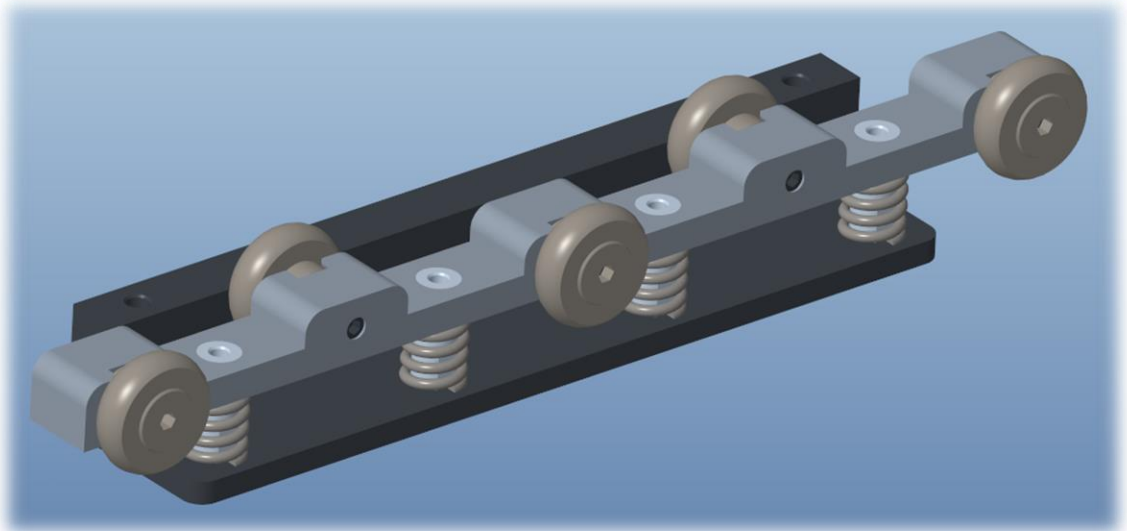
Valitussa kuormitusmenetelmässä pilari siirretään ja kiinnitetään kokoonpanon jälkeen alustalle, joka kääntyy paikoillaan hieman yli 90 astetta. Yli 90 asteen käännöllä varmistetaan, että pilarin välykset siirtyvät puolelta toiselle vaatimuksen 8 mukaisesti. Pilariin kiinnitettävän kuorman takia se täytyy lukita alustalle tukevasti, ja kappaleen 2.4 ergonomiavaatimukset oli huomioitava testilaitteen operaattorin työskentelyn helpottamiseksi. Vaatimuksen 11 mukaan operaattorin pitää pystyä lukitsemaan pilari testilaitteeseen ilman kumartelemista. Tästä syystä minkäänlaista käsityökalujen avulla tapahtuvaa lukitusta, kuten väännintyökalulla lukitsemista, ei voitu käyttää. Pilarin massa on noin 30 kg, joten vaatimuksen 10 mukaisesti pilarin manuaalinen liikuttaminen piti minimoida. Pilarin alalaipan kiinnittämiseen päätettiin käyttää Destacon vipukiinnittimiä, jotka operaattori voi jalalla polkaista kiinni. Kuvassa 7 on esitetty pilarin alalaipan kiinnitys.



Kuva 7. Pilarin kiinnitysalusta.

Pilari siirretään alustalle, johon on jousien varaan asennettu kiinnityslaippa sekä kaksi vipukiinnitintä, joilla laippa puristetaan pilarin alalaippaa vasten. Kiinnittimien valintaa varten täytyi selvittää niihin kohdistuva voima pilaria testattaessa. Testilaitteen rakenteesta johtuen kiinnittimet kääntyvät pilarin mukana 90 astetta ja niihin kohdistuva voima muuttuu testauksen aikana. Pilarin tasapainoyhtälöstä saatiin testausasennosta ja kiinnittimien sijainnista riippuen niihin kohdistuvan voiman suuruudeksi 1–4 kN. Pilarin alusta pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman lähelle testilaitteen turvahäkin ovea pilarin liikuttamisen minimoimiseksi, joten kiinnitysalustan pyörimisen takia kiinnittimien muoto, koko ja asento rajoittivat valintavaihtoehtoja. Valittiin kuvan 7 mukainen Destacon 344-kiinnitin, jonka suurin pitovoima on 8,9 kN. Se soveltuu hyvin tarkoitukseen, koska yksikin kiinnitin pystyy pitämään pilarin paikoillaan toisen vikaantuessa. Kiinnittimen kahvaosa on myös tarpeeksi suuri, joten sen avaaminen ja sulkeminen jalalla on helppoa. Alustaan tehtiin myös pilarin alalaipan muotojen mukainen syvennys, jotta pilari kohdistuisi aina haluttuun kohtaan.

Pilarin testilaitteen alustalle siirtämisen helpottamiseksi alustan pohjaan lisättiin kaksi kuvan 8 mukaista jousitettua rullakokoonpanoa.



Kuva 8. Rullakokoonpano, jolla helpotetaan pilarin siirtoa testilaitteen alustalle.

Rulliksi valittiin RXBLN30-2RS-laakerit, jotka on kiinnitetty jousien päälle asennettuun runkoon. Kokoonpano kiinnitetään kuvan 7 alustan pohjaan ja laakerit tulevat 1 mm:n alustan pinnan tason yläpuolelle. Kokoonpanon jousitus kantaa pilarin painon kokoonpuristumatta pilaria alustalle liu'utettaessa. Kun pilari lukitaan alustaan vipukiinnittimien avulla, kokoonpanon jousitus puristuu kasaan ja laakerit painuvat alustan pinnan tasolle, jolloin pilarin alalaippa on tukevasti kosketuksissa alustaan. Laakerit on sijoitettu kuvan mukaisesti rungon molemmille puolille, jotta jousitus puristuisi tasaisesti.

Jotta rullakokoonpano toimisi halutulla tavalla, kokoonpanon jousituksen pitää pystyä kantamaan pilarin paino (300 N) puristumatta liikaa. Kun pilari on rullien päällä, jousituksen puristuman pitää olla alle 1 mm, jolloin rullat pysyvät kiinnitysalustan pinnan tason yläpuolella. Sallittu puristuma on pieni, joten käytettävien jousien jousivakion arvon pitää olla suhteellisen iso. Jousien tasapainoyhtälöstä johdetulla kaavalla 1 lasketaan, kuinka monta joustaa tarvitaan kannattelemaan pilaria siten, että puristuma on alle 1 mm. Valittiin jousi, jonka jousivakio on 44 N/mm.

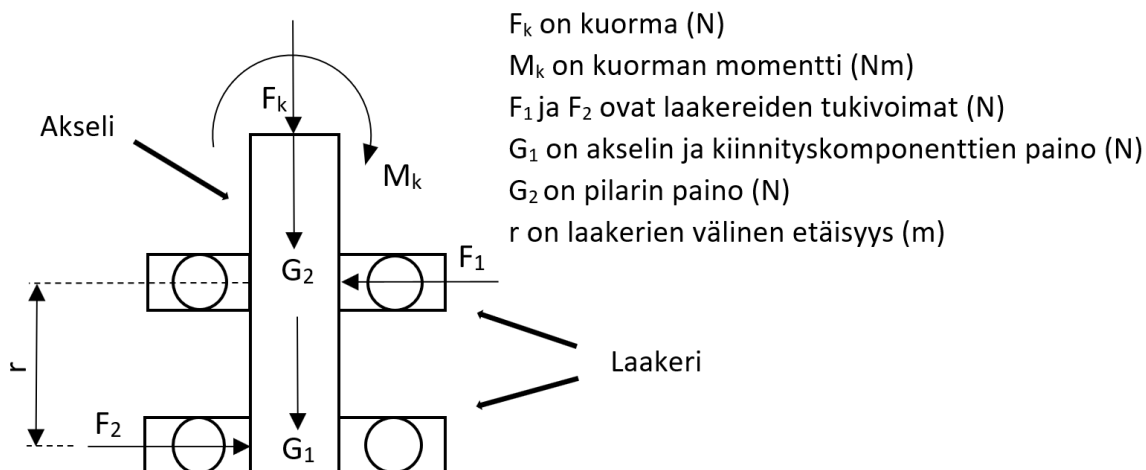
$$a = \frac{mg}{kx} = 6,7 \quad (1)$$

jossa

- a on jousien lukumäärä
- m on pilarin massa (kg)
- g on putoamiskiikkyvyys (m/s^2)
- k on jousivakio (N/m)
- x on jousen puristuma (m)

Kaavan 1 perusteella pilarin kannattelemiseen tarvitaan vähintään 7 joustaa. Pilarin tasollesiirtovaiheessa sen massa ei kuitenkaan kohdistu välittömästi kaikkien jousien varaan. Tästä syystä tarvitaan joko enemmän jousia tai mahdollisuutta asentaa jouset paikoilleen esipuristettuina. Ratkaisuksi valittiin kuvan 8 mukainen kokoonpano, jolloin pilaria kannattelee yhteensä 8 joustaa. Jouset voidaan asentaa esipuristettuina ja esipuristuksen suuruutta voidaan säätää, jos kokoonpanovaiheessa huomataan, että jousitus ei ole tarpeeksi jäykkä. Testauksen aikana jousitus pyrkii nostamaan pilaria ja kohdistaa edelleen voiman myös vipukiinnittimiin. Tämän voiman kokoluokka piti tarkistaa, jotta tiedettiin täytyykö se huomioida kiinnittimien mitoituksessa. Jousia on kahdeksan ja kokoonpano mahdollistaa korkeintaan 2 mm:n esipuristuksen. Suurimmallakin esipuristuksella jousituksen pilariin kohdistama voima olisi joitakin satoja Newtonia, joten valittujen kiinnittimien pitovoima on riittävä.

Kiinnitysalusta pyörii paikoillaan, joten se täytyi laakeroida. Ensimmäiseksi kokeiltiin kahta 6014-2z tiivistettyä urakuulalaakeria, koska ne pystyvät kantamaan aksiaali- ja radiaalisuuntaisia kuormia sekä niitä oli heti saatavilla KaVo Kerrin varastossa. Vaatimuksen 11 mukaan pilarin manuaalinen nostokorkeus saa olla enintään 20 cm, joten laakeroinnille jäi suhteellisen vähän tilaa. Alustavassa suunnittelussa laakereiden etäisyydeksi saatiin 75 mm. Tämän etäisyyden ja kappaleessa 2.4 esitetyn testilaitteen vaaditun kuorman avulla laskettiin laakereille radiaali- ja aksiaalisuuntaiset kuormitukset, kun toinen laakeri kantaa kaiken aksiaalikuorman. Laskentaan käytetään kuvan 9 vapaakappalekuvaa.



Kuva 9. Akselin kuormituksen vapaakappalekuva.

Akselin tasapainotarkastelulla saadaan laakereiden tukivoimien F_1 ja F_2 suuruudet, jotka ovat yhtäsuuria ja vastakkaisuuntaisia kuin laakereihin kohdistuvat radiaalikuormitukset. Aksiaalikuorman suuruus on pilarin painon G_2 , akselin ja kiinnityskomponenttien painon G_1 ja kuorman F_k summa. Akselin ja kiinnityskomponenttien alustava massa oli noin 13 kg, jolloin aksiaalikuorman suuruudeksi saatiin 1,69 kN. Molempiin laakereihin kohdistuvan radiaalikuorman suuruus on 6,64 kN.

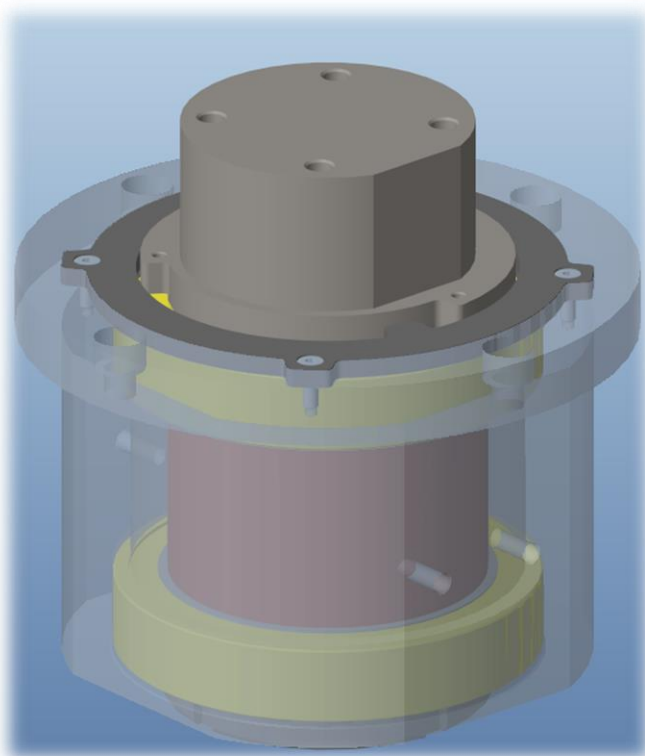
Testilaitteen laakerointi pyörii hitaasti ja liikkuu edestakaisin, joten laakeroinnin kantavuuslukuna käytettiin staattista kantavuuslukua C_0 dynaamisen kantavuusluvun sijaan [7, s. 27]. Laakerin 6014-2z kantavuusluku on 31 kN. Seuraavaksi laskettiin laakereille staattinen ekvivalenttikuormitus, joka yksittäisille urakuulalaakereille saadaan kaavalla 2 [7, s. 184]. Saatua arvoa verrattiin laakerin staattiseen kantavuuslukuun.

$$P_0 = 0,6F_r + 0,5F_a = 4,83 \text{ kN} \quad (2)$$

jossa P_0 on staattinen ekvivalenttikuormitus
 F_r on kuormituksen radiaalikomponentti
 F_a on kuormituksen aksiaalikomponentti

Kaava 2 antaa ekvivalenttikuormituksen arvon yksittäiselle laakerille ja siitä voidaan päätellä, että aksiaalisen kuorman kantavan laakerin staattinen ekvivalenttikuormitus on suurempi kuin pelkkää radiaalikuormaa kantavan laakerin, jolla kaavan toisen termin

arvo on nolla. Laakeroinnin mitoitukseen pitää käyttää suurempaa staattisen ekvivalenttikuormituksen arvoa, joka tässä tapauksessa on 4,83 kN. Saatua arvoa on kuitenkin pienempi kuin laakerikuormituksen radiaalikomponentin F_r arvo (6,64 kN), joten laskennassa P_0 -arvona pitää käyttää radiaalikomponentin arvoa. [7, s. 184]. Lopuksi laskettiin staattinen kantavuusvarmuus s_0 ja verrattiin saatua arvoa SKF:n antamaan ohjearvoon. Kantavuusvarmuus lasketaan suhteesta C_0/P_0 ja sen arvo on 4,67, joka kyseiselle laakeri- ja kuormitustyyppille annetun ohjearvon mukaan on riittävä. Suunniteltu laakerointi on kuvan 10 mukainen.



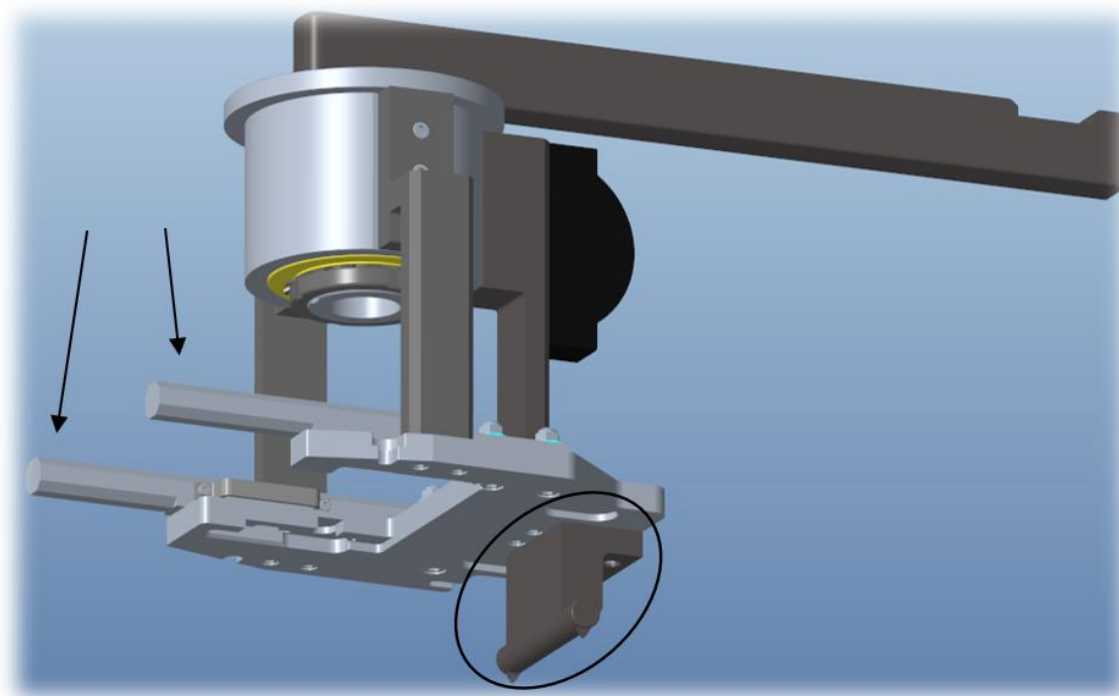
Kuva 10. Kiinnitysalustan laakerointi.

Ylempi laakeri kantaa aksiaalikuorman ja alempi pysyy paikoillaan akselimutterin avulla. Laakereiden välissä on erillinen holkki, ja laakeripesän sisämitat suunniteltiin siten, että akselimutteria kiristämällä ei ole mahdollista aiheuttaa laakereille esijännitystä. Esijännitykselle ei tässä sovelluksessa ole tarvetta, ja se myös kasvattaisi akselin pyörittämiseen vaadittavaa momenttia. Aksiaalisuuntaiset tarpeettomat välykset poistetaan aaltojousilaatoilla. Akselin pyöriminen on rajoitettu noin 100 asteeseen, sillä pilarin kiinnitysalustan rajoittamaton pyöriminen on tarpeetonta testilaitteen toiminnasta

johtuen. Rajoitus estää myös pilarin ja testilaitteen välisen törmäyksen, joka tapahtuisi rajoittamattomassa pyörimisessä. Rajoitus toteutetaan kuvassa 10 näkyvällä laakeripesään kiinnitettävällä renkaalla, jonka sisäkehällä on uloke ja akselissa vastaava 100 asteen syvennys.

3.2.2 Pilarin ylälaipan ja kuorman kiinnitys

Kuormitusmenetelmässä pilari kääntyy paikoillaan ja siihen on kiinnitetty kuorma, joka puolestaan pysyy vaakatasossa paikoillaan ja nousee pilarin mukana sitä ylös ajettaessa. Tämä tarkoittaa, että myös pilarin ylälaipan ja kuorman välinen kiinnitys piti laakeroita. Ratkaisussa käytetään samoja laakereita ja etäisyyksiä kuin edellisen kappaleen pilarin kiinnitysalustan laakeroinnissa. Kuormasta aiheutuva laakerikuormitus on sama molemmille laakeroinneille mutta kiinnitysalustan laakerointi joutuu kantamaan sen lisäksi myös pilarin painon. Tämä tarkoittaa, että ylälaipan laakeroinnin kokonaiskuormitus on pienempi, joten sen kestävyyttä ei tarvinnut erikseen laskea. Pilarin ylälaipan ja kuorman välinen kytkentä toteutetaan kuvan 11 mukaisella kokoonpanolla.



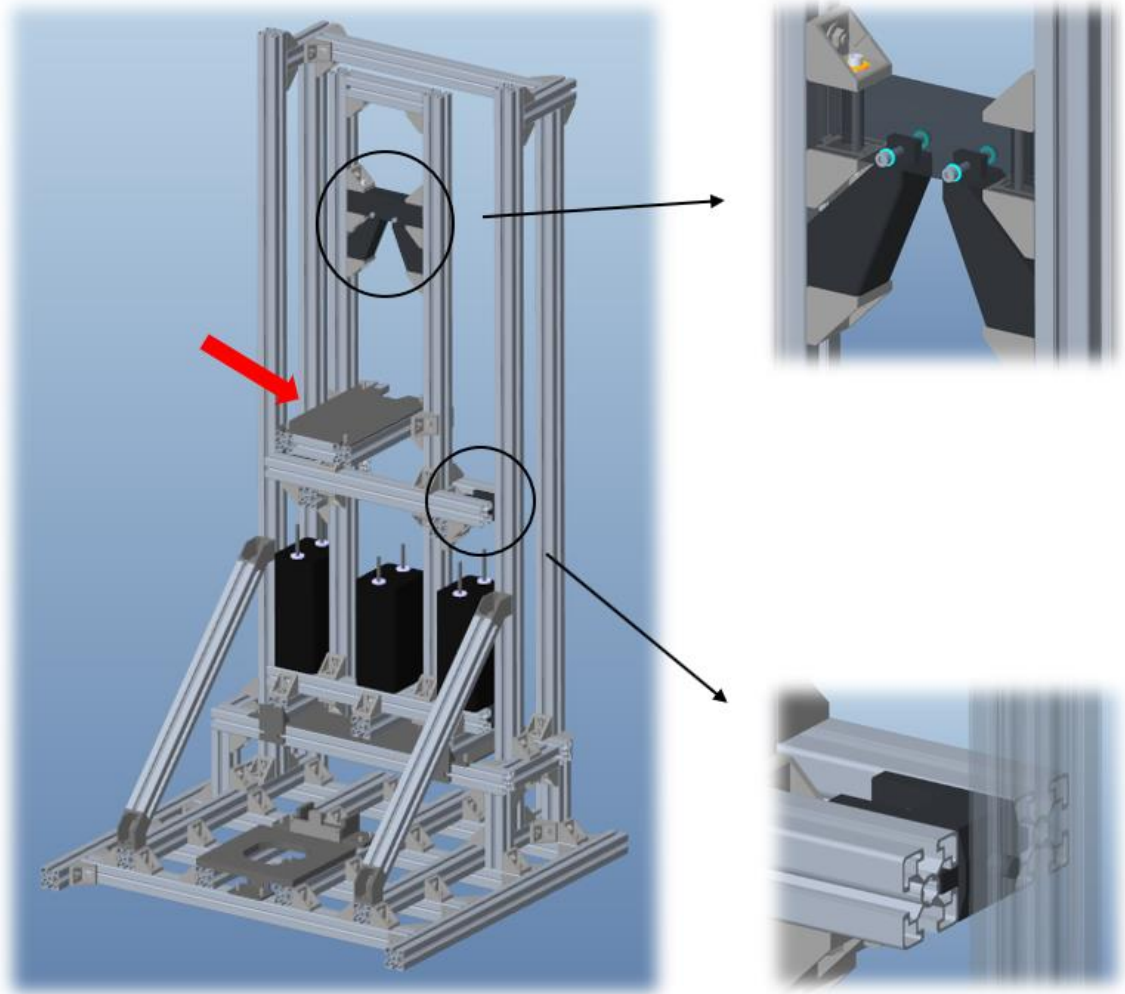
Kuva 11. Pilarin ylälaipan ja kuorman kiinnitys.

Kokoonpano sisältää levyn, joka mukailee pilarin ylälaipan muotoja. Levyyn on kiinnitetty kuvassa 11 ympyröity osa, joka asetetaan pilarin saranalevyyn ja kokoonpano käännetään pilarin päälle kuvan kahvojen avulla. Kokoonpano kiinnitetään pilariin kuvassa 5 esitetyillä pilarikokoonpanoon kuuluvilla ruuveilla, joita käytetään myös röntgenlaitteen ja pilarin välisessä kiinnityksessä. Näiden ruuvien ja saranalevyn käyttö toteuttavat vaatimukset 3 ja 4. Kuvista 3 ja 5 nähdään, että pilarin moottori sijaitsee osittain ylälaipan pinnan yläpuolella, joten laakerointi täytyi nostaa kuvassa 11 näkyvien kolmen korokepalan avulla. Akseliin on kiinnitetty varsi, johon kuorma kytketään.

Koska kyseinen kokoonpano käännetään pilarin päälle, sen liikuttaminen ei saa olla liian raskasta. Kääntökahvojen pituuden lisääminen testilaitteen operaattorilta vaadittavan voiman vähentämiseksi ei ollut vaihtoehto, sillä kappaleen 3.2.1 mukaisesti pilari sijoitetaan mahdollisimman lähelle testihäkin ovea sen manuaalisen liikuttamisen minimoimiseksi. Vaihtoehdoksi jäi kokoonpanon massan vähentäminen materiaalivalinnoilla ja -määrällä. Kokoonpanosta pyrittiin poistamaan materiaalia siten, että testauksen aikana osien muodonmuutokset olisivat korkeintaan elastisia ja mahdollisimman pieniä. Kokoonpanon ensimmäisessä suuntaa antavassa CAD-mallissa osien materiaaliksi kokeiltiin terästä, jolloin sen massa nousi yli 30 kilogrammaan. Tämän todettiin olevan liikaa ja materiaaliksi vaihdettiin alumiini. FEM-analyysin perusteella kokoonpanosta pystyttiin karsimaan ylimääräinen materiaali. Lopullisen kokoonpanon massa on 11 kg, joten sen pystyy suhteellisen helposti kääntämään pilarin päälle. Pilari kannattelee tätä massaa testauksen aikana, joten se on huomioitava myös pääkuorman massaa laskettaessa.

3.2.3 Testilaitteen runko

Testilaitteen runko rakennettiin 45 x 45 mm:n alumiiniprofiiliosista, jotka oli helppo kiinnittää toisiinsa kulmarautojen ja profiilin muotoihin lukittavien ruuviankkurien avulla. Testilaitteelle on tuotannon tiloissa varattu noin 1 x 1 m:n kokoinen alue. Runko on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Testilaitteen runko.

Kuvasta nähdään, että painot on sijoitettu rungon pohjaprofiilien yläpuolelle korotetulle tasolle. Näin saatiin lisää tilaa vaihteistolle ja moottorille, jotka kiinnitetään rungon pohjaprofiileihin. Painoina käytetään 700 g painavia lyijylevyjä, jotka ovat kiinnitetty painokelkkaan kolmeen pinoon. Painokelkka on asennettu kuvassa näkyvien pystysuuntaisten profiilien väliin, ja pilaria testattaessa se liukuu niitä pitkin. Kelkassa on polyasetaalista valmistettuja osia, jotka pitävät sen vaakatasossa paikoillaan pystyprofiilien suhteen. Osissa on lieriöulokkeet, jotka hyödyntävät profiilin muotoja, ja niiden koko sekä sopivat välykset mahdollistavat kelkan pienen kallistumisen eri suuntiin testauksen aikana, mikä vähentää kelkan kiilautumisriskiä profiilien väliin.

Painokelkassa on kuvaan 12 nuolella merkitty taso, jolle pilarin ylälaipan kiinnityskokoonpano lasketaan testauksen päätteeksi. Tason ja kiinnityskokoonpanon

mitoitus toteutettiin siten, että kokoonpanon putoaminen tasolta pilariin asennuksen tai siitä irrottamisen aikana on epätodennäköistä. Testilaitteen toimintaperiaatteen mukaisesti kiinnityskokoonpanon painovarsi kaappaa painokelkan mukaansa pilarin noustessa yläasentoon. Tätä varten painokelkassa on vastinkappale painovarrelle ja siihen yhdistetyt ohjurit, jotka kohdistavat varren ja kelkan toisiinsa. Näin saadaan mahdollisimman identtinen testaus pilareille ja vertailukelpoisia tuloksia.

3.2.4 Moottori ja vaihteisto

Pilarin kiinnitysalustan 90 asteen kääntö toteutetaan automaattisesti, jotta operaattorin ei tarvitse testin aikana mennä testihäkin sisälle. Käännön moottorina käytetään askelmoottoria, joka on käytössä myös pilariin asennettavassa röntgenlaitteessa ja on siten melko helposti integroitavissa testiohjelmaan. Vaihteistoksi valittiin hihnakäyttö, johon suurin osa komponenteista löytyi valmiiksi KaVo Kerrin tuotannosta. Vaihteiston välityssuhteen selvittämiseksi piti laskea pilarin kääntöön tarvittava momentti testauksen aikana. Tarvittava momentti saatiin laskemalla testilaitteen ylä- ja alalaakeroinnin kitkan aiheuttamat vastusmomentit kuormituksen aikana. Kappaleessa 3.3.2 todettiin, että laakeroinnit ovat keskenään samanlaisia ja että alemmaan laakerointiin kohdistuu hieman suurempi kuorma. Voitiin siis laskea alemman laakeroinnin vastusmomentti ja tuplata se, jolloin saatiin tarvittava kokonaisvastus pienellä varalla.

Laakerien kitkamomenttien laskeminen on melko monimutkainen prosessi, ja siihen onkin olemassa useampia vaihtoehtoisia laskentamenetelmiä. Käytetyimmille menetelmille yhteistä on kitkamomentin jakaminen kuormituksesta riippuvaan ja riippumattomaan komponenttiin, joiden yhteisvaikutus aiheuttaa kokonaiskitkamomentin. Näistä menetelmistä viimeisin ja kattavin on SKF:n julkaisema ja siinä kuormituksesta riippuva ja riippumaton komponentti jaetaan edelleen pienemmiksi kokonaisuuksiksi [8]. Menetelmä ottaa huomioon esimerkiksi laakerivoitelun ominaisuudet ja lämpötilamuutosten vaikutukset, ja laskenta on sen takia monimutkaista. Tässä työssä laakeroinnin kitkamomenttien tarkka laskeminen ei ole tarkoituksenmukaista, sillä testauksen aikana pilari kallistuu melko paljon, jolloin ylä- ja alalaakerointi eivät ole enää täydellisesti linjattu. Tämä epäkeskisyys aiheuttaa ison tai jopa suurimman osan laakerointikitkasta, ja sen laskeminen on hankalaa.

Kitkamomentille laskettiin kuitenkin alustava ideaalinen arvo, jonka perusteella saatiin käsitys siitä, onko valitun askelmoottorin kokoluokka oikea. Kitkamomentin laskennassa käytettiin SKF:n menetelmää yksinkertaisempaa Harrisin menetelmällä [8]. Myös tässä menetelmässä kitkamomentti jaetaan kuormituksesta riippuvaan ja riippumattomaan komponenttiin. Kuormituksesta riippumattoman kitkamomentin kaava riippuu voiteluöljyn kinemaattisesta viskositeetista ν (mm²/s) ja laakerin pyörimisnopeudesta n (rpm). Käytettävä kaava riippuu siitä, onko tulon νn arvo yli vai alle 2000. Jos laakerissa käytetään rasvavoitelua, kinemaattisen viskositeetin arvona käytetään rasvan perusöljyn kyseistä arvoa. Laakerissa 6014-2z käytetään rasvaa, jonka kinemaattinen viskositeetti +40 °C:n lämpötilassa on 100 mm²/s. Koska testilaitteen kiinnitysalustan pyörimisnopeus on noin 3 rpm, tulo νn on reilusti alle 2000. Kuormituksesta riippumattoman kitkamomentin laskemiseen käytetään kaavoja 3 ja 4. [7, s. 58.]

$$M_0 = 160 * 10^{-7} f_0 d_m^3 \quad (3)$$

$$d_m = 0,5(d + D) \quad (4)$$

joissa M_0 on kuormituksesta riippumaton kitkamomentti (Nmm)
 f_0 on laakerimallista riippuva kerroin
 d_m on laakerin keskihalkaisija
 d on laakerin reiän nimellinen sisähalkaisija (mm)
 D on laakerin nimellinen ulkohalkaisija (mm)

Rasvavoidelluille yksirivisille urakuululaakereille kertoimen f_0 arvo on välillä 0,75 ... 2, pienet arvot pätevät keveille ja suuret raskaille laakerisarjoille [7, s. 59]. Laakerisarjoja ovat leveys- ja halkaisijasarja, joista käytettävä laakeri kuuluu leveyden osalta kevyeen ja halkaisijan osalta keskiraskaaseen sarjaan. Tämän perusteella kertoimen f_0 arvoksi valittiin 1,5. Kaavojen 3 ja 4 avulla laakerin kuormituksesta riippumattoman kitkamomentin arvoksi saatiin 17,5 Nmm. Kuormasta riippuvan kitkamomentin arvo lasketaan kaavoilla 5, 6 ja 7. [7, s. 60–61.]

$$M_1 = f_1 P_1^a d_m^b \quad (5)$$

$$f_1 = (0,0006 \dots 0,0009) \left(\frac{P_0}{C_0} \right)^{0,55} \quad (6)$$

$$P_1 = 3F_a - 0,1F_r \quad (7)$$

joissa M_1 on kuormituksesta riippuva kitkamomentti (Nmm)
 f_1 on laakerimallista ja kuormituksesta riippuva kerroin
 P_1 on laakerikuormitus (N)
 a ja b ovat laakerimallista riippuvat eksponentit

Kaavaan 6 liittyen kappaleen 3.2.1 mukaisesti laskennassa käytettiin staattisen ekvivalenttikuormituksen P_0 arvona laakerikuormituksen radiaalikomponentin F_r arvoa 6,64 kN. Kaavan 7 laakerikuormitus P_1 lasketaan aksiaali- ja radiaalikuormien avulla. Staattisen ekvivalenttikuormituksen tavoin laakerikuormituksen P_1 laskettu arvo kummallekin laakerille on pienempi kuin radiaalikuormituksen F_r arvo, joten $P_1 < F_r$. Eksponenttien a ja b arvo yksirivisille urakuulalaakereille on 1 [7, s. 61]. Kaavassa 6 käytettävän kertoimen arvo riippuu laakerisarjoista. Kaavan 3 kertoimen f_0 arvoina tavoin pienet arvot pätevät keveille ja suuret raskaille laakerisarjoille. Kertoimen arvoksi valittiin 0,0008. Kuormasta riippuvan kitkamomentin M_1 arvoksi saatiin molemmille laakereille 204,9 Nmm. Yksittäisen laakerin kokonaiskitkamomentti saadaan kuormituksesta riippuvan ja riippumattoman kitkamomentin summasta kaavan 8 avulla.

$$M = M_0 + M_1 = 222,4 \text{ Nmm} \quad (8)$$

Aikaisemmin todettiin pilarin ylälaippaan kiinnitettävän laakeroinnin olevan sama kuin kääntöalustan laakerointi ja kuorman olevan hieman pienempi, koska ylälaipan laakerointi ei kannattele pilaria. Laakeroinneissa on yhteensä neljä laakeria, joilla kaikilla on suurin piirtein sama kitkamomentti 222,4 Nmm. Kokonaiskitkamomentti on siten 889,6 Nmm.

Laskettu arvo on kokonaiskitkamomentti laakerien pyöriessä. Pyörimisen aloittamiseen vaadittava momentti on urakuulalaakereilla kaksi kertaa kuormituksesta riippuvaa

kitkamomenttia M_1 suurempi [7, s. 63]. Tämän perusteella kokonaiskitkamomentille saadaan uusi arvo kaavalla 9.

$$M = 4M_0 + 8M_1 = 1,71 Nm \quad (9)$$

Vaihteiston hihnan kireys aiheuttaa laakerikuorman. Kuorman suuruus tarkistettiin siltä varalta, että se pitäisi huomioida laakerikitkaa laskettaessa. Hihnakäyttöisessä vaihteistossa hihnaan syntyy löysä ja tiukka puoli pyörimissuunnan mukaisesti. Näiden puolien aiheuttamat hihnavoimat ovat eri suuruisia ja niiden erotus, kehävoima F_c , on vaihteiston toiminnan mahdollistava tekijä. Voimatasapainon seurauksena hihnavoimat ja siten kehävoima ovat yhtä suuria käytävällä ja käytettävällä hihnapyörällä [9]. Käytettävältä akselilta saatava momentti riippuu käytettävän hihnapyörän halkaisijasta. Valitun moottorin suurin vääntömomentti on noin 400 Nmm ja moottorin akselilla olevan hihnapyörän halkasija 14 mm. Käyttävän ja edelleen käytettävän hihnapyörän kehävoiman maksimiarvo lasketaan kaavalla 10. [9.]

$$F_{c,max} = \frac{2M_{i,max}}{D_i} = 57,1 N \quad (10)$$

jossa $F_{c,max}$ on kehävoiman maksiarvo (N)
 $M_{i,max}$ on moottorin suurin vääntömomentti (Nm)
 D_i on käytettävän hihnapyörän halkaisija (m)

Saatu arvo on teoreettinen maksimiarvo. Vaihteisto mitoitettiin siten, että todellinen tarvittava kehävoima ja siten moottorin vääntömomentti ovat reilusti maksimiarvojensa alapuolella.

Hihna täytyy esikiristää liukumisen välttämiseksi, ja se toteutetaan hihnapyörien akseliväliä säätämällä. Esikiristysvoiman suuruus riippuu luonnollisesti siitä, kuinka suureksi akseliväli säädetään, minkä takia kaavalla 11 laskettu esikiristysvoima tarkoittaa siirrettävälle kehävoimalle vaadittavaa minimiesikiristysvoimaa juuri ennen hihnan liukumista. Todellisuudessa hihnakäyttöä ei ajeta lähellä liukumisrajaa. [10.]

$$F_{p,min} = F_c \frac{e^{\mu\varphi} + 1}{2(e^{\mu\varphi} - 1)} \quad (11)$$

jossa $F_{p,min}$ on esikiristysvoiman minimiarvo (N)
 φ on hihnan kiertymäkulma hihnapyörän ympärillä (rad)
 μ on hihnan ja hihnapyörän välinen kitkakerroin

Esikiristysvoiman minimiarvo laskettiin kehävoiman maksiarvolla. Koska vaihteisto mitoitettiin siten, että todellinen tarvittava kehävoima on reilusti saatavissa olevaa maksimiarvoa pienempi, kaavalla 11 saatiin suuntaa antava arvo todellisesta esikiristysvoimasta. Kiertymäkulman arvona käytettiin 180 astetta ja kitkakertoimelle laskettua arvoa 0,35. Hihnan esikiristysvoiman arvoksi saatiin 57,1 N. Hihnan löysä ja tiukka puoli ovat yhdensuuntaisia, jolloin hihnan esikiristyksestä akseliin kohdistuva voima on tasapainoehdon mukaisesti kaksi kertaa esikiristysvoiman suuruus, 114,2 N. Akselivoiman edelleen laakereihin kohdistama kuormitus saadaan akselin tasapainoehdosta.

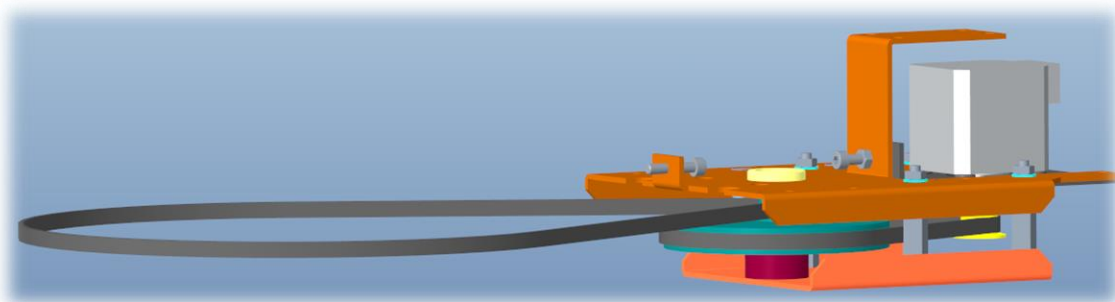
Laakereihin kohdistuvat radiaalikuormat ovat 154,2 ja 40,0 N. Kaavoilla 5, 6 ja 7 saatiin hihnan esikiristyksestä aiheutuvien laakerien kuormituksesta riippuvan kitkamomenttien arvoiksi 0,6 Nmm ja 0,07 Nmm. Arvot ovat mitättömän pieniä verrattuna aiemmin laskettuun kokonaislaakerikitkaan 1,71 Nm, joten ne voidaan jättää huomioimatta vaikka hihnan esikiristysvoima olisi moninkertainen.

Lopuksi laskettiin vaihteiston minimivälityssuhde, joka saadaan moottorin maksimivääntömomentin ja laakerointien kitkamomenttien suhteesta kaavalla 12. Hihnakäyttöjen yleinen hyötysuhde on noin 90...98 % [11, s. 417]. Laskennassa käytettiin arvoa 90 %.

$$i = \frac{M}{M_{i,max}\eta} = 4,8 \quad (12)$$

jossa i on välityssuhde
 η on hyötysuhde

Kuten todettua, pilarin kiinnityksen laakerointien epäkeskisyyden takia kokonaiskitkamomentti M on suurempi kuin laskettu 1,71 Nm ja moottorilta ei oteta kaavassa 12 käytettyä maksimivääntömomenttia. Näistä syistä välityssuhde mitoitettiin suuremmaksi kuin saatu laskennallinen arvo. Vaihteistoon käytettiin pääosin komponentteja, joita yritykseltä löytyi valmiiksi ja halutun suuruista yksiportaista vaihteistoa ei ollut saatavilla. Tästä syystä vaihteistosta tehtiin kaksiportainen ja siihen käytetään kuvan 13 mukaisia komponentteja.



Kuva 13. Moottori ja vaihteisto.

Käytettävä vaihteisto on hyvin yksinkertainen, molempien portaiden hihnakireyksiä säädetään akselivälejä muuttamalla. Hihnoina käytetään hammashihnoja ja molempien portaiden pienempi hihnapyörä on hammastettu. Isommissa pyörissä kontaktipinta on sileä.

3.3 Elektroniikka

Testilaitteen automaation takia sen pitää sisältää erilaisia elektroniikkakomponentteja, joiden avulla testilaitteen ja pilarin toimintaa ohjataan ja tarkkaillaan. Näihin kuuluu esimerkiksi piirikortti, jonka avulla pilarin moottorin nopeutta säädetään ja mitataan sen ottaman virran suuruutta. Kortilla on tarvittavat I/O-portit, joiden avulla seurataan pilarin kotiaseman optosensorin ja hätäseis-painikkeen tilaa. Portteja tarvitaan myös erilaisille antureille.

Vaatimuksen 7 mukaisesti pilarin kallistuskulma täytyy mitata ja siihen käytetään vanhan testilaitteen tavoin Muratan 2-akselista kallistusanturia, jonka mittaustarkkuus on 0,0025 astetta. Mittaussuunnat ovat asennuspinnan kanssa yhdensuuntaisia ja keskenään

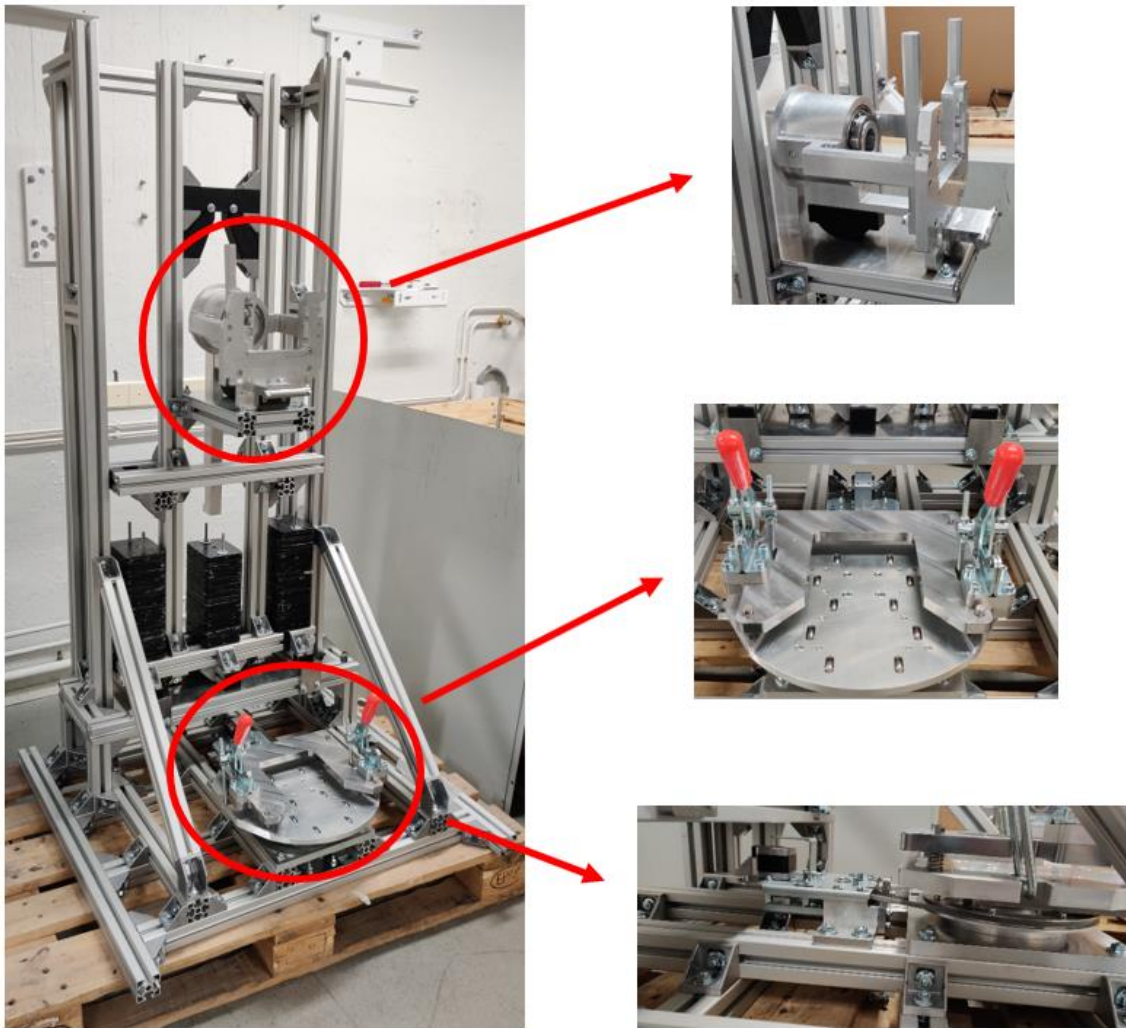
kohtisuorassa toisiaan vastaan. Pilarin paikan tunnistamiseen käytetään kahta induktiivista läheisyysanturia. Ne sijoitetaan tunnistamaan pilarin ylä- ja ala-asentoja ja niiden avulla voidaan varmistaa, että pilari on siinä korkeudessa, jossa testilaitteisto sen tulkitsee olevan.

Testilaitteeseen sijoitetaan myös kaksi mekaanista rajakytkintä sarjaan, jolloin niiden molempien tilan pitää vaihtua testin alkamiseksi. Toinen kytkin sijoitetaan turvahäkin oveen ja toinen kappaleessa 3.2.1 käsitelyyn pilarin alalaipan kiinnityskokoonpanoon. Näin saadaan varmistettua, että pilari on kiinnitetty tukevasti testilaitteeseen ja testihäkin ovi on kiinni ennen testin alkamista. Oven aukaiseminen tai pilarin alalaipan kiinnityksen aukeaminen testin aikana keskeyttävät testin. Anturien kaapelien reititykset on tehtävä huolellisesti, jotta ne eivät pilarin kääntyessä ja noustessa jää minnekään väliin eivätkä ole operaattorin tiellä pilaria liikutettaessa.

4 Kokoonpano, testin kulku ja käyttöönotto

4.1 Kokoonpano ja testilaitteen toiminnan varmistaminen

Suunnittelun jälkeen oli vuorossa koneistettavien osien valmistuspiirustusten teko, ostosien tilaus sekä testilaitteen kokoonpano ja alustava testaus. Testilaitte on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Testilaitte sekä pilarin ylälaipan kiinnityskokoonpano ja kääntöalusta.

Vaatimuksen 1 mukaisesti pilarin kuormituksen pitää vastata 1,1-kertaisesti röntgenlaitteen kuormaa. Painokelkan lisäksi kuvassa 14 näkyvä pilarin ylälaipan kiinnityskokoonpano kuormittaa pilaria. Vaaditun kuormituksen ja kuorman jakautumisen perusteella painokelkan ja pilarin akselin väliseksi etäisyydeksi saatiin 425 mm.

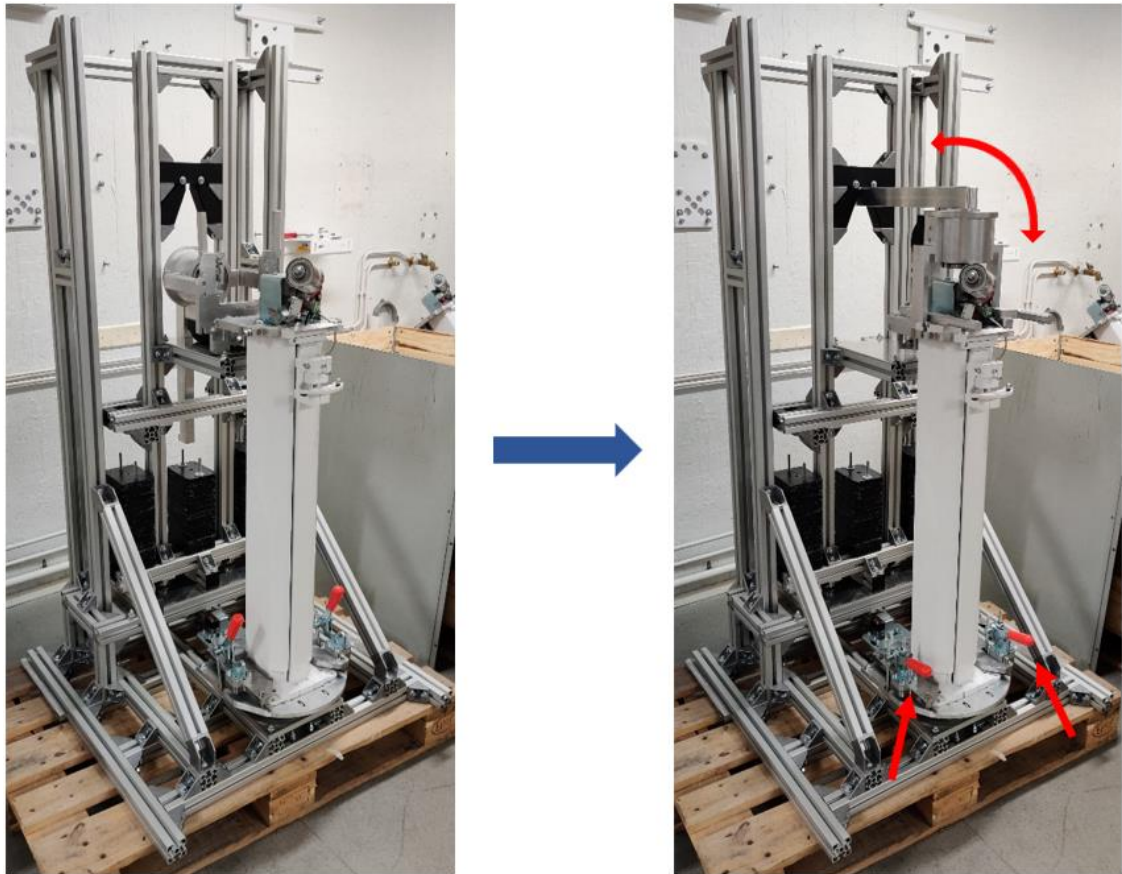
Alustavassa testauksessa testilaitteeseen kiinnitettiin pilari ja katsottiin, toimivatko suunnitellut osakokonaisuudet tarkoituksenmukaisesti. Kiinnitysalustan moottorin ja pilarin nostomoottorin ajamiseen oli saatavilla työkalut, joten vaikka testilaitteen elektroniikka ja testiohjelma eivät olleet vielä saatavilla, voitiin laitteella suorittaa pilarin suunnitellun testiohjelman mukainen ajo. Testauksessa selvisi, että testilaitte toimi halutulla tavalla ja perusteellisille rakennemuutoksille ei ollut tarvetta. Esimerkiksi

kääntöalustan moottori jaksoi vaivattomasti kääntää alustaa testauksen aikana ja painokelkka liikkui ongelmitta ylös- ja alaspäin alumiiniprofiilien välissä.

Muutamille osille ja kokoonpanoille jouduttiin kuitenkin tekemään muutoksia testilaitteen paremman toiminnan takaamiseksi. Esimerkiksi pilarin kiinnitystä alustaan jouduttiin muuttamaan, koska pilarin alalaippa ei pysynyt täysin paikoillaan kiinnitysalustassa vaan pyrki kallistumaan testauksen aikana. Tämä ratkaistiin vipukiinnittimien sijaintia muuttamalla ja tekemällä niiden sijaintiin pieni porrastus. Toinen ongelma aiheutui pilarin suuresta kallistuksesta testin aikana. Kallistuminen aiheutti sen, että myös painokelkka liikkui pienessä kulmassa, jolloin se ei tasolle laskeutuessaan ollut täysin vaakasuorassa. Paikka-anturoinnin takia painokelkan haluttiin laskeutuvan aina samaan paikkaa tasaisesti alustalle, joten kelkalle tehtiin ohjurit, jotka suoristavat sen juuri ennen tasolle laskeutumista. Myös pilarin kiinnitysalustan rullina toimivien laakerien määrää kasvatettiin ja sijainteja muutettiin, jotta pilarin liu'utus alustalle onnistuisi mahdollisimman sulavasti. Useat osat vaativat myös pieniä mittamuutoksia toimiakseen ideaalisesti.

4.2 Pilarin testauksen kulku

Pilarin testaus koostuu vaiheista, jotka testilaitte tekee automaattisesti, ja vaiheista, jotka vaativat operaattorilta toimenpiteitä. Testiohjelma opastaa operaattoria käyttöliittymän kautta kuvin ja sanallisesti suorittamaan eri toimenpiteet ja odottaa operaattorin kuittausta ennen seuraavaa vaihetta. Pilari kokoonpannaan telineessä, josta se siirretään rullilla liikkuvalla tasolle. Tasolta pilari liu'utetaan samalla korkeudella olevalle testilaitteen pyörivälle alustalle, johon operaattori lukitsee pilarin. Tämän jälkeen pilarin ylälaipan kiinnityskokoonpanon sarana kohdistetaan pilarin saranalevyyn ja kokoonpano käännetään pilarin päälle sekä kaapelit kiinnitetään pilarin nostomoottoriin. Pilarin lukitus ja kiinnityskokoonpanon kääntö on havainnollistettu kuvassa 15.



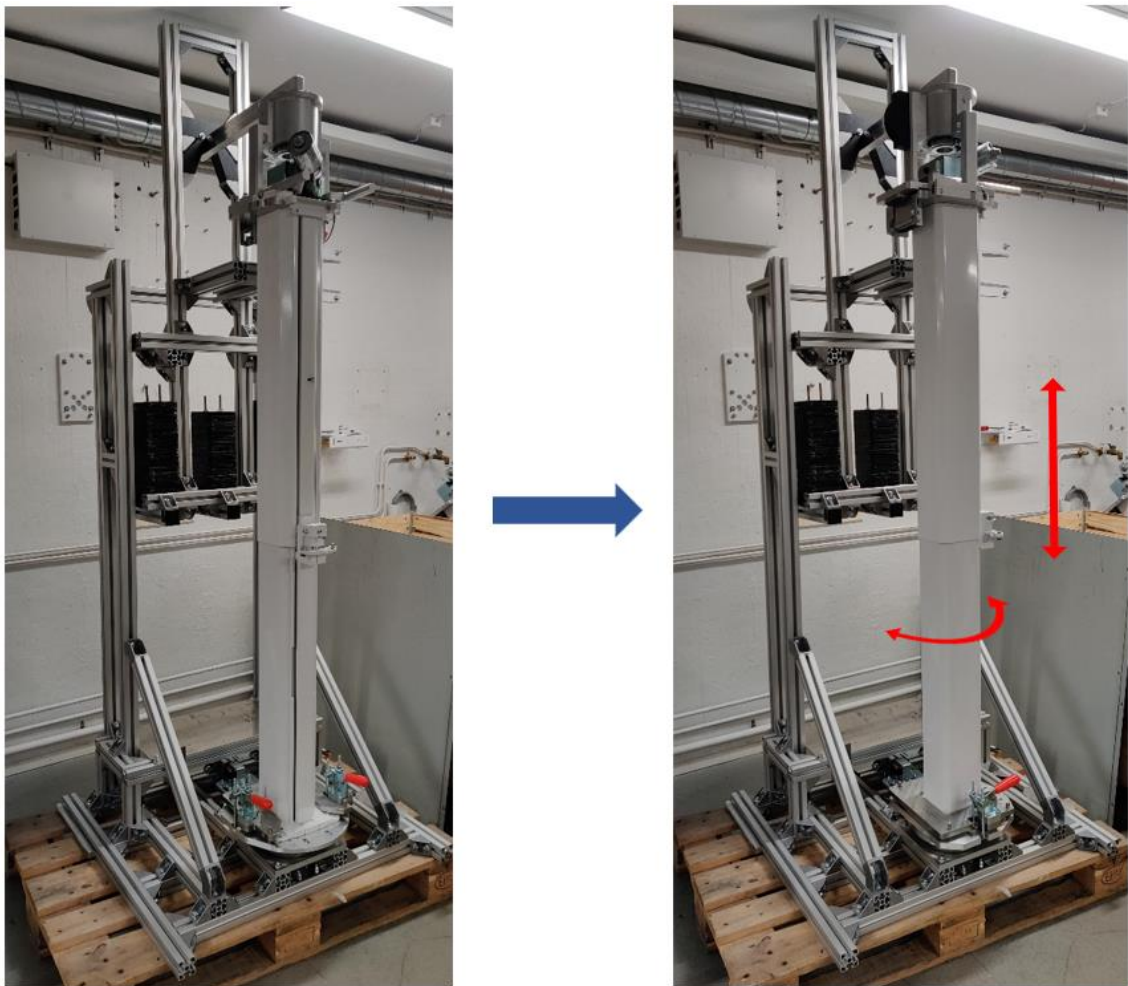
Kuva 15. Pilarin lukitus testilaitteeseen ja ylälaipan kiinnityskokoonpanon kytkentä.

Ennen varsinaisen testin alkamista pilarin hätäseis-painikkeen toiminta pitää testata. Operaattori painaa ja vapauttaa kytkimen ja testiohjelma tarkistaa, että kytkimen tilaa osoittava arvo vaihtuu ja palautuu oletuksen mukaisesti. Testiohjelma myös valvoo, että testihäkin oven ja pilarin alalaipan kiinnityksen rajakytkimien tilat ovat kiinni-tilassa. Testiohjelma lukee jo tässä vaiheessa kallistusanturin arvoa, joten jos ylälaipan kiinnityskokoonpano on unohtunut asentaa paikoilleen, anturin arvot eivät ole sallituissa rajoissa. Testi ei käynnisty, vaikka operaattori olisi kuitannut työvaiheen.

Tämän jälkeen pilaria lähdetään ajamaan ylöspäin ja se kaappaa painokelkan mukaansa. Pilaria ajetaan tietyn verran ylöspäin ja sen pitäisi saapua kotipaikkaansa. Testiohjelma tarkistaa kotipaikan, minkä jälkeen pilari ajetaan täydellä nopeudella yläasentoonsa 3D/PAN-kuvausasennossa. Pilarin yläasento tarkoittaa ylintä korkeutta, jolle asiakas pystyy pilarin ja röntgenlaitteen nostamaan. Pilarin rakenne kuitenkin mahdollistaa sen nostamisen hieman tämän ylimmän käyttökorkeuden yläpuolelle ennen kuin mekaaninen rajoitin tulee vastaan. Rajoittimen toiminta testataan ajamalla pilaria

hitaasti sitä vasten, jolloin moottorin ottaman virran arvo nousee yli suojarajan ja testiohjelma pysäyttää ajon.

Seuraavaksi testiohjelma kääntää pilarin kiinnitysalustaa ja siten myös koko pilaria 90 astetta kefalokuvausasentoon. Kuorman painopiste pilarin suhteen siirtyy, ja samalla pilarin sisäkkäisten alumiiniprofiilien välykset siirtyvät puolelta toiselle. Pilari ajetaan kefaloasennossa alas ja uudestaan ylös, minkä jälkeen käännetään takaisin 3D/PAN-asentoon. Pilarin pysty- ja kääntöliike on havainnollistettu kuvassa 16.



Kuva 16. Pilari yläasennossa ja kääntö kuvausasentojen välillä.

Testiohjelma lukee kallistus- ja värähtelyanturin arvoja pilarin nostojen, laskujen sekä kääntöjen aikana, ja saatujen arvojen pitää olla sallituissa rajoissa hyväksytyyn testituloksen saamiseksi. Testiohjelma laskee myös jokaisen nosto- ja laskunopeuden

pilarin ylä- ja ala-asennossa tallennettujen aikaleimojen ja kuljetun matkan suhteesta. Samalla mitataan pilarin nostomoottorin ottaman virran keskimääräinen ja suurin arvo.

Lopuksi pilari ajetaan ala-asentoon, operaattori irrottaa ylälaipan kiinnityskokoonpanon ja laskee sen takaisin telineeseen. Tämän jälkeen testiohjelma ajaa pilarin pakkauskorkeuteen, joka on hieman ala-asentoa ylempänä. Operaattori irrottaa pilarin nostomoottorin kaapelit, avaa pilarin alalaipan lukituksen ja tarkistaa testissä mitatut arvot. Tulokset tallentuvat tuotannon tietokantaan ja pilari siirretään pakattavaksi.

4.3 Käyttöönotto

Ennen testilaitteen käyttöönottoa tuotantolinjalla, sen toimivuus pitää varmistaa yrityksessä käytettävän validointi- ja verifiointiprosessin (V&V) mukaisesti. Tällä prosessilla tarkoitetaan niitä toimia, joilla todetaan, että testilaitte täyttää sille asetetut vaatimukset ja että sillä testatut pilarit ovat varmasti toimivia. V&V-prosessi sisältää testilaitteen asennukseen, toiminnallisuuteen ja suorituskykyyn liittyviä vaatimuksia. Asennukseen liittyvillä vaatimuksilla tarkoitetaan, että esimerkiksi verkkovirta, ethernet-yhteys ja tarvittava laitteisto ovat saatavilla. Toiminnallisiin vaatimuksiin kuuluu muun muassa operaattorin ohjeistus testin eri vaiheissa, mitattujen arvojen läpimenorajojen määrittäminen sekä mittauksien tallennus. Suorituskykyvaatimuksessa tietty määrä toimivia ja viallisia pilareita testataan testilaitteella ja laitteen pitää pystyä hyväksymään toimivat ja hylkäämään vialliset pilarit. Tällainen kattava V&V-prosessi on suoritettava yrityksen tuotannon testilaitteille, jos molemmat seuraavista kriteereistä täyttyvät:

1. Laitte on yrityksen suunnittelema ja se on suunniteltu tiettyä tarkoitusta varten.
2. Laitteen kriittisyysnumero ylittää määrätyn arvon.

Kriittisyysnumero määräytyy sen perusteella, kuinka merkittävä rooli laitteella on tuotteen laadunvalvonnassa ja tuotantolinjan toiminnassa. Kuten todettua, pilarin toimivuus todetaan ainoastaan tässä työssä esitellyn testilaitteen avulla, joten sen vikaantuessa pilarin tuotantolinja pysähtyy. Tästä syystä kriittisyysnumero on suurin mahdollinen ja testilaitte vaatii kuvaillun testauksen. Testaussuunnitelma ja tulokset dokumentoidaan ja hyväksytyn testausraportin jälkeen testilaitte voidaan lisätä tuotannon laitekantaan sekä sillä testatut pilarit toimittaa asiakkaille.

5 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa testilaitte röntgenlaitteen pilarille. Työ rajattiin mekaniikan suunnitteluun ja toimivan testilaitteen valmistukseen. Testausautomaation takia testilaitteeseen lisätään tarvittava elektroniikka, laiteohjelmisto sekä ohjelmakoodi ja laite otetaan käyttöön yhtiön tuotannossa.

Työ aloitettiin määrittämällä pilarin testausvaatimukset ja tutustumalla pilarin rakenteeseen. Testilaitteen perusrakenne ja toiminta suunniteltiin tuotannon henkilöstöstä ja mekaniikkasuunnittelijoista koostuvissa pienryhmissä eri ideointimenetelmiä käyttäen. Testilaitte mallinnettiin 3D-ohjelmalla ja sen rakennetta täsmennettiin ja muutettiin uusien ideoiden synnyttyä. Lopullinen testilaitte sisältää alumiiniprofiilirungon ja noin 60 erilaista osaa. Näistä suurin osa valmistettiin laadittujen piirustusten perusteella KaVo Kerrin koneistamossa, ja loput löytyivät valmiiksi yrityksen tuotannosta. Tämä mahdollisti eri vaihtoehtojen nopean testaamisen, ja monista osista tehtiinkin useampi prototyyppikierrös.

Eniten työssä vaati aikaa erilaisten prototyyppiosien suunnittelu sekä testaus. Nopeasti tuli huomattua, että vaikka osat ja kokoonpanot näyttivät toimivan laskennallisesti ja 3D-malleina, testausvaiheessa ilmeni ongelmia, joita ei ollut osannut huomioida. Esimerkiksi painokelkan tasapainottaminen osoittautui ongelmalliseksi. Kelkkaa oli vaikea kokoonpanna niin symmetrisesti, että pilaria testattaessa se ei puoltaisi johonkin suuntaan.

Kehityskohteeksi voi mainita ainakin testilaitteen kuorman sijainnin muutoksen pilarin suhteen. Suunnittelussa testilaitteessa painokelkka sijaitsee kiinteällä tasolla, jonka paikkaa on mahdollista mutta työlästä muuttaa. Painokelkan tasolle voisi tehdä mekanismin, joka mahdollistaa sen helpon liikuttamisen pilarin suhteen. Tämä nopeuttaisi huomattavasti testilaitteen säätöä, jos röntgenlaitteesta julkaistaan myöhemmin uusi tuoteversio, jonka pilariin kohdistama kuormitus muuttuu merkittävästi. Toinen kehityskohde liittyy alumiiniprofiilirungon ja yllä mainitun painokelkan kokoonpanoon. Rungon ja kelkan alumiiniprofiilien liitoskohdat mitattiin työntömitan avulla, mutta tämä ei takaa täysin tarkkaa kokoonpanoa. Profiileihin voisi tehdä esimerkiksi koneistuksia, jotka määräisivät täysin niiden liitoskohdat.

Lopputuloksena saatiin valmistettua luotettava ja toimiva testilaitte, johon on pienillä muutoksilla helppo lisätä tarvittavat elektroniikkakomponentit. Testilaitte todettiin käyttökelpoiseksi kokeilemalla laitteen toimintaa useammalla pilarilla. Pilarit ajettiin kappaleen 4.2 mukaisen testisuunnitelman läpi ja laitteen hyvä toistotarkkuus todettiin mittaamalla vaadittuja arvoja.

Lähteet

- 1 OP 3D™. Verkkoaineisto. Kavo Dental. <<https://www.kavo.com/dental-x-ray-machines-and-diagnostics/op-3d-extraoral-x-ray>>. Luettu 18.06.2019.
- 2 Hampaiden röntgenkuvaus. Verkkodokumentti. Amemori. <<https://fi.webdento.com/hampaiden-rontgenkuvaus/>>. Luettu 18.06.2019.
- 3 Pöntinen, Tanja & Kudjoi-Kyllönen, Suvi. 2015. Panoraamatomografia ja kartiokeilatomografia hammaskuvantamisessa - Oppimateriaali röntgenhoitajaopiskelijoille. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 4 KaVo Kerr Group Finland. Verkkoaineisto. <<https://www.kavokerr.com/fi-fi/>>. Luettu 18.06.2019.
- 5 Gray, Dave.2010. Brainwriting. <<https://gamestorming.com/brainwriting/>>. Luettu 02.07.2019.
- 6 Chang, Kuang-Hua. 2015. Decisions in Engineering Design. <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/decision-matrix>>. Luettu 29.08.2019.
- 7 SKF. 1999. Laakerikirja. Torino: Stamperia Artistica Nazionale.
- 8 Tu, Minghui. 2016. Validation and modeling of power losses of NJ 406 cylindrical roller bearings. Master of Science Thesis. KTH, Industrial Engineering and Management.
- 9 Power transmission of a belt drive. <<https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/belt-drive/power-transmission-of-a-belt-drive/>>. Luettu 21.10.2019.
- 10 Bearing force. <<https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/belt-drive/bearing-force/>>. Luettu 21.10.2019.
- 11 Aho, Kauko; Airila, Mauri; Holvio Veikko; Mantovaara, Urpo; Kivioja Seppo & Välimaa, Veikko. 1985. Koneenosien suunnittelu 3. Porvoo: WSOY.