



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Antton Stolt

# Intraoraaliröntgenlaitteen kartiosuodattimen koestusprosessin digitalisointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tutkinto-ohjelman nimi

Insinöörityö

06.10.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Antton Stolt Intraoraaliröntgenlaitteen kartiosuodattimen koestusprosessin digitalisointi xx sivua + x liitettä 25.04.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Automaatiotekniikka
Ohjaajat	Lehtori Raisa Kallio Planning and Distribution Manager Toni Hirvonen
<p>Päättötyön aiheena oli kehittää intraoraaliröntgenlaitteen kartiosuodattimen koestusprosessia. Tarkoitus oli lisätä nykyisen prosessin nopeutta, huoltovarmuutta sekä työergonomiaa vaihtamalla vanhoja manuaalisia työvaiheita sekä työlaitteita uudempiin digitaalisiin. Lisäksi työssä käsitellään Lean-ajatusmallia ja sen hyödyntämistä työssä sekä arkipäivän työelämässä.</p> <p>Työ alkoi vaatimusmäärittelyllä, jossa määritettiin vähimmäisvaatimukset lopputulokselle. Tämän jälkeen koestuslaitetta voitiin suunnitella annettujen vaatimusmääreiden mukaiseksi. Uuteen koestuslaitteeseen valittiin vanhan kuvalevyn tilalle uusi digitaalinen röntgensensori. Sopivan sensorin löydyttyä tiedettiin, mitä ohjauspiirikortteja sensori tarvitsee toimiakseen. Sensorin ohjaamiseen tarvittaviin komponentteihin ei voitu vaikuttaa. Haasteena oli saada kahden eri röntgenlaitteen komponentit toimimaan keskenään, vaikka niitä ei ollut siihen suunniteltu. Tämä aiheutti huomattavan paljon haasteita.</p> <p>Kun kommunikointi laitteiden välillä toimi, aloitettiin ensimmäiset testit, joilla määritettiin sensorin ja röntgenlaitteen säteilylähteen välinen sijoittelu sekä varmistettiin koestuslaitteen toiminta. Kun röntgenkuva saatiin näkyviin tietokoneelle, sen tiedostotyyppiä ei kuvantulkintaan käytettävä tietokoneohjelma kyennyt lukemaan. Tallennusformaatti piti kääntää RAW-muodosta TIF-muotoon.</p> <p>Kun kuvan tiedostotyyppiin muuntaminen toimii, rakennettiin laitteen ympärille lyijyllä vuoratusta vanerista kaappi, josta säteilylähteen muodostama röntgensäteily ei pääse ulkopuolelle. Kaapin valmistuttua tehtiin loppukoestukset, jotta voitiin varmistua koestuslaitteen toimivuudesta. Uusi prosessi toimi huomattavasti nopeammin kuin vanha prosessi. Vanhassa prosessissa kuvan siirtyminen tietokoneelle kesti noin puolitoista minuuttia. Uudessa prosessissa kuva siirtyi tietokoneelle noin 20 sekuntin. Uusi koestusprosessi oli vanhaa prosessia nopeampi, laatu oli vähintään yhtä hyvää, ja varaosien saanti parani huomattavasti.</p>	
Avainsanat	röntgen, hammaslääketiede, abloy, lean

Author Title Number of Pages Date	Antton Stolt Digitalisation of testing process for intraoral x-ray machine cone filters xx pages + x appendices 24. of April 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree programme in Electrical and automation engineering
Professional Major	Automation engineering
Instructors	Raisa Kallio, Senior Lecturer Toni Hirvonen, Planning and Distribution Manager
<p>The purpose of the thesis work was to develop the testing process for cone filter of intraoral x-ray machine. The requirement was to add speed, maintainability and work ergonomics by changing old manual work operations and old work tools to newer digital ones. This thesis also handles Lean-thinking and how it was used in this project and how to apply it in everyday life.</p> <p>The project started by going through the requirement specification in which the minimum requirements for the outcome were set. When the required outcome was known the new testing device could be planned. For replacing the old imaging plate, a new digital x-ray sensor was chosen to the new testing device. After finding suitable x-ray sensor, it was known what controlling units and other circuit boards the new digital x-ray sensor required to function. The challenge was how to get components from two different x-ray machines to communicate and operate together even though they never were designed to work together. Finding a way to get the components to work properly together caused a lot of difficulties.</p> <p>Eventually when communication between the components was working properly the first tests were done. By these tests the distance between x-ray sensor and the tube head were set and the basic operation of the testing device was ensured. When the testing device was able to transfer the x-ray images to the computer, the computer software used to open the x-ray images was not able to read the output file type of the images. The output file type was in RAW and had to be converted to TIF-file.</p> <p>After the output file type was converted to TIF-file, the basic operation of the testing device was completed. The tube head which creates the x-rays had to be covered inside of lead plated plywood cabinet to prevent the x-rays from reaching people around the testing device. After the plywood cabinet was done the last testing was made to fully ensure the correct functionality of the whole testing process. The new testing process was much faster than the old one. In the old process the image transferring time from the testing device to the computer took about one and half minutes. In the new testing process the time was only 20 seconds. In conclusion the new testing process was faster, the quality was at least equally good, and the amount of functioning spare parts was much higher.</p>	
Keywords	X-ray, dental medical science, abloy, lean

# Sisällysluettelo

1. Johdanto	1
2. Lean-ajattelu	2
2.1 Lean-ajattelun historiaa	2
2.2 Lean-toimintamalli	3
3. Kavo Kerr Group	12
3.1 Historia	12
3.2 Nykyhetki	12
3.3 Lean Kavo Kerr Tuusulassa	13
4. Röntgensäteily	15
4.1 Historia	15
4.2 Röntgensäteily	18
5. Röntgenlaite	19
5.1 Säteilyn muodostus	19
5.2 Säteilystä kuvaksi	23
5.2.1 Röntgenfilmi	24
5.2.2 Kuvalevy	24
5.2.3 CCD-sensori	25
5.3 Hammasröntgenlaitteet	26
5.3.1 Intraoraaliröntgenlaite	26
5.3.2 Panoraamaröntgenlaite	29
5.3.3 Kefalostaatti	31
5.3.4 Kartiokeilatietokonetomografialaite	31
6. Uusi kartiosuodattimen koestimen	33
6.1 Säteilylaki 859/2018	33
6.2 Päättötyön aihe sekä vaatimusmäärittely	36
6.3 Vanha koestusprosessi sekä -laite	36
6.4 Uusi koestusprosessi sekä -laite	39

6.5	Koestuslaitteen suunnittelu	42
6.5.1	Intraoraaliröntgenlaite	42
6.5.2	Röntgensensori ja sen hallinta	42
6.5.3	Potentiaaliero ja sen ratkaiseminen	43
6.5.4	Laitteiden välinen kommunikointi	44
6.6	Koestuslaitteen rakentaminen suunnitteluun pohjautuen	46
6.6.1	Komentojono koestuslaitteen ohjaukseen	46
6.6.2	Rajapinta röntgenlaitteiden välille	47
6.6.3	Ensimmäiset koestukset	52
6.6.4	Kuva RAW-muodosta TIFF-muotoon	53
6.6.5	Toiset koestukset	53
6.6.6	Kahdenmittaisia kartiosuodattimia	57
6.6.7	Lyijykaappi	58
6.6.8	Loppukoestus	62
6.6.9	Lean-ajattelun vaikutus koestuslaitteen toteutuksessa	63
6.6.10	Jatkokehitys	63
7.	Yhteenveto	64
	Lähteet	66

## Lyhenteet

DBS	Danaher business system. Danaher – yrityksen luoma liiketoiminnan toimintamalli.
DHR	Device history record. Laitteen historiatiedot.
keV	Kiloelektronivoltti. Käytetään kuvaamaan röntgenlaitteen putkijännitettä. Suure on suoraan verrannollinen voltteihin, jolloin $1\text{keV} = 1\text{kV}$ .
Lyijykaappi	Vanerista rakennettu kaappi, jonka seinät on vuorattu lyijylevyllä, jotta röntgensäteily ei läpäise sitä.
Putkijännite	Suurin säteilytyksen aikainen jännitetaso, huippujännite.
Putkivirta	Virran keskiarvo säteilytyksen aikana.

## 1. Johdanto

Kuinka hammasröntgenlaitteita valmistetaan? Millaisia erilaisia röntgenlaitteita on? Kuinka moderni röntgenlaitteita valmistava tehdas toimii? Mitä kaikkea mielenkiintoista röntgensäteilyn historia kätkee sisäänsä? Kuinka autovalmistaja Toyota sekä suomalainen hammasröntgenlaitteita valmistava yritys liittyvät toisiinsa? Kuinka arkea voi kehittää helpommaksi muuttamalla toimintatapoja pienin askelin kohti parempaa tulevaisuutta? Tämä päättötyö antaa vastauksen näihin kysymyksiin.

Työn tavoite oli kehittää hammasröntgenlaitteessa käytettävän röntgensäteitä suodattavan kartiosuodattimen valmistusprosessia modernimmaksi digitalisoimalla suodattimen koestusvaihe. Syy kehitystyölle löytyy Lean-ajattelumallista. Tämä ajattelumalli ohjasi kaikkea yrityksen toiminnassa. Tästä syystä päättötyössä selostetaan hyvin tarkasti, mutta kuitenkin mahdollisimman yksinkertaisesti Lean-ajattelumallin periaatteet sekä sen historian pääkohtia. Lean-ajattelumalli on saavuttanut suuren suosion varsinkin suuremmissa yrityksissä, joissa on paljon jatkuvaa kehittämistä. Voidaankin sanoa, että Lean-ajattelumalli on käsite, jonka jokainen työntekijä tulee jossain työelämän vaiheessa kohtaamaan. Työssä käydään myös läpi röntgensäteilyn historiaa sekä sen kehitysvaiheita hammasröntgentiede painopisteenä. Lisäksi työssä oli huomioitava Suomen säteilylaki. Lain eri kohtia on käytetty apuna selventämään, miksi työn eri vaiheet toteutettiin tavoilla, joilla ne on tässä työssä kuvattu.

Päättötyön teoriaosuutta kirjoitettaessa on ensin haluttu oivaltaa itse, miksi jokin asia on tai tapahtuu, kuten se on kirjassa kirjoitettu. Oivalluksen jälkeen asiat on pyritty kirjoittamaan siten, että jokainen lukija voi sen ymmärtää.

Työ rajautuu hammasröntgentieteeseen, eikä siinä käsitellä tarkasti muita röntgenlaitteita tai -tekniikkaa, jota ei hammasröntgentieteessä käytetä. Työ tehtiin yritykselle Kavo Kerr Tuusula.

## 2. Lean-ajattelu

Viime vuosina yritysmaailmassa on ollut voimakkaasti esillä Lean-toimintamalli. Monet yritykset mainostavat toimivansa Lean-henkisesti tai Lean-ajattelun mukaan. Monet yritysten johtajista käyvät erilaisilla Lean-kursseilla ja -luennoilla. Mitä on Lean? Mikä on sen historia? Kuka sen on kehittänyt? Miksi se on kehitetty? Kuinka se toimii? Miksi se on niin suuresti esillä juuri nyt? Yksinkertaisesti se on Japanissa Toyotan tehtailla 1900-luvun puolivälissä alkunsa saanut ajattelumalli Toyota Production System, jossa kaikki prosessia häiritsevä sekä muu ylimääräinen hukka tulee poistaa. Vuosien varrella siitä on kehitetty erilaisia variaatioita, mutta yleisin niistä on Lean.

Tässä päättötyössä Lean-ajattelulla oli suuri vaikutus. Yrityksessä, jolle työ tehtiin, oli Lean-ajattelu suuresti käytössä. Heille jatkuva parantaminen on yksi suurimmista tavoitteista. Tämä tavoite johtaa usein siihen, että löydetään prosesseista puutteita. Näistä puutteista halutaan eroon mahdollisimman pian, jotta työskentelystä saadaan mahdollisimman vaivatonta. Kartiosuodattimen koestusprosessista löydettiin puutteita, joista haluttiin päästä eroon. Lean-ajattelun tärkeydestä johtuen on sitä käsitelty tässä työssä laajasti.

### 2.1 Lean-ajattelun historiaa

Vaikka käsitteenä Lean-ajattelu on varsin tuore, on osa sen toimintamalleista kehitetty vuosisatojen kuluessa. 1500-luvulla Venetsiassa gondoleita valmistettiin ”liukuhihnalla” hyödyntämällä virtaavaa vettä. Gondolit lipuivat virtauksen mukana valmistuslinjaston läpi. Tämä on aikaisimpia esimerkkejä työn virtautuksesta. 1780-luvulla Ranskassa aseiteollisuuden kasvaneeseen aseiden valmistustarpeeseen kehitettiin keskenään vaihdettavia aseiden osia. 1880-luvulla Amerikassa eläinten ruhoja ryhdyttiin liikuttamaan liukuhihnalla lihanleikkaajien työpisteiden välillä. Vuonna 1902 japanilainen Sakichi Toyoda kehitti kutomakoneisiin laitteen, joka automaattisesti kuteen katketessa pysäyttää koneen. Ennen automaattista pysäytystä kudetta tarkkaili työntekijä, usein lapsi, jonka tehtävänä oli ilmoittaa kuteen katkeamisesta, ja näin estää kankaan pilaantuminen. [1, s. 11; 2, s. 7.]



Vuosien 1908 ja 1926 välillä Henry Ford kehitti autoteollisuutta voimakkaasti. Hän loi standardisoidut mitoitus, jotka mahdollistivat osien käytön ristiin. Esimerkiksi yksi rengasmalli kävi useampiin automalleihin, kun aiemmin jokaiseen malliin oli luotu oma, vain kyseiseen malliin soveltuva rengas. Lisäksi Ford kehitti virtaustuotantoa ohjaamalla koko tehtaan tahtia viimeisen työpisteen mukaan. Ford loi ”tuotantokylä” erityisille työvaiheille, kuten maalaamiselle sekä hitsaukselle. Nämä tuotantokylät mahdollistivat massatuotannon. 1930-luvulla Saksassa lentokoneiden valmistuksessa kehitettiin tahtiaika. Suurien rungon osien sekä kokonaisten runkojen liikutus kokoonpanolinjalla vaiheesta toiseen piti tapahtua samanaikaisesti. [1, s. 11; 2, s. 7.]

Vuonna 1937 Sakichi Toyodan poika Kiichiro Toyoda loi Toyota Motor Companyn. Samalla hän ideoi komponenttien toimituksen tuotantoon ”juuri ajoissa”, eli Just In Time -malli. Siihen aikaan tuotanto sekä toimitukset olivat liian epästabiliileja, jotta Just in time -malli olisi toiminut. Vasta 1950-luvulla japanilaisen Taichi Ohnon kehittäessä laatikko-ohjausjärjestelmän eli kanbanin sekä keskitetyt komponenttivarastot, supermarketit, mahdollistui Kiichiron ideoitu just in time -malli. [1, s. 11; 2, s. 8.]

1960-luvulla Kiichiro Toyodan serkku, johti Toyota Motors Companya. Hän loi ajan kuluessa uudenlaisen hallintajärjestelmän. Tällä järjestelmällä oli uusi lähestymistapa ongelmanratkaisuun, johtamiseen, tuotantoon, toimittajayhteistyöhön, tuotekehitykseen, prosessin kehitykseen sekä asiakaspalveluun. Tämä uusi hallintajärjestelmä sai nimekseen Toyota Production System, TPS. 1990-luvulla ja sen jälkeen Toyota Production Systemsistä on kirjoitettu useita menestyneitä kirjoja, joiden pohjalta Lean-toimintamalli on muovautunut ja tullut tunnetuksi. Nykyään Lean-toimintamalli on maailmanlaajuisesti satojen yritysten käytössä. [1, s. 13; 2, s. 9.]

## 2.2 Lean-toimintamalli

Lean-toimintamalli on vakiintunut lähes kaikilla toimialoilla johtavaksi tuotantoperiaatteeksi. Sen voi havaita muun muassa tuotannon organisoinnissa sekä toiminnan jatkuvana kehittämisenä. Lean-toimintamallin mukaista on tehdä laadun eteen kaikki mahdollinen siellä, missä kädet liataan ja asiakkaan saama todellinen arvo syntyy. Kehitystyön siis tulee tapahtua ongelman ilmenemispaijalla, esimerkiksi tuotantolinjalla,

eikä johdon toimistoissa näkemättä itse ongelmaa. Lean-toimintamallissa tuotteen tai palvelun laatu määritetään asiakkaan näkökulmasta. Kaikki mikä ei tuo asiakkaalle lisäarvoa jätetään pois, kun asioihin, jotka tuottavat asiakkaan haluamaa arvoa, keskitetään yrityksen voimavarat. Näin asiakkaat saavat juuri sitä, mitä he tarvitsevat laadukkaasti. [1, s. 13; 2, s. 15.]

Lean-toimintamallissa työskentelyn kehittäminen on keskeisessä osassa. Lean-toiminnan kehittäminen etenee viisikohtaisesti:

(1. Arvo) Ensin tuotteen tai palvelun arvo määritetään asiakkaan näkökulmasta. Siten määritetään se, mistä asiakas on halukas maksamaan. Samalla varmistetaan, ettei käytetä resursseja seikkoihin, joilla ei ole asiakkaalle riittävän suurta merkitystä.

(2. Arvoketju) Toisena kuvataan yrityksen arvoketju. Näin voidaan määrittää alueet, joissa asiakkaalle tärkeät arvot syntyvät. Resursseja, joilla ei voida tuottaa arvoa asiakkaalle, vähennetään tai poistetaan ja ne voidaan keskittää niille alueille, joissa arvoa tuotetaan.

(3. Virtaus) Kolmanneksi kehitetään tuotannon virtausta. Koneiden ja laitteiden sijoittelu suunnitellaan siten, että materiaali virtaa mahdollisimman saumattomasti. Laitteiden ja tuotantopisteiden välit halutaan pitää mahdollisimman lyhyinä.

(4. Imu) Neljäntenä on imuohjauksen suunnittelu. Imuohjauksessa tarvittavia tuotteita valmistetaan vain todellisen tarpeen mukaan tai kulutuksen mukaan. Imuohjauksen suurin hyöty on pienemmät varastot, jolloin resursseja ja pääomaa ei sitoudu turhaan varastoon.

(5. Pyri täydellisyyteen) Viidentenä, viimeisenä kohtana on täydellisyyteen pyrkiminen. Sen mukaan prosesseja on kehitettävä jatkuvasti paremmiksi. [1, s. 11; 3, s.8, 9.]

Sana ”hukka” on usein esillä, kun puhutaan Leanista. Hukkaa on kaikki turha, joka ei tuota arvoa yritykselle sekä asiakkaalle. Hukan poistaminen onkin tapa, jolla Lean-toimintamallissa parannetaan tuottavuutta. Yrityksen tuottavuutta voidaan siis lisätä ilman, että työtahtia on nostettava. Riittää, että tehdään työtä samalla tahdilla, mutta keskitytään vain oikeisiin asioihin. Lean-toimintamallissa on määritetty seitsemän erilaista hukkaa:

(1. Ylituotanto) Ensimmäisenä hukkana on ylituotanto. Se johtaa tuotteiden liialliseen varastointiin sekä keskeneräisiin töihin. Pääomaa ei haluta pitää kiinni varastoissa yhtään enempää, kuin on välttämätöntä. Lisäksi ylituotanto aiheuttaa helposti muita hukkia.

(2. Odottelu ja viivästyksset) Toisena hukkana on viivästyksset ja odottelu. Se, että asiakas joutuu odottamaan tuotteita tai palvelua laitehäiriöiden tai materiaalipuutteiden takia, ei tuota hänelle mitään lisäarvoa. Tämä johtaa pahimmillaan asiakkaiden menetyksiin, jolloin yrityksen tuottavuus heikkenee.

(3. Tarpeeton kuljettaminen) Tarpeeton materiaalien ja tuotteiden kuljettaminen on kolmas hukka. Usein turhat kuljetukset johtavat viivästyksiin. Pahimmillaan ne johtavat työtapaturmaan.

(4. Laatuvirheet) neljäntenä hukkana ovat laatuvirheet. Asiakas kärsii, jos laitteessa on laatuvirheitä. Laitteen valmistukseen käytetty aika ja materiaali menee hukkaan. Lisäksi yritykselle koituu lisäkustannuksia laitteen vikojen korjaamisesta.

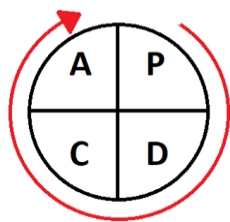
(5. Tarpeeton varastointi) Tarpeetonta varastointia tulee välttää, ja se onkin viidentenä hukkana. Tuotteiden varastointi sitoo tilaa sekä työntekijäresursseja. Nämä johtavat lisääntyviin ylläpitokustannuksiin. Lisäksi tuotteiden turha kuljettaminen varastoitavaksi kuluttaa aikaa, joka on pois arvoa lisäävästä työstä. Liiallisen varastoinnin seurauksena voi jotkin ongelmat piiloutua, jolloin niitä ei huomata ajoissa.

(6. Ylikäsittely) Tuotteiden ylikäsittely on kuudes hukka. Ylikäsittelyllä tarkoitetaan tuotteen turhan pitkälle vietyä hienosäätöä. Kaikki tuotteeseen tehtävä ylimääräinen käsittely, joka ei tuo asiakkaalle lisäarvoa, on turhaa.

(7. Tarpeeton liike työskentelyssä) Seitsemäs hukka saattaa olla hankala käsittää. Tarpeeton liike voi olla esimerkiksi pitkä välimatka kokoonpanolinjaston vaiheiden välillä. Huonosti suunniteltu työpiste aiheuttaa turhia kierto- ja kurotusliikkeitä. Pahimmillaan turhat liikkeet lisäävät työtaturmariskiä. [3, s.10, 11; 1, s. 2, 3.]

Työturvallisuus ja -ergonomia ovat lean-toimintamallissa tärkeitä. Aina toimintaa kehitettäessä otetaan huomioon työturvallisuus sekä -ergonomia. Ergonomiset ja turvalliset työskentelytilat vähentävät tapaturmariskiä, lisäävät viihtyvyyttä sekä tuottavuutta. Lean-toimintamallin mukaisilla työskentelyalueilla työkalut ovat helposti löydettävissä ja käytettävissä. Tällä vähennetään työkalujen etsimiseen kuluva aikaa sekä vähennetään työtaturmariskiä poistamalla turhia kurotus- ja kyykistysliikkeitä. Työalueen valaistuksen on oltava riittävää, jotta työskentely on mukavaa ja turvallista. Työskentelyasennon on oltava mahdollisimman ergonominen ja raskaiden esineiden nostoa on vältettävä. Nostamisen sijaan tuotteita voidaan liikuttaa keventäjällä tai nostolaitteilla. Työpiste voidaan suunnitella myös siten, että mitään ei tarvitse nostaa tai laskea, vaan tuote siirtyy saumattomasti saman korkuisten työpisteiden välillä. [3, s.12, 13]

Lean-toimintamallissa toimintaa ei kehitetä vain kerran ja tämän jälkeen lopeteta kehitystyötä. Jatkuva parantaminen, kaizen, näkyy Lean-toimintamallissa lähes kaikkialla. Kehitystyö toteutetaan pienryhmissä. Ryhmä tutustuu aiheeseen, suunnittelee ratkaisut ja toteuttaa ne itse. Ryhmä usein koostuu yrityksen eri työtehtävissä työskentelevistä henkilöistä, jotta saadaan mahdollisimman laaja ymmärrys ja samalla täysin toisistaan poikkeavia näkökulmia ongelmaan. Jatkuvaa parantamista Lean-toimintamallissa toteutetaan noudattamalla PDCA-sykliä. Lyhenne PDCA muodostuu sanoista Plan (suunnittele), Do (suorita), Check (arvioi) sekä Act (toteuta). Kuvassa 1 on esitetty PDCA-sykli visuaalisena neljään osaan jaettuna ympyränä. Jokainen kenttä väritetään, kun kentän työvaihe on suoritettu.



Kuva 1. PDCA-syklissä edetään myötäpäivään värittäen jokainen toteutettu vaihe. Näin voidaan visualisoida työnkulku.

Aluksi korvaava toimenpide suunnitellaan, jonka jälkeen suunnitellut tehtävät toteutetaan pilottihankkeena testiympäristössä. Pilottihankkeen valmistuttua arvioidaan, miten toteutettua hanketta voisi kehittää ennen sen lopullista toteuttamista kohdealueelle. Kun tarvittavat korjaavat toimenpiteet on suoritettu, lopullinen muutos toteutetaan kohdealueella. Kehitystyön valmistuttua sen vaikutuksia seurataan 90 päivän ajan. Säännöllisin väliajoin tulokset käydään läpi, jotta voidaan havaita, kuinka hyvin muutos on vaikuttanut. Jos havaitaan, että tulokset eivät riitä, voidaan kehitystä vaativille osaluueille suorittaa uusi kehitystyö PDCA-syklin mukaisesti. Lean-toimintamallissa kehitysideoiden ei tarvitse olla suuria ja mullistavia, vaan jokainen osallistuja voi lähestyä aihetta kysymällä itseltään: Miten voisin työskennellä paremmin? Mikä työntekoani häiritsee? Mitä edellisessä työvaiheessa voidaan tehdä toisin, jotta oma työni helpottuu? [1, s.14; 3, s.14, 15.]

Jotta työtapoja ja -menetelmiä voidaan kehittää, on niiden ensin oltava vakiinnutettuja. Samaa työtehtävää tehtäessä usealla eri tavalla, on riski virheille suurempi. Työn laatua sekä työturvallisuutta on vaikeampi pitää yllä työskentelymenetelmien erotessa työntekijöiden välillä. Työohjeilla voidaan ohjata työntekijät työskentelemään halutulla tavalla. Lean-toimintamallissa työohjeiden on oltava selkeitä. Niissä kuvataan kaikki työn päävaiheet sekä niihin liittyvät keskeiset turvallisuuteen ja laatuun vaikuttavat seikat. Työohjeissa käytetään paljon kuvia. Ohjeet tulee luoda sellaisiksi, että henkilö, joka ei ole työtä aiemmin tehnyt, kykenee ohjeen avulla suorittamaan työn turvallisesti, ja laatuvaatimusten mukaisesti. [1, s.115; 3, s.16, 17.]

Työn ollessa vakiinnutettua voidaan siirtyä Lean-toimintamallin seuraavaan vaiheeseen: tuotannon tasoitukseen. Tuotannon tasoituksella tarkoitetaan tuotteiden valmistamista säännöllisissä erissä kulutuksen mukaan. Eräkoot pidetään mahdollisimman pieninä.

Pienillä, tasaisesti syntyvillä erillä pyritään vähentämään turhaa varastointia sekä keskeneräisiä töitä. Tasoitetusta tuotannosta on huomattavasti hyötyä yritykselle. Työkoneiden sekä työntekijöiden kuormitus on tasaisempaa. Näin koneiden huollon ajankohdat on helpompi suunnitella etukäteen. Myös materiaalin kulumisen tasoittuu, jolloin sopivan varastomäärän ylläpitäminen helpottuu. Materiaalin kulumisen ennakkoinnin helpottuminen mahdollistaa myös pienemmän varastoinnin määrän, sillä materiaaleja ei tarvitse varastoida varmuudenvuoksi. Toimittajien ja alihankkijoiden ohjeistus ja hallinta helpottuvat, kun heiltä tarvittavien palveluiden sekä tuotteiden kulutus on helpommin arvioitavissa. Suurin haittapuoli tasoitetussa tuotannossa ovat lisääntyvät tuotevaihdot. Lisääntyvien tuotevaihtojen myötä asetussajat kasvavat. Tasoitettu tuotanto vaatii hyvin toimivat ja lyhyet asetussajat. [1, s.56; 3, s.18, 19.]

Vakiinnutettu ja tasoitettu työ mahdollistaa tuotannon virtauttamisen. Lean-toimintamallissa halutaan valmistaa tuotteet nopeasti ja vain välittömän tarpeen mukaan. Virtauksen tehokkuutta mitataan läpäisyajalla. Läpäisyajalla tarkoitetaan kalenteriaikaa, joka kuluu tuotteen valmistuksen aloittamisesta tuotteen valmistumiseen. Esimerkiksi, kun halutaan valmistaa kahdeksan tunnin työpäivän aikana kahdeksan laitetta, on yhden laitteen läpimenoaika yksi tunti. Läpimenoaika säädetään asiakastarpeen mukaan. Jotta tuotannon virtauttaminen toimii, on tuotantoprosessin oltava mahdollisimman virheetön ja varmatoiminen. Virtauttamisen kehittäminen tuokin esille usein tuotantoprosessin puutteita. Tuotannon läpäisyajan pienentäminen ei perustu siihen, että työtahtia kiristettäisiin, vaan ylimääräisten odotusaikojen poistamiseen. Virtauttamisen kehittämisellä saavutetaan lyhyet toimitussajat sekä saadaan vähennettyä varastoihin sitoutunutta pääomaa. Näin yrityksen tuottavuus kasvaa. [1, s.58; 3, s. 20, 21.]

Tuotantoa ei saada virtautettua ilman yhtä Lean-toimintamallin tunnetuinta tekniikkaa: imuohjausta. Imuohjaus perustuu osien kulutukseen. Tarvittavien osien valmistus aloitetaan impulssista, joka voi tulla joko työprosessin seuraavalta työvaiheelta, tai osaa käyttävältä osastolta. Seuraavalta työvaiheelta tuleva impulssi toimii ilmoittamalla edelliseen työvaiheeseen oman työn valmistumisesta sekä valmiudesta vastaanottaa uusi työ. Impulssina toimii usein tyhjä laatikko (Kanban) tai imuohjauskortti (JOT-kortti). Lyhenne JOT tulee sanoista Just On Time, eli juuri ajallaan. JOT-kortti määrittää valmistettavan nimikkeen sekä valmistettavan määrän. Usein kortissa on myös

merkittynä minimimäärä, jonka verran tuotetta on oltava hyllyssä, eli hälytysraja, toimittajatiedot, toimitusaika sekä tuotteen hyllypaikka. Kuvassa 2 on esimerkki toimivasta JOT-kortista.

<b>JOT-KORTTI</b>	
MUTTERI M4	
Hyllypaikka: Hylly 24-3-1	
Häly:	20 kpl
Tilausmäärä:	200 kpl
Toimittaja:	Rautakauppa
Toimitusaika:	2 työpäivää

Kuva 2. Esimerkki JOT-kortista.

Aina ei ole viisasta käyttää JOT-korttia. Tyhjentynyt laatikko on usein visuaalisesti viisaampi ratkaisu. Kun laatikko tyhjenee, se asetetaan näkyviin. Työntekijä, jonka tehtävä on täyttää laatikko, tuo tyhjän laatikon tilalle täyden ja täyttää tyhjentyneen odottamaan seuraavaa tyhjentyvää laatikkoa. Imuhjauksella voidaan pienentää varastoinnin tarvetta, selkeyttää tuotantoa ja ennen kaikkea, lyhentää tuotannon läpimenoaikaa. [3, s.22, 23]

Lean-toimintamallissa asiakkaan saaman laitteen tai palvelun laadulla on suuri merkitys. Laatua pyritäänkin jatkuvasti parantamaan. Tuotteiden ja palveluiden laadusta huolehtii jokainen työntekijä, ja laadunvarmistus ovat normaali osa työtä jokaiselle työntekijälle. Laatu poikkeamiin puututaan välittömästi niiden ilmetessä. Virheitä pyritään estämään muun muassa teknisillä menetelmillä. Esimerkiksi muotoillaan osat siten, ettei niitä voi liittää toisiinsa kuin yhdessä asennossa. Tehty työ voidaan varmistaa visuaalisesti esimerkiksi värjäämällä kiristetty pultti punaiseksi. Myös koneiden automatiikkaa hyödynnetään. Nykyään koneissa on monipuoliset virheentunnistusominaisuudet, joita hyödyntämällä voidaan tunnistaa virheitä nopeammin ja ennakoivasti. [3, s.24, 25]

Siisteys ja järjestelmällisyys on suuressa osassa japanilaista kulttuuria, eikä sen osa Lean-toimintamallissa ole yhtään sen pienempi. Useat yritykset käyttävät niin sanottua 5S-toimintamallia. 5S on yksi osa Lean-toimintamallista, ja se tulee japaninkielisistä sanoista Seiri (lajittele), Seiton (järjestä), Seiso (puhdistaj ja huolla), Seiketsu (vakiinnuta) ja Shitsuke (ylläpidä). 5S:ssä työkalut, materiaalit sekä muut tavarat järjestetään niiden tarpeellisuuden mukaan. Kaikki ylimääräinen poistetaan. Jokaiselle tarpeelliselle esineelle on järjestettävä tarkoituksenmukainen paikka, josta sitä on helppo käyttää. Jokainen tavaran säilytyspaikka on merkittävä sille kyseiselle esineelle. Näin tehtäessä on helppo tarkastaa yhdellä silmäyksellä, jos jotain puuttuu, tai jos säilytyspaikoilla on jotain sinne kuulumatonta. Koneet ja laitteet huolletaan säännöllisesti. Näin niiden käyttöikä pitenee sekä tuotteiden laatu säilyy tasaisena. Jokainen 5S:n mukainen toimenpide vakiinnutetaan päivittäiseen työntekoon. Näin työympäristö säilyy siistinä, viihtyisämpänä ja turvallisempänä. Vakiintuneita toimintatapoja ylläpidetään säännöllisillä tarkastuksilla. [1, s. 32, 33; 3, s.26, 27.]

Jotta kyetään ymmärtämään, sujuuko kaikki suunnitelmien mukaan, on tuotantoa kyettävä mittaamaan. Lean-toimintamallissa erilaiset mittarit ovat päivittäinen osa työskentelynhallintaa. Jokaisen tuotantoalueen tavoitteet sekä mittarit ovat esillä ilmoitustauluilla. Mittareita päivitetään pääsääntöisesti kerran päivässä, mutta tarpeen mukaan niitä voidaan päivittää useammin. Lean-toimintamallissa mittareihin merkitään edellisen työpäivän tilanteet, joista opittua pyritään hyödyntämään tulevaisuudessa. Kaikki havaitut virheet ja puutteet pyritään korjaamaan välittömästi. Keskeisiä Lean-toimintamallissa käytettäviä mittareita ovat tuottavuus, laatu, läpäisy aika, keskeneräinen tuotanto (KET) sekä hukka, kuten materiaali sekä aika. [3, s.28, 29]

Lean-toimintamallissa ongelmat pyritään ratkaisemaan systemaattisesti. Tavoitteena on löytää ongelman juurisyyt ja estää niiden toistuminen. Systemaattinen ratkaiseminen on tehokkain keino ymmärtää ja ratkaista ongelmia. Se kehittää osallistujien osaamista ja ongelmanratkaisukykyä. Ongelmanratkaisuprosessi dokumentoidaan, jotta tehtyjä ratkaisuja ja oivalluksia voidaan hyödyntää myöhemmin uudelleen. Tunnetuin Lean-toimintamallin ongelmanratkaisutyökaluista on kysyä viisi kertaa miksi.

Kuva 3 havainnollistaa, kuinka kysymällä viisi kertaa miksi päästään syvemmälle ongelmassa ja löydetään juurisyyt. Löytämällä juurisyyt voidaan ongelma estää



tulevaisuudessa. Systemaattinen ongelmanratkaisu onkin yksi suurimmista syistä, miksi Lean-toimintamalli on niin toimiva ja suosittu. Yrityksessä voi olla kuinka hyvä ja tuottoisa tahansa, mutta yksikään yritys ei kykene välttämään ongelmia ikuisesti. Ilman toimivaa ongelmanratkaisukykyä hyväkin yritys kärsii tai jopa kaatuu kokonaan. Lean-toimintamallissa ongelmia ratkaistaan pienryhmissä. Ryhmän koko määräytyy tarpeen mukaan. Ryhmään pyritään valitsemaan mahdollisimman monipuolisesti työntekijöitä ympäri yritystä, jotta tietotaito on mahdollisimman laajaa. Pienryhmiä käytetään ongelmanratkaisun lisäksi myös toiminnan kehityksessä, valmistusprosessin hallinnassa sekä laadunvarmistuksessa. Jotta ryhmä toimii toivotulla tavalla, odotetaan jäseniltä hyvää keskinäistä yhteistyötä. Ryhmätyöllä saavutetaan muun muassa parempaa tiedonjakoa työtehtävien tai -osastojen välillä. Lisäksi ryhmässä työskenteleminen on usein mielekkäämpää kuin yksin työskentely. [1, s. 65; 3, s.30, 31.]

Ongelma:	Valmistettessa laitetta, siitä irtosi rengas.
1. Miksi?	Renkaan pultti oli löysällä.
2. Miksi?	Pultti oli kiristetty 20 Nm:n kireyteen, vaadittavan 40 Nm:n sijaan.
3. Miksi?	Työohjeessa oli merkitty väärin vaadittava kireys.
4. Miksi?	Työohje oli vanhalle rengastyypille. Uusi rengastyypin vaatii pulstin kiristämisen 40 Nm:iin.
5. Miksi?	Tuotantoinsinööriä ei oltu informoitu muuttuneesta osasta.
Korjaava toimenpide:	Työohje päivitetään heti.

Kuva 3. Esimerkki siitä, kuinka kysymällä viisi kertaa ”miksi?” päästään pitkälle ongelmanratkaisuun.

Lean-toimintamallia voidaan hyödyntää kaikilla toimialoilla. Kuitenkin sen työkalut ja -menetelmät toimivat parhaiten kappale-tavarateollisuudessa. Lean-toimintamallissa kaikki työkalut sekä -menetelmät tukevat toisiaan. Juuri tästä syystä Lean-toimintamalli tulisi ottaa käyttöön kokonaisuutena, eikä valita vain itseään miellyttäviä osuuksia. Tärkein tavoite Lean-toimintamallissa on työntekijöiden osaamisen kehittäminen. Parantamalla työntekijöiden osaamista asiakkaat saavat laadukkaampia tuotteita ja palveluita, minkä johdosta yrityksen tuottavuus kasvaa. Kaikkien muutosten vakiinnuttaminen vaatii aikaa, eikä muutos välttämättä aina tunnu oikealta. Siksi on hyvä muistaa, että jos ongelmaan halutaan ratkaisu, mutta asiat tehdään niin kuin ennenkin, mikään ei muutu. [3, s. 34, 35]

### 3. Kavo Kerr Group

Tässä luvussa käsitellään yritystä Kavo Kerr Group sekä sitä, kuinka lean-ajatusmalli toimii yrityksessä.

#### 3.1 Historia

Vuonna 1946 suomalainen professori Yrjö Veli Paatero julkaisi ensimmäisen tutkimuksensa panoraamaröntgenkuvauksesta. Jo seuraavana vuonna hän rakensi toimivan prototyypin, Parablogafin. Panoraamaröntgenkuvassa hampaat näkyvät vierekkäin tasaisena levynä, ja koko hampaistoa voidaan tarkastella edestäpäin. Paateron tutkimusta pidetään yhtenä röntgentutkimuksen suurimpana edistysaskeleena. Vuonna 1961 julkaistiin ensimmäinen kaupallinen panoraamaröntgenlaite. Vuonna 1964 perustettiin uutta röntgenlaitetta valmistava yritys, Ruusuvaara Oy, jonka nimeksi vaihdettiin vuonna 1967 Palomex Oy. Ensimmäisen panoraamaröntgenlaitteen nimeksi annettiin ORTHOPANTOMOGRAPH™, OP1. Useiden yrityskauppojen takia vuosien 1977 ja 2009 välillä Palomex Oy:n nimi vaihteli. Lopulta Altor Equity Partnersin ostettua hammashoito-osuuden Palomex Oy:n silloiselta omistajalta, General Electriciltä, tuli yritykselle nimeksi Palodex Group Oy. Vuonna 2009 amerikkalainen yritys Danaher Corporation osti Palodex Group Oy:n. Vuonna 2019 perustettiin Envista Holdings Corporation, joka irtosi Danaher Corporationin omistuksesta pörssiin omaksi yritykseksi. Kavo Kerr Group siirtyi samalla Envista Holdings Corporationin omistukseen. [4]

#### 3.2 Nykyhetki

Kavo Kerr Group tarjoaa hammaslääkäreiden tarvitsemia tuotteita ja palveluita. Tehtaita on muun muassa Suomessa, Kiinassa, USA:ssa sekä Saksassa. Suomessa valmistetaan hammasröntgenlaitteita. Tehdas sijaitsee Tuusulassa. Kavo Kerr Tuusula on osa Kavo Kerr Group-konsernia. Kavo Kerr Tuusula työllisti vuonna 2018 438 työntekijää. Yrityksen liikevaihto oli 144,9 miljoonaa euroa ja tilikauden tulos 14,5 miljoonaa euroa. Tuusulassa valmistetaan valtaosa Kavo Kerr Groupin kuvantamislaitteista. Valmistettavia röntgenkuvantamislaitteita on neljä:

- OP2D:llä voidaan kuvata panoraamakuvia.
- OP3D:lla ja OP3D Pro:lla voidaan kuvata cephalo-, panoraama- sekä 3D-kuvia.
- Focus on intraoraaliröntgenlaite.

### 3.3 Lean Kavon Kerrin Tuusulassa

Kavo Kerr Tuusula on Suomen johtavia Lean-yrityksiä. Monet yritykset käyvät siellä tutustumassa ja oppimassa, kuinka Lean-toimintamallilla luodaan hyviä tuloksia. Tuusulassa Lean näkyy kaikkialla tehtaalla. Käytävillä ja kokoonpanolinjoilla on paljon valkotauluja päivittäisen, viikoittaisen sekä kuukausittaisen työn hallitsemiseen, raportointiin sekä visuaaliseen esittämiseen. Yrityksen tulevaisuuden tavoitteet ovat jokaisen työntekijän nähtävillä ja niistä kerrotaan avoimesti. Tehdasta kehitetään aktiivisesti. Ei ole sellaista kuukautta, etteikö jollain osastolla tapahtuisi isoa tai pientä kehitystyötä. Kokoonpanolinjat ja työpisteet luodaan itse kunkin työn vaatimusten mukaisesti. Harvoin tilataan valmiita ratkaisuita, sillä niiden kehittäminen ja muokkaaminen on haastavampaa. Työpisteitä kehitetäänkin Tuusulassa usein. Niiden järjestystä ja sijaintia voidaan muuttaa, jos kehitys sitä vaatii.

Työpäivä aloitetaan käymällä läpi edellinen päivä osaston työntekijöiden kanssa. Määritetyt henkilöt raportoivat esimiehelle vastuualueensa ja merkitsevät lukemat valkotaululle kaikkien nähtäväksi. Lopuksi käydään läpi kuluvan päivän tavoitteet. Kun kaikki vastuualueet on esitelty esimiehelle, on hänellä koko osaston kattava tilannetieto edellisen päivän osalta. Tämän jälkeen osastoiden esimiehet kokoontuvat yhteen heidän esimiehen kanssa ja raportoivat hänelle oman osastonsa edellisen päivän lukemat, poikkeamat sekä muut tarvittavat tiedot. Näin koko tehtaan tilannekuva edellisen päivän osalta muodostuu ja kulkeutuu johtoryhmälle asti. Kun kaikki tapahtuu järjestelmällisesti ja kootusti, on helpompi johtaa ja säilyttää tilannetietoisuus korkealla tasolla.

Tehtaalla jokaisella työkalulla on sille määritetty paikka. Käytävät on merkitty erivärisillä teipeillä ja kaikille laitteille on lattiaan merkityt paikat. Toimistoissa on hyvin siistiä, eikä hyllyillä ja pöytätasolla juurikaan loju mitään ylimääräistä sinne kuulumatonta tavaraa.

Lean-ajattelun avulla Tuusulaan on onnistuttu luomaan hyvin viihtyisä työympäristö, jonka kehittäminen paremmaksi jatkuu myös tulevaisuudessa.

## 4. Röntgensäteily

### 4.1 Historia

Wilhelm Conrad Röntgen syntyi Saksassa 27.3.1845 ja kuoli 10.2.1923. Marraskuussa 1895 tutkiessaan katodisäteitä hän huomasi uudenlaisen säteilyn aiheuttaman fluoresenssi-ilmiön paperilevyllä, joka oli käsitelty ultraviolettissäteilyn havaitsemiseen tarkoitetulla loisteaineella. Tutkiessaan ilmiötä hän huomasi, että säteilylähteen, ja paperilevyn väliin asetetut eri paksuiset esineet jättivät toisistaan läpinäkyvyydeltään poikkeavia jälkiä. Pidettyään vaimonsa kättä säteilylähteen ja paperilevyn välillä hetken aikaa, ilmestyi paperilevyllä käden luiden muodostamat varjot. Tehtyään lisätutkimuksia Röntgen osoitti säteiden muodostuvan katodisäteiden osuessa aineelliseen objektiin. Hän julkaisi havaintonsa 28.12.1895 ja kutsui löytämiään säteitä X-säteiksi. Tieto uusista säteistä levisi maailmalle nopeasti. Jo seuraavana vuonna monissa maissa otettiin röntgenkuvia ihmisistä ja eläimistä. [5, s. 15, 16; 6]



Kuva 4. Wilhelm Conrad Röntgen [7]

Ensimmäisten röntgenlaitteiden teho nykyaikaisiin laitteisiin verrattuna oli heikkoa ja valotusajat pidempiä. Esimerkiksi Prahassa vuonna 1896 potilaan nielaisema naula paikannettiin röntgenkuvalla. Kuvan valottaminen kesti noin 90 minuuttia. Pitkistä valotusajoista ja säteiden vaarojen tiedostamattomuudesta johtuen potilaiden säteilyannokset saattoivat olla tuhatkertaisia nykyisiin verrattuna. [5, s. 15,]

Ruoansulatuskanavan röntgenkuvaus tehtiin ensimmäisen kerran vuonna 1896. Angiografia, eli raajojen verisuonten varjoainekuvaus, tehtiin elävälle potilaalle ensimmäisen kerran USA:ssa vuonna 1924. Kahta vuotta myöhemmin vuonna 1926 Portugalissa kuvattiin ensimmäisen kerran kallon sisäisiä valtimoita. Alkuaikoina verisuonten kuvaamisessa käytetyt varjoaineet olivat hyvin toksisia, mikä aiheutti useita kuolemia. Nykyään varjoaineena käytetään jodipitoisia aineita, jotka ovat ei-ionimuotoisia. Nämä jodipitoiset varjoaineet ovat vähemmän toksisia ja nykyään valtimoiden varjoainekuvauksissa esiintyy komplikaatiota hyvin harvoin. [5, s. 17]

Tietokonetomografialaitteen, eli TT-laitteen, tai englanniksi CT-laitteen, ensimmäinen prototyyppi valmistui vuonna 1972. Kaupallinen versio laitteesta julkaistiin seuraavana vuonna (1973). Tietokonetomografiassa kuvat ovat poikkisuuntaisia leikkeitä. Potilas makaa tutkimuspöydällä, joka ajetaan laitteen kuvausaukkoon. Kuvausaukon toisella puolella on röntgenputki ja toisella puolella kohtisuorassa röntgenputkeen nähden on röntgensäteitä tunnistava sensori. Röntgenputki sekä -sensori pyörähtävät kuvattavan potilaan ympäri kuvaten ohuen siivun kerrallaan. Tietokone analysoi säteilyn vaimenemisen, ja muodostaa kerroksittaisia leikekuvia. Tietokonetomografiaa pidetään suurimpana radiologisena edistysaskeleena röntgensäteiden löytämisen jälkeen. Kuvassa 5 on GE Healthcaren valmistama LightSpeed tietokonetomografialaite. [5, s. 18, 68]



Kuva 5. Moderni TT-laite: GE LightSpeed [8]

## 4.2 Röntgensäteily

Röntgensäteily on sähkömagneettista säteilyä. Sen aallonpituus vaihtelee noin 0,01 ja 10 nanometrin välillä. Ihmisen havaitseman valon aallonpituus vaihtelee noin 400 ja 700 nanometrin välillä. Röntgensäde on huomattavasti näkyvää valoa lyhytaaltoisempaa. Se eroaa pitkäaaltoisemmasta sähkömagneettisesta säteilystä fysikaalisilta ominaisuuksiltaan huomattavasti. Kuten säteilyturvakeskuksen kirjassa *Säteilyn käyttö*, sivulla 26 (2004) sanotaan:

”Kvanttimekaniikan mukaan kaikilla hiukkasilla on sekä hiukkas-, että aalto-ominaisuuksia. Tämä ilmiö on erityisen selvä fotoneilla. Kun fotonin energia on pieni, kuten radiotaajuisella säteilyllä, sen aalto-ominaisuudet dominoivat. Kun fotonin energia on suuri, sen hiukkasominaisuudet korostuvat. Röntgensäteilyn kvanttienergiat ovat niin suuria, että röntgendiagnostiikan fysiikan ymmärtämiseksi riittää yleensä ajatella röntgensäteilyn koostuvan yksittäisistä hiukkaista, fotoneista.” [5, s. 26]

Röntgensäteily on helpompi käsittää fotoneina, jotka liikkuvat suoraviivaisesti, kukin omaan suuntaansa. Liikkuessaan fotonit joutuvat vuorovaikutuksiin kohtaamiensa aineiden kanssa. Yleisimpiä vuorovaikutustapoja on kolme: koherentti sironta, epäkoherentti sironta sekä fotosähköinen absorptio. Koherenttia sirontaa kutsutaan myös Rayleighin sironnaksi. Siinä fotoni siroaa, eli kimpoaa esimerkiksi molekyylistä tai atomin elektroniverhosta siten, että fotonin suunta sekä energia säilyvät lähes muuttumattomina. Epäkoherenttia sirontaa kutsutaan myös Comptonin sironnaksi. Siinä fotoni siroaa vapaasta elektronista, ja fotonin energia sekä suunta muuttuvat. Comptonin sironta on pehmytkudoksissa merkittävin sirontatyyppi, kun kvanttienergiat ylittävät 30 keV, eli kiloelektronivolttia. Kolmas vuorovaikutustyyppi on fotosähköinen absorptio. Siinä fotoni ei enää kimpoa, vaan se häviää, ja luovuttaa energiansa elektronille. Fotosähköistä absorptiota tapahtuu alkuaineissa, joiden järjestysluku on korkeampi kuten luussa. Röntgendiagnostiikassa fotosähköistä absorptiota hyödynnetään esimerkiksi, kun säteily halutaan rajata vain tietylle alueelle. Pääsääntöisesti rajaus toteutetaan lyijylevyllä, joka absorptoi säteilyn, eikä päästä sitä lävitseen. [5, s. 26]

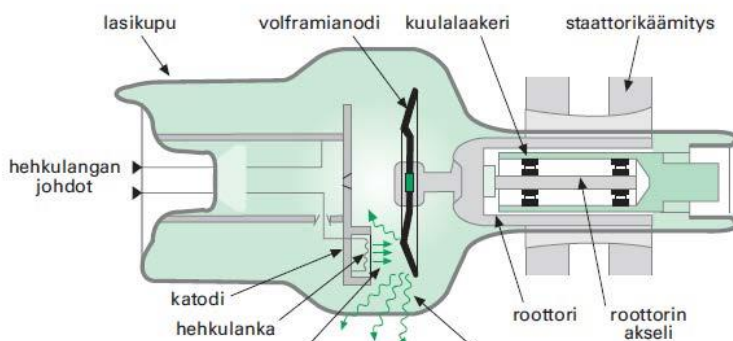


## 5. Röntgenlaite

Tässä luvussa käsitellään röntgenlaitteita, niiden toimintaa, rakennetta sekä sitä, kuinka röntgensäteilyä muodostetaan.

### 5.1 Säteilyn muodostus

Röntgenlaitteissa säteilyä halutaan muodostaa haluttu määrä hallitusti ja turvallisesti. Tähän tarvitaan pääasiassa röntgenputkea sekä röntgengeneraattoria. Röntgenputki on pääsääntöisesti lasista valmistettu putki, jonka sisällä on katodi ja anodi. Röntgenputken katodina toimii hehkulanka, joka kuumentuessaan emittoi, eli säteilee elektroneja. Katodin lämpötilaa voidaan säätää sähkövirralla eli hehkuvirralla. Hehkuvirta muodostetaan röntgengeneraattorilla. Katodin lämpötilaa säätämällä kontrolloidaan siitä vapautuvien elektronien määrää. Hieman ennen kuvan ottamista röntgengeneraattori asettaa hehkuvirran haluttuun arvoon, ja siten katodin lämpötilan oikeaksi. Tätä toimenpidettä kutsutaan esihehkuksi. Kuvassa 6 on esitelty röntgenputken yksinkertainen rakenne.



Kuva 6. Röntgenputki [5, s. 32]

Röntgenputken anodi on viistopintainen lautanen. Anodiin kohdistuu suuri lämpötila ja tästä syystä se on usein valmistettu volframista sen korkean sulamispisteen takia (3 410 °C). Kuvauksen aikana anodilautanen pyörii, jolloin säteily ei kohdistu vain yhteen kohtaan, jolloin anodi ei kuumene liikaa ja voidaan käyttää suurempia jännitteitä. Tavallisesti röntgendiagnostiikassa käytetään noin 25 – 150 keV:n jännitettä.

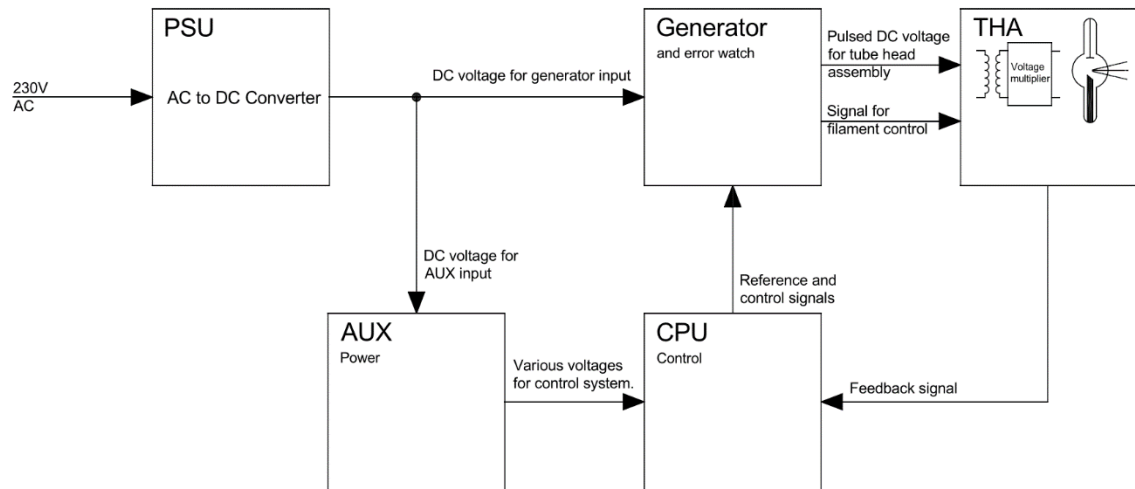
Pienitehoisissa röntgenlaitteissa, kuten hammasröntgenlaitteissa anodi voi myös olla pyörimätön, eli kiinteä.

Kytkemällä anodin ja katodin välille suurjännite eli putkijännite saadaan katodilta emittoituvat elektronit vedettyä suurella nopeudella päin anodia. Elektronit osuvat anodiin noin 0,3-0,6 kertaisella valonnopeudella (eli noin 323 775 800 km/h - 647 551 700 km/h). Elektronien nopeuteen vaikuttaa käytetty putkijännite. Röntgenputkessa elektroneille muodostuva liike-energia on suoraan verrannollinen käytettyyn jännitteeseen. Tätä jännitettä kutsutaan putkijännitteeksi. Esimerkiksi 70 kV:n putkijännite antaa elektroneille liike-energiaksi 70 keV, eli kiloelektronivoltia. Elektronien törmätessä anodiin ne menettävät nopeasti liike-energiansa. Tämä tapahtuu anodin pinnalla vain muutaman tuhannes- tai sadasosamillimetrin matkalla. Elektronien hidastuessa ne vuorovaikuttavat anodin atomien kanssa ja muodostavat röntgensäteilyä. Kuitenkin vain noin yksi prosentti liike-energiasta muuttuu röntgensäteilyksi. Suurin osa energiasta vapautuu lämpönä. Syntyvä röntgensäteily voidaan jakaa syntytapansa mukaan kahteen osaan: jarrutussäteilyyn ja karakteristiseen säteilyyn. Jarrutussäteilyä muodostuu elektronien liike-energian pienentyessä nopeasti. Karakteristista säteilyä syntyy, kun anodin atomien elektroniverhoon syntyneet viritystilat purkautuvat. [5, s. 33]

Röntgenputken sisällä on tyhjiö, joka suojaa katodia palamiselta sekä mahdollistaa elektroneille esteettömän liikkeen katodilta anodille. Röntgenputken ympärillä on öljyllä täytetty suojavaippa. Öljy toimii sähköisenä eristeenä ja johtaa lämpöä pois röntgenputkesta muihin rakenteisiin. Suojavaippa on rakennettu kokonaan lyijystä tai sen pinta on lyijytettyä. Näin anodilta muodostuva röntgensäteily voidaan rajoittaa vain haluttuun suuntaan.

Jotta röntgenputkelle saadaan muodostettua jännite, tarvitaan röntgengeneraattoria. Röntgengeneraattorilla on monia tehtäviä röntgenlaitteen sekä röntgensäteilyn hallinnassa. Sen tehtävänä on muun muassa muodostaa röntgenputkelle tarvittava teho, huolehtia kuvaukseen liittyviä ajoituksia, valvoa laitteiden toimintaa, kytkeä hehkuvirta oikea-aikaisesti, käynnistää anodilautasen pyörimisen ajoissa ennen suurjännitteen kytkemistä, ohjata kuvaus- ja läpivalaisulaitteita ja kompensoida verkkojännitteen vaihtelua.

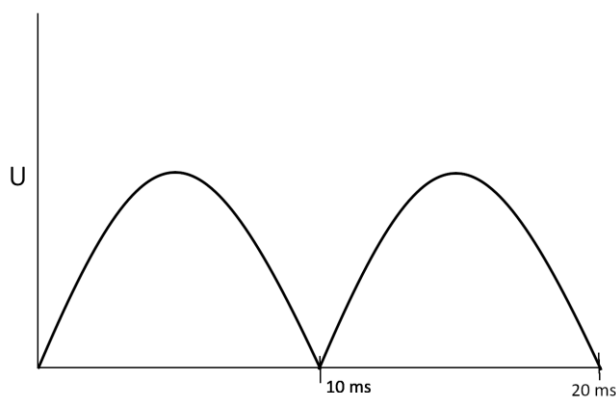
Suurjännitteen generaattori voi muodostaa yksi- tai kolmivaiheisesta verkkojännitteestä. Röntgengeneraattorin toimintaa kuvaavassa esimerkissä (kuva 7) käytetyt voltti- ja muut arvot ovat vain viitteellisiä.



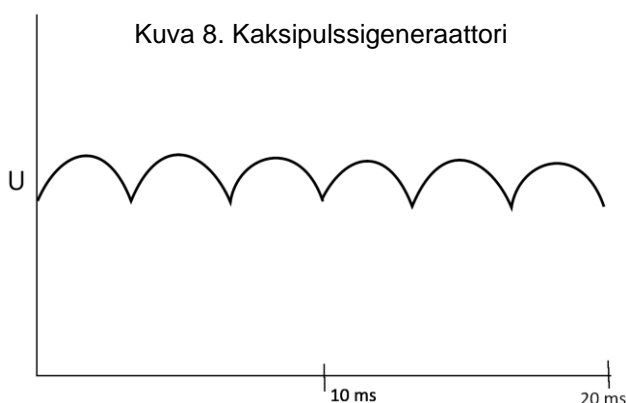
Kuva 7. Röntgengeneraattorin toimintakaavio

Röntgengeneraattorille kytketään 90-240 voltin verkkojännite, jonka virtalähde (kuvassa 7: PSU) muuntaa vaihtojännitteestä tasajännitteeksi, jonka jälkeen jännite nostetaan 360 volttiin. Tämän jälkeen 360 voltin tasajännite ohjataan kahteen pisteeseen: apuvirtalähteelle (kuvassa 7: AUX power) sekä generaattorille (kuvassa 7: generator and error watch). Apuvirtalähde muodostaa 360 voltin tasajännitteestä röntgengeneraattorin ohjaamiseen tarpeelliset 0 – 24 voltin apujännitteet (kuvassa 6: Various voltages for control system). Nämä apujännitteet ohjataan prosessorille (kuvassa 7: CPU control). Prosessori ohjaa generaattorin muodostamaa jännitettä referenssisignaalin avulla (kuvassa 7: Reference and control signals). Generaattori pulssittaa tasajännitteen referenssisignaalin mukaan, ja pulssitettu jännite ohjataan putkipään (kuvassa 6: THA) muuntajan ensiökäämille. Muuntaja nostaa toisiokäämillä jännitettä korkeammaksi, jonka jälkeen jännitteen tasoa vielä nostetaan jännitteenkertojalla (kuvassa 7: Voltage multiplier.) lopulliseen haluttuun tasoon. Tämän jälkeen jännite ohjataan röntgenputken katodin ja anodin välille. Tätä jännitettä kutsutaan putkijännitteeksi. Generaattori syöttää myös röntgenputkelle tarvittavan referenssisignaalin, jolla kontrolloidaan röntgenputken katodin hehkulangan esihehkua. Putkipää kertoo prosessorille palautesignaalin muodossa (kuvassa 7: Feedback signal) sen todellisen jännitetason. Tämän

palautesignaalin avulla prosessori säätää generaattorille syötettävää referenssisignaalia siten, että putkijännite pysyy halutussa arvossa koko valotuksen ajan. Lisäksi generaattori huolehtii turvallisuudesta. Se esimerkiksi katkaisee jännitteen syötön, jos referenssisignaali ja palautesignaali eroavat liaksi toisistaan tai jännitteen syöttö putkipäälle on päällä liian kauan.



Kuva 8. Kaksipulssigeneraattori



Kuva 9. Kuusipulssigeneraattori

Röntgengeneraattorit voivat käyttää sekä yksi- että kolmivaiheista verkkojännitettä. Suuritehoisemmat röntgenlaitteet käyttävät pääsääntöisesti kolmivaiheista jännitettä. Hammasröntgenlaitteiden tehot ovat niin matalia, että niissä voidaan käyttää yksivaiheista jännitettä. Generaattorit voidaan luokitella niiden pulssitaajuuksien mukaan. Luokittelu tapahtuu sen mukaan, montako positiivista suurjännitepulssia niistä saadaan yhden 20 millisekuntin mittaisen verkkojännitejakson aikana. Pääsääntöisiä generaattorityyppejä ovat muun muassa yksi-, kaksi-, kuusi-, kaksitoista- sekä monipulssigeneraattorit. Lisäksi on olemassa tasajännitegeneraattori, jossa pulssitusta

ei tapahdu ollenkaan. Kuvassa 8 ja 9 on havainnollistettu kaksi- ja kuusipulssigeneraattorin pulssien aaltokuvioista yhden 20 ms:n jaksolta. [5, s. 36]

Pienitehoisissa yksivaiheista verkkojännitettä käyttävissä röntgenlaitteissa on ennen käytetty yksi- sekä kaksipulssigeneraattoreita. Nykyään niissä pääsääntöisesti käytetään monipulssigeneraattoreita, joissa suurjännite muodostetaan käyttämällä taajuusmuuttajatekniikkaa. Monipulssigeneraattorit vastaavat aaltomääriltään kuusi-kaksitoistapulssigeneraattoreita. Yksi- ja kaksipulssigeneraattoreiden heikkous on niiden huono säädettävyys sekä epätarkkuus. Tämänlaisen generaattorin lyhin valotusaika on yhden aallon pituus eli 10 ms. Kuitenkaan valotusta ei synny kuin vain noin viiden millisekuntin aikana jännitteen ollessa riittävän korkealla. Tämä luo epävarmuutta säteilymääriin kuvattaessa hyvin lyhyillä valotusajoilla. Lisäksi uudet monipulssigeneraattorit ovat huomattavasti pienempiä, jolloin laitteista voidaan tehdä ergonomisempia. [5, s. 37]

Suuritehoisissa röntgenlaitteissa kolmivaiheista verkkojännitettä käyttämällä voidaan käyttää kuusi- tai kaksitoistapulssigeneraattoreita. Lisäksi kaksitoistapulssigeneraattorista voidaan elektronisilla komponenteilla muokata tasajännitegeneraattori. Se tosin on monimutkainen ja kallis ratkaisu, eivätkä tasajännitegeneraattorit ole kovinkaan yleisiä. [5, s. 37]

## 5.2 Säteilystä kuvaksi

Edellä käsiteltiin röntgensäteilyn muodostamiselle kahta kriittistä komponenttia, röntgenputkea sekä -generaattoria. Säteily on sen muodostamisen jälkeen kyettävä taltioimaan ja muuntamaan ihmiselle luettavaan muotoon. Säteilyn taltiointi tapahtuu asettamalla kuvattavan kohteen taakse röntgensäteilyyn reagoiva kuvareseptori, johon absorboitunut säteily voidaan muuntaa ihmiselle luettavaan muotoon. Yleisimpiä menetelmiä ovat röntgenfilmi, kuvalevy sekä röntgensensori.

### 5.2.1 Röntgenfilmi

Röntgenfilmi oli pitkään yleisimmin käytetty kuvareseptori. Röntgenfilmi kuitenkin reagoi vain näkyvään valoon sekä ultraviolettivaloon, eikä röntgensäteily ole sellaista. Näin ollen röntgensäteily täytyy muuttaa sopivaan muotoon, jotta se voidaan tallentaa filmille. Tämä tapahtuu asettamalla röntgenfilmi kasettiin, jossa se puristuu tiukasti kahden vahvistuslevyn väliin. Vahvistuslevyjen materiaali absorboi suurimman osan röntgensäteilystä. Osa absorboidusta säteilystä vapautuu joko näkyvänä valona tai ultraviolettivalona, joka muodostaa röntgenfilmille latentin kuvan, eli piilevän kuvan, joka ei näy ennen sen kehittämistä. Kehittämisen täytyy tapahtua täysin pimeässä tilassa, sillä filmin pienikin altistuminen valolle pilaa otoksen täysin. Alussa filmin kehitys tapahtui pimiössä eli pimeässä huoneessa. Filmi poistettiin kasetista, jonka jälkeen se käsiteltiin erilaisilla kemikaaleilla, jolloin filmille muodostunut latentti kuva muuttui näkyväksi. Myöhemmin kehitettiin filminkehityskone, joka automaattisesti kehitti kuvan. Kone sääteli automaattisesti tarvittavat lämpötilat, kemikaalisuhteet sekä poisti filmin kasetista. Näin voitiin luopua pimiöistä. Kehittämisen jälkeen filmi ei enää reagoi valoon. Näin kuvaa voidaan tutkia missä vain. Kuvattu kohde näkyy kuvassa tummempana kohtana, jolloin röntgenkuvaa voitiin tutkia kirkasta valoa vasten. Nykyään röntgenfilmin käyttö on lopetettu. [5, s. 52, 53, 54]

### 5.2.2 Kuvalevy

Kuvalevy on 1980-luvulla röntgenfilmin tilalle kehitetty levy, jonka avulla voidaan muuttaa röntgenkuva digitaaliseen muotoon. Kuvalevy voi olla minkä kokoinen tahansa kuvattavan kohteen koosta riippuen. Hammasröntgenkuvantamisessa käytetään noin 20 mm x 30 mm – 50 mm x 50 mm kokoisia kuvalevyjä. Kuten röntgenfilmikin kuvalevy asetetaan kuvattavan kohteen taakse. Kuvalevy absorboi siihen osuvia röntgensäteitä. Absorboituessaan säteet muodostavat kuvalevyn pinnalle metastabiileja viritystiloja. Kuvan muuttamiseksi kuvalevyltä tietokoneelle käytetään kuvanlukulaitetta. Kuvanlukulaite skannaa kuvalevyn tehokkaalla punaisella laserilla. Kuvalevy jaetaan mittauspisteisiin eli pikseleihin. Kuvanlukulaite pyyhkäisee jokaisen mittauspisteen, jolloin pisteeseen varautunut metastabiili viritystila vapautuu punaista laservaloa lyhyempänä sinisenä valona. Mitä enemmän kuvalevyn pisteeseen on absorboitunut röntgensäteilyä, sitä enemmän sinistä valoa muodostuu. Mittaamalla tämän sinisen

valon intensiteetti saadaan pikselille numeerinen arvo. Digitaalisen kuvan pikseli saa tummuuden mitatun numeerisen arvon mukaan. Sama toistuu kuvalevyn jokaisessa mittauspisteessä, jolloin digitaalisen kuvan jokainen pikseli saa oman tummuusarvon. Kuvalevyn mittaamisen jälkeen kuvanlukijalaite tyhjentää sen voimakkaalla valolla. Kuvalevyä ei myöskään saa altistaa valolle kuvan ottamisen sekä lukemisen välillä, jotta siihen muodostuneet metastabiilit tilat eivät vapaudu liian aikaisin. Kuvalevyä voidaan käyttää useita kertoja uudelleen. Nykyään digitaaliset röntgensensorit ovat syrjäyttäneet kuvalevyt, ja niiden käyttö muualla kuin hammasröntgenkuvantamisessa on todella harvinaista.

### 5.2.3 CCD-sensori

Moderneissa röntgenlaitteissa tietokone on yhdistettynä suoraan röntgenlaitteeseen, jolloin ylimääräiset kuvankehittimet, röntgenfilmit sekä kuvalevyt voidaan jättää pois. Tällöin kuva siirtyy huomattavasti nopeammin tietokoneelle, eikä ylimääräisiä hajoavia laitteita tarvita. Röntgendetektorina toimii CCD-sensori (engl. Charge-Coupled Device). CCD-sensorin kehittivät kanadalainen fyysikko Willard Sterling Boyle sekä amerikkalainen fyysikko George Elwood Smith vuonna 1969. CCD-sensorin kehittämisestä heille myönnettiin Nobelin fysiikanpalkinto vuonna 2009. [9, 10]

CCD-sensorin pinnassa on pieniä kondensaattoreita, jotka reagoivat röntgensäteilyyn. Jokaiseen kondensaattoriin syntyy sähkövaraus, jonka määrä riippuu siihen osuvaan säteilyn intensiteetistä. Kondensaattoreiden varaus luetaan yksi kerrallaan. Varauksen mukaan jokainen pikseli saa varausta vastaavan tummuusarvon, ja kuva muodostuu näytölle. Toimintaidealtaan CCD-sensori vastaa tavallista röntgenkuvalevyä. Kuitenkaan CCD-sensorin tietoa ei tarvitse lukea erillisellä ulkoisella laitteella, vaan tieto muunnetaan kuvaksi tietokoneohjelman avulla.

CCD-sensorin koko ei ole rajattu. Pienimmät sensorit korvaavat intraoraaliröntgenkuvauksessa käytettävät suuhun mahtuvat kuvalevyt. Hammasröntgenkuvauksessa käytetään suurimmillaan sensoria, jolla voidaan kuvata koko kallon 3D-röntgenkuva. CCD-sensorin suurin etu muihin röntgendetektoreihin on mahdollisuus lukea kuvan tietoja kuvauksen aikana. Millään muulla detektorilla ei voi kuvata 3D-kuvaa.

### 5.3 Hammasröntgenlaitteet

Pään alueen ja etenkin hampaiston kuvantamisessa käytetään joko panoraamaröntgenlaitetta, kefalostaattia, kartiokeilatietokonetomografialaitetta tai intraoraaliröntgenlaitetta. Intraoraaliröntgenlaitteessa reseptori asetetaan potilaan suuhun. Tätä kuvaa sana "intra". Intraoraalilaitteella otetaan pääsääntöisesti kuvia maksimissaan noin kolmesta hampaasta kerrallaan. Sekä panoraamaröntgenlaitteessa että kefalostaatissa reseptori sijaitsee potilaan ulkopuolella. Panoraamalaitteella voidaan kuvata koko ihmisen hampaisto yhteen kuvaan. Kefalostaatilla kuvataan kallosta sivuttainen kuva. Kaikista mainituista laitteista uusin on kartiokeilatietokonetomografialaite. Sillä voidaan luoda täysin kolmiulotteinen kuva pään alueesta. Jokaiselle röntgenlaitteelle on niille tarkoin määritetyt käyttökohteet. Mitään ei saa kuvata väärällä laitteella, eikä varsinkaan turhaan. Potilaan saama säteilyannos on minimoitava. Säteilyä on käytettävä niin vähän kuin mahdollista, mutta silti täytyy saavuttaa tarvittava kuvanlaatu. Tämän takia esimerkiksi panoraamaröntgenlaitteella ei kuvata vain yhtä hammasta, vaikka se olisikin helpoin ratkaisu. Hammasröntgenlaitteet järjestyksessä säderasituksen mukaan vähiten rasittavasta eniten rasittavaan: 1. intraoraaliröntgenlaite, 2. kefalostaatti, 3. panoraamaröntgenlaite, 4. kartiokeilatietokonetomografialaite.

#### 5.3.1 Intraoraaliröntgenlaite

Intraoraaliröntgenlaitteella voidaan kuvata maksimissaan noin kolme hammasta kerrallaan. Se ei tarvitse erillistä röntgenkuvaustilaa, vaan on usein sijoitettuna hammaslääkäriin hoitotuolin viereen. Hammaslääkärit käyttävät intraoraaliröntgenlaitetta päivittäisessä työssään. Vuosittain Suomessa otetaan noin 2 500 000 intraoraaliröntgenkuvaa, mikä tekee siitä yleisimmän röntgenkuvatyyppin. Laitteen pääkäyttökohde on ennakoivassa hammashoidossa. Hammaslääkäri voi tarkastaa haluamansa hammasvälit reikien sekä ohentuneen kiilteen varalta. Ilman röntgenlaitetta näiden ajoissa havaitseminen olisi mahdotonta. Hammaslääkärit käyttävät intraoraaliröntgenlaitetta usein myös juurihoidossa, jolloin kuvattavia hampaita on usein





Kuva 10. Kavo Focus intraoraaliröntgenlaitteen säteilylähde, sekä irrotettava säteilynrajain. [11]

vain yksi. Ennen viisaudenhampaan poistoa intraoraaliröntgenlaitteella tarkastetaan hampaan juurien suunta sekä muoto, jotta viisaudenhampaan poisto olisi helpompaa.

Intraoraaliröntgenlaite koostuu nivelletystä varresta, säteilylähteestä sekä vaihdettavasta säteilynrajaimesta, kartiosuodattimesta. Varren avulla säteilylähde voidaan liikuttaa vapaasti haluttuun kohtaan ilman, että potilaan tarvitsee liikkua tai poistua kuvauksen ajaksi hoitotuolista. Säteilylähde on sijoitettuna lyijyllä vuorattuun koteloon, joka rajaa säteilyn haluttuun suuntaan. Tätä kutsutaan primäärirajaukseksi. Sen päätarkoituksena on suodattaa muualle kuin haluttuun suuntaan suuntautuva säteily pois, jolloin laitetta käyttävä henkilö ei altistu röntgensäteilylle. Kuvassa 10 näkyvään intraoraaliröntgenlaitteeseen on kiinnitetty pyöreä kartiosuodatin. Röntgenlaitteen kotelon sisällä on säteilylähde, eli putkipää lyijyllä vuoratussa kotelossa.

Primäärirajauksen jälkeen säteily kohdistetaan vielä tarkemmin rajaamalla se uudelleen kartiosuodattimella. Tämä päättötyö käsittelee juuri näiden kartiosuodattimien koestusprosessia ja sen kehittämistä. Kartiosuodattimen muodostamaa rajausta kutsutaan sekundäärirajaukseksi. Sekundäärirajauksen tarkoitus on kohdistaa röntgensäteet haluttuun kohtaan ja suodattaa kaikki muu pois. Tästä syystä kartiosuodattimia on eri kokoisia, eri muotoisia ja eri mittaisia. Yleisimmin kartiosuodattimia valmistetaan noin 10 senttimetrin sekä 20 senttimetrin mittaisina. Suodattimen pituudesta riippumatta niiden ulkohalkaisija on noin 6 cm. Kartiosuodatin koostuu pääosin kolmesta osasta: rungosta, suodattimesta sekä kartion päästä. Runko on alumiinin sekä lyijyn sekoitetta, jotta röntgensäteet eivät läpäise sen sivuja. Rungon sisällä suodattimena toimii lyijylevy, jossa on joko suorakulmion tai ympyrän muotoinen

aukko. Suodattimen aukon koko vaihtelee. Tämä mahdollistaa erikokoisten kartiosuodattimien käytön kuvattavien alueiden mukaan. Joidenkin maiden lain mukaan intraoraalikuvia saa ottaa vain suorakulmion muotoisilla kartiosuodattimilla siitä syystä, että suorakulmainen suodatin suodattaa pyöreää suodatinta tarkemmin turhan röntgensäteilyn pois. Kartion pää voi olla muovia tai metallia. Sen muoto vaihtelee suodatinlevyn aukon muodon mukaan. Näin on helpompi tunnistaa, minkä muotoista kartiosuodatinta käytetään. Lisäksi suodattimen pään mukaan voidaan havaita suodatinlevyn asento. Kartiosuodattimen pituudella ei ole kuvan laadun tai koon kannalta mitään eroa. Pidempää kartiosuodatinta käytettäessä säteilylähde jää kauemmaksi potilaasta, jolloin säteilyn intensiteetti heikkenee enemmän pidemmän välimatkan takia, eikä potilaaseen kohdistu yhtä voimakasta röntgensäteilyä kuin lyhyttä kartiosuodatinta



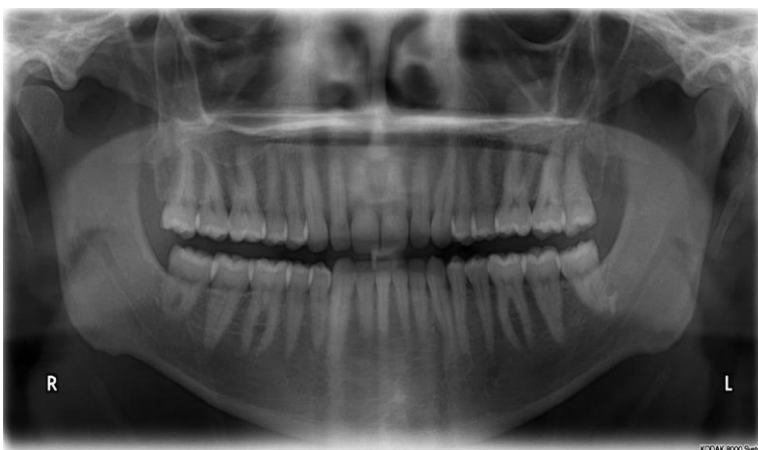
Kuva 11. Erikoisia, sekä -muotoisia kartiosuodattimia. [12]

käytettäessä. Kuvassa 11 on Kavo Kerr Groupin myymiä erikokoisia kartiosuodattimia. Pyöreissä kartiosuodattimissa on pyöreä rajaus, ja kantikkaissa kartiosuodattimissa on suorakaiteen muotoinen rajaus.

Intraoraalikuvaa otettaessa reseptori asetetaan potilaan suuhun kuvattavien hampaiden taakse. Tämän jälkeen säteilylähde kohdistetaan kartiosuodattimen avulla siten, että kuvattavat hampaat jäävät reseptorin sekä säteilylähteen väliin. Kuvausaika on usein hyvin lyhyt, vain noin 100 millisekuntia. Tässä ajassa potilas ei ehdi heilahtaa, jolloin kuvasta on helppo saada laadukas. Jos reseptorina käytetään kuvalevyä, tai röntgenfilmiä, tällöin reseptori asetetaan kuvanlukijaan, joka siirtää kuvan tietokoneelle. Käytettäessä suoraan tietokoneeseen liitettävää CCD-sensoria, ei kuvaa tarvitse erikseen kehittää, vaan se siirtyy suoraan tietokoneelle. Kuvan siirtymisen jälkeen hammaslääkäri tutkii kuvaa ja tarvittaessa ottaa uusia kuvia.

### 5.3.2 Panoraamaröntgenlaite

Panoraamaröntgenkuvaus on suomalaisen Yrjö Paateron 1940–1960-lukujen aikana kehittämä röntgenkuvausmuoto, jolla ihmisen leuat sekä hampaisto saadaan kuvattua yhdellä kuvalla. Panoraamaröntgenkuvasta voidaan tutkia useita eri asioita. Yleisimmin sitä käytetään hampaiden juurien, viisaudenhampaiden, leukaluiden rakenteen sekä poskionteloiden tutkimiseen. Pelkkä panoraamaröntgenkuva ei aina ole riittävä. Hammaslääkäri näkee siitä hampaiston sekä leukaluiden yleiskunnon, mutta usein panoraamaröntgenkuvan tueksi on tarkempaa tutkimusta vaativista kohdista otettava intraoraaliröntgenkuvia, joilla päästään huomattavasti tarkempaan kuvanlaatuun, kun halutaan tutkia pieniä yksityiskohtia. Varsinkin hampaiden kruunua tutkittaessa panoraamaröntgenkuvan tarkkuus ei riitä. Kuten kuvasta 12 voi havaita, ei kuva yhden tai useamman hampaan kunnon tulkitsemiseksi ole riittävän tarkka, mutta kuvasta on helppo havaita leukaluun sekä hampaiston yleinen sijoittuminen. Jos potilaalla olisi esimerkiksi viisaudenhammas, joka ei vielä ole kasvanut ikenestä läpi, se näkyisi muiden hampaiden tasoa alempana yksittäisenä hampaana.



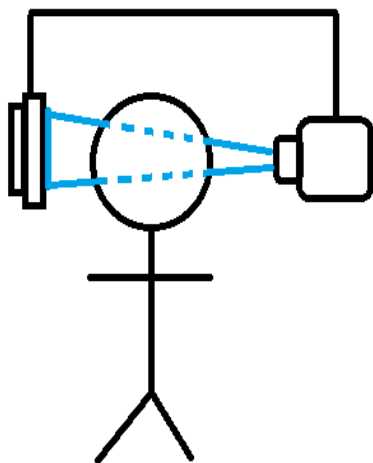
Kuva 12. Panoraamakuva [13]

Panoraamaröntgenlaite on rakenteeltaan suurempi sekä monimutkaisempi kuin intraoraaliröntgenlaite. Kuvassa 13 on Kavo Kerr Groupin valmistama muun muassa panoraamaröntgenkuvaa kuvaava röntgenlaite. Yksinkertaistetusti panoraamaröntgenlaite koostuu koskeussäädettävästä pystyvarresta, jonka yläpäässä on varsi, johon on kiinnitetty vaakasuunnassa pyörivä teline, jossa on säteilylähde sekä reseptori. Kuten kuvassa 14 on esitetty, säteilylähde sekä reseptori ovat toisiaan vasten

siten, että kuvattava kohde asetetaan niiden väliin. Toisin kuin intraoraaliröntgenlaite, panoraamaröntgenlaite tarvitsee oman röntgenkuvaushuoneen johtuen sen suuresta koosta sekä kuvanottotavasta, jossa röntgensäteitä suuntautuu kuvauksen aikana useaan suuntaan. Tästä johtuen röntgenhoitajat poistuvat kuvauksen ajaksi erilliseen lyijyllä suojattuun huoneeseen.



Kuva 13. OP 3D PRO [14]



Kuva 14. Panoraamaröntgenlaitteen toimintaperiaate.

Kuvauksen aikana potilas asettuu laitteen eteen kasvot laitetta kohti. Tämän jälkeen laitteen korkeus kohdistetaan siten, että säteilylähde sekä reseptori ovat potilaan pään korkeudella. Laitteen kohdistuksen jälkeen säteilylähde ja reseptori pyörähtävät potilaan pään ympäri vaakatasossa. Pyörimisen sekä kuvaamisen yhtäaikaisesta vuorovaikutuksesta johtuen koko ihmisen hampaisto saadaan yhteen kuvaan ikään kuin levyksi. Ennen reseptorina käytettiin röntgenfilmiä. Nykyään kehittyvissä maissa käytetään kuvalevyä, ja kehittyneissä maissa on siirrytty jo CCD-sensoritekniikkaan. Yhden panoraamaröntgenkuvan säteilyannos potilaalle on noin kaksi – nelinkertainen intraoraaliröntgenkuvaan verrattuna.

### 5.3.3 Kefalostaatti

Kefalostaattisesta röntgenkuvasta tutkitaan kallon osien mittasuhteita toisiinsa nähden. Näitä kuvia hyödynnetään pääasiassa oikomahoidon suunnittelussa, mutta myös onnettomuuksien jälkeen kefalostaattisella röntgenkuvalla voidaan tutkia kallon vammoja. Kefalostaattinen röntgenkuvaus ei ole kovin yleinen röntgenkuvausmuoto. Yhden kefalostaattisen röntgenkuvan säteilyannos potilaalle on noin kaksinkertainen intraoraaliröntgenkuvaan verrattuna. Kefalostaatti on hyvin yksinkertainen laite, ja usein se on yhdistettynä panoraamaröntgenlaitteeseen tai kartiokeilatietokonetomografialaitteeseen. Kefalostaatti koostuu säteilylähteestä sekä reseptorista. Jos kefalostaatti on yhdistettynä panoraamaröntgenlaitteeseen tai kartiokeilatietokonetomografialaitteeseen, toista säteilylähdettä ei usein käytetä, vaan voidaan hyödyntää jo laitteessa olevaa säteilylähdettä. Reseptorin on oltava hieman aikuisen ihmisen päätä suurempi. Se voi olla joko röntgenfilmi, kuvalevy, tai kuten nykyään lähes kaikki, röntgensensori.

### 5.3.4 Kartiokeilatietokonetomografialaite

Kartiokeilatietokonetomografialaitetta kutsutaan yleisesti 3D-laitteeksi. Selkeyden vuoksi tästä eteenpäin päättötyössä käytetään kartiokeilatietokonetomografialaitteesta nimitystä 3D-laite. Se on kaikista hammasröntgenlaitteista kehittynein laite. 3D-laite on ulkonäöltään sekä toimintaperiaatteeltaan lähes identtinen panoraamaröntgenlaitteen kanssa. Sillä voidaan kuvata 3D-kuvien lisäksi myös panoraamakuvia. 3D-kuvissa sensori sekä säteilylähde pyörähtävät potilaan pään ympäri, kuten

panoraamaröntgenkuvaa otettaessa, mutta tietokone laskee ja käsittelee sensorin vastaanottamaa röntgensädettä eri tavalla, jolloin kaksiulotteiden kuvan sijaan se muodostaa kolmiulotteisen kuvan halutusta alueesta. 3D-laitteella otettavat kuvakoot sekä -alueet vaihtelevat muutamasta hampaasta vain leuan toiselta puolelta, lähes koko pään alueen kokoiseen kuvaan. Reseptorina voidaan käyttää vain digitaalista röntgensensoria.

3D-laitteella on useita käyttökohteita. Niistä suurimpana ovat implantit, joita varten otetaan noin puolet kaikista 3D-laitteella kuvattavista röntgenkuvista. Myös oikomahoito, juurihito, sekä viisaudenhampaiden tutkiminen sekä poisto ovat 3D-röntgenlaitteen käyttökohteita. Missään tilanteessa 3D-röntgenkuva ei ole ensimmäinen potilaasta otettava kuva sen suuresta säteilyannoksesta johtuen. Yhden 3D-röntgenkuvan säteilyannokset ovat kuvan koosta riippuen noin 1 - 48 -kertaisia yhteen intraoraalikuvaan verrattuna. 3D-kuvasta voidaan muun muassa erotella ja tarkastella ilmaa sisältäviä pään alueita, kuten poskionteloita sekä nielun aluetta. Lisäksi voidaan erotella pelkät pehmytkudokset, luusto sekä hermoradat. Juuri hermoratojen tutkiminen on tärkeää viisaudenhampaiden poistoa suoritettaessa. 3D-kuvasta tarkistetaan viisaudenhampaiden juurien asento sekä sijainti leuassa kulkevien hermoratakanavien suhteen. Hammaslääkäri tutkii 3D-kuvasta, onko juuri esimerkiksi hermoradan ympärillä, jolloin hampaan poistossa on oltava erityisen varovainen.

## 6. Uusi kartiosuodattimen koestin

Tässä luvussa käsitellään uuden kartiosuodattimen koestimen sekä koko uuden koestusprosessin kehittämistä vaiheittain, siinä järjestyksessä, missä ne toteutettiin.

### 6.1 Säteilylaki 859/2018

Säteilylain päätarkoitus on suojella, ehkäistä sekä vähentää ihmisen ja ympäristön altistumista säteilystä aiheutuville haitoille. Laissa käsitellään muun muassa radioaktiivisen jätteen käsittelyä, röntgensäteilylle altistuvan potilaan suurinta sallittua säteilymäärää, raskaana olevan työntekijän velvollisuuksia sekä oikeuksia säteilytyössä sekä säteilylaitteita valmistavan yrityksen velvollisuuksia.

Säteilylakia ei kuitenkaan sovelleta seuraavissa tapauksissa:

- 1) alle viiden kilovoltin jännite-erolla toimivan ionisoivaa säteilyä sähköisesti tuottavan laitteen käyttöön
- 2) avaruussäteilyn aiheuttamaan taustasäteilyyn maanpinnan tasossa
- 3) kehossa luonnostaan olevien radioaktiivisten aineiden aiheuttamaan taustasäteilyyn
- 4) ilmailussa muiden kuin ilma-aluksen miehistön altistukseen avaruussäteilylle
- 5) avaruussäteilyn aiheuttamaan väestön altistukseen avaruuslennoilla.

Koko säteilylaki voidaan kiteyttää seuraavanlaisesti: Säteilylle on altistettava niin vähän, kuin on tarpeen. Tämä koskee niin säteilylle altistuvia potilaita kuin säteilyn kanssa työskenteleviä ihmisiä. Kaikki säteilylle altistuminen on minimoitava kaikkialla. Vain tarkoin koulutetut työntekijät saavat käyttää tai valmistaa säteilylaitteita. Säteilylaitteita kuljetettaessa, käytettäessä sekä valmistettaessa toimenpiteistä ei saa aiheutua haittaa ympäristölle sekä ihmisille. Viranomainen valvoo, että yritykset, jotka käyttävät tai

valmistavat laitteita huolehtivat, että kaikki edellä mainittu toteutuu. Jos jokin kohta ei toteudu, tällöin viranomainen voi antaa erilaisia sanktioita.

Mitä säteilylaki sanoo ihmisen altistumisesta säteilylle:

Luku 2, 7 § Yksilönsuojaperiaate

Säteilytoiminnassa työntekijän ja väestön yksilön säteilyannos ei saa olla annosrajaa suurempi (yksilönsuojaperiaate).

Säteilyannosta säteilytyötä tekeväälle henkilölle ei säteilylaki erikseen määritä. Kuitenkin annosraja on löydettävissä säteilyturvakeskuksen sivuilta:

Säteilytyössä työntekijän annosraja viidessä vuodessa on 100 millisievertiä (mSv) eli vuosittainen annos saa olla keskimäärin enintään 20 millisievertiä. Muille kuin säteilytyössä oleville työntekijöille säteilyn käytöstä aiheutuva vuosittainen annos työpaikalla ei saa ylittää arvoa 1 mSv (Valtioneuvoston asetus ionisoivasta säteilystä 1034/2018). (<https://www.stuk.fi/aiheet/sateily-terveydenhuollossa/henkilokunnan-altistus>, luettu 14.01.2021)

Säteilylaki määrittää myös työnantajan velvollisuuksia säteilyltäsuojautumisen järjestämisestä:

luku 12, 88 § Työntekijöiden säteilysuojelun järjestäminen

Säteilytyöntekijöiden säteilysuojelu on järjestettävä tässä luvussa säädetyllä tavalla. Muiden työntekijöiden suojeluun sovelletaan, mitä tässä laissa säädetään väestön säteilysuojelusta, jollei muualla toisin säädetä.

Toiminnanharjoittaja ja ulkopuolisen työntekijän työnantaja ovat vastuussa säteilytoimintaan osallistuvien työntekijöidensä säteilysuojelusta 102—104 §:ssä säädetyin vastuunjaon mukaan. Ulkopuolisilla työntekijöillä on oltava samantasoinen suojelu kuin omilla työntekijöillä.

Säteilyturvakeskus antaa tarkemmat tekniluonteiset määräykset työntekijän suojelusta säteilytoiminnassa.



Kartiosuodattimen koestuksen yksi päätavoitteista on osoittaa tuotteen turvallisuus. Säteilylaki määrittää tuotteiden säteilyturvallisuudesta seuraava:

#### luku 8, 56 § Tuotteen säteilyturvallisuuden osoittaminen

Toiminnanharjoittajan, joka valmistaa, tuo maahan, saattaa markkinoille, tarjoaa, pitää kaupan, myy tai muuten luovuttaa säteilylähteitä tai säteilytoiminnan turvallisuuteen liittyviä varusteita ja muita tuotteita (tuote), on voitava osoittaa, että tuote on turvallinen.

#### luku 8, 58 § Tuotteen säteilyturvallisuuden arviointi

Valvontaviranomainen arvioi 56 §:ssä tarkoitetun tuotteen säteilyturvallisuuden sitä koskevan tuoteturvallisuuslainsäädännön nojalla tai sellaisten standardien mukaisesti, joita koskeva viittaus on julkaistu Euroopan unionin virallisessa lehdessä.

Tuotteen säteilyturvallisuuden arvioinnissa on kiinnitettävä lisäksi huomiota seuraaviin seikkoihin:

- 1) muut kuin 1 momentissa tarkoitetut tuotteen turvallisuutta koskevat kansainväliset tai kansalliset standardit;
- 2) Euroopan komission suositukset, jotka sisältävät säteilyturvallisuuden arviointia koskevia ohjeita;
- 3) valvontaviranomaisten ohjeet ja suositukset;
- 4) säteilyturvallisuutta koskevat käytännösäännöt;
- 5) nykyinen tieto ja tekniikka.

Jos tuotetta ei voida arvioida 1 momentissa tarkoitetulla tavalla, valvontaviranomainen voi arvioida tuotteen säteilyturvallisuuden sen mukaan, mitä 2 momentissa säädetään. Lisäksi vaikka tuote on 1 ja 2 momentissa tarkoitettujen turvallisuuden arvioinnissa käytettävien perusteiden mukainen, valvontaviranomainen voi ryhtyä eräiden tuotteiden markkinavalvonnasta annetun lain 3 luvussa tarkoitettuun valvonnan toimenpiteeseen, jos tuote kuitenkin aiheuttaa riskin terveydelle.

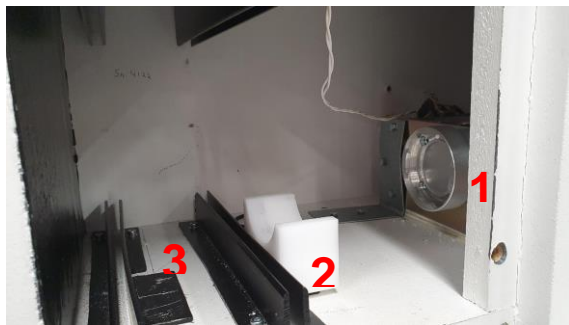
Tässä työssä on otettu huomioon kaikki säteilylain vaatimukset sekä noudatettu niitä suurella tarkkaavaisuudella sekä henkilökohtaisella moraalikäsitteen kattavalla omantunnonoikeudella.

## 6.2 Päätötyön aihe sekä vaatimusmäärittely

Päätötyön aiheena oli kehittää ja digitalisoida intraoraaliröntgenlaitteen kartiosuodattimen koestusprosessia. Työ tehtiin Kavo Kerr Groupin Tuusulan toimipisteeseen. Projektin alussa työlle sovittiin ehdot eli vaatimusmäärittelyt. Vaatimusmäärittelyihin kirjattiin muun muassa seuraavaa: Koestusprosessin läpimenoaika on lyhennettävä. Kuvanlukulaitteesta sekä kuvalevystä on luovuttava. Koko prosessia ei tulla muuttamaan, joten uusi prosessi tulee olemaan luonteeltaan nykyisen prosessin kaltainen. Kuvan- sekä toiminnanlaadun on oltava vähintään nykyisen prosessin tasolla. Kuvan on siirryttävä tietokoneelle alle 30 sekunnissa. Uuden prosessin on oltava Suomen säteilylain 859/2018 mukainen. Tarkemmin kartiosuodattimen sekä intraoraaliröntgenlaitteen toimintaperiaatetta käsitellään kohdassa 5.3.1.

## 6.3 Vanha koestusprosessi sekä -laite

Vaatimusmäärittelyiden jälkeen voitiin aloittaa prosessin läpikäyntiä. Vanha laite koostui lyijyllä vuoratun vanerikaapin (lyijykaapin) ympärille sulautetusta intraoraaliröntgenlaitteesta, kontrastityökalusta, suodattimen mittatyökalusta, kontrastisekä mittatyökalujen telineestä, kuvalevystä, kuvalevynlukulaitteesta sekä kannettavasta tietokoneesta. Kontrastityökalu oli noin 7 cm halkaisijalta ja noin 4 cm paksu alumiininen kiekko, jonka sisällä oli lyijyviivoja. Kontrastityökalusta puhuttiin myös nimellä: viivaparityökalu, sillä työkalun läpi otetusta kuvasta nähtiin kuvan tarkkuus tarkastelemalla kuvassa näkyviä viivapareja. Mitä ohuempia viivat erottuivat, sitä tarkempi kuvanlaatu oli. Suodattimen mittatyökalu oli kooltaan sekä muilta ominaisuuksiltaan kontrastityökalun kaltainen, mutta siinä oli viivaparien sijaan lyijypiste keskellä. Tämän pisteen avulla kuvasta voitiin helpommin mitata suodattimen halkaisija vetämällä mittaviiva keskipisteen läpi. Lyijykaappi oli rakennettu noin 20 mm paksusta vanerista. Kaapin sisäpuoli oli vuorattu 4 mm paksulla lyijylevyllä. Lyijy absorptoi kuvauksessa muodostuvan ylimääräisen säteilyn. Näin koestuslaitetta voitiin käyttää avoimessa suojaamattomassa tilassa ilman lisäsuojausta.



Kuva 15. Vanhan koestuslaitteen lyijykaappi.



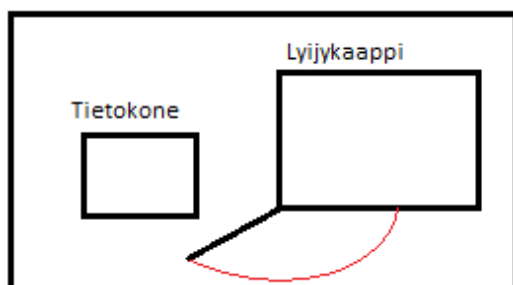
Kuva 16. Pitkä kartiosuodatin kiinnitettynä putkipäähän, kontrastityökalu telineellä, sekä kuvalevyn suoja asetettuna kuvalevyntukeen.

Koestusprosessi alkoi sarjanumeron määrittämisellä. Seuraava vapaa sarjanumero etsittiin Excel-tiedostosta, johon merkittiin päivämäärä, valittu sarjanumero sekä koestajan nimikirjaimet. Tämän jälkeen kartiosuodatin kierrettiin koestuslaitteen putkipäähän (kuva 15, kohta 1). Seuraavaksi kontrastityökalu asetettiin muovisen tuen päälle (kuva 15 kohta 2) kiinni kartiosuodattimeen. Kartion pituuden mukaan muovinen tuki asetettiin joko putkipäätä lähemmän tai kauemman kuvalevytuen (kuva 15 kohta 3) eteen. Seuraavaksi noin 20 cm x 30 cm -kokoinen kuvalevy asetettiin kuvalevytukeen ja lyijykaapin ovi suljettiin. Kuvalevyn, kontrastityökalun sekä kartiosuodattimen asettuminen koestuslaitteeseen on havainnollistettu kuvassa 16. Kartiosuodatinta koestava henkilö painoi kuvauspainiketta ja otti kuvan. Tämän jälkeen kuvalevyä käännettiin 180 astetta ja se asetettiin takaisin kuvalevytukeen, jonka jälkeen kontrastityökalun tilalle vaihdettiin suodattimen mittatyökalu. Seuraavaksi otettiin kuva mittatyökalun läpi. Kuvauksen jälkeen kuvalevy asetettiin kuvalevynlukulaitteeseen, ja kuva siirtyi kannettavalle tietokoneelle. Tietokoneella kuvat avattiin kuvanlukuohjelmalla.

Kuvista tarkastettiin kuvanlaatu viivapareja tutkimalla sekä mitattiin suodattuneen alueen halkaisija. Koska kuvalevyä käännettiin 180 astetta, mahtuivat molempien työkalujen läpi kuvatut kuvat vierekkäin yhteen kuvaan. Kun kuva oli tarkastettu, merkattiin kuvan tietoihin tuotenumero sekä sarjanumero. Lopuksi kuva tulostettiin A4-kokoiselle paperille ja paperi sijoitettiin valmistettujen osien historiatietoja sisältävään DHR-kansioon.

Vanhassa koestusprosessissa oli monia heikkouksia, joiden takia uusi prosessi sekä koestuslaite haluttiin luoda. Suurin ongelma vanhassa prosessissa oli kuvalevyltä kuvatiedon siirto tietokoneelle. Kuvan siirtyminen kuvanlukulaitteelta kesti noin 1 minuutti 30 sekuntia, joka kymmeniä kartiosuodattimia koestaessa loi huomattavan määrän hukka-aikaa. Lisäksi käytettävä laite oli niin vanha, ettei varaosia enää ollut saatavilla. Varalaitteitakaan ei enää tehtaassa ollut juuri lainkaan. Lisäksi kuvanlukulaite ei ollut kovinkaan luotettava, ja usein kuvien siirtäminen keskeytyi kuvanlukulaitteen virhetilaan. Koko koestusprosessin kriittisin laite oli siis hyvin epävakaa, ja sen vikaantuessa yhtään kartiosuodatinta ei voitu valmistaa. Lisäksi kuvanlukulaite vei tilaa. Tästä syystä työpisteen ergonomia ei ollut riittävällä tasolla.

Lyijykaapin sisällä olevassa mittatyökalujen telineessä (kuva 18 kohta 2) ei ollut mitään säätömahdollisuuksia, jolloin sen keskittäminen kartiosuodattimen keskelle toteutettiin asettamalla sopiva määrä pieniä Post-It-lappuja telineen alle. Lyijykaapin ovi aukesi vasemmalle, mikä tietokoneen ja työpisteen ollessa lyijykaapin vasemmalla puolella ei ollut kovinkaan ergonomista. Oven aukeneminen tietokoneen eteen on havainnollistettu kuvassa 17. Oven aukeamissuunnasta johtuen kartiosuodattimen kiinnittäminen ja kuvalevyn siirtely oli hankalampaa oikeakätisille työntekijöille, sillä ovi aukesi suoraan käyttäjää kohti, jolloin oli siirryttävä työpisteellä sivuun ja kierrettävä kartiosuodatin kiinni vasemmalla kädellä.



Kuva 17. Vanhan koestuslaitteen lyijykaapin ovi aukesi tietokoneen eteen.

Työturvallisuutta oli huomioitu muun muassa lyijykaapin oven yläreunaan asennetulla painokatkaisijalla, joka esti koestuslaitteen toiminnan oven ollessa auki. Tällä estettiin tahaton röntgensäteilyn leviäminen ympäristöön. Kuitenkin katkaisija oli asennettu siten, että kuka tahansa kykeni halutessaan tai vahingossa painamaan katkaisijaa. Röntgenlaitteen ollessa ”automaattivalotus”-asennossa alkaa se muodostamaan röntgensäteilyä heti painokatkaisijan kytkeytyessä kiinni. ”Automaatti”- sekä ”käsivalotus”-asentojen vaihtaminen oli mahdollista keinuvivulla, jota ei ollut mitenkään suojattu. Suojan puuttumisen takia saattoi röntgenlaitteen kytkeä ”automaattivalotus”-asentoon, jolloin riski röntgenlaitteen vahinkovalotukselle oli huomattava.

Kartiosuodattimet oli koestettava ennen asiakkaalle toimitusta, jotta voitiin varmistaa niiden olevan säteilylain mukaisia.

Säteilylaki 859/2018 Luku 8, 56 § Tuotteen säteilyturvallisuuden osoittaminen: Toiminnanharjoittajan, joka valmistaa, tuo maahan, saattaa markkinoille, tarjoaa, pitää kaupan, myy tai muuten luovuttaa säteilylähteitä tai säteilytoiminnan turvallisuuteen liittyviä varusteita ja muita tuotteita (tuote), on voitava osoittaa, että tuote on turvallinen.

Koska kartiosuodatin rajaa säteilyn halutulle alueelle, ja näin estää ylimääräisen ja tarpeettoman säteilylle altistumisen, oli sen oltava luotettavasti mitattu. Näin röntgenlaitetta käyttävä henkilö voi turvallisesti käyttää laitetta tietäessään, ettei hän tai potilas altistu liialliselle säteilymäärälle ja otetuista röntgenkuvista tulee laadukkaita.

#### 6.4 Uusi koestusprosessi sekä -laite

Uuden koestusprosessin sekä -laitteen luominen aloitettiin tutustumalla vaatimusmäärittelyissä luotuihin ehtoihin. Lainaus vaatimusmäärittelystä kohdasta ”Haluttu lopputulos”:

Testausprosessin läpimenoaikaa halutaan lyhentää. Kuvanlukulaitteesta sekä kuvalevystä on luovuttava. Niiden käyttö tekee testausprosessista hitaan ja hajoamisriskistä, ja varaosapuutteesta johtuen epävarman.

Haluttu kartiosuodattimen testausprosessi:

Kartiosuodatin kootaan varaosaosastolla. Valmis suodatin testataan sitä varten valmistetulla testaustyökalulla. Ensin suodattimelle annetaan sarjanumero. Kaikki tarvittavat tiedot dokumentoidaan ja taltioidaan. Testilaitteen kaapissa on putkipää, johon testattava suodatin kytketään. Kaappiin asetetaan kuvan laadun testausta varten kuvattavaksi kohteeksi kontrastityökalu, jonka läpi otetaan kuva. Kuvalevyn sijaan kaapissa on reseptori, joka muodostaa kuvan ja siirtää sen suoraan tietokoneelle. Ensimmäisen kuvan jälkeen kontrastityökalun tilalle vaihdetaan suodatuksen laadun testausta varten suodatuksen mittatyökalu, ja otetaan toinen kuva. Tietokoneohjelman avulla kuvista tarkastetaan kuvan tarkkuus ja suodattimen mitat sekä laatu. Kuvan tietoihin merkitään koodi sekä sarjanumero. Tämän jälkeen tulostetaan testatun suodattimen dhr-paperi.

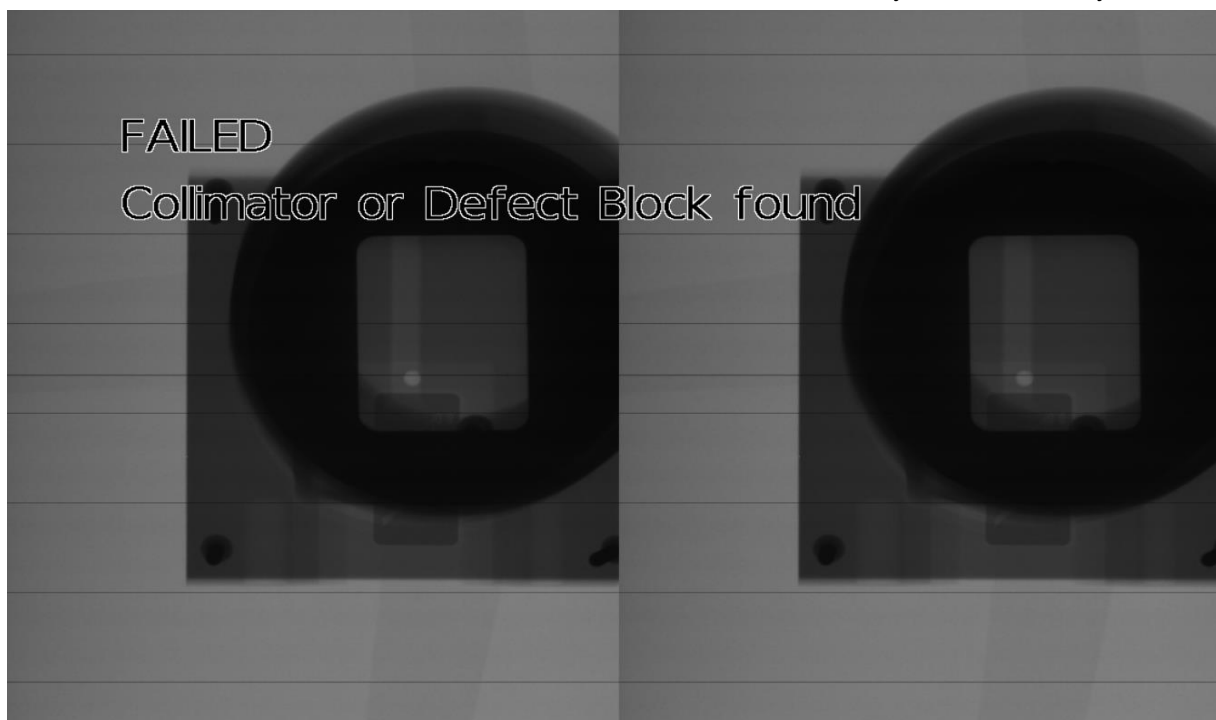
Uusi prosessi on muuten sama, kuin nykyprosessi, mutta kuvalevyä ja kuvankehituslaitetta ei enään tarvita. Prosessin läpimenoaika lyhenee, ja varaosia saa laitteen vikaantuessa.

Yllä olevan lisäksi vaatimusmäärittelyssä asetettiin kuvan siirtymiselle tietokoneelle maksimijaksiksi 30 sekuntia.

Ennen minkään muun suunnittelua oli selvítettävä, miten kuva saadaan siirrettyä digitaalisesti tietokoneelle. Tähän tarkoitukseen ainoa toimiva ratkaisu oli digitaalinen röntgensensori. Sopivan vaihtoehdon oli löydyttävä Kavo Kerr Groupin valmistamien laitteiden sensorivalikoimasta, jotta varaosasaatavuus, tuotetuntemus sekä laiteyhteensopivuus voitiin taata. Vaihtoehtoja oli neljä: sensori 1, sensori 2, sensori 3 sekä sensori 4.

Sensori 1:n maksimikuva-ala oli 37 mm x 27 mm. Sensori 2:n maksimikuva-ala oli 23 mm x 16 mm. Molempien sensoreiden liitäntä tietokoneelle tapahtui USB-väylän avulla, mikä teki niistä hyvän vaihtoehdon helpon yhdistettävyyden takia. Kuitenkaan kuva-alat eivät riittäneet. Kuva-alan oli oltava vähintään 75 mm x 75 mm kokoinen. Tästä syystä molemmat sensorit 1 ja 2 jouduttiin hylkäämään heti alussa. Sensorit 3 ja 4 olivat eri laitteesta kuin sensorit 1 ja 2. Kun sensorit 1 ja 2 oli tarkoitettu hammaslääkärin vastaanottohuonekäyttöön, olivat sensorit 3 ja 4 laitteista, joita ei voitu käyttää tavallisessa vastaanottohuoneessa laitteiden suuren koon sekä ympärilleen leviävän hajasäteilyn takia. Kyseiset laitteet on sijoitettava erilliseen lyijyllä suojattuun röntgenhuoneeseen, josta hoitaja poistuu kuvauksen ajaksi. Tästä syystä sensoreiden liitäntä oli erilainen. Molemmat sensorit yhdistetään suoraan sensorin tiedon lukemista varten luotuun piirikorttiin. Tietokone, johon kuvat siirretään, on yhdistetty röntgenlaitteeseen esimerkiksi verkkokaapelilla. Röntgenlaite käsittelee sensorilta lukemaansa tietoa ja siirtää sen verkkokaapelia pitkin tietokoneelle. Sensori 3:n kuva-

ala oli 95 mm x 65 mm, mikä sekään ei ollut riittävän suuri. Sensori 4:n kuva-ala oli 120 mm x 120 mm, joka teki siitä ainoan soveltuvan ratkaisun. Lisäksi tehtaalla oli olemassa kyseiselle sensorille luotu koestussovellus, jota mahdollisesti voitaisiin hyödyntää koestuslaitteen hallinnassa. Ennen lopullista valintaa otettiin vielä koestuskuvia 3D-röntgenlaitteella, joka käyttää sensoria 4. Kartiosuodatin kiinnitettiin teipillä 3D-röntgenlaitteen säteilylähteeseen ja kuva otettiin viivaparityökalun läpi. Kuva 18 on koestuskuva. Kuvanlaatu tarkastettiin visuaalisesti ja se todettiin riittävän tarkaksi. Kuva otettiin 3D-laitteen koestukseen sekä kalibrointiin tarkoitetulla ohjelmalla. Tästä johtuu



Kuva 18. 3D-röntgenlaitteella otettu koestuskuva suorakulmisen kartiosuodattimen läpi. Musta alue on alue, jolla säteily ei ole läpäissyt suodatinta. Viivaparityökalu ei ole aivan kohdallaan. Se näkyy osin suodattimen takaa sen alareunassa. Kuva on otettu laitteen koestukseen, sekä kalibrointiin tarkoitetulla ohjelmalla, mistä johtuu teksti: "FAILED Collimator or Defect Block Found".

kuvassa 18 näkyvä teksti "FAILED Collimator or Defect Block found". Ohjelma tunnistui esteen kuvan edessä, jolloin kuva hylättiin, mutta se ei vaikuttanut visuaalisesti tehtyyn kuvanlaaduntarkistukseen. Kuvanlaadultaan riittävänä sekä ainoana kooltaan soveltuvana sensorina, sensoria 4 valittiin käytettäväksi koestuslaitteessa. Kun sensoria tiedettiin, voitiin aloittaa muun laitteen suunnittelu.

## 6.5 Koestuslaitteen suunnittelu

### 6.5.1 Intraoraaliröntgenlaite

Ennen sensorin valintaa tiedettiin, että koestuslaitteessa oli vanhan koestuslaitteen tapaan käytettävä kokonaista intraoraaliröntgenlaitetta, joka tullaan sulauttamaan koestuslaitteen ympärille. Koestuslaitteen suunnittelussa intraoraaliröntgenlaitteen osista tärkeimmät olivat putkipää sekä röntgengeneraattori. Röntgengeneraattori ohjaa putkipäälle syötettävää virtaa sekä jännitettä, ja näin hallitsee syntyvää röntgensäteilyä. Generaattorin piirikortilla on prosessori, joka hallitsee koko generaattorin toimintaa. Vanhassa koestuslaitteessa käytetty intraoraaliröntgenlaite oli valmistettu vuonna 2007. Uuteen koestuslaitteeseen saamaa intraoraaliröntgenlaitetta ei voitu käyttää, sillä kartiosuodattimien koestusprosessia ei voitu lopettaa, jolloin vanhaa koestuslaitetta ei voitu poistaa käytöstä ennen uuden koestuslaitteen hyväksytyä käyttöönottoa. Tarvitut intraoraaliröntgenlaitteen osat haettiin niitä valmistavalta tuotantolinjalta. Uusi putkipää haettiin putkipäitä valmistavalta tuotantolinjalta.

### 6.5.2 Röntgensensori ja sen hallinta

Pelkkä röntgensensori ei riitä luomaan kuvaa röntgensäteistä. Sensorin hallinta sekä tietojenkäsittely tapahtuu piirikortin avulla. Tähän tehtävään valikoitui 3D-röntgenlaitteessa käytettävä kuvatiedonlukukortti. Tietokoneen liittäminen koestuslaitteeseen oli helppoa, sillä kuvatiedonlukukorttiin yhdistämiseen tietokoneella tarvittiin vain USB- sekä RJ45-liitäntä. USB-portin kautta voidaan kontrolloida kuvatiedonlukukortin prosessoria, joka hallitsee koko piirikorttia sekä siihen liitettyä sensoria. Jotta USB-portin kautta voitiin lähettää komentoja prosessorille, tarvittiin sarjaliikennettä tukeva terminaaliemulaattori. Terminaaliemulaattori toimii USB-porttiin liitetyn laitteen, tässä tapauksessa kuvatiedonlukukortin, hallintapäättänä. Sillä voidaan hallittavan kohteen ymmärtämiä komentoja käyttäen saada kohde toimimaan halutulla tavalla. Koestuslaitteeseen terminaaliemulaattoriksi valitsimme Tera Term -nimisen avoimen lähdekoodin ohjelman. Tämä ohjelma valittiin, sillä tehtaalla oli jo vahva osaamistaso Tera Termille, jolloin ei tarvinnut opetella täysin uuden ohjelman käyttöä.

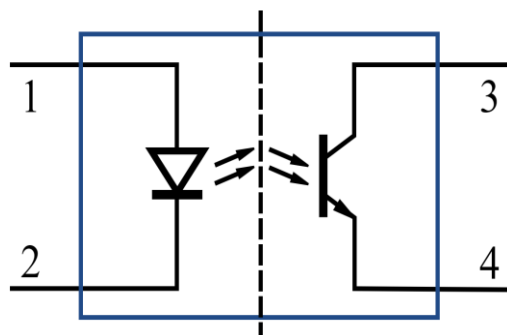


Kuvansiirto-ohjelmalla voitiin siirtää kuvatieto tietokoneelle käyttämällä tavallista verkkokaapelia. Jotta tietokone saatiin yhdistettyä kuvatiedonlukukorttiin kuvansiirto-ohjelmalla, piti tietokoneen IP-osoite vaihtaa samaan osoiteavaruuteen kuvatiedonlukukortin kanssa. IP-osoitteiden ollessa oikeat oli kuvadatan siirtäminen mahdollista kuvansiirto-ohjelman kautta oikeita komentoja käyttäen. Mitään kuvatietoa ei kuitenkaan vielä ollut, sillä ensin piti ratkaista suurin haaste: kuinka saada kahden täysin erilaisten röntgenlaitteen komponentit keskustelemaan keskenään.

### 6.5.3 Potentiaaliero ja sen ratkaiseminen

Koestuslaitteen suunnittelu- sekä toteutusvaiheiden yksi suurimmista haasteista oli ratkaista, kuinka eri röntgenlaitteiden komponentit saadaan kommunikoidaan keskenään, vaikkei niitä ole siihen koskaan tarkoitettu. Intraoraaliröntgenlaitteen piirikorttien ohjausjännitteet toimivat 15 voltin tasossa, kun taas 3D-röntgenlaitteen ohjausjännitteet toimivat 5 voltin tasossa. Potentiaalieron takia laitteiden komponentteja ei voitu kytkeä suoraan toisiinsa.

Röntgenlaitteessa ajoitukset eri toimintojen välillä ovat kriittisiä. Röntgengeneraattorin ja putkipään muodostaessa röntgensäteilyä on röntgensensori kytkettävä päälle oikeaan aikaan. Liian aikaisin kytkettäessä kuvaan muodostuu taustasäteilystä kohinaa, joka heikentää kuvanlaatua. Liian myöhään kytkettäessä sensoria ei ehdi vastaanottamaan tarpeellista määrää röntgensäteitä, jotta kuvasta saadaan riittävän tarkka. Röntgensäteilyä muodostetaan hyvin lyhyt aika, noin 20 ms – 500 ms, jolloin ajoitus säteilyn muodostamisen sekä sen vastaanottamisen välillä on oltava todella tarkkaa. Normaalisti röntgenlaitteen prosessori ohjaa ajoituksia toimintojen välillä. Kuitenkin koestuslaitteessa käytettävät komponentit eivät kommunikoi keskenään samalla tavalla,



Kuva 19. Optoerotin

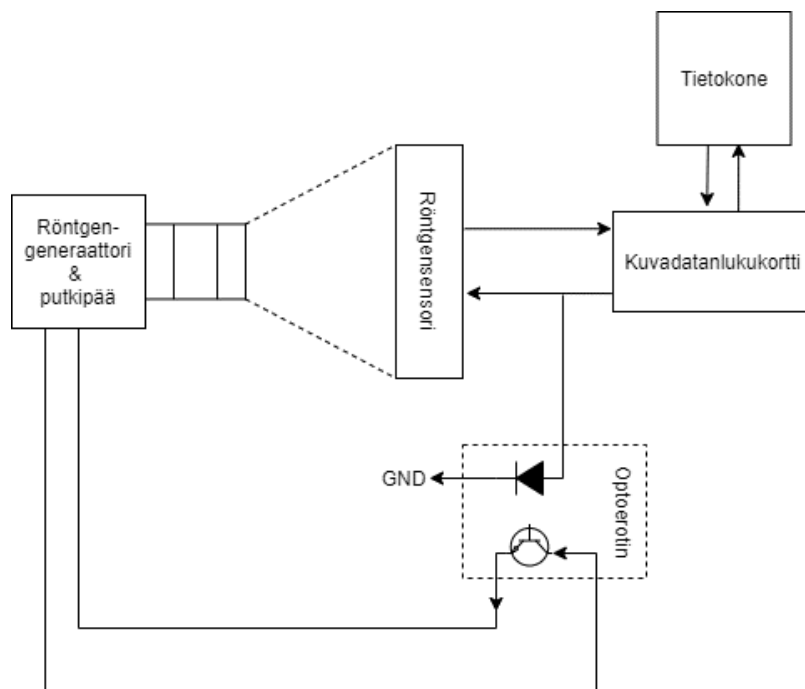
eikä niitä voitu kytkeä suoraan toisiinsa. Kahden laitteen komponenttien rajapinnalle oli luotava tapa kommunikoinnille.

Sopivan ratkaisun löytäminen ei vienyt pitkään, sillä tehtaen elektroniikkaosaston työntekijöillä oli hyvin tarkka tuntemus piirikorttien sekä laitteiden toiminnasta. Ensimmäisenä sekä heti toimivana vaihtoehtona kokeiltiin optoerotinta. Optoerotin kautta signaali saadaan ohjattua eri potentiaaleissa olevien piirien välillä. Optoerotin toiminta on hyvin yksinkertaista. Se koostuu ledistä sekä valosta aktivoituvasta transistorista. Kuvassa 19 on komponenttikuva optoerotimesta. Kun ledille johdetaan virtaa, sen luoma valo aktivoi transistorin, joka sulkee virtapiirin transistorin sisällä. Ledi toimii eräänlaisena katkaisijana, joka sulkee virtapiirin halutussa vaiheessa.

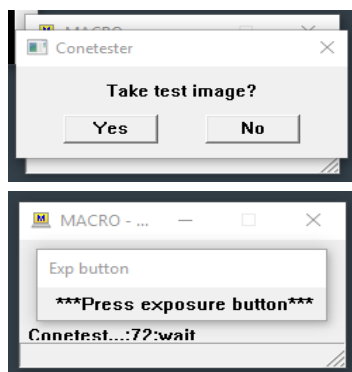
#### 6.5.4 Laitteiden välinen kommunikointi

Optoerotin toimittua ratkaisuna potentiaalierojen välisenä kommunikointitapana alkoi tarpeellisten signaalien kartoitus. Kun tiedetään tarpeelliset signaalit, voidaan kommunikoinnissa käytettävä piirikortti suunnitella laitteiden välille. Kartiosuodattimenkoestuslaitetta haluttiin ohjata tietokoneella. Tietokone voitiin kytkeä ainoastaan kuvatiedonlukukorttiin USB-liitännän sekä RJ45-liitännän kautta. Jotta röntgengeneraattoria sekä putkipäätä voitiin ohjata tietokoneella, oli tarpeellisten signaalien sekä kuvatiedon kuljettava kuvatiedonlukukortin kautta. Yksinkertainen toimintakaavio suunniteltiin koestuslaitteelle. Kuvassa 20 on havainnollistettu koestuslaitteen komponenttien sijoittumista toimintaketjulla. Vaihe 1: Tietokone käskii koestuslaitetta ottamaan kuvan. Vaihe 2: Kuvatiedonlukukortti kytkee röntgensensorin vastaanottamaan röntgensäteitä. Optoerotin kautta kytketään signaali säteilytyksen käynnistämiseksi. Vaihe 3: Röntgengeneraattori kytkee esihehkun päälle, eli säätelee hehkuvirran haluttuun arvoon, ja siten katodin lämpötilan oikeaksi. Näin vältetään katodin poikkipalamiselta. Vaihe 4: Röntgensensori kytkee säteilytyksen päälle, jolloin röntgenputki alkaa muodostamaan röntgensäteilyä. Vaihe 5: Röntgensäteilyä muodostuu asetettuna aikana, jolloin röntgensensori lukee säteilyä. Vaihe 6: Röntgensensorilta data siirtyy kuvatiedonlukukortille. Vaihe 7: Kuva siirtyy kuvatiedonlukukortilta tietokoneelle. Tämän yksinkertaistetun toimintakaavion avulla

voitiin aloittaa tarvittavan tietokoneohjelman, piirikortin optoerottimelle sekä koestuslaitteen fyysisen osuuden suunnittelu.



Kuva 20. Alkuvaiheen suunnitelma laitteen toiminnasta.

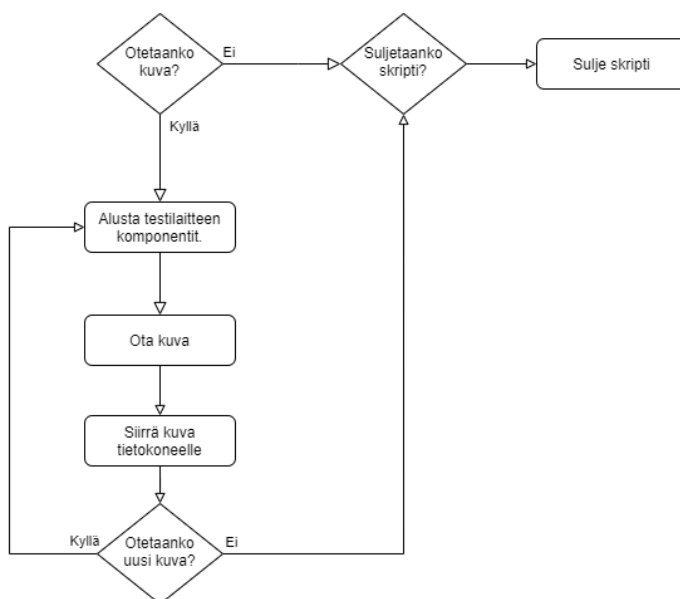


Kuva 21. Koestuslaitteen käyttäjälle näkyvät ruudut, sekä kysymys koestuskuvanotosta, sekä pyyntö valotuspainikkeesta.

## 6.6 Koestuslaitteen rakentaminen suunnitteluun pohjautuen

### 6.6.1 Komentojono koestuslaitteen ohjaukseen

Tehtaalla oli käytössä röntgensensorin koestuksessa käytettävä skripti, suomeksi komentojono, eli yksinkertainen koodikielellä kirjoitettu komentosarja, jota tässä tapauksessa ajettiin Tera Term -nimisellä terminaaliemulaattorilla. Tällä komentojonolla voitiin ohjata kuvatiedonlukukortin kautta röntgensensoria ja sitä kautta koestaa sen toimivuutta erilaisissa olosuhteissa. Röntgensensorin koestuskomentojono toimi koestuslaitteen komentojonon pohjana, sillä se sisälsi jo lähes kaiken koestuslaitteen ohjauksessa tarvittavan tiedon. Kuten osiossa 6.3 mainitaan, kuvatiedon siirtämiseen tietokoneelle kuvatiedonlukukortilta vaati erillisen kuvansiirto-ohjelman käyttöä, sillä Tera Term -terminaaliemulaattorilla ei voinut siirtää kuvatietoa. Koestuslaitteeseen muokattu komentojono haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena, koestuslaitteen turvallisen käytön varmistavana sekä mahdollisimman käyttäjäystävällisenä. Komentojonon toimintakaavio on havainnollistettu kuvassa 21. Komentojonon alussa käyttäjältä kysytään: Otetaanko koestuskuva? Vastattaessa kyllä siirrytään komentojonon seuraavaan vaiheeseen. Käyttäjälle näkyvä kysymys koestuskuvan ottamisesta näkyy kuvassa 22. Muussa tapauksessa käyttäjältä kysytään: Suljetaanko komentojono? Kun komentojonossa siirrytään kuvanottovaiheeseen, alustaa se koestuslaitteen komponentit kuvanottoa varten. Alustuksen jälkeen komentojono odottaa signaalia valotuspainikkeelta, joka näkyy kuvassa 22. Signaalin saatuaan ohjelma asettaa putkipään valottamaan, eli muodostamaan röntgensäteilyä sekä röntgensensorin vastaanottamaan sitä. Valotuksen päätyttyä komentojono lopettaa röntgensensorin säteilynluvun. Tämän jälkeen komentojono avaa kuvansiirto-ohjelman, joka siirtää kuvat kuvatiedonlukukortilta tietokoneelle RJ45-kaapelia pitkin. Jos kuvansiirto-ohjelma ei saa yhteyttä kuvatiedonlukukorttiin, ilmoittaa se siitä käyttäjälle ja sulkee komentojonon. Kuvansiirron onnistuttua komentojono sulkee kuvansiirto-ohjelman. Tämän jälkeen komentojono kysyy käyttäjältä: Otetaanko uusi kuva? Jos uusi kuva halutaan ottaa, palaa komentojono koestuslaitteen komponenttien alustusvaiheeseen. Muussa tapauksessa käyttäjältä kysytään: Suljetaanko komentojono? Jos valotuspainike päästetään liian aikaisin, tulee näytölle ilmoitus virheestä. Tämän jälkeen käyttäjän on manuaalisesti kuitattava virhe koestuslaitteeseen sulautetun intraoraaliröntgenlaitteen ohjauspaneelista.



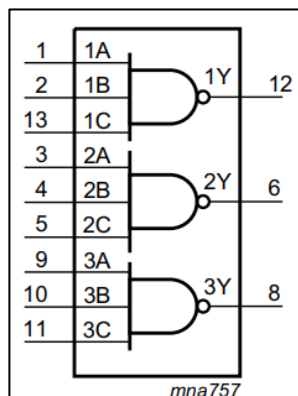
Kuva 22. Komentojonon toiminta-kaavio

Toimivan komentojonon luonti ei ollut helppo prosessi, vaikka tämä raportti saattaakin antaa sellaisen vaikutelman. Suurin ongelma oli kuvansiirto-ohjelman sekä Tera Termin välinen kommunikointi. Lisäksi kuvansiirto-ohjelma käyttää eri koodikieltä, kuin Tera Term. Oli opittava kahta eri koodikieltä ja luotava molempiin toimivat komentojonot.

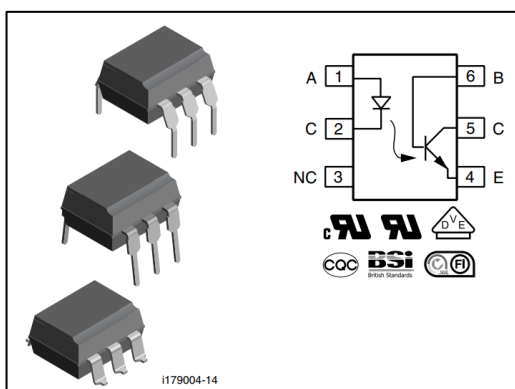
### 6.6.2 Rajapinta röntgenlaitteiden välille

Kahden eri röntgenlaitteen välisen kommunikoinnin mahdollistavan piirikortin suunnittelu alkoi tarvittavien signaalien kartoittamisella. Ensimmäinen tarvittava signaali oli röntgengeneraattorin prosessorille annettava valotussignaali. Röntgenlaite ei koskaan saa toimia täysin automaattisesti. Valotuskäskyn antaa ihminen pitämällä valotuspainiketta pohjassa koko valotuksen ajan. Valotus päättyy ja röntgenlaite antaa virheilmoituksen heti, jos painikkeen vapauttaa kesken valotuksen. Toinen signaali oli kuvatiedonlukukortille annettava käsky asettaa röntgensensori vastaanottamaan säteilyä. Tämä signaali oli röntgensensorin sekä putkipään yhteistoiminnan kannalta tärkeä. Kolmas signaali oli kuvatiedonlukukortilta tieto, kun röntgensensori on tilassa, jossa se kykenee vastaanottamaan ja tallentamaan röntgensäteilyä. Jotta kaikki kolme signaalia saatiin kulkemaan kahdessa eri jännitepotentiaalissa toimivien osien välillä,

tarvittiin jokaiselle signaalille optoerotin. Erottimia tarvittiin siis kolme kappaletta. Sopiviksi optoerottimiksi valikoitui CNY17-3-mallinen optoerotin. Kyseinen malli valittiin, sillä niitä löytyi tehtaalta valmiiksi. Tällöin ei tarvinnut tilata erikseen komponentteja työtä varten.



Kuva 23. 74LS10 NAND-piiri, jossa on kolme porttia.



Kuva 24. CNY17-3 optoerotin

Kun kaikki kolme signaalia toteutuu, annetaan valotuskäsky röntgengeneraattorin prosessorille. Vasta tällöin kaikki signaalit ohjataan yhteen pisteeseen. Tällaiseen tarkoitukseen parhaiten soveltuu AND-portti. AND-portissa on kaksi tai useampi sisääntulo, ja yksi lähtö. Kuvassa 25 on havainnollistettu AND-portin totuustaulu. Jokaisen sisääntulon on toteuduttava, jotta lähtö vaihtaa tilaa, joko nolasta ykköseksi, tai toisinpäin. Tässä työssä käytettiin invertoivaa AND-piiriä, eli NAND-piiriä. Tämän tyyppisessä piirissä lähdön tila on aina päinvastainen. Toisin sanoen portin lähtö on normaalisti yksi, ja kaikkien tulojen toteutuessa lähtö muuttuu nolnaan. Työhön NAND-

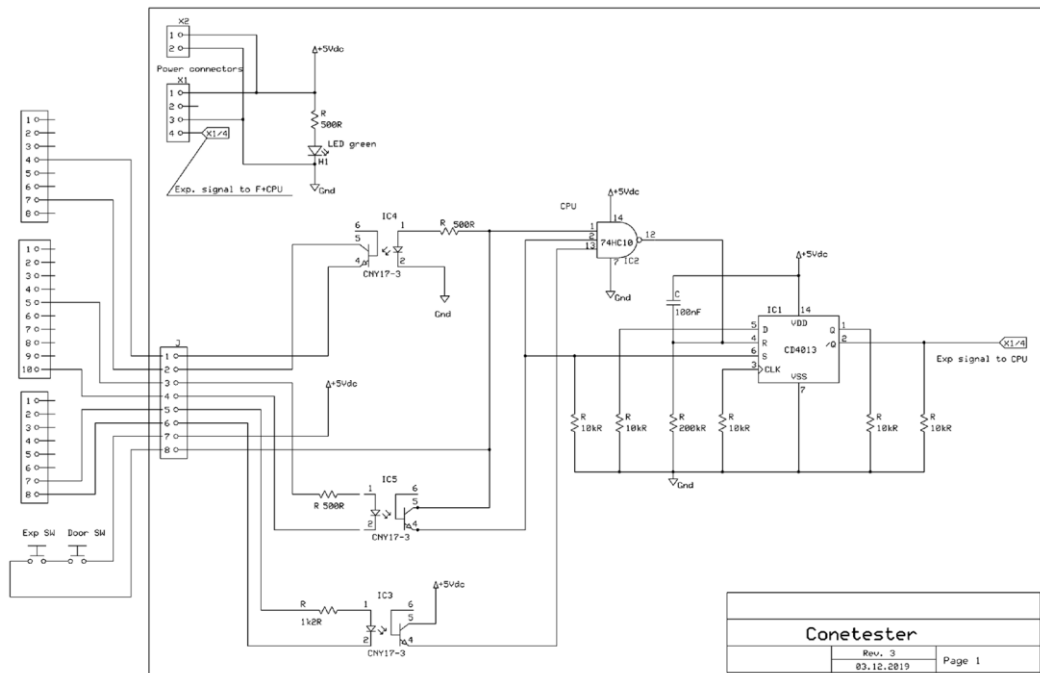
portiksi valittiin 74LS10-mallista NAND-piiriä, josta käytettiin vain yhtä porttia. 74LS10-NAND-piirin jokaisella portilla on kolme tuloa, joka oli juuri oikea määrä koestuslaitteessa tarvittaville kolmelle signaalille. Kuvassa 23 on 74LS10-piirin datalehdeltä kopioitu piirin rakennekuva. Syy invertoivan portin käytölle selittyy tarkastelemalla pistettä, johon portin lähtö kytkettiin.

Tulo		Lähtö
A	B	$A \times B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Kuva 25. AND-portissa tulot kerrotaan yhteen, jolloin vain kaikkien tulojen ollessa 1, portin lähtö vaihtaa tilaa.

Valotuskäskyn oli pysyttävä päällä koko kuvauksen ajan. Tähän tarvittiin kiikkua, eli flip-floppia. Kiikku on elektroninen komponentti, joka muistaa sille määritetyn tilan. Kiikussa on kaksi lähtöä, joista toinen on aina tilassa yksi, ja toinen tilassa nolla. Kiikun kytkeytyessä vaihtavat lähdöt tilojaan päinvastaisiksi. Kiikkuja on erityyppisiä: RS-kiikku, D-kiikku, T-kiikku sekä JK-kiikku. Jokainen tyyppi eroaa toisistaan hieman toimintatapansa perusteella. Työhön valittiin CD4013-piiri. Piirissä on kaksi D-tyypin kiikkua. D-tyypin kiikussa on neljä tuloa ja kaksi lähtöä. Set-tulo kytkee kiikun, eli asettaa lähdöt määritettyyn tilaan. Reset-tulo puolestaan palauttaa kiikun lähdöt alkuperäiseen tilaansa. Työssä kiikku haluttiin pitää set-tilassa vain kuvattaessa. Tällöin kun NAND-portin kolmen tuloa ei toteudu, on sen lähtö tilassa yksi. NAND-portin lähtö on kytkettynä kiikun reset-tuloon, jolloin se pitää kiikun reset-tilassa aina, kun ei haluta kuvata. Lisäksi kiikussa on clock-, eli kello- sekä data-tulot. Näitä käytetään, kun kiikkua halutaan ohjata pulssisignaalilla, esimerkiksi laskurina. Joukaisella kello-tulon nousevalla signaalilla kopioidaan data-tulon signaali kiikun lähtöön yksi. Jos data-tulo on tilassa yksi, tällöin lähtö saa tilan yksi, ja päinvastoin. Tässä työssä kumpaakaan näistä tuloista ei käytetty. Kiikun ohjaamiseen tarvittiin vain set- sekä reset-tuloja.

Näistä viidestä komponentista, reikälevystä, kondensaattorista, monesta vastuksesta, hyppylangoista sekä liittimistä luotiin piirikortti, jolla voitiin liittää toisiinsa kahden eri röntgenlaitteen komponentteja, joita ei ollut suunniteltu toimimaan keskenään. Aluksi luotiin prototyyppi, jolla voitiin todentaa suunnitelman toimiminen sekä hienosäätää vastuksien kokoa sekä kokeilemaan erilaisia ratkaisuita ennen lopullisen piirikortin luomista. Piirikortille lisättiin ledi indikoimaan piirikortin jännitteen statusta. Ledin palaessa, on piirikortilla jännite. Ledin ollessa pimeänä on se joko rikki tai piirikortilla ei ole jännitettä.



Kuva 26. Piirikaavio piirikortista



Kuva 26 on piirikaavio piirikortista. Kuvasta on poistettu muutamia salassa pidettäviä nimityksiä liittimille. Kuitenkin piirikortin toiminta on täysin kuvanmukainen. Piirikortin toiminta alkaa, kun koestuslaitteen komentojono saapuu kohtaan, jossa käyttäjää pyydetään painamaan valotuspainiketta. Valotuspainike näkyy kuvan vasemmassa alareunassa nimellä "Exp SW". Valotuspainikkeen vieressä kuvassa näkyy "Door SW". Tämä on turvallisuustoiminto koestuslaitteen ovesa. Koestuslaitteen lyijykaapin oveen on lisätty katkaisija, jonka on oltava suljettuna, jotta valotuspainikkeen käsky voi toimia. Tämä katkaisija estää säteilynmuodostamisen oven ollessa auki. Komentojonon pyydettyä valotuspainikkeen signaalia, käyttäjä pitää painiketta pohjassa, kunnes koko kuvanotto prosessi on toteutunut. Käyttäjän painaessa valotuspainiketta tapahtuu seuraavaa:

1. Valotuspainikkeen signaali menee 5 voltin jännitteenä kuvassa ylimmän optoerottimen tuloon yksi ja kytkee ledin palamaan. Lisäksi signaali menee 5 voltin jännitteenä keskimmäisen optoerottimen tuloon viisi, joka on erottimen transistoripuoli. Koska keskimmäisen optoerottimen ledi ei vielä pala, ei sen transistori ole kytkeytynyt, jolloin 5 voltin signaali ei etene optoerottimelta vielä eteenpäin. Valotuspainikkeen 5 voltin signaali menee vielä kolmanteen kohtaan, NAND-portin tuloon yksi.
2. Ylimmän optoerottimen ledin syttyessä kytkeytyy optoerottimen transistori johtavaan tilaan. Tällöin kuvatiedonlukukortille menee 15 voltin signaalina käsky valmistella kuvatiedonlukukortti sekä röntgensensori vastaanottamaan säteilyä.
3. Kuvatiedonlukukortti ilmoittaa valmiudestaan keskimmäisen optoerottimen ledille 15 voltin signaalina. Ledi syttyy ja saa transistorin johtamaan, jolloin 5 voltin signaali kulkeutuu NAND-portin tuloon kaksi sekä kiikun set-tuloon. Kiikku ei kuitenkaan vaihda lähtöjen tiloja, sillä NAND-portin tulo syöttää 5 voltin signaalin kiikun reset-tuloon. Tämä pitää kiikun reset-tilassa.
4. Kuvatiedonlukukortti ilmoittaa röntgensensorin valmiudesta antamalla 15 voltin signaalin alimman optoerottimen ledille, joka saa optoerottimen transistorin johtamaan 5 voltin signaalin NAND-portin tuloon 13.

5. Kun kaikki kolme signaalia toteutuvat NAND-portin tuloihin, vaihtaa se lähdön nolla-tilaan. Tällöin signaali katkeaa kiikun reset-tulolta. Kiikun set-tulo aktivoituu ja lähtöjen tilat vaihtuvat.
6. Kiikun tulolta ohjataan 5 voltin signaali röntgengeneraattorin prosessorille, joka ohjaa putkipään muodostamaan röntgensäteilyä.

Säteilyä muodostuu röntgengeneraattorille röntgenlaitteen ohjauspaneelilta määritetyn ajan verran. Jos valotuspainike päästetään kesken säteilymuodostuksen, katkeaa signaali NAND-piirin tuloon, jolloin sen lähdön tila vaihtuu ja 5 voltin signaali ohjataan kiikun reset-tuloon. Tällöin kiikku vaihtaa lähtöjen tiloja ja valotussignaali katkeaa. Tällöin säteilymuodostus pysähtyy, röntgenlaite menee virhetilaan. Tämä on täysin normaali toiminto, jonka säteilylaki vaatii jokaiselta röntgenlaitteelta turvallisuussyistä. On totta, että piirikorttia voi ohjata valotuspainikkeella myös silloin, kun komentojono ei sitä erikseen pyydä. Tämä ei kuitenkaan aiheuta mitään, sillä röntgengeneraattori ei ohjaa putkipäätä muodostamaan säteilyä ennen kuin komentojono on käskenyt röntgengeneraattoria niin toimimaan.


### 6.6.3 Ensimmäiset koestukset

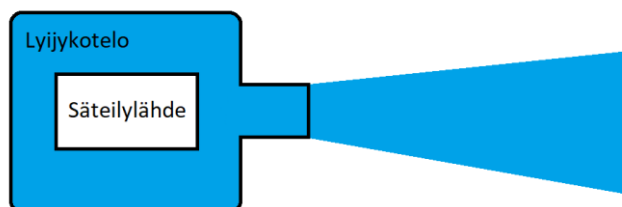
Alun koestusvaiheessa koestuslaite oli kasattuna pöydälle, jota säilytettiin suuressa koestuskopissa, jonka seinät oli vuorattu lyijyllä. Tällöin koestuslaitetta voitiin käyttää turvallisesti ilman omaa lyijykaappia ohjaamalla sitä koestuskopin ulkopuolelta. Ensimmäisillä kuvilla haettiin summittaista asetelua röntgensensorille sekä putkipäälle. Röntgensäteet haluttiin kohdistaa mahdollisimman keskelle röntgensensoria. Heti ensimmäisten kuvien kohdalla huomattiin ongelma: Kuvat tulivat tietokoneelle RAW-muodossa eli raakakuvana. Koestuslaitteella otettavat kuvat tarkastetaan ja mitataan kuvanlukuohjelmalla, mutta käytettävä kuvanlukuohjelma ei kyennyt lukemaan RAW-muotoisia kuvia. Täten kuvat oli muunnettava toiseen muotoon. Aluksi kokeiltiin ImageJ-nimisen avoimen lähdekoodin kuvanprosessointiohjelman käyttöä. Kuvat saatiin muutettua ImageJ:llä RAW-muodosta TIF-muotoon. Kuvanlukuohjelma kykeni lukemaan TIF-muotoista kuvaa. Kuitenkaan ohjelmaa ei haluttu käyttää, sillä se toi lisävaiheita prosessiin. Prosessista haluttiin mahdollisimman yksinkertainen käyttäjälle,

jolloin kaikista ylimääräisistä manuaalisista vaiheista haluttiin luopua. Oli löydettävä toinen ratkaisu.

#### 6.6.4 Kuva RAW-muodosta TIFF-muotoon

Kuvien muuntamiseen RAW-muodosta TIFF-muotoon luotiin lyhyt ohjelma C-kielillä. Ohjelmalle ei määritetty mitään nimeä, joten kutsutaan sitä kuvanmuunnosohjelmaksi. Komentojono kutsuu kuvanmuunnosohjelmaa vastaanotettuaan onnistuneesti kuvan kuvatiedonlukukortilta RAW-muodossa. Kuvanmuunnosohjelma avaa RAW-muotoisen röntgenkuvan ja muuntaa sen TIFF-muotoon.

 = Röntgensäteilyä



Kuva 27. Säteilyä muodostuu joka suuntaan, mutta se ohjataan vain haluttuun suuntaan.

#### 6.6.5 Toiset koestukset

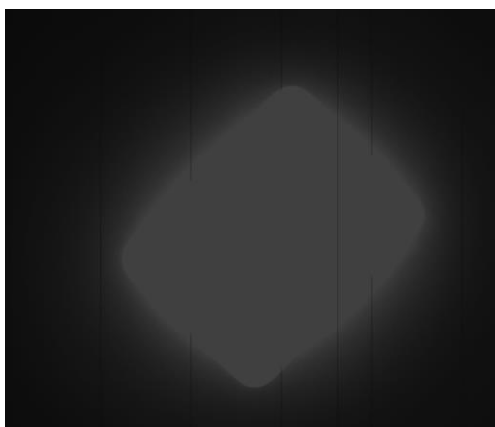
Kun röntgenkuva saatiin kuvanlukuohjelmalle soveltuvaan muotoon, voitiin aloittaa tarkemmat koestukset. Ensimmäisenä sensorin ja putkipään välinen etäisyys piti asettaa oikein. Jokaisen valmistetun kartiosuodattimen on oltava juuri oikean kokoinen. Tämä varmennetaan ottamalla koestuskuva kartion läpi ja mittaamalla kuvassa näkyvän kartiosuodattimen rajaaman alueen halkaisija tai ristimitta riippuen kartiosuodattimen rajaimen muodosta. Jokaiselle erikokoiselle kartiosuodattimelle oli määritetty tietyt raja-arvot, joiden väliin kartiosuodattimen rajaaman alueen oli osuttava. Raja-arvot oli määritetty laskennallisesti tietylle etäisyydelle, joten uuteen koestuslaitteeseen oli kyettävä asettamaan sama etäisyys sensorin sekä putkipään välille. Syy etäisyyden merkitykselle johtuu röntgensäteiden leviämisestä. Säteilyä muodostuu joka suuntaan,

mutta röntgensäteet suuntaan vain haluttuun asentamalla säteilylähteen ympärille lyijykotelo, jossa on vain yksi aukko, joka päästää röntgensäteet läpi. Tämä on havainnollistettu kuvassa 30. Kaikki muu säteily absorptoituu. Aukosta kulkeva säteily etenee keilamaisesti tietyssä kulmassa. Jos putkipään ja sensorin välinen etäisyys on liian pitkä, tällöin kuvassa näkyvä rajattu alue on liian suuri raja-arvoihin verrattuna. Sama pätee myös liian läheltä otettuun kuvaan. Tosin tällöin rajattu kuva on liian pieni. Kuva-etäisyyden oli oltava oikea sekä vakio, jotta virheellisistä, tai viallisista osista valmistetut kartiosuodattimet voitiin havaita. Raja-arvot ovat salassapidettavaa tietoa, eikä niitä siitä syystä voida kertoa. Sopiva etäisyys haettiin mittaamalla vanhasta koestuslaitteesta putkipään sekä kuvalevyjen telineen välinen etäisyys. Tämän jälkeen etäisyyttä hienosäädettiin, jotta kuvat olivat jokaisella kartiosuodattimella juuri raja-arvojen välissä.

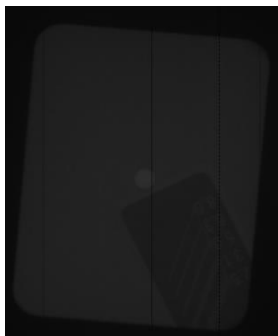
Oikeaa etäisyyttä määritettäessä otettiin paljon koestuskuvia. Heti alussa huomattiin, että röntgensensori on aivan liian herkkä sille säteilymäärälle, jonka intraoraaliröntgenlaitteen putkipää muodosti. Kuvat ylivalottuivat. Kuvassa 31 näkyy ylivalottumisesta johtuva rajausalueen leviäminen. Aluksi säteilymuodostusaikaa lyhennettiin 200 millisekuntista 50 millisekuntiin asti, mutta sekään ei riittänyt. Säteilyä oli suodatettava jollain keinolla. Röntgensäteilyä voidaan suodattaa monella materiaalilla. Suoraan tehtaalta saatavilla oli alumiinia, kuparia sekä lyijyä, eikä koestuslaitetta varten haluttu tilata erikseen materiaalia. Paras suodatuskyky vaihtoehtoista oli lyijyllä. Kuitenkin se on aivan liian tehokas suodattamaan, jolloin sitä ei voitu käyttää. Jäljelle jäi alumiini sekä kupari. Näistä vaihtoehtoista kupari on suodatuskyvyltään parempi. Kartiosuodattimen päähän teipattiin kaksi millimetriä paksu kuparilevy, joka osoittautui lyijyn tavoin liian tehokkaaksi suodattimeksi. Kuva 30 on esimerkki alivalottuneesta koestuskuvasta. Lisäämällä säteilymuodostuksen aikaa oli mahdollista saada hyvälaatuinen kuva, mutta kuvausprosessia ei haluttu hidastaa. Kahden millimetrin kuparilevyn tilalle vaihdettiin yhden millimetrin paksuinen kuparilevy. Tämä oli jo lähellä sopivaa suodatusta, mutta kuitenkin hieman liian vähän. Kuvassa 28 näkyy onnistunut koestokuva. Koestuksien jälkeen tiedettiin, että kuparin oikea paksuus on yli yksi millimetri, ja alle kaksi millimetriä. Kuitenkaan tehtaalta ei löytynyt mitään sopivaa vaihtoehtoa. Oli käytettävä yhden millimetrin paksuista kuparilevyä. Hienosäätö

toteutettiin lisäämällä alumiinia kuparilevyn lisäksi. Ensin lisättiin 15 millimetriä alumiinia. Tämä osoittautui kuitenkin liian suureksi määräksi ja kuvasta tuli alivalottunut. Lopulta sopivaksi määräksi alumiinia osoittautui kolme millimetriä. Osa koestuskuvista on avattu Windowsin kuvankatseluohjelmalla, joka näyttää kuvan eri tavalla, kuin kuvanlukuohjelma. Osa kuvista on avattu kuvanlukuohjelmalla, mutta ovat muokkaamattomia, ja osasta on muokattu kuvanlukuohjelmalla kirkkautta sekä kontrastia ja vaihdettu musta ja valkoinen väri päittäin. Värit vaihdetaan, jotta kuvaa tulostettaessa arkistoon ei paperille tulostu ison mustan alueen keskelle valkoinen läikkä, vaan rajattu alue näkyy mustana valkoista vasten. Mustetta säästyy. Muokkaamaton ja muokattu kuva on esitetty kuvassa 31.

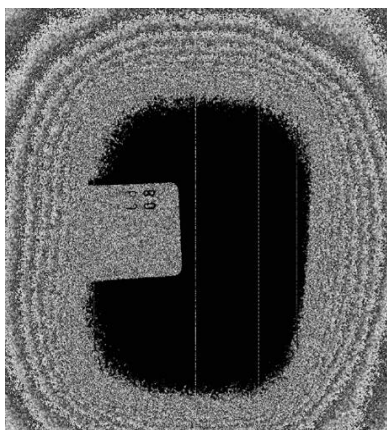
Putkipäässä on istukka, johon kartiosuodatin kierretään paikoilleen. Tätä istukkaa muokattiin tehtaan konepajassa lisäämällä istukkaan kolme millimetriä alumiinia sekä yksi millimetri kuparia. Näin mitään ylimääräisiä levyjä ei käyttäjän tarvitse lisätä ,ja testiympäristö pysyy vakiona.



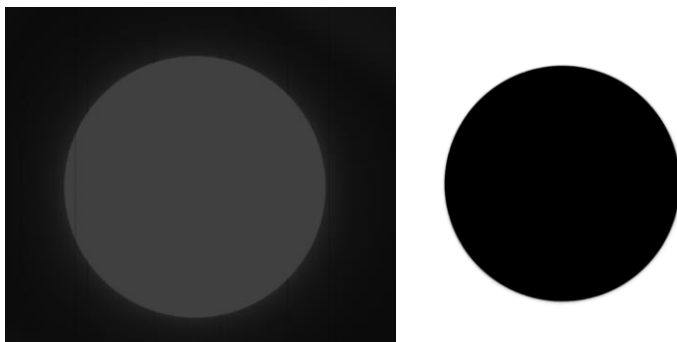
Kuva 28. Ylivalottunut kuva suorakaiteenmuotoisen kartiosuodattimen rajaamasta alueesta.



Kuva 29. Onnistunut kuva suorakaiteen muotoisen kartiosuodattimen rajaamasta alueesta. Kuvassa näkyy viivaparityökalu oikeassa alareunassa rajatulla alueella. Kuva on otettu 60kV:n jännitteellä ja 50 millisekuntin säteilynmuodostusajalla. Yhden millimetrin paksuisen kuparilevyn lisäksi käytettiin kolme millimetriä paksuista alumiinilevyä.



Kuva 30. Alivalottunut kuva suorakaiteen muotoisen kartiosuodattimen rajaamasta alueesta. Rajattu alue on epätarkka. Kuvassa näkyy viivaparityökalu vasemmalla rajatulla alueella. Kuva on otettu 60kV:n jännitteellä ja 50 millisekuntin säteilynmuodostusajalla. Yhden millimetrin paksuisen kuparilevyn lisäksi käytettiin 15 millimetriä paksuista alumiinilevyä.



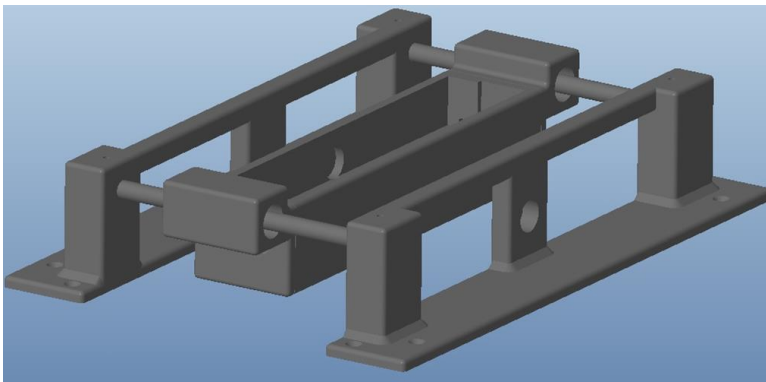
Kuva 31. Kuvat pyöreän kartiosuodattimen rajaamasta alueesta. Vasemmanpuoleinen kuva on avattu Windowsin kuvankatseluohjelmalla ja oikeanpuoleinen kuvanlukuohjelmalla. Oikeanpuoleisesta kuvasta on käännetty musta ja valkoinen väri päittäin ja säädetty hieman kirkkautta ja kontrastia.

#### 6.6.6 Kahdenmittaisia kartiosuodattimia

Tehtaan valmistamia kartioita on kahta eri pituutta. Molemmat pituudet koestetaan samassa koestuslaitteessa. Vanhassa koestuslaitteessa kuvalevyllä oli kaksi tukea, joista toista käytettiin lyhyttä kartiosuodatinta koestettaessa ja toista pitkää kartiosuodatinta koestettaessa. Toleranssit rajatun alueen mitalle oli määritetty näiden etäisyyksien mukaan, jolloin uudessa koestuslaitteessa oli oltava samat etäisyydet. Uudessa koestuslaitteessa ei ollut irrallisia, helposti liikuteltavia kuvalevyjä, vaan painava, herkkä röntgensensori. Kuitenkin etäisyyttä oli kyettävä muuttamaan. Heti alussa päätettiin, että putkipäätä ei liikuteta. Se painaa monta kiloa, eikä sellaisen painon liikuttaminen ole ergonomista. Röntgensensorista oli siis tehtävä liikutettava. Tehtaalla oli 3D-tulostimia, joita voitiin käyttää tarvittavan liikutusmekanismin luomisessa.

Ensin röntgensensorille suunniteltiin teline, jossa se pysyy vakaasti. Suunniteltu teline on havainnollistettu kuvassa 32. Sensorin kyljessä oli pulteille valmiit kierteet. Telineeseen tehtiin reiät kierteiden kohtiin, joista sensori voitiin tukevasti kiinnittää telineeseen. Seuraavaksi suunniteltiin liikutusmekanismi, jolla sensoria voitiin liikuttaa.

Parhaaksi vaihtoehdoksi osoittautui kaksi pyöreää metallitankoa, joihin laakerien avulla teline voitiin kiinnittää. Näin sensoria oli helppo liikuttaa. Metallitangot piti saada



Kuva 32. 3D-tulostimella tulostettu teline.

pysymään paikoillaan ja sopivalla korkeudella, jotta röntgensäteily osuu sensorin keskikohtaan. Sensoria oli kyettävä liikuttamaan 5 senttimetriä eteenpäin ja taaksepäin. Tehtiin päätykappaleet, joiden varaan metallitangot sekä röntgensensori asetettiin. Sensorin telineeseen asennettiin magneetit sekä etu- että takapuolelle. Päätykappaleisiin asennettiin metalliset levyt, joihin magneetti tarttui. Näin sensori saatiin pysymään paikoillaan. Tulostettu ja koottu sensorinliikutusmekanismi oli loistava. Magneetit eivät olleet liian tiukkoja, ja sensorin liikuttelu oli todella vaivatonta. Kuitenkin kyhäelmä oli vankka ja magneetit pitivät sensorin hyvin paikoillaan.

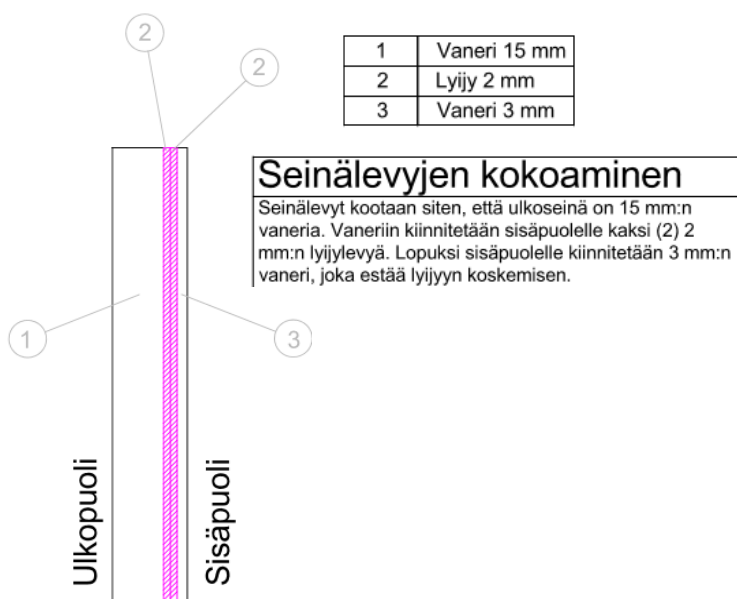
#### 6.6.7 Lyijykaappi

Koestuslaite oli rakennettava lainmukaiseksi, jolloin laitetta käyttävä henkilö ei saa altistua säteilylle. Helpoin tapa estää säteilylle altistuminen oli sulkea koestuslaitteen säteilylähde, putkipää sekä kaikki säteilylle altistuvat osat lyijyllä vuorattuun kaappiin. Lyijyn paksuus kaapin seinissä oli oltava niin paksu, ettei säteily läpäise sitä ollenkaan. Tällöin työntekijä voi turvallisesti käyttää koestuslaitetta ilman minkäänlaista altistumista säteilylle. Kuten tiedetään, lyijy on raskasmetalli, eikä sitä kuulu käsitellä paljain käsin. Kaappi ei siis voinut olla pelkkää lyijyä, eikä muusta materiaalista valmistettua, jonka ulko- tai sisäpinnalla on lyijyä. Kaappi päätettiin rakentaa kahdesta vanerilevystä, joiden väliin lyijy kiinnitettiin. Näin työntekijä ei altistu lyijylle.



Mallia lyijykaappiin otettiin tehtaan muista lyijykaapeista. Seinäelementit valmistettiin 15 millimetriä paksusta ja kolme millimetriä paksusta vanerista, joiden väliin liimattiin kaksi kahden millimetrin paksuista lyijylevyä. Näin lyijyä tuli yhteensä neljä millimetriä, mikä riitti absorptioimaan kaiken säteilyn. Tehtaalla ei ollut mahdollisuuksia tehdä lyijytöitä. Tästä syystä lyijyt sekä vanerilevyt tilattiin alihankintana sellaiselta yritykseltä, joka kykeni leikkaamaan vanerit ja lyijyt sekä liimaamaan ne toisiinsa. Seinäelementin rakennekuva, joka lähetettiin seinäelementon toimittajalle, on havainnollistettu kuvassa 33. Lisäksi toimittajalle lähetetty lista tilattavien osien mitoista on havainnollistettu kuvassa 34. Lyijykaapin koko määritettiin mittaamalla sen sisälle sijoitettavien komponenttien vaatima tila, ja tekemällä kaapista varmuudenvuoksi hiukan suurempi. Kaapin suunnittelussa huomioitiin kaikki vanhasta koestuslaitteesta löydetty ominaisuudet, joita haluttiin parantaa. Suurin ongelma vanhan koestuslaitteen lyijykaapissa oli oven avautuminen oikealta vasemmalle, suoraan tietokoneen sekä työntekijän eteen. Uudessa lyijykaapissa ovi suunniteltiin avautumaan vasemmalta oikealle, jolloin sen käyttö olisi helpompaa oikeakätiselle, eikä ovi aukenisi tietokoneen eteen. Uudessa lyijykaapissa korjattiin lisäksi turvallisuusriskiksi todettu ovikatkaisija, joka vanhassa lyijykaapissa oli suojaamatta. Käyttäjä saattoi vahingossa painaa ovikatkaisijaa, ja koestuslaitteen röntgenlaitteen ollessa automaattivalotus-asennossa, alkaisi se heti ovikatkaisijan kytkeytyessä muodostamaan röntgensäteilyä, joka tulisi avonaisesta oviaukosta täysin suodattamattomana käyttäjän kehoon. Uuteen lyijykaappiin ovikatkaisija sijoitettiin syvemmälle ja suojattiin 3D-tulostimella tulostetulla suojalla. Oveen asennettiin 3D-tulostimella tehty uloke, joka mahtui

painumaanovipainikkeen suojan sisään ja painamaan painiketta oven ulkeutuessa. Näin estettiin tahaton ovipainikkeen kytkeminen ja lisättiin työturvallisuutta.



Kuva 33. Seinäelementit rakentaneelle yritykselle annetut ohjeet.

Osanumero	Materiaali	Korkeus x leveys x paksuus	Pinta-ala m <sup>2</sup>	Tilausmäärä
1	Vaneri	330 x 390 x 15 mm	0,1287	1
2	Vaneri	330 x 410 x 15 mm	0,1353	1
3	Vaneri	580 x 430 x 15 mm	0,2494	1
4	Vaneri	580 x 430 x 15 mm	0,2494	1
5	Vaneri	330 x 170 x 15 mm	0,0561	1
6	Vaneri	370 x 170 x 15 mm	0,0629	1
7	Vaneri	370 x 410 x 15 mm	0,1517	1
8	Vaneri	330 x 580 x 15 mm	0,1914	1
9	Vaneri	100 x 60 x 15 mm	0,006	2
10	Vaneri	80 x 120 x 15 mm	0,0096	1
11	Vaneri	100 x 80 x 15 mm	0,008	1
12	Vaneri	330 x 390 x 3 mm	0,1287	1
13	Vaneri	330 x 410 x 3 mm	0,1353	1
14	Vaneri	580 x 430 x 3 mm	0,2494	1
15	Vaneri	580 x 430 x 3 mm	0,2494	1
16	Vaneri	330 x 170 x 3 mm	0,0561	1
17	Vaneri	370 x 170 x 3 mm	0,0629	1
18	Vaneri	370 x 410 x 3 mm	0,1517	1
19	Vaneri	330 x 580 x 3 mm	0,1914	1
20	Vaneri	100 x 60 x 3 mm	0,006	2
21	Vaneri	80 x 120 x 3 mm	0,0096	1
22	Vaneri	100 x 80 x 3 mm	0,008	1
23	Lyijy	330 x 390 x 2 mm	0,1287	2
24	Lyijy	330 x 410 x 2 mm	0,1353	2
25	Lyijy	580 x 430 x 2 mm	0,2494	2
26	Lyijy	580 x 430 x 2 mm	0,2494	2
27	Lyijy	330 x 170 x 2 mm	0,0561	2
28	Lyijy	370 x 170 x 2 mm	0,0629	2
29	Lyijy	370 x 410 x 2 mm	0,1517	2
30	Lyijy	330 x 580 x 2 mm	0,1914	2
31	Lyijy	100 x 60 x 2 mm	0,006	4
32	Lyijy	80 x 120 x 2 mm	0,0096	2
33	Lyijy	100 x 80 x 2 mm	0,008	2

Kuva 34. Seinäelementit rakentaneelle yritykselle annettu lista tarvittavasta materiaalmäärästä

Lyijykaapin valmistuttua sen turvallisuus piti vielä varmistaa vuotosäteilymittauksella. Mittauksessa mitattiin lyijykaapin läpäisemä säteily monesta suunnasta. Läpäisevää säteilyä kutsutaan vuotosäteilyksi, eikä sitä saanut ilmetä ollenkaan. Kun lyijykaappi oli todettu lainmukaiseksi ja turvalliseksi käyttää, voitiin aloittaa loppukoestaminen.

#### 6.6.8 Loppukoestus

Loppukoestuksessa varmistettiin, että uusi koestuslaite vastasi vaatimusmäärityksissä annettuja ehtoja. Loppukoestuksen aikana viivaparityökalun, sekä suodattimen mittatyökalun käytöstä päätettiin luopua. Kartiosuodattimen koestuskuvasta mitataan vain rajatun alueen halkaisija. Suodattimen mittatyökalu on käytännössä turha, sillä sen keskittäminen kartiosuodattimen kanssa on hankalaa, jolloin kuvaan muodostuva keskipiste ei välttämättä ole keskellä rajattua aluetta. Viivaparityökalu taas on tarkoitettu röntgensensorin tarkkuuden varmistamiseksi. Koestuslaitteella ei tarkisteta röntgensensorin laatua, vaan suodatetun alueen kokoa sekä eheyttä. Näistä vaiheista luopumalla voitiin vähentää kuvamäärä kahdesta kuvasta yhteen kuvaan. Tämä nopeutti prosessia todella paljon.

Vertaillakseen vanhaa ja uutta koestuslaitetta, suoritettiin yhden kartiosuodattimen koestus molemmilla laitteilla. Vertailussa ei huomioitu muuttumattomia asioita, kuten paperin tulostusta arkistoon sekä sarjanumeron valintaa ja merkitsemistä tietokantaan. Kartiosuodatin asetettiin ensin vanhaan koestuslaitteeseen, ja otettiin kaksi röntgenkuvaa, joista ensimmäinen viivaparityökalun läpi ja toinen suodattimen mittaustyökalun läpi. Kuvalevy asetettiin kuvanlukulaitteeseen, joka siirsi kuvat tietokoneelle. Tähän koko prosessiin kului aikaa 2 min 25 s. Sama prosessi toistettiin uudella koestuslaitteella. Viivapari- sekä suodattimen mittaustyökaluja ei käytetty ja otettiin vain yksi kuva kahden sijaan. Koko prosessi kesti 24 sekuntia. Uudella koestuslaitteella saavutettiin noin kahden minuutin säästö jokaista koestettua kartiosuodatinta kohtaan.

Loppukoestuksessa todettiin, että uusi koestuslaite on täysin vaatimusmäärittelyiden mukainen.

### 6.6.9 Lean-ajattelun vaikutus koestuslaitteen toteutuksessa

Leanissa on tärkeää poistaa kaikki ylimääräinen hukka. Koestuslaitteesta haluttiin poistaa kaikki ylimääräinen työ. Tämä johti muun muassa luopumaan kokonaan molempien työkalujen sekä kontrastityökalun että suodattimen mittatyökalun käytön lopettamiseen. Näiden työkalujen käyttöä ei voitu perustella mitenkään

### 6.6.10 Jatkokehitys

Koestuslaitetta rakennettaessa syntyi paljon kehitysideoita, joita ei ensimmäiseen versioon kannattanut tai voinut toteuttaa. Oven avaaminen vahingossa halutaan estää. Tämä onnistuu esimerkiksi riittävän vahvalla sähkömagneetilla, joka pitää oven lukittuna säteilymuodostuksen aikana. Sensorin liikutus suunniteltiin tapahtuvan sähkömoottoreilla esimerkiksi valitsemalla komentojonolla, mitä kartiosuodatinta halutaan koestaa. Suurin ja varmasti pian toteutuva kehitysidea koestuslaitteelle on kartiosuodattimen rajaaman alueen halkaisijan sekä ristimitan automaattinen mittaaminen tietokoneohjelmalla. Näin poistettaisiin mahdollinen inhimillinen mittavirhe sekä nopeutettaisiin työtä. Lisäksi tullaan kartoittamaan, voiko sarjanumeroiden valintaa sekä muodostusta automatisoida.

## 7. Yhteenveto

Kuten kaikissa projekteissa, oli alussa paljon epäselviä kysymyksiä. Projektin aikana kysymyksiin saatiin vastauksia, mutta samalla syntyi uusia kysymyksiä.

Vanha koestuslaite oli todella hidas ja varaosien saatavuus oli hyvin heikkoa. Lisäksi vanha koestuslaite oli hyvin epäergonominen. Muun muassa koestuslaitteen lyijykaapin ovi aukesi suoraan operaattorin käyttämän tietokoneen eteen. Lisäksi operaattori joutui vaihtamaan kartiosuodattimen sekä kuvalevyn väliin erilaisia työkaluja sekä kääntämään kuvalevyä eri asentoihin koestusprosessin aikana. Vaatimusmäärittämissä muun muassa kuvanottoa haluttiin nopeuttaa noin puolestatoista minuutista 30 sekuntiin.

Aluksi vaatimusmäärittäykset tuntuivat tiukoilta, eikä syntyneisiin kysymyksiin ollut minkäänlaisia vastauksia. Ongelmia lähdettiin ratkaisemaan yksi kerrallaan. Ensimmäinen haaste oli löytää sopiva röntgensensori. Sensorilla oli koestuslaitteessa suurin vaikutus lyijykaapin koon sekä kalustuksen määrittämisessä. Sopivan röntgensensorin löydyttyä mahdollistui koko koestuslaitteen sekä -prosessin hahmottaminen.

Seuraava haaste oli luoda yhteys kahden eri röntgenlaitteen komponenttien välille. Tämä yhteys kyettiin luomaan käyttämällä optoerotinta kahdessa eri potentiaalissa toimivien komponenttien kommunikaatioviestien välittäjänä. Kolmen optoerotin lisäksi tarvittiin kiikku, NAND-portti sekä vastuksia, kondensaattoreita ja reikälevy, johon komponenteista rakennettiin toimiva kommunikointiväline.

Optoerotin toimittua yhteys tietokoneelta koestuslaitteen prototyyppiin onnistui. Kuitenkaan kuvaa ei saatu näkymään oikein. Kuvan tiedostomuoto oli RAW, eli raakakuva, eikä kuvanlukuohjelma kyennyt sitä avaamaan. Oli keksittävä keino, jolla raakakuva voitiin kääntää luettavaan muotoon. Tämä ongelma ratkaistiin C-kielellä kirjoitetulla ohjelmalla, joka muunsi raakakuvan tiff-muotoon.

Koko koestuslaitteen prototyypin toimittua sulautettiin koestuslaite lyijyllä vuorattuun vanerikaappiin ja sen ympärille. Kaikki säteilyä muodostavat sekä säteilyä vastaanottavat komponentit sijoitettiin lyijykaappiin, jotta säteily ei pääse vaikuttamaan

koestuslaitteen ympärillä oleviin ihmisiin. Lyjykaapin valmistuttua oli koestuslaite lopullisessa muodossaan. Tämän jälkeen voitiin suorittaa loppukoestuksia.

Vanhalla koesturprosessilla kului aikaa 2 min 25 s prosessin alusta siihen, että kuvat olivat tietokoneella. Uusi koestuslaite kykeni samaan 24 sekuntissa. Lisäksi työturvallisuutta oli lisätty suojaamalla oven röntgensäteilynmuodostuksen katkaiseva kytkin, jottei sitä vahingossa voi painaa oven ollessa auki. Kuvanlaatu oli vähintään yhtä hyvä kuin vanhassa koestuslaitteessa. Uusi koestuslaite sekä -prosessi täytti täysin sille vaatimusmäärittelyssä annetut ehdot.

## Lähteet

- 1 Toshiko Narusawa ja John Shook, Kaizen Express, Fundamentals for Your Learn Journey, ISBN: 978-1-934109-23-6, Lean Enterprise Institute, 2009.
- 2 A brief history of Lean, Lean Enterprise Institute: <https://www.lean.org/WhatsLean/History.cfm> (Luettu 27.3.2019)
- 3 Ilkka Kouri: Lean taskukira ISBN 978-952-238-037-1, Teknologiateollisuus ry 6/2019
- 4 Kavo Kerr Group, Historiamme: <https://www.kavokerr.com/fi-fi/historiaamme> (Luettu 27.12.2019)
- 5 Säteilyturvakeskus: Säteilyn käyttö ISBN 951-712-498-8, Olavi Pukkila 2004
- 6 The Nobel Prize, Wilhelm Conrad Röntgen Biographical: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/rontgen/biographical/> (Luettu 9.2.2019)
- 7 [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5e/R%C3%B6ntgen%2C\\_Wilhelm\\_Conrad\\_%281845-1923%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5e/R%C3%B6ntgen%2C_Wilhelm_Conrad_%281845-1923%29.jpg) (Luettu 10.05.2021)
- 8 [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/UPMCEast\\_CTscan.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/UPMCEast_CTscan.jpg) (Luettu: 10.05.2021)
- 9 George E. Smith Facts: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2009/smith/facts/> (Luettu 9.5.2021)
- 10 Willard S. Boyle Facts: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2009/boyle/facts/> (Luettu 9.5.2021)
- 11 <https://www.kavo.com/en-us/imaging-solutions/kavo-focus-intraoral-x-ray> (Luettu: 11.05.2021.)
- 12 <https://www.kavo.com/en-us/imaging-solutions/kavo-focus-intraoral-x-ray#features> (Luettu: 11.05.2021)
- 13 [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/X-ray\\_of\\_all\\_32\\_human\\_teeth.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/X-ray_of_all_32_human_teeth.jpg) (Luettu 10.05.2021)
- 14 [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/X-ray\\_of\\_all\\_32\\_human\\_teeth.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/X-ray_of_all_32_human_teeth.jpg) (Luettu: 10.05.2021)
- 15 Jeffrey K. Liker: The Toyota way to service excellence ISBN 978-1-259-64110-7, McGraw-Hill Education 2017
- 16 Jeffrey K. Liker: Toyotan tapaan ISBN 978-952-220-226-0, Readme.fi 2010
- 17 Digitaaliset kuvantamismenetelmät: kuvalevy- ja taulukuvaustekniikat: <https://docplayer.fi/14797696-Digitaaliset-kuvantamismenetelmat-kuvalevy-ja-taulukuvaustekniikat.html> (Luettu 10.05.2021)
- 18 Optoerotin CNY17:  
<https://static6.arrow.com/aropdfconversion/726f2e3c73ef6a1e94e6268bdd10331c1c0cf660/cny17.pdf> (Luettu 10.05.2021)



- 19 NAND 74HC10: <http://www.farnell.com/datasheets/2115733.pdf> (Luettu: 10.05.2021)
- 20 Flipflop CD4013: <https://www.eleccircuit.com/cd4013-dual-d-type-flip-flops-datasheet/> (Luettu: 10.05.2021)
- 21 Robert Maurer, The Spirit of Kaizen ISBN: 978-0-07-179617-0, The McGraw-Hill companies, 2013
- 22 HUS, Tietokonetomografia: <http://www.hus.fi/sairaanhoito/kuvantaminen-ja-fysiologia/tietoa-tutkimuksista/Tietokonetomografia/Sivut/default.aspx> (Luettu 9.2.2019)