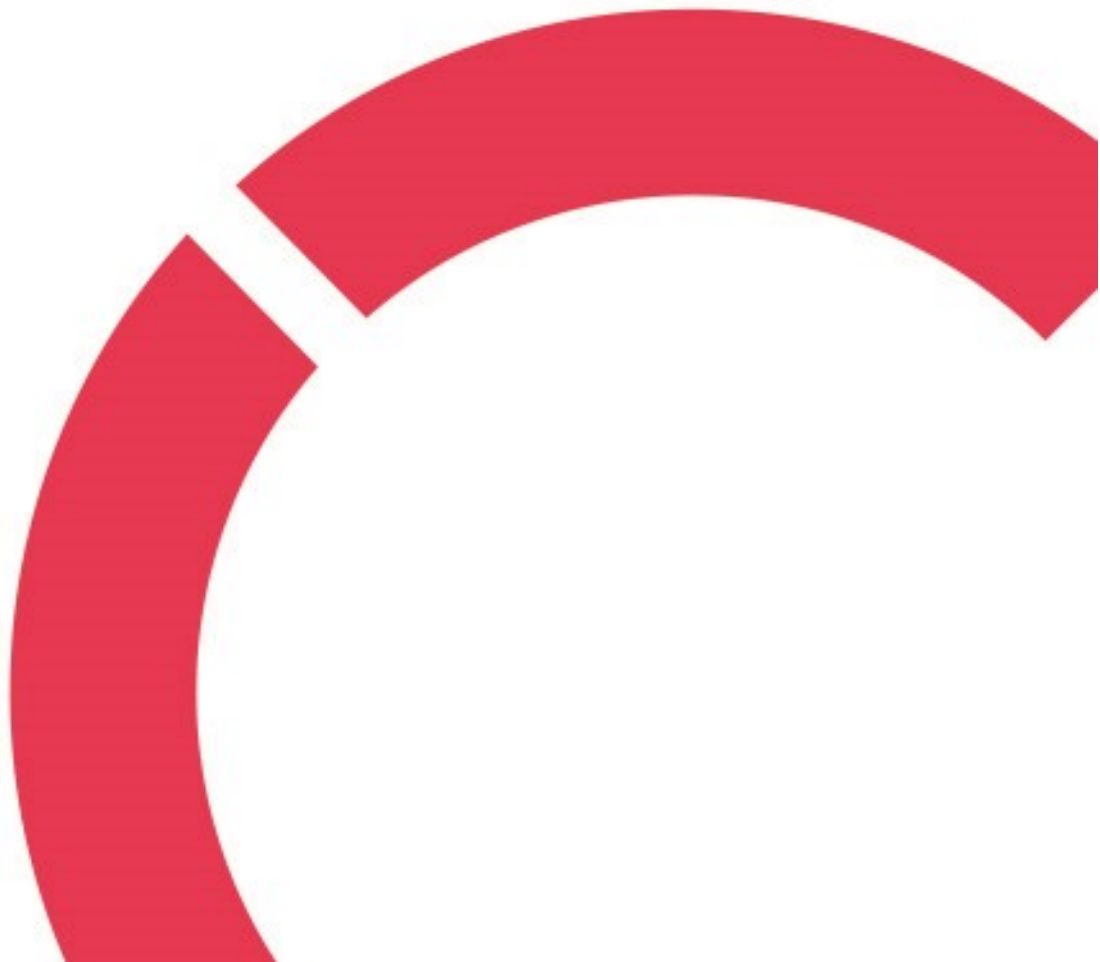


Roope Laamanen

**DIGITAALISEN RADIOGRAFIAN SOVELTAMINEN TEOLLISUU-
DESSA**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Tieto- ja viestintätekniikan koulutus
Joulukuu 2023**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Joulukuu 2023	Tekijä/tekijät Roope Laamanen
Koulutus Insinööri, tieto- ja viestintätekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi Digitaalisen radiografian soveltaminen teollisuudessa		
Työn ohjaaja Jari Isohanni		Sivumäärä 38
Työelämäohjaaja Kimmo Suorsa		
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli laatija toimeksiantajan DEKRA Industrial Oy:n käyttöön luotu videomateriaali erilaisten paneelitekniikkaa hyödyntävien digitaalisen radiografian ohjelmistojen käytöstä rikkomattomassa aineenkoetuksessa teollisuuden saralla.</p> <p>Materiaalissa käsiteltiin digitaalisen radiografian paneelitekniikan röntgenkuvauksen suorittamista, laitteistojen kalibrointia ja ylläpitoa sekä eri ohjelmistojen oikeaoppista käsittelyä. Lähdemateriaalina käytettiin suurimmaksi osaksi DEKRA:n sisäisiä koulutusmateriaaleja, mutta käytettiin myös verkosta kerättyä ja kirjallista materiaalia. Materiaalin suunnittelussa ja rajauksessa noudatettiin SFS-EN ISO 17636-2:2022:en (Non-destructive testing of welds – radiographic testing. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors) standardia, sekä DEKRA:n sisäisiä tarkastusohjeita. Materiaali rakennettiin näiden tietojen pohjalta.</p> <p>Materiaalin hyödyllisyyttä voidaan arvioida tällä hetkellä vaan teoriatasolla, koska se tehtiin tukemaan jo aiemmin saatua koulutusta aiheesta eikä toimimaan vain ja ainoastaan opetusmateriaalina.</p>		
Asiasanat Digitaalinen radiografia, kuvalevytekniikka, paneeli, paneelitekniikka, rikkomaton aineenkoetus		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date December 2023	Author Roope Laamanen
Degree programme Engineer, information, and communication technologies		
Name of thesis Application of digital radiography in the field of industry		
Centria supervisor Jari Isohanni	Pages 38	
Instructor representing commissioning institution or company Kimmo Suorsa		
<p>The point of this thesis was to create video material for DEKRA Industrial Oy about the uses of digital detector array in the field of industry, more specifically in non-destructive testing.</p> <p>The video material addressed the correct use of digital detector array, the calibration of its panel and how to conduct digital radiographic inspection correctly while using different kinds of software from various manufacturers. The SFS-EN ISO 17636-2:2022:en (Non-destructive testing of welds – radiographic testing. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors) standard and DEKRA’s internal instructions were used as main source materials. The video material was constructed based on this information.</p> <p>The usefulness of the video material can currently only be evaluated on a theoretical level because it was made to reinforce the already received training and not to function solely as teaching material.</p>		
Key words Computed radiography, digital radiography, digital detector array, non-destructive testing, panel		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

DDA

(Digital Detector Array) on digitaalisessa radiografiassa käytettävä paneelitekniikka, joka muuttaa saadun röntgensäteilyn kaksiulotteiseksi kuvaksi prosessorin ruudulle.

SNR

(Signal-to-noise ratio) signaali-kohinasuhde on paneelitekniikassa esiintyvän hyöty- ja kohinasignaalin tehojen suhde.

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO.....	1
2 DEKRA INDUSTRIAL OY.....	3
3 RIKKOMATON AINEENKOETUS.....	4
3.1 Rikkomaton aineenkoetus	4
3.2 Tunkeumanestetarkastus	4
3.3 Magneettijauh tarkastus.....	6
3.4 Ultraäänitarkastus.....	7
3.5 Pyörrevirta.....	7
3.6 Visuaalinen tarkastus	8
3.7 NDT-tarkastaja.....	8
4 RADIOGRAFINEN TARKASTUS.....	9
4.1 Säteily.....	9
4.2 Filmitekniikka	12
4.3 Kuvan laatuun vaikuttavat tekijät.....	14
5 DIGITAALINEN RADIOGRAFIA	17
5.1 Digitaalinen röntgentarkistus	17
5.2 Kuvalevytekniikka.....	18
5.3 Paneelitekniikka	19
5.4 Laitteisto	20
5.5 Paneeli.....	22
5.6 Pikseli.....	24
5.7 Pikselin rakenne ja vialliset pikselit.....	26
5.8 Harmaasävyarvo	27
5.9 Digitaalisen kuvan laatuun vaikuttavat tekijät	28
6 OHJELMISTOT	31
6.1 Ohjelmiston alustaminen.....	31
6.2 Onnistuneen kuvan ottaminen	32
6.3 Kuvankäsittely.....	33
6.4 Kuvan luokittelu.....	35
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TULOKSIEN ANALYSOINTI.....	36
LÄHTEET	38
KUVAT	
KUVA 1. Sähkömagneettisen aaltoliikkeen energia ja aallonpituus	9
KUVA 2. Röntgenputken osat	10
KUVA 3. Röntgenlaitteen jatkuva spektri	11
KUVA 4. Esimerkki digitaalisesta röntgenkuvasta	17
KUVA 5. DDA:n pääkomponentit	21

KUVA 6. Välittömästi säteilyn kääntävät ja epäsuorasti säteilyn kääntävät paneelit	22
KUVA 7. TFT-paneelin poikkileikkaus	24
KUVA 8. Pikselin rakenne	25
KUVA 9. Pikselin koon ja pikseleiden määrän vaikutukset erotuskyvyssä	26
KUVA 10. Vialliset pikselit ja CKP	27
KUVA 11. SNR ja CNR	29
KUVA 12. Keskiarvoistuksen merkitys kuvan laatuun	33
KUVA 13. Vidiscon ohjelman highpass filtering-toiminto	34

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Filmiluokat	13
TAULUKKO 2. Kuvan kontrastiin vaikuttavat tekijät	14
TAULUKKO 3. Kuvan epäterävyyteen vaikuttavat tekijät	15

1 JOHDANTO

Esittelen opinnäytetyössäni digitaalisen radiografian peruspiirteet ja eri laitteistojen ja ohjelmistojen teknillisiä toimintatapoja ja niiden käyttöä teollisuuden sekä rikkomattoman aineenkoetuksen saralla. Työn taustalla on digitaalisen radiografian vaikutus rikkomattoman aineenkoetuksen tarkastukseen ja sen kilpailu perinteisen filmitekniikan kanssa. Opinnäytetyöni sisältö avaa lukijalle ensin, mitä rikkomattoman aineenkoetus on, mitä eri tarkastusalueita se pitää sisällään ja miten perinteistä radiograafista filmitekniikkaa suoritetaan? Opinnäytetyön lukemisen jälkeen pitäisi olla jonkinlainen käsitys siitä miten digitaalisen radiografian kuvaus suoritetaan, miten paneelitekniikan ohjelmistot toimivat ja minkälaisia laitteita onnistuneen kuvan ottamiseen tarvitaan.

Rikkomattoman aineenkoetuksen ja säteilyn vaikutuksien perusymmärryksen jälkeen avaan digitaalisen radiografian peruseriaatteita ja laitteiston tietoteknillistä tapaa kääntää paneelille tai fosforilevyllä tuleva säteily kaksiulotteiseksi digitaalseksi kuvaksi luokitteluun käytettävän prosessorin näytölle. Koska tämä kuva ei osaa muokata itseään luokiteltavaan kuntoon, kerron, mitkä eri asiat vaikuttavat digitaalisen kuvan erotuskykyyn ja laatuun, sekä, miten ohjelmistoa käyttämällä se saadaan muokattua hyväksyttävään muotoon.

Yksi työni tutkimusongelmista oli vanhan ja uuden materiaalin sulava yhdistäminen eheäksi kokonaisuudeksi. Radiografiassa käytettävä filmitekniikka on pääpiirteittäin pysynyt samana jo vuosi kymmeniä, kun taas digitaalinen radiografia rantautui lääketieteen puolelle vuonna 1980 ja sai ensimmäisen virallisen rikkomattoman aineenkoetuksen standardinsa Euroopassa vasta 2013. Toinen ongelma, tosin positiivisempi, digitaalisen radiografian saralla liittyy yleiseen tietoteknilliseen kehitykseen. Kun vanhaa tietoa perinteisestä filmitekniikasta on löydettävissä runsaasti, koko ajan muutoksen saralla elävästä digitaalisesta radiografiasta ei liiku teollisuuden piireissä laajalti vapaata julkista tietoa. Myös jotkin laitevalmistajat päivittävät ohjelmistojaan nopeaa vauhtia, jolloin uusia ohjelmistopäivityksiä julkaistaan useaan kertaan vuodessa. Tämä aiheutti opinnäytetyöni tekemisessä aika ajoin pienimuotoisia vaikeuksia, koska esimerkiksi tiettyjen ohjelmistojen kohdalla jo valmiiksi raportoitu tieto saattoi kahden kuukauden päästä olla vanhentunutta. (Suorsa, K. 2023)

Työssäni käytetyimmät merkittävimmät lähdetiedot perustuvat työnantajani Dekra Industrial Oy:n firman sisäiseen koulutusmateriaaliin, Suomen standardiliiton digitaalisen radiografian standardiin SFS-

EN ISO 17636-2:2022:en ja koulutuskeskus Taitotalon opetusmateriaalin radiografisesta tarkastuksesta rikkomattoman aineenkoetuksen tasoille 1 ja 2.

2 DEKRA INDUSTRIAL OY

Kirjoitan opinnäytetyötäni digitaalisen radiografian käytöstä DEKRA Industrial Oy:lle, joka on nykyinen työnantajani. DEKRA Industrial Oy on maailman laajuinen testaus- ja tarkastusfirma, joka tuottaa palveluita teknisiin tarkastuksiin, testauksiin, arviointeihin ja sertifiointiin teollisuuden eri osa-alueilla. DEKRA on myös maailman kolmanneksi suurin autokatsastus ja tarkastusfirma, joka kesällä 2022 avasi katsastuskonttorinsa myös Suomessa. (DEKRA Industrial Oy 2023a)

DEKRA on erittäin maailmanlaajuisesti levinnyt, alun perin saksalainen konserni, jolla on toimipisteitä kymmenissä eri maissa ja noin kaksikymmentä eri konttoria Suomessa. DEKRA:n Suomen pääkonttori sijaitsee Vantaalla, Tuupakankuja 1:ssä. Yritys perustettiin Berliinissä Saksassa vuonna 1925, sen tarkoituksena tuottaa voittoa tarkastamalla ja katsastamalla autoja. Suomeen DEKRA:n autopuoli rantautui vasta vuonna 2022, mistä syystä pohjoismaissa se suurin osin johdetaan teollisuuteen ja NDT-tarkastukseen. DEKRA:n toiminnot ja palvelut Suomessa keskittyvät teknisiin tarkastuksiin, testauksiin, arviointeihin ja sertifiointeihin teollisuuden eri alueilla ja sen toiminta alkoi Suomessa jo vuonna 1974 nimellä Polartest Oy. (DEKRA Industrial Oy 2023a)

DEKRA:n liikevaihto vuonna 2022 oli 3,8 miljardia ja konsernissa työskenteli noin 48 tuhatta työntekijää maailmanlaajuisesti. Sen asiakaskuntaan lukeutuu autoalan ammattipalvelijat, sekä lukemattomat erilaiset teollisuuden saralla työskentelevät yritykset. Suomessa DEKRA:n nimekkäimpiä asiakkaita ovat Andritz, Stora Enso ja Neste. (DEKRA Industrial Oy 2023a)

3 RIKKOMATON AINEENKOETUS

3.1 Rikkomaton aineenkoetus

Rikkomaton aineenkoetus (englanniksi non-destructive testing) on nimensä mukaisesti tietyn aineen tarkastusta ja/tai testausta, jossa materiaalin eheys, tai sen puute voidaan todistaa hajottamatta tarkastettavaa materiaalia. Erilaisia NDT (non destructive testing) -tarkastusmenetelmiä ovat kaksi pintamenetelmää nimeltään tunkeumaneste- ja magneettijauh tarkastus, visuaalinen tarkastus, volumetriset röntgentarkastus- ja ultraäänimenetelmä, sekä pyörrevirta. Jokaisella ennalta mainituista menetelmistä on erilaisia alalajeja, jotka tuottavat yhtä tarkan tarkastustuloksen, mutta niitä käytetään sopimaan paremmin tarkastettavan materiaalin laatuun, lämpöön, ympäristöön, luotettavuuteen sekä aikaan soveltuun. (DEKRA Industrial Oy 2023a)

Näiden perinteisten ja niiden vaihtoehtoisten menetelmien lisäksi on myös olemassa erilaisia edistyneitä NDT-menetelmiä, joita joudutaan soveltamaan haastavissa kohteissa esimerkiksi tarkastettavan kohteen geometrinen ominaisuuksien vuoksi. Tällaisissa tilanteissa luodaan vertailukappale, jolla standardiin soveltaen todetaan tarkastuksen luotettavuus. Materiaalin eheyden määrittelyn lisäksi NDT-tarkastukset soveltuvat esimerkiksi tuotekehityksen tueksi, valmistuksen seurantaan, kehittämiseen tai valvontaan, sekä valmistuksen ja asennuksen laadunvarmistukseen. (DEKRA Industrial Oy 2023a)

3.2 Tunkeumanestetarkastus

Tunkeumanestetarkastuksen avulla voidaan havaita pintaan aukeavia vikoja kiinteistä materiaaleista, jotka eivät ole huokoisia. Pintojen on oltava puhtaita ja sileitä, mutta kappaleiden muotoa menetelmä ei rajoita, kuten ei myöskään vikojen suuntaa. Tarkastuksen avulla voidaan löytää muun muassa säröt ja halkeamat, läpät sekä huokoisuus. Yleisimmät tarkastuskohteet ovat hitsatut, valetut, taotut ja vedetyt tuotteet, jotka ovat joko alumiinista tai ruostumattomasta teräksestä. Muita tarkastettavia materiaaleja ovat pulverimetallurgian tuotteet, keraamit, muovit ja lasituotteet. (Toivonen, J. 2016, 1–13)

Rautateillä tarkastettiin 1800-luvun loppupuolella raskaita osia, esimerkiksi pyöriä tunkeumanestetarkastusta edeltävällä tekniikalla ”oil and whitening”, jossa kohde upotettiin tunneiksi kerosiinilla laimennettuun öljyyn, puhdistettiin ja kuivattiin huolellisesti, jonka jälkeen sen pintaan levitettiin alkoholin ja liidun muodostama suspensio, josta alkoholi lopulta haihtui pois, öljyn värjätessä vialliset kohdat

kohteen pinnasta valkoisiksi. Näyttämien ulostuloa tehostettiin iskemällä kohdetta vasaralla tai täräyttämällä. Tätä tekniikkaa käytettiin aina 1940-luvulle asti, ennekuin magneettijauhetarkastus syrjäytti sen junien ferromagneettisissa osissa. Tunkeumanesteitä kehitetään edelleen, mutta perustekniikka ei ole muuttunut yli sataan vuoteen. (Toivonen 2016, 1–13)

Tunkeumanestetarkastuksen avulla löydetään huomattavasti paljon pienempiä vikoja kuin silmämääräisessä tarkastuksessa, koska se suurentaa vian ja tekee siitä taustasta erottuvan näyttämän. Suurenuskerroin on halkeamilla ja säröillä leveyssuunnassa useita kymmeniä tai jopa satoja. Näyttämä on joko punainen tai fluoresoiva ja erottuu hyvin valkoisesta taustasta. Tunkeumanestetarkastusten avulla voi etsiä myös vuotoja. (Toivonen 2016, 1–13)

Tunkeumanestetarkastuksen voi kohteesta, pinnanlaadusta tai sen lämpötilasta riippuen suorittaa joko värillä tai fluoresoivalla tunkeumanesteellä. Tunkeumanestetarkastuksen suorittamiseen värillä NDT-tarkastaja tarvitsee esipuhdistukseen ja värin puhdistamiseen joko liuotinta tai vettä sekä kontrasti värin ja itse tunkeumanesteen. Tarkastus suoritetaan kuudessa eri vaiheessa, joissa jokaisen vaiheen kesto voi ajallisesti vaihdella standardin, lämpötilan tai olosuhteiden mukaan. Nämä vaiheet ovat esipuhdistus, tunkeumanesteen levittäminen (tunkeutumisaika yleensä 20-30min), ylimääräisen tunkeumanesteen poisto vedellä tai liuottimella, ylimääräisen tunkeumanesteen poiston onnistumisen tarkistus ja kehitteen levittäminen (kehitysaika 10-15min, jonka aikana kohdetta tarkastellaan jatkuvasti). Viimeisessä vaiheessa kehitysajan päätyttyä tarkastetaan kohde lopullisesti, mitataan koot ja dokumentoidaan koot sekä raportoidaan mahdollisten vikojen tarkastus. (Toivonen 2016, 1–13)

Fluoresoiva tunkeumanestetarkastus seuraa samoja vaiheita aina tunkeuma-aikoihin asti, mutta on silti toiminta malliltaan vähän erilainen. Fluoresoivatarkastus suoritetaan fluoresoivalla tunkeumanesteellä, liuottimella ja/tai vedellä sekä ultraviolettivalolla pimeässä tilassa, jossa valoa saa tarkastettavan kohteen pinnalla olla enintään 20 luxia ja ultravioletin valon intensiteetin on oltava vähintään 10 Wm^2 (1000, uW/cm^2). Fluoresoivassa tunkeumanestetarkastuksessa käytetään myös kehitettä, mutta vähemmän kuin värillisessä menetelmässä. Vaikka ultraviolettivalo hoitaa kontrastin luomisen ihmisilmällä, on kehitteen toinen tehtävä imeä viasta tunkeumanestettä esiin. (Toivonen 2016, 1–13)

Tunkeumanestetarkastus on helppo oppia ja suorittaa eikä se vaadi kalliita apuvälineitä. Yksittäisten kohteiden tarkastaminen voi olla hidasta, koska peräkkäisiä työvaiheita on useita. Samaan aikaan voidaan kuitenkin tarkastaa useita kappaleita rinnakkain. Jos tarkastettavia kohteita on paljon, on tarkastus

automatisoitavissa. Täysautomaattinen tarkastuslinja tekee toistettavasti tietokoneen ohjaamana tarkastusten kuljetuskehikkoon lastatuille kappaleille. (Toivonen 2016, 1–13)

3.3 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastus on vanhimpia, käytetyimpiä ja arvostetuimpia NDT-menetelmiä. Menetelmä soveltuu ferromagneettisten aineiden pinnassa ja pinnan läheisyydessä olevien, erityisesti kapeiden epäjatkuvuuksien kuten säröjen havaitsemiseen. Magneettijauhetarkastus hyödyntää suoraviivaista fyysikaalista ilmiötä eli vuotokenttien syntymistä epäjatkuvuuskohdista. Magneettijauhemenetelmä onkin juuri sen vähäisen alttiuden ulkopuolisille häiriöille, luotettavuuden, suoraviivaisuuden ja selvän fyysikaalisen pohjansa takia NDT-tarkastajien suosiossa. (Åström 2000)

Kapea epäjatkuvuus, useimmiten särön aiheuttama magneettinen vuotokenttä, kerää ympärilleen ferromagneettista hiukkasista muodostuneen sillan. Sillan leveys on muutama kymmenesosamillimetriä, kun taas särön leveys voi olla esimerkiksi vain 0,1 mm. Tähän indikaation optiseen suurennukseen, joka voi olla jopa 1000-kertainen, perustuu magneettijauhemenetelmän kyky paljastaa aineen epäjatkuvuuskohtia. (Åström 2000)

Kun kappale magnetoidaan, magneettiset voimaviivat jakaantuvat tasaisesti kappaleen poikkipinnassa, pyrkien kuitenkin pysymään aineen hyvän magneettisen läpäisykyvyn eli permeabiliteetin ansioista kappaleen sisällä. Jos magneettivuolle tulee este kappaleen geometrian tai virheen takia, kulkee osa vuosta esteen alta, osa läpäisee virheen ja osa pyrkii etenemään ilman kautta. Näin saadaan epäjatkuvuuskohdan ympärille vuotokenttä, jolla on kappaleeseen nähden vastakkainen napaisuus, ja se toimii täten eräänlaisena pienoismagneettina. Tätä syntyvää napaisuutta käytetään hyväksi epäjatkuvuuskohdian havaitsemisessa. Magneettijauhetarkastuksessa kappaleen pintaan levitetään siis rautahiukkasia, jotka kerääntyvät vuotokenttään muodostaen sillan, joka voidaan havaita visuaalisesti. Tämä indikaatio ilmaisee esimerkiksi särön sijainnin, muodon ja osittain myös laajuuden. (Åström 2000)

Magneettijauhetarkastuksen voi suorittaa joko märällä tai kuivalla menetelmällä. Kuiva menetelmä ei ole läheskään yhtä yleinen kuin märkä ja sitä käytetäänkin lähinnä teelmien tarkastukseen, jossa on suhteellisen suuria virheitä, tai sellaisiin kappaleisiin, joiden pintaan ei voida levittää märkää jauhetta lämmön tai kemiallisen syyn takia. Suuren raekokonsa takia kuiva menetelmä ei erota pieniä vuotokenttiä. Märkämenetelmä on Suomessa selvästi kuivaa enemmän käytetympi ja se voidaan suorittaa joko värillistä magneettijauhetta käyttäen tai fluoresoivaa magneettijauhetta käyttäen. (Åström 2000)

Havaitakseen vuotokenttään syntyvän epäjatkuvuuden tarkastettavassa aineessa, on luotava aineeseen jännittynyt magneettikenttä, jota ilman ei magneettijauheta tarkastusta voi luotettavasti suorittaa. Tällaisia hetkellisiä magneettikenttiä luovia tarkastuslaitteita ovat kestromagneetit, Iesmagnetointilaitteet, vaihto- ja tasavirtamagnetointilaitteet ja magnetointipenkit. Epäjatkuvuuskohdan parempaan havaitsemiseen tarvitaan siis rautahiukkasia omaavaa magneettijauhetta, kontrastin luovaa kontrastiväriä ja magneettikentän synnyttävää tarkastuslaitetta. (Åström 2000)

3.4 Ultraäänitarkastus

Ultraäänitarkastus on NDT-menetelmistä röntgenin lisäksi ainoa menetelmä, jolla tarkastettavan materiaalin eheys voidaan todeta muualtakin kuin pinnasta. Ultraäänitarkastuksessa käytetään hyväksi ultraäänilaitteella synnyttäviä, väliaineessa eteneviä aaltomuotoja, jotka ilmaisevat ääntä heijastamalla mahdollisista epäjatkuvuuksista tarkastettavassa aineessa. (AEL 2019)

Ultraääni on mekaanista aaltoliikettä, joka etenee jossakin väliaineessa. Äänen korkeus eli värähtelytaajuus, F , ilmoittaa ilmoitetaan värähtelyn lukumääränä sekunnissa $1/s$, jonka nimeksi on annettu Hertz (Hz). Ihminen pystyy teoriassa kuulemaan Hz-taajuudet 20–20 000 Hz. Tämän kuuloalueen ylittäviä ääniä kutsutaan ultraääniksi. Ultraäänitekniikassa käytetään yleensä taajuuksia 0,5–15 MHz. (AEL 2019)

Ääni etenee aineessa kullekin väliaineelle ominaisella vakionopeudella, jonka määräävät väliaineen materiaalitekijät kuten; tiheys, kimmo- tai liukumoduli ja Poissonin luku. Äänen voimakkuutta vertaillessa käytetään logaritmista desibeliasteikkoa. (AEL 2019)

3.5 Pyörrevirta

Pyörrevirtatarkastus (eddy current testing) on yksi useista kehittyneistä rikkomattoman aineenkoetuksen tarkastusmenetelmistä, jotka käyttävät pääasiassa sähkömagnetismia tutkimusten perustana. Pyörrevirtatarkastus voidaan suorittaa sekä ferromagneettisille, että ei-ferromagneettisille materiaaleille. (DEKRA Industrial Oy 2023b)

Pyöreävirtakeloja valmistetaan kaikenlaisissa muodoissa, minkä seurauksena hyvin erityisten muotojen pinta voidaan tarkastaa nopeasti ja tehokkaasti. Tämä mahdollistaa myös erittäin nopean skannauksen, koska menetelmä on erittäin herkkä pienille halkeamille ja muille vaurioille. (DEKRA Industrial Oy 2023b)

3.6 Visuaalinen tarkastus

Silmämääräinen tarkastus on visuaalisesti suoritettava NDT-tarkastusmenetelmä, jossa todetaan materiaalin tai kohteen visuaalinen eheys. Silmämääräinen tarkastus ei muista NDT-menetelmistä poiketen vaadi melkein minkäänlaisia apuvälineitä, vaan sen pystyy yleensä suorittamaan vain yleisvaloa, työntömittaa ja Inox-mittaa käyttäen. Kuitenkin juuri sen yksitoikkoisuudesta ja yksinkertaisuudesta johtuen, on se myös materiaalin eheyden mittauksessa epäluotettavin kaikista menetelmistä. Tästä syystä erittäin iso osa silmämääräisestä tarkastuksesta suoritetaan ennen muita menetelmiä. (Taitotalo 2022b)

Silmämääräistä tarkastusta suorittaessa, on otettava huomioon materiaalin eheyttä todettaessa kohteen pintalämpötila, kohteen siisteys, profiili ja säännöllisyys. Erityisesti tarkastettavan kohteen siisteys on merkityksellistä, koska silmämääräinen tarkastus ei ole mitään materiaalia läpäisevä tarkastustekniikka ja muuten havaittavat virheet voivat jäädä esimerkiksi kuonan tai maalin alle piiloon. (Taitotalo 2022b)

3.7 NDT-tarkastaja

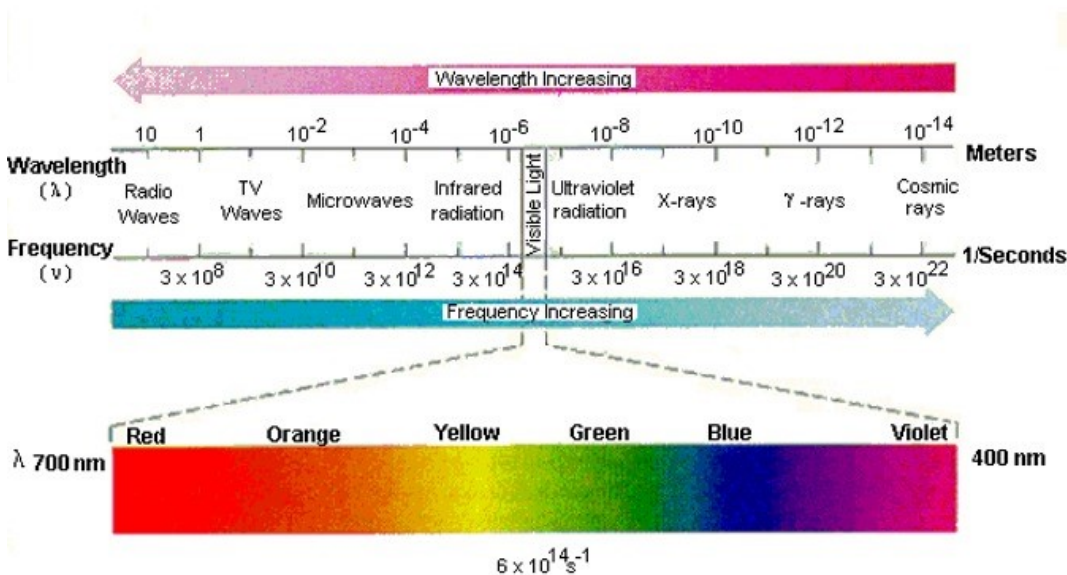
Rikkomatonta aineenkoetusta, oli menetelmä mikä tahansa, voi tietysti vain suorittaa NDT-tarkastaja. Suomessa NDT-tarkastaja on Kiwa Oy sertifioima ja tenttimä, sekä Taitotalon ja työntekijän firman kouluttama henkilö, jolla on lupa toimia tietyn standardin vaatimalla tavalla. (Taitotalo 2022a)

NDT-pätevyyksiä, tasoja ja auditioijia on useita ympäri maailmaa ja ulkomailla auditoidut NDT-tarkastajat voivat myös työskennellä Suomessa, jos heidät on pätevoity kyseisen tarkastus standardin mukaisella tavalla. Suomessa toimiakseen on NDT-tarkastajan täytettävä ISO 9712 rikkomattoman aineenkoetuksen – NDT-tarkastajan pätevointi- ja sertifiointi vaatimukset. (Taitotalo 2022a)

4 RADIOGRAFINEN TARKASTUS

4.1 Säteily

Radiografinen tarkastus on rikkomattoman aineenkoetuksen tarkastusmenetelmä, jossa pystytään säteilyn avulla tarkastamaan niin materiaalin pinnan sisäisiä kuin pintavirheitä. Sähkömagneettinen aaltoliike, tai säteily, sisältää sähkö- ja magneettista aaltoliikettä. Kaikki sähkömagneettiset aaltoliikkeet etenevät valonnopeutta, joka on $c = 300000 \text{ km/s}$, mutta niiden muut ominaisuudet riippuvat aaltoliikkeen aallonpituudesta. Aallonpituus ulottuu mihin vain radioaalloista (pisin) aina kosmiseen säteilyyn (lyhyin). (Taitotalo 2022a)

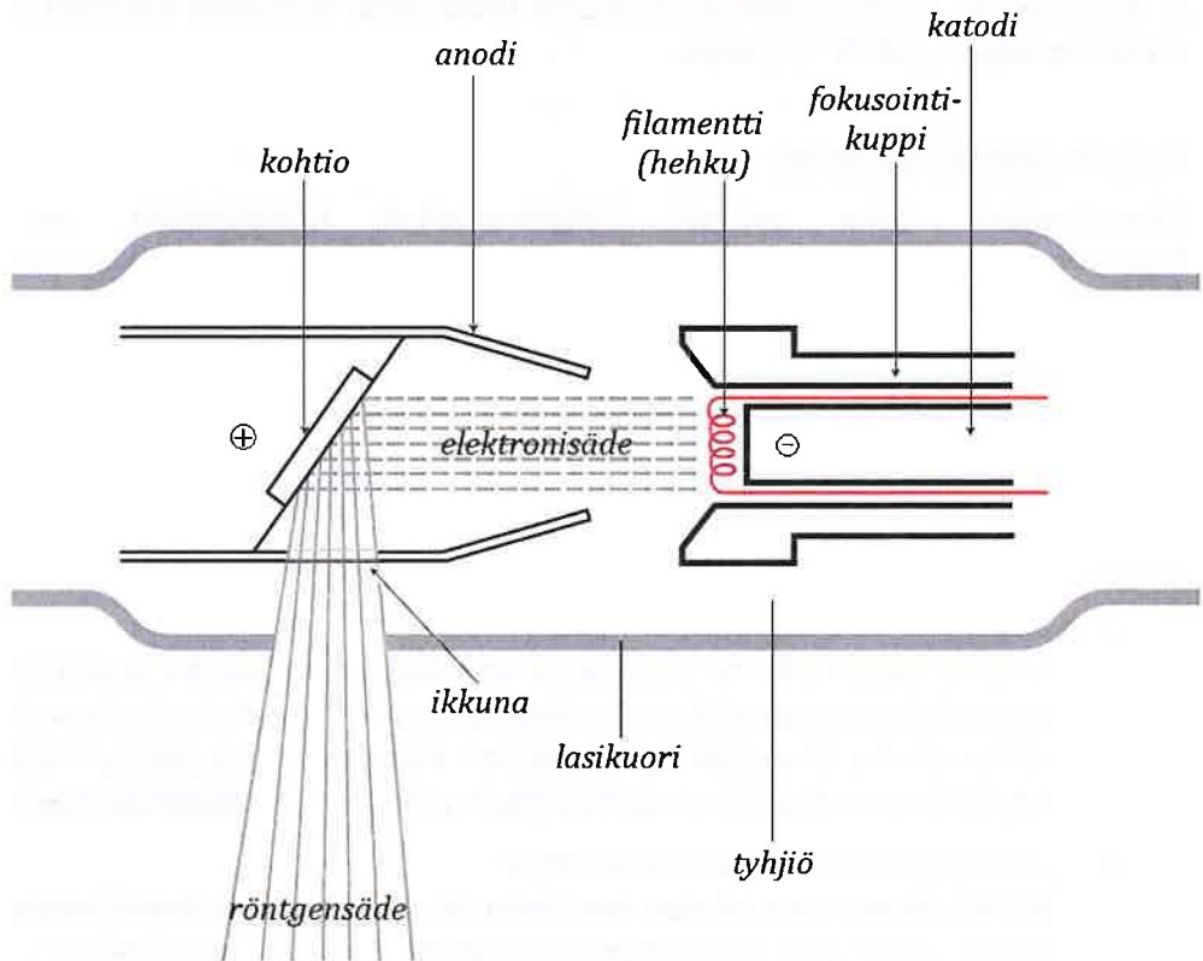


KUVA 1. Sähkömagneettisen aaltoliikkeen energia ja aallonpituus (WordPress)

Sähkömagneettisen aaltoliikkeen energia on kääntäen verrannollinen aallonpituuteen eli toisin sanoen kosmisen säteilyn energia on korkea ja radioaaltojen energia on alhainen. Radiografisessa tarkastuksessa käytettävät röntgen- ja gammasäteily ovat sähkömagneettista aaltoliikettä, jonka aallonpituus on 10⁻⁶...10⁻¹² m. Röntgen- ja gammasäteily muodostuu erillisistä aineettomista tai massattomista fotoneista eli energiahiukkasista, joilla ei ole sähkövarausta. (Taitotalo 2022a)

Röntgentarkastuksia voidaan rikkomattoman aineenkoetuksen saralla suorittaa joko röntgen- tai gammasäteilyllä. Röntgensäteily syntyy sähköllä, kun suurella jännitteellä kiihdytetyt elektronit törmäävät

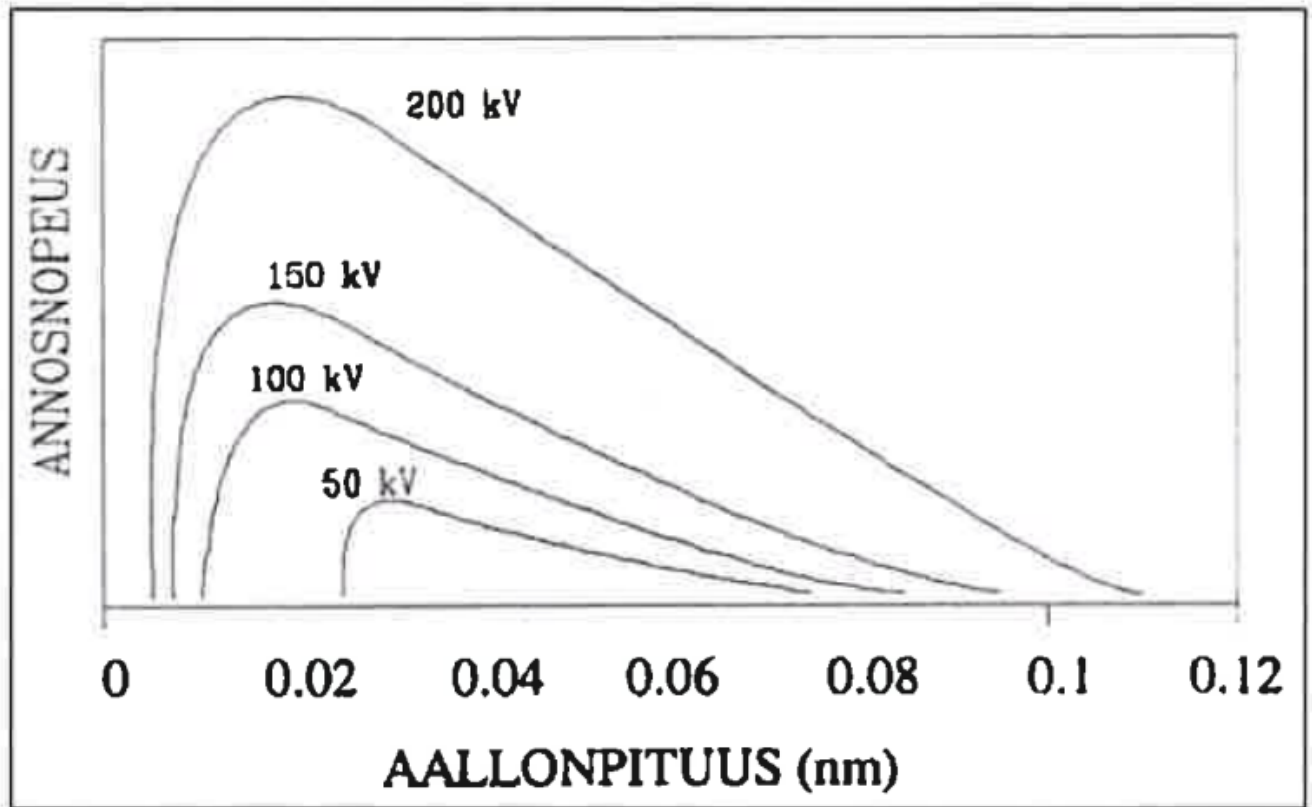
kiinteään aineeseen eli kohtioon. Röntgensäteily läpäisee hyvin ainetta, etenee yleensä suoraviivaisesti, vahingoittaa eläviä soluja eikä sitä ei voi niin nähdä, tuntea tai kuulla. Elektronista röntgensäteilyä säädelään ohjauspöydän avulla, jolla voidaan muuttaa säteilyn kilovoltti- (putkijännite) ja milliampeeriarvoja (Putkivirta). Putkivirtaa (milliampeereita) nostamalla lisään röntgenputken hehkulangan lämpötilaa ja elektronien kiihdytystä, samalla lisäten elektronien määrää. Putkijännitteen (kilovolttien) kytkeminen aiheuttaa elektronien virtauksen katodista anodiin. (Taitotalo 2022a)



KUVA 2. Röntgenputken osat. (Taitotalo 2022)

Elektronien nopeus riippuu putkijännitteestä: mitä korkeampi jännite, sitä nopeammin elektronit virtaavat, kun taas syntyvän säteilyn aallonpituus riippuu kohtion materiaalista, paksuudesta ja kiihdytysjännitteestä. Aallonpituuden (läpäisykyvyn) mittana käytetään kiihdytysjännitteen suuruutta, joka on kuitenkin riippuvainen pienimmän aallonpituudesta. Toisin sanoen säteilyn pienin aallonpituus pienenee, kun kiihdytysjännite kasvaa. Tavanomaisessa röntgentarkastuksessa kuitenkin vain hyvin pieni

osa syntyvästä säteilystä saavuttaa tämän spektrin ja suurin osa jääkin pitempiaaltoiseksi. Röntgenputkessa syntyvän säteilyn aallonpituuden alue onkin hyvin laaja ja syntyessään se muodostaa niin sanotun säteilyn jatkuvan spektrin. (Taitotalo 2022a)



KUVA 3. Röntgenlaitteen jatkuva spektri. (Taitotalo 2022)

Gammasäteily on samantyyppistä sähkömagneettista aaltoliikettä kuin röntgensäteily ja sen ominaisuudetkin muistuttavat melkein identtisesti röntgensäteilyä, jos etenemistä ja säteilyn tuottoa ei oteta huomioon. Toisin kuin röntgensäteily, gammasäteilyä ei tuoteta elektronisesti, vaan sitä syntyy radioaktiivisen alkuaineen atomiytimen hajoamisen tuotteena. Näin ollen gammasäteilyn toimintaa ei voida säädellä sähköisesti vaan se säteilee koko ajan yhtä voimakkaasti ja ilman rajoituksia joka puolelle. Iridium ja Koboltti ovat hyviä esimerkkejä luonnollisten säteilylähteiden käytöstä teollisuudessa, joihin niiden käyttö ei ole tarkoituksenmukaista niiden epäedullisten ominaisuuksien, kuten pienen ominaisaktiivisuuden ja suuren kokonsa vuoksi. Gammasäteilylle on ominaista, että säteily koostuu hyvin harvoista aallonpituuksista eikä muodosta röntgensäteilyn jatkuvaa spektriä. Aallonpituusjakauma eli energiaspektri on kullekin isotoopille ominainen vakio eikä sitä voi säädellä tai muuttaa. Tästä syystä eri aineenpaksuuksille on valittava eri isotooppi. (Taitotalo 2022a)

Jokaisella gammasäteilyn omaavalla radioaktiivisella isotoopilla on oma aktiivisuusaikansa. Aktiivisuus ilmoittaa säteilyn määrän, eli ydinmuutosten lukumäärän tietyllä aikavälillä. Aktiivisuuden yksikkö on curie (Ci) ja yhden Ci:n aktiivisuus merkitsee $3,7 \cdot 10^{10}$ ydinmuutosta sekunnissa. Säteilylähde siis lähettää tämän määrän yksittäisiä fotoneja sekunnissa. Aktiivisuuden SI-yksikkö on becquerel (Bq) ja $1 \text{ Bq} = 1$ ydinmuutos sekunnissa. Kutakin isotooppia on saatavilla aktiivisuudeltaan eri suuruisena eri käyttötarkoituksiin valjastettuna. Tavallisesti isotoopin aktiivisuus vaihtelee koon mukaan 2–100 Ci välillä. Gammasäteilyn kovuus ei muutu aktiivisuuden muuttuessa. (Taitotalo 2022a)

4.2 Filmitekniikka

Ennen digitaalista röntgentekniikkaa, kuvattiin röntgentarkastukset yksinomaan filmille. Filmitekniikka on nykypäivänäkin suosituin röntgentarkastustekniikka Suomessa ja muualla maailmassa. Syitä filmitekniikan käyttöön digitaalisen radiografian sijaan ovat digilaitteistojen hinnat, virallisen maailmanlaajuisen standardin myöhä valmistuminen, tarkastusohjelmistojen opetteleminen ja ohjelmistokielien kääntäminen. (Taitotalo 2022a)

Filmitekniikassa säteilyä hyödynnetään radiograafisessa tarkastuksessa muodostamalla filmille pysyvä kuva, jota tavallisesti käytetään kohteen ja varsinkin sen sisäisen rakenteen tarkastamiseksi. Kuvauksessa käytettävän filmin perustana on sen muovinen pohja ja suurimmaksi osin käytettävä filmi on kaksipuolinen, jossa emulsion on filmin pohjan molemminpuolinen. Päällimmäisenä suojakalvo ja sen alla emulsio, jossa hopeahalogeeneerirakeet sijaitsevat, kun taas tartuntakalvon tarkoitus on kiteiden tartuttaminen pohjaan. Filminkokonaispaksuus on noin 0,2 mm. (Taitotalo 2022a)

Radiograafisessa tarkastuksessa filmitekniikkaa käyttäen on mahdollista käyttää monta erilaista filmiluokkaa, jotka sisältävät erilaisia filmityyppiä. Filmityyppiä muuttaessa, muuttuu toiseen luokkaan verrattessa esimerkiksi havaitsemisherkkyys ja tarvittavan valotuksen aika. Filmit luokitellaan filmijärjestelmäluokkiin CI-C6 SFS-EN ISO 11699-1 standardin mukaan. Filmin havaitsemisherkkyys ilmoittaa filmin kyvyn esittää herkemmin yksityiskohtia. Mitä herkempi filmi, sitä pienempiä yksityiskohtia siitä on mahdollista havaita. Filmin nopeus sen sijaan kuvaa eri filmiluokkien ominaiskäyrää, eli niiden tarvetta saada tietty määrä säteilyä, saavuttaakseen saman mustuma-arvon. Mitä nopeampi filmi, sitä vähemmän se tarvitsee säteilyä. (Taitotalo 2022a)

TAULUKKO 1. Filmiluokat. (Taitotalo 2022)

EN-584-1	DIN	ASTM	BS	Havaitsemis-herkkyys	Nopein	Filmityypit Agfa/Kodak
C1	G1	SP	A	1	6	D2/DR
C2	G2	1	A	2	5	D3/M
C3	G3	1	A	3	4	D4/MX
C4	G4	1	A	4	3	D5/T
C5	G5	2	B	5	2	D7/AA400
C6	G6	3	B	6	1	D8/CX

Erilaiset filmivalmistajat nimeävät omilla tavoillaan SFS-EN 584-1 standardiin mukaan luokitellut filmijärjestelmäluokkiin kuuluvat filmsä. Esimerkiksi Agfa:n mukaan C3 järjestelmäluokan havaitsemisherkkyyden omaavan filmin nimitys on D4, kun C4 luokan filmi on D5. Sen sijaan samojen luokkien filmit ovat Kodakilla MX (C3) ja T (C4). Havaitsemisherkkyyss- ja nopeussarakeissa numero yksi kuvaa herkempää/nopeampaa filmiä, kuin numero kuusi. (Taitotalo 2022a)

Yleensä filmitekniikkaa käytettäessä, filmijärjestelmäluokasta huolimatta, filmi jo valmiiksi pakatussa vakuumissa-tilassa. Esimerkiksi kaikki Agfan ja Kodakin myyvistä filmityypeistä toimitetaan muoviin tyhjiöpakatussa päivänvalopakkausessa, jossa on valmiiksi valotiivisti pakattu filmi ja kaksi kappaletta (yksi filmin kumminkin puolin) lyijyvahvistuslevyjä. Radiograafisen tarkastuksen voi myös suorittaa ilman vahvistuslevyjä. Niiden ei ole aina pakko olla lyijystä, mutta filmitekniikassa lyijyvahvistuslevyt ovat erittäin yleisiä ja käytännöllisiä, koska ne vahvistavat filmille saapuvaa pehmeää säteilyä. Tietyissä yhteyksissä, kuten voimakkaissa säteilymäärissä ja voimakkailla isotoopeilla kuvatessa, voidaan käyttää ohjeiden mukaisia, eri paksuisia tai materiaalista valmistettuja vahvistuslevyjä. Lyijyvahvistuslevyjen pintojen on oltava tasaisia ja etummaisen levyn paksuuden on vastattava käytettävän säteilyn kovuuutta, jotta se päästäisi lävitseen primäärisäteilyn, mutta pysäyttäisi sironneen säteilyn. Lyijyvahvistuslevyjen paksuus on normaalisti 0,02...0,15 mm ja niiden käyttö perustuu sironneen säteilyn heikentämiseen ja Beta-säteilyn emitoimiseen, jolle filmi on herkkää. Näiden periaatteiden edulliset vaikutukset ovat siis kuvan yksityiskohtien havaittavuuden parantaminen ja valotusajan lyhentäminen. (Taitotalo 2022a).

4.3 Kuvan laatuun vaikuttavat tekijät

Suunnitellessa radiograafisessa tarkastuksessa tarkoitukseen sopivaa kuvaustekniikkaa on otettava huomioon kuvan laatuun vaikuttavat kaksi päätekijää: kontrasti ja epäterävyys. Kontrastiin, eli kahden eri luminanssin tai värin tummuuseroon, radiograafisessa tarkastuksessa vaikuttavat kaksi eri tekijää: säteilykontrasti ja filmikontrasti. (Taitotalo 2022a)

TAULUKKO 2. Kuvan kontrastiin vaikuttavat tekijät (Taitotalo 2022)

Säteilykontrasti	Filmikontrasti
- Säteilyn laatu (energia)	- Filmityyppi
- Aineen koostumus, paksuus ja tiheys	- Filmin Kehitys
- Säteilyn heikentyminen kohteessa	- Mustuma
- Hajasäteily	- Vahvistuslevyjen Tyyppi

Säteilyenergian joko liiallinen kovuus tai pehmeys vaikuttavat kuvan laadun säteilykontrastiin heikentäen kontrastia. Hyväksyttävään tulokseen päästään, kun säteilyn läpäisykyky on 3...8-kertainen puoliintumispaksuuteen nähden. Aine, sen koostumus, paksuus, tiheys ja vaikutus säteilyn heikentymiseen kohteessa vaikuttavat säteilyn kovuuden, kuvaustekniikan ja säteilylähteen valintaa. Hajasäteily on röntgentarkastuksessa syntyvää sirontaa, jota ilmenee jokaisen röntgentarkastuksen ympäristössä, puhutaan sitten teollisuudesta tai lääketieteestä. (Taitotalo 2022a)

Filmille saapuvan syntyvän hajasäteilyn osuus kuvattavan kohteen kokonaissäteilystä on aina merkittävä. Sironnut säteily lisää aina filmin kokonaismustumaa, mutta koska se on kuitenkin kuvaa muodostamatonta säteilyä, alentaa se oman mustumaosuutensa verran todellista kontrastia. Sironneen säteilyn mustumaosuus on yleisesti noin puolet kokonaismustumasta, mutta tietyissä tapauksissa se voi olla suurempi. Hajasäteilyn kontrastia huonontavaa vaikutusta voidaan vähentää käyttämällä lyijyvahvistuslevyjä tai suodatinta. (Taitotalo 2022a)

Kaikilla teollisuusröntgenfilmeillä, jotka on tarkoitettu käytettäväksi metallivahvistuslevyjen kanssa, filmikontrasti kasvaa mustuman kasvaessa. Filmikontrasti tavallaan kuvaa juuri sitä vahvistuserointia, jolla filmi toistaa mustumaeroina filmitasolla valinneet säteilyn annosnopeuserot. (Taitotalo 2022a)

Epäterävyys radiograafisessa tarkastuksessa voidaan tiivistää kykyyn havaita tasomaisia virheitä. Epäterävyyteen (U) vaikuttavat kaksi päätekijää: geometrinen epäterävyys (U_g) ja sisäinen epäterävyys (U_i). (Taitotalo 2022a)

TAULUKKO 3. Kuvan epäterävyyteen vaikuttavat tekijät (Taitotalo 2022)

Geometrinen epäterävyys U_g	Sisäinen epäterävyys U_i
- Säteilylähteen koko (d)	- Säteilyn Laatu
- Kuvausetäisyys (f)	- Filmin/vahvistuslevyjen välinen kosketus
- Kohde-filmietäisyys (b)	- Filmin tyyppi
- Kohteen paksuusvaihtelut	- Filmin kehitys
- Kuvausgeometrian vinous	- Rakeisuus

Säteilylähteet saavat aina aikaan jonkin verran geometrinen epäterävyyttä. Geometrinen epäterävyyttä kuvaava arvo voidaan laskea kaavasta: $U_g = b \times d / f$

Missä b on kohde-filmietäisyys, d on säteilylähteen koko ja f on kuvausetäisyys. Suurta kuvausetäisyyttä käyttämällä geometrinen epäterävyys voidaan pitää mahdollisimman pienenä. Yleinen vaatimus geometriselle epäterävyydelle on: $U_g \leq 0,2 \text{ mm}$. (Taitotalo 2022a)

Sisäinen epäterävyys riippuu käytännöllisesti kokonaan säteilyn laadusta ja sen vaikutus on havaittavissa jo, kun putkijännite (KV) saavuttavat noin 300Kv rajan. Sisäiseen epäterävyyteen vaikuttavat myös oikeanlaisen filmityypin valinta, mahdolliset filmi- tai käsittelyvirheet ennen kehitystä ja kehityksen aikana, sekä filmin valmistusvirheet. (Taitotalo 2022a)

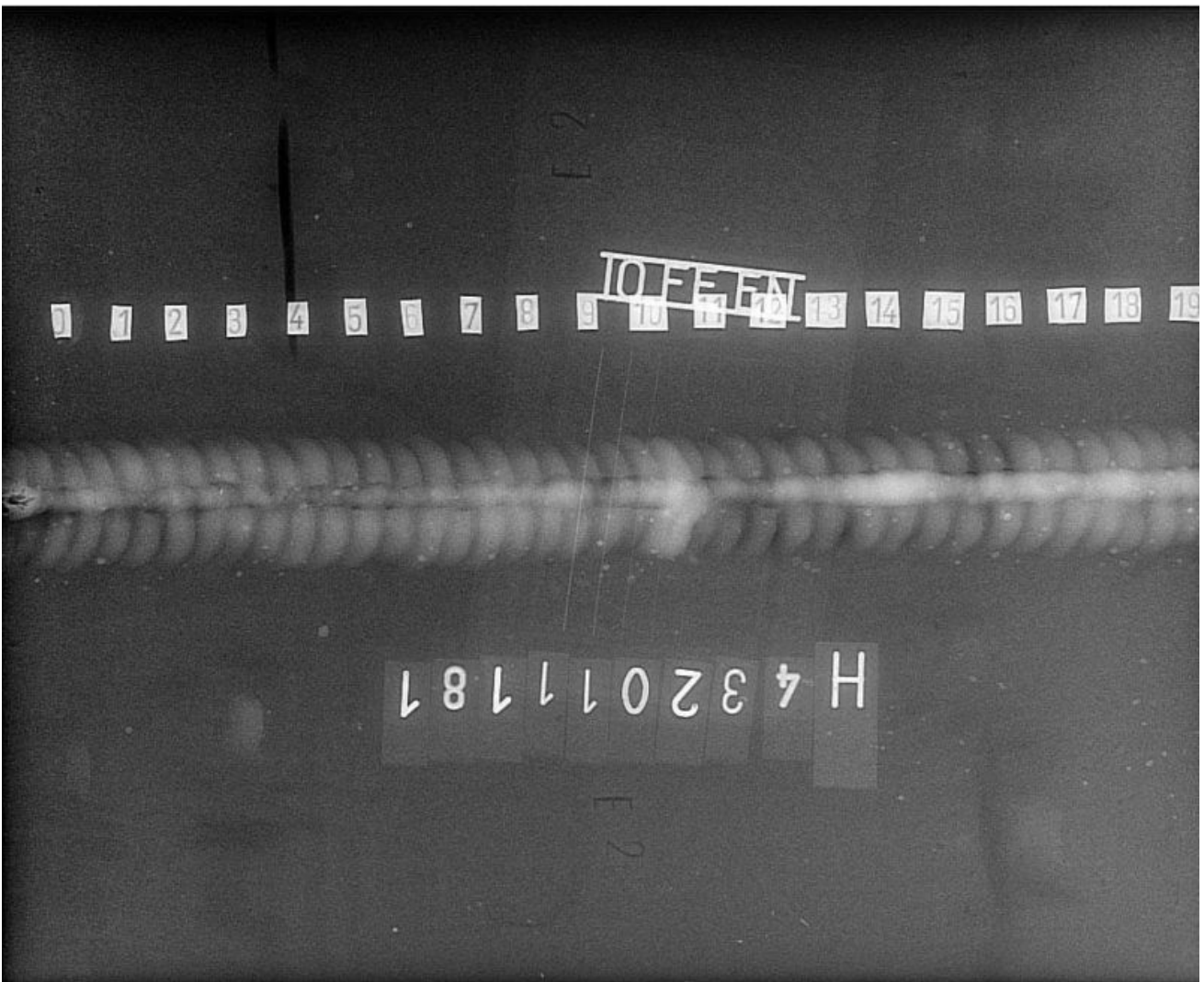
Kontrasti ja terävyys kompensoivat tiettyyn pisteeseen asti toisiaan, mutta kohtuullinen erotuskyky voidaan turvata vain silloin, kun molemmat osatekijät ovat kohtuullisessa sopuinnassa keskenään. Kontrastin ja epäterävyyden, eli kuvan laatuun vaikuttavista tekijöistä voidaan erotella neljä tekijää, joihin pitää kiinnittää huomiota kohtuullisen erotuskyvyn varmistamiseksi. Erotuskyvyllä tarkoitetaan tässä tilanteessa kuvauskokonaisuuden kykyä muodostaa aineen epäjatkuvuuskohtia tai pienistä aineenpaksuuseroista riittävän suuria ja tarkkoja mustumaeroja filmille tai digitaalisen radiografian tallennustavoille. (Taitotalo 2022a)

Kuvan luokittelussa, jokaisessa radiografian muodossa, käytetään standardiin, materiaaliin ja ainepaksuuteen verraten sopivaa indikaattoria (IQI) todentamaan kuvaustavan luotettavuus. Indikaattoreja esiintyy lanka-, kaksoislanka- ja reikäindikaattorien muodossa. Indikaattorien malli, sijoitus ja määrä kuvattavaa kohdetta kohden on erittäin monen asian summa, mutta niiden jokaisen perustoimintaperiaate perustuu joko tarvittavan lyijylangan tai mustuman löytämiseen kuvatulta kohteelta. (Taitotalo 2022a)

5 DIGITAALINEN RADIOGRAFIA

5.1 Digitaalinen röntgentarkistus

Digitaalinen röntgentarkastus on ainetta testaavan, rikkomattoman aineenkoetuksen tarkastus-sara, jossa tarkastettavan materiaalin eheys todetaan käyttämällä röntgensäteilyä, paneelia tai fosforifilmejä ja tietokonetta. Digitaaliset röntgentarkastustekniikat voidaan jakaa kahteen erilaiseen tarkastustekniikkaan: tässä opinnäytetyössä paljon puhuttavaan paneelitekniikkaan DDA (Digital Detector Array), sekä kuvalevytekniikkaan CR (Computed Radiography). Digitaalinen röntgentarkastus ei tarkastuksen suorittamisen puolesta eroa paljoakaan filmitekniikasta, varsinkin kuvalevytekniikan kohdalla, mutta esimerkiksi paneelitekniikan tietyt vaiheet ovat digitaalisempia ja omaavat paljon eriävaihtyksiä kuvan luokittelussa ja käsittelyssä. (Suorsa 2023)



KUVA 4. Esimerkki digitaalisesta röntgenkuvasta. (Pexraytech 2023)

Digitaalisen tekniikan suurimpia etuja perinteiseen filmitekniikkaan verrattuna on kokonaisuudessaan nopeamman tarkastuksen suorittaminen, suurempien ainevahvuuserojen tarkastaminen samanaikaisesti, pienempien säteilyarvojen käyttö ja usean filmitekniikkaan liittyvien, digitaaliselle röntgentarkastukselle turhien tarkastusvaiheiden pois jättäminen. Näihin vaiheisiin kuuluu esimerkiksi filmin kehittäminen. Muita etuja ovat kokonaan sähköinen dokumentoitu, tarvittaessa tarkastuslaajuuden välitön laajentaminen ja korjauskohtien välitön osoittaminen. Myös kehityskoneen ylläpitoon tarvittavat kemikaalit jäävät pois. (Suorsa 2023)

Kokonaisuudessaan nopeampi tarkastus ja välitön luokittelu eivät silti tarkoita, etteikö filmitekniikalla olisi omiakin etuja digitaalisiin tekniikoihin verrattuna. Tämän päivän teknologian luomat paneelit ovat vielä liian paksuja ja jäykkiä mahtumaan tai kunnolla mukautumaan osiin teollisuuden tarkastuskohteista. Tällaisissa tilanteissa materiaalia ei yksinkertaisesti pysty kokonaan tarkistamaan digitaalisella röntgenillä ja on korvattava joko filmitekniikalla tai kokonaan toisenlaisella tarkastusmuodolla. (Suorsa 2023)

Myös väittääkseen digitaalitekniikoiden olevan aina nopeampia tarkastustapoja kuin filmitekniikka, on vielä tänä päivänä valetta. Esimerkiksi konepajoissa suuria määriä vierekkäin olevia, mutta kuitenkin valotuksen välissä joka kerta laitteisto siirrettäviä putkia kuvatessa voi filmitekniikka olla nopeampi kuvaustyylillä, olettaen kehityskoneen olevan kuvauspaikan läheisyydessä. Myös laitehäiriöt, lämpötilat tai geometrialtaan haastavat kappaleet vaikeuttavat paneelin kiinnitystä, pidentäen kuvausaikaa paikassa, jossa filmi kiinnittyisi tarkastuskohteeseen helpommin. Tällaiset haastavat kuvauspaikat ovat myös alttiita paikkoja rikkomaan yhä herkkien digitaalisten laitteistojen kriittisiä johtoja tai tarkastukselle elintärkeitä paneeleja. (Suorsa 2023)

5.2 Kuvalevytekniikka

Kuvalevytekniikka on taipuisia fosforifilmejä käyttävä digitaalinen röntgentarkastustekniikka, jossa säteilyä saaneet filmit työnnetään kuvauksen jälkeen niille tarkoitettuun skanneriin, joka siirtää kuvan tietokoneella tarkasteltavaan käyttöjärjestelmään. Kuvalevytekniikassa kuvaus suoritetaan samalla tavalla kuin filmitekniikassa, mutta skannauksen jälkeinen filmien luokittelu vastaa digitaalisen röntgentarkastuksen paneelitekniikkaa. Toisin kuin paneelitekniikassa käytettävä paneeli, kuvalevytekniikassa käytettävät, erilaisissa muodoissa ja koissa tulevat fosforilevyt ovat taipuisia, mistä syystä ne filmin tavoin pystyvät mukailemaan tarkastettavan kohteen geometriaa. Kuitenkin filmitekniikasta eroten,

fosforilevyt (kuvalevyt) eivät ole kertakäyttöisiä ja niiden skannauksessa ei vaadita pimiötä tai kemikaaleja. (Suorsa 2023)

Yksi kuvalevy kestää teoriassa noin tuhat valotusta, kun taas filmitekniikan filmi vain yhden, ja sen skannaukseen kuluu aikaa noin 1–3 minuuttia, kun taas filmitekniikan kehitysaika on 8–10 minuuttia ja sen absorboivalle säteilyenergialle ei ole rajoituksia. Kuvalevytekniikka ylittää itsensä tilanteissa, joissa pimiön saaminen kuvauspaikan läheisyyteen on mahdotonta ja tarkastettavat kohteet ovat muoltaan haastavia. (Suorsa 2023)

Paneelitekniikka on näistä kahdesta digitaalisen tekniikan saroista suositumpi, koska sen tarkastustekniikka antaa suorat tulokset. Yksi syy kuvalevytekniikan harvinaisuuteen ja sen hentoon epäsuosioon paneelitekniikkaan verrattaessa on sen samanlaisuus filmitekniikan kanssa. Digitaaliset röntgentekniikat ovat suurissa käyttömäärissä yhä filmitekniikkaa harvinaisempi tarkastusvaihtoehto, vaikka esimerkiksi uudelle tarkastusfirmalle digitaalisen radiografian laitteisto maksaisi yhtä paljon, kuin filmitekniikan laitteistot, jos ostoslistalla on myös kehityskone. Jos kehityskone tarkastusfirmalta löytyy jo entuudestaan, voivat paneelitekniikka ja erityisesti kuvalevytekniikka tuntua kalliilta investoinnilta. Digitaalisiin tarkastustekniikoihin investoiminen on pienille firmoille kallista ja kun investointeja aletaan tekemään, valitaan näistä kahdesta tekniikoista yleensä vain toinen. Tällaisessa tilanteessa on vain loogista päätyä paneelitekniikkaan, koska vaikkakin kuvalevytekniikan taipuisat fosforifilmit ovat uudeleen käytettäviä ja eivät vaadi tarkastustuloksen saavuttamiseksi kemikaaleja, on sen kuvaustekniikka lähes identtinen filmitekniikan kanssa ja paneelitekniikkaa kalliimpi sijoitus. (Suorsa 2023)

5.3 Paneelitekniikka

Digitaalisen röntgentarkastuksen paneelitekniikassa kuvattavaa kohdetta ei valoteta minkäänlaiselle filmille vaan tarkastustuloksen välittömän tuloksen luomiseksi tietokoneen näytölle käytetään paneelia eli digitaalista detektoria. (Suorsa 2023)

Yksi paneelitekniikan isoimmista hyödyistä ja koko tarkastustekniikan peruseriaatteista on röntgenkuvan välitön luokittelumahdollisuus. Paneelissa sijaitseva vastaanotin kääntää säteilyn seurauksena kohteesta lävitse tulleen säteilyn intensiteetin piirtämän kuvan tietokoneohjelman ruudulle. Tätä kuvaa pystytään erilaisten digitaaliröntgen ohjelmistojen avulla välittömästi muokkaamaan, tarkastelemaan ja tallentamaan, joka eroaa vahvasti filmitekniikan kuvan luokittelusta ja sen kehittymisestä. (Suorsa 2023)

Filmitekniikassa kuvan ottamisen jälkeen on luokitellakseen filmiä tarkastelevan henkilön ensinnäkin löydettävä kehityskone, joka voi tietyissä tilanteissa olla esimerkiksi satojen kilometrien päässä, ennen kuin hän voi edes aloittaa kuvan luokittelun. Jo yksin tästä syystä useimmiten digitaalinen röntgentarkastus on filmitekniikkaa nopeampi, mutta luokitteluvaiheen aikaistuminen on myös yksi digitaalitekniikoiden eduista. Oletetaan, että kuva on standardin mukaan luokittelukelpoinen ja tarkastaja ei joudu kuvaamaan kohdetta filmille uudestaan saavuttaakseen tarvittavat mustumamääreet ja tarkastuskelpoisuuden, jolloin voidaan siirtyä luokitteluvaiheeseen. Kuitenkin luokitteluvaiheessa tarkastaja huomaa itse tarkastettava materiaalissa epäkohdan tai virheen, josta syystä materiaali on korjattava sen saavuttaakseen hyväksyttävät rajoitukset. Filmitekniikan pidentyneen luokittelun takia mahdollisen korjauskohdan korjaamisprosessi alkaa myöhemmin, kuin se olisi alkanut digitaalisella röntgentarkastuksella ja myös mahdolliset lisätarkastukset, tarkastuslaajuuden lisääntymisen vuoksi, viivästyneet. (Suorsa 2023)

Paneelinsa ansiosta filmitekniikkaan verrattuna pystytään digitaalisissa röntgentekniikoissa myös vähentämään röntgensäteilyn määrää, kuvan muokkauksen avulla tarkastamaan yhden valotuksen avulla suurempia ainevahvuuseroja ja välttämään kuvankehityksessä tarvittavat kemikaalit. (Suorsa 2023)

Kehityskoneen oikeaoppisen toiminnan takaamiseksi on myös kehityshuone pimennettävä, ettei valoa pääse kehitettävän filmin pinnalle, kehityshuoneeseen hankittava valonintensiteetin määrältään filmille sopiva punavalon työskentelyä varten, sopiva ilmanvaihto ja lämmitys kemikaalien oikean lämpötilan ja kemikaalihöyryjen poistamista varten, sekä sähköjen laitteiston toimintaa varten. (Taitotalo 2022a)

5.4 Laitteisto

Paneelitekniikassa, laitevalmistajasta riippumatta, on onnistuakseen digitaalisessa röntgentarkastuksessa laitteistoon kuuluttava kolme pääkomponenttia: tietokone, paneeli, säteilylähde ja mahdollinen ohjaus- virtakeskus, joka ei ole kaikilla laitevalmistajilla välttämätön. Tietokoneyksikkö sisältää luokitteluun ja kuvankäsittelyyn pystyvän sovelluksen, joka on yhteensopiva vähintään muiden osien, kuin säteilylähteen kanssa. Ohjaus- tai virtakeskus (englanniksi control tai power hub) joko tuottaa virtaa säteilyenergiaa vastaanottavalle paneelille tai toimii konjunktiona koneen ja paneeliin yhdistävälle bluetooth- tai wifi-yhteydelle. (Suorsa 2023)

Jos tarkastuksessa käytettävä säteilylähde on samaa merkkiä laitevalmistajan kanssa, kuin digitaalinen paneelitekniikan laitteisto, on se mahdollista kytkeä joko ohjauspöydän kautta suoraan tietokoneyksikössä sijaitsevaan käyttöjärjestelmään, tai esimerkiksi pulssiröntgenlaitteesta tai akkukoneesta puhuessa simuloida sama tulos kytkemällä se ohjaus- tai virtakeskukseen. Joka tapauksessa, digitaalisen kuvan luomiseen DDA:ssa vaaditaan tietysti säteilylähde, ja sen ei yleisesti ottaen ole pakko olla laitevalmistajan oma. Tällaisessa tapauksessa toisen laitevalmistajan valmistamaa säteilylähdetä ei kuitenkaan voi liittää ohjausyksikön ajamaan ohjelmaan, jolloin ohjelmaa ajava tarkastaja joutuu manuaalisesti valitsemaan tarkastusarvot. (Suorsa 2023)

Pääkomponentit

1. CDU/tietokone
2. ICU
3. Paneeli
4. Säteilylähde

1. Tietokone
2. Power unit
3. Paneeli
4. Säteilylähde



KUVA 5. DDA:n pääkomponentit. (DEKRA 2023)

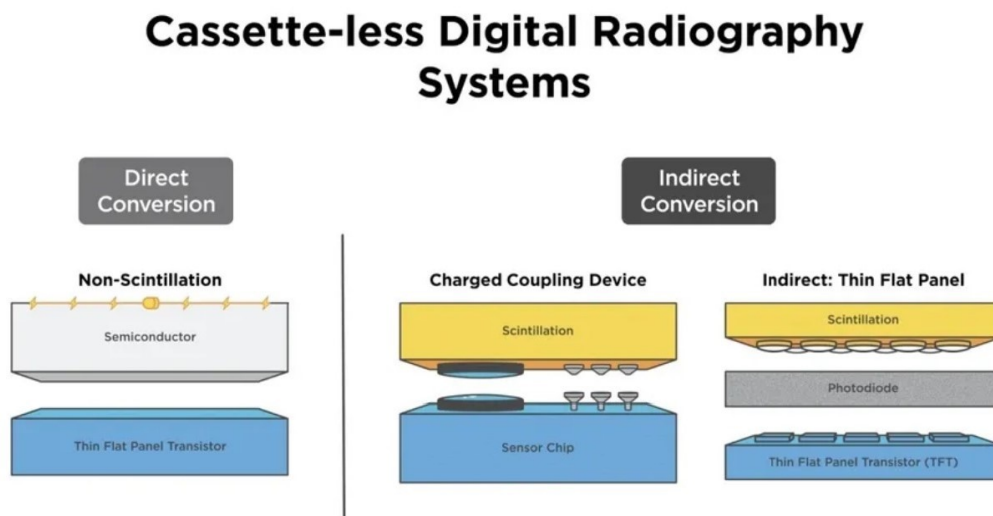
Monet laitevalmistajat tarjoavat useita erilaisia vaihtoehtoja tarkastuksessa käytettävien paneelien koolle. Tämä mahdollistaa erilaisten variaatioiden käytön kuva-alueiden, pikselikokojen ja harmaasävyjen muodossa, antaen tarkastajalle mahdollisuuden valita juuri oikean kokoinen ja erotuskykyinen paneeli tietyille tarkastuskohteelle. (Suorsa 2023)

Akkujen kehityksen ansioista pystytään digitaalinen röntgentarkastus suorittamaan nykyään täysin johdottomasti, jos käytettävä säteilylähde on esimerkiksi akullinen pulssiröntgenlaite tai jatkuvasti sätei-

levä isotooppi. Myös johdollinen tarkastus on mahdollista ja kohteesta, ympäristöstä sekä laitevalmistajasta riippuen, voi se myös olla langatonta nopeampaa. Esimerkiksi rutilätasolla korkeissa paikoissa tarkastusta suorittaessa, voi wifi-yhteyden löytäminen olla sen etenemistyyppin takia haastavaa ja aikaa vievää, puhumattakaan sen ylläpitämisestä. (Suorsa 2023)

5.5 Paneeli

DDA:n, eli paneelitekniikan detektorien toimintaperiaate perustuu sisään tulevien röntgensäteiden muuntamiseksi sähkövarauksiksi, jotka ovat elektronisesti luettavissa. Tätä tekniikkaa hyväksikäyttävät paneelit voidaan jakaa kahteen eri paneelityyppiin: välittömästi säteilyn kääntäviin paneeleihin (englanniksi direct conversion) ja epäsuorasti säteilyn kääntäviin paneeleihin (englanniksi indirect conversion). Epäsuorasti säteilyn kääntävät paneelit voidaan vielä jakaa kahteen alasarakkeeseen: TFT (englanniksi thin flat panel transistor) ja CCD (englanniksi charged coupled device). Teollisuudessa nähtävät paneelit ovat melkein yksinomaan epäsuorasti säteilyä kääntäviä paneeleita. (DGZfp & IAEA 2012)



KUVA 6. Välittömästi säteilyn kääntävät ja epäsuorasti säteilyn kääntävät paneelit. (Aro systems)

Jokaisessa paneelissa on kuva-alue, joka sisältää paneelille ominaisen säteilyä harmaasävyksi kääntävän tekniikan. Kuva-alueita voi olla monissa eri mitoissa, joka tietysti vaikuttaa suoraan itse paneelin ulkomittoihin ja painoon. Fyysisen kokonsa lisäksi kuva-alue pitää sisällään omat pikseli- ja bittikonsa. (DGZfp & IAEA 2012)

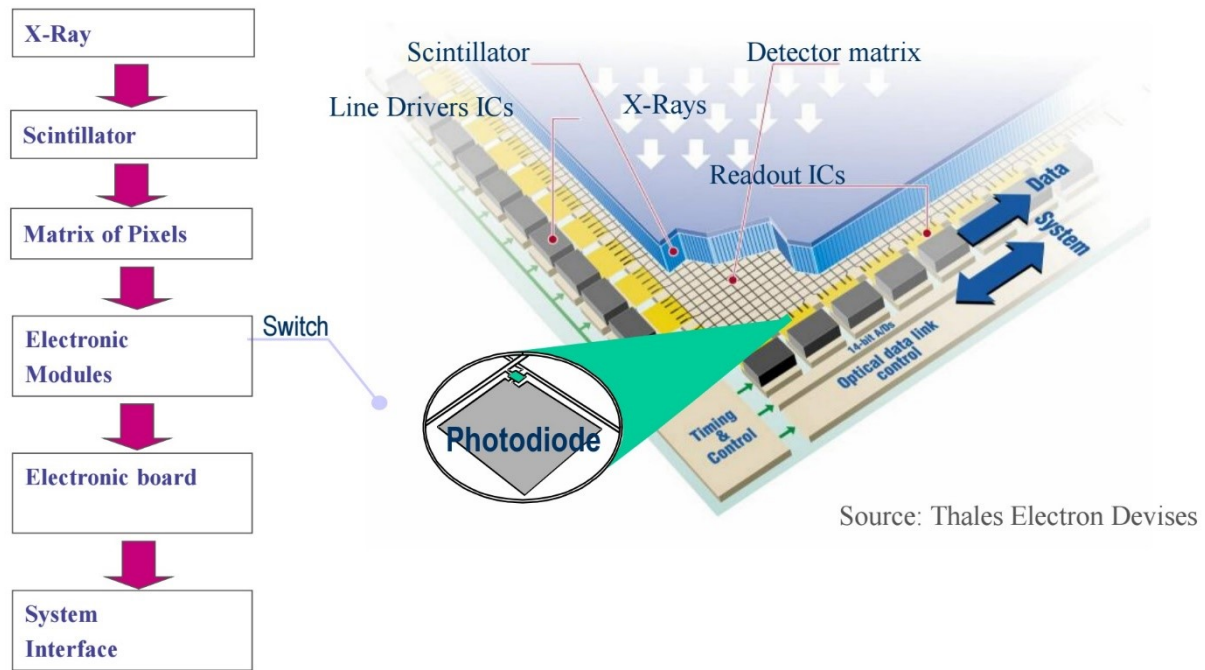
TFT-paneelissa on kolme erilaista kerrosta, joista jokainen vuorollaan tekee oman työnsä lopputuloksen eteen. Ensimmäinen säteilyn vastaanottava kerros sisältää tuikeilmaisimen (englanniksi scintillator), joka muuttaa vastaanottamansa elektroneista koostuvan säteilyenergian valonvälähdykseksi. (DGZfp & IAEA 2012). Säteilyenergian absorboituminen virittää atomin energiatilalle, joka purkautuu emittoimalla näkyvää valoa tai ultraviolettifotoneja. (Klemola)

Jotta tuikeilmaisimien kuitenkin pystyy havaitsemaan aineen, on sillä oltava tiettyjä ominaisuuksia. Kiinteiden ja nestemäisten tuikeaineiden tiheyden on oltava tarpeeksi suuri, että säteilyn absorptiodennäköisyys on riittävä. Tästä absorptiosta tulee seurata tarpeeksi suuri luminenssi ja tuikeaineen on oltava läpinäkyvä valolle. Tuikeilmaisimien on siis loppujen lopuksi vain valonpurkaus. Tuikeilmaisimen tuikeaine voi koostua joko cesiumjodista (CsI) tai gadoliniumista (Gd), joista cesiumjodi omaa paremman spatiaalisen erotuskyvyn. (DGZfp & IAEA 2012)

Tuikeilmaisimesta syntyvä valonpurkaus matkaa seuraavaksi paneelin toiseen kerrokseen, joka sisältää fotodiodeja, jotka koostuvat sähköisesti puolijohteista materiaalista nimeltä amorfinen piidioksi (englanniksi amorphous silicon). Paneelin fotodiodeja sisältävä kerros vastaanottaa tuikeilmaisimelta saapuvat fotonit, eli valon, ja muuttaa sen sähkövaraukseksi. Tämän sähkövarauksen elektronien muodossa paneelin fotodiodit siirtävät TFT-kerrokseen, jossa sähkövarausta lukevat detektoriosat sijaitsevat. (DGZfp & IAEA 2012)

TFT-kerros koostuu matriiseista hyvin pieniä detektorielementtejä, joiden sisällä pikselit, tai kuvapistet sijaitsevat. Jokaisen pikselin sisällä on muisti kondensaattori (englanniksi storage capacitor), joka tallentaa elektroneista koostuvan energian ja kytkin, joka vapauttaa tämän tallennetun energian binääri-numerosarjana kuvankäsittelyohjelmalle, näin luoden tietokoneen ruudulle saapuvan röntgenkuvan. (DGZfp & IAEA 2012)

Röntgenkuvan syntyminen tietokoneen ruudulle tarkoittaa siis sitä, että mitä enemmän säteilyenergiaa absorboivaa materiaalia on minkäkin kuva-alueen osion edessä, sitä vähemmän valonpurkausta tietty osuus tuikeilmaisimesta saa. Tuikeilmaisimien siirtää saamansa tiedon fotodiodeille, jotka muuttavat valonmäärän fotoneiksi, jotka taas pikselit muuttavat dataksi tiedonkäsittelyohjelmalle, synnyttäen erilaisia harmaasävyarvoja omaavan kaksikulotteisen kuvan tietokoneen ruudulle. (DGZfp & IAEA 2012)



KUVA 7. TFT-paneelin poikkileikkaus. (Thales electron devices)

CCD-paneelit erottuvat TFT-paneeleista vain siinä suhteessa, että ne eivät omaa valoa sähkövaraukseksi muuttavaa fotodiode-kerrosta, vaan tukeilmaisoin on liitetty sensori siruun (englanniksi sensor chip) joko linssein tai kuituoptiikalla. CCD-paneelit pystyvät muuttamaan valoa sisältävät fotonit sähköiseksi signaaliksi ja siirtämään ne binäärinumeroista koostuvana tietoketjuna tietokoneelle. (DGZfp & IAEA 2012)

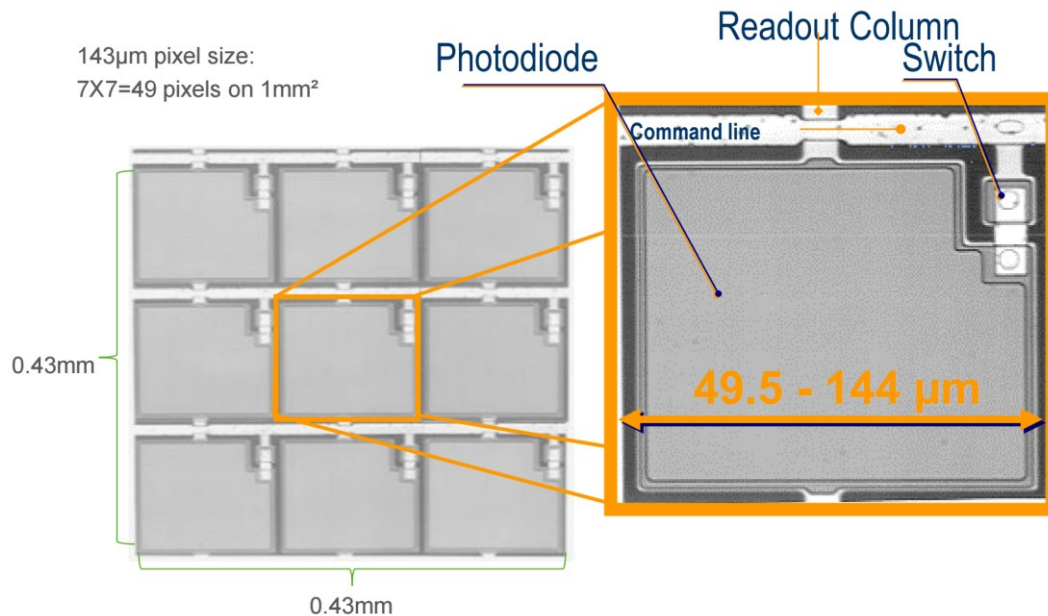
Välittömästi säteilyn kääntävät paneelit eivät omaa tukeilmaisinta ollenkaan ja käyttävät amorfisen piidioksin sijaan amorfista seleeniä. Puolijohdeesta (englanniksi semiconductor) ja TFT-kerroksesta koostuva paneeli kerää korkeajännitekentän paneelin pinnalle juuri ennen röntgensäteilyn saapumista. Valohiukkasten osuessa korkeajännitteeseen amorfisesta seleenistä koostuva puolijohde vapauttaa sähkövarauksen TFT-paneelille. (DGZfp & IAEA 2012)

5.6 Pikseli

Digitaalinen kuva koostuu kaksiulotteisesta joukosta yksittäisiä kuvaelementtejä, jotka ovat järjestäytyneet sarakkeiksi ja riveiksi. Näiden sarakkeiden ja rivien neliöjärjestyksestä käytetään termiä matriisi, jonka arvot digitaalisessa kuvantamisessa vastaavat diskreettejä pikseliarvoja. Mitä pienempiä ja

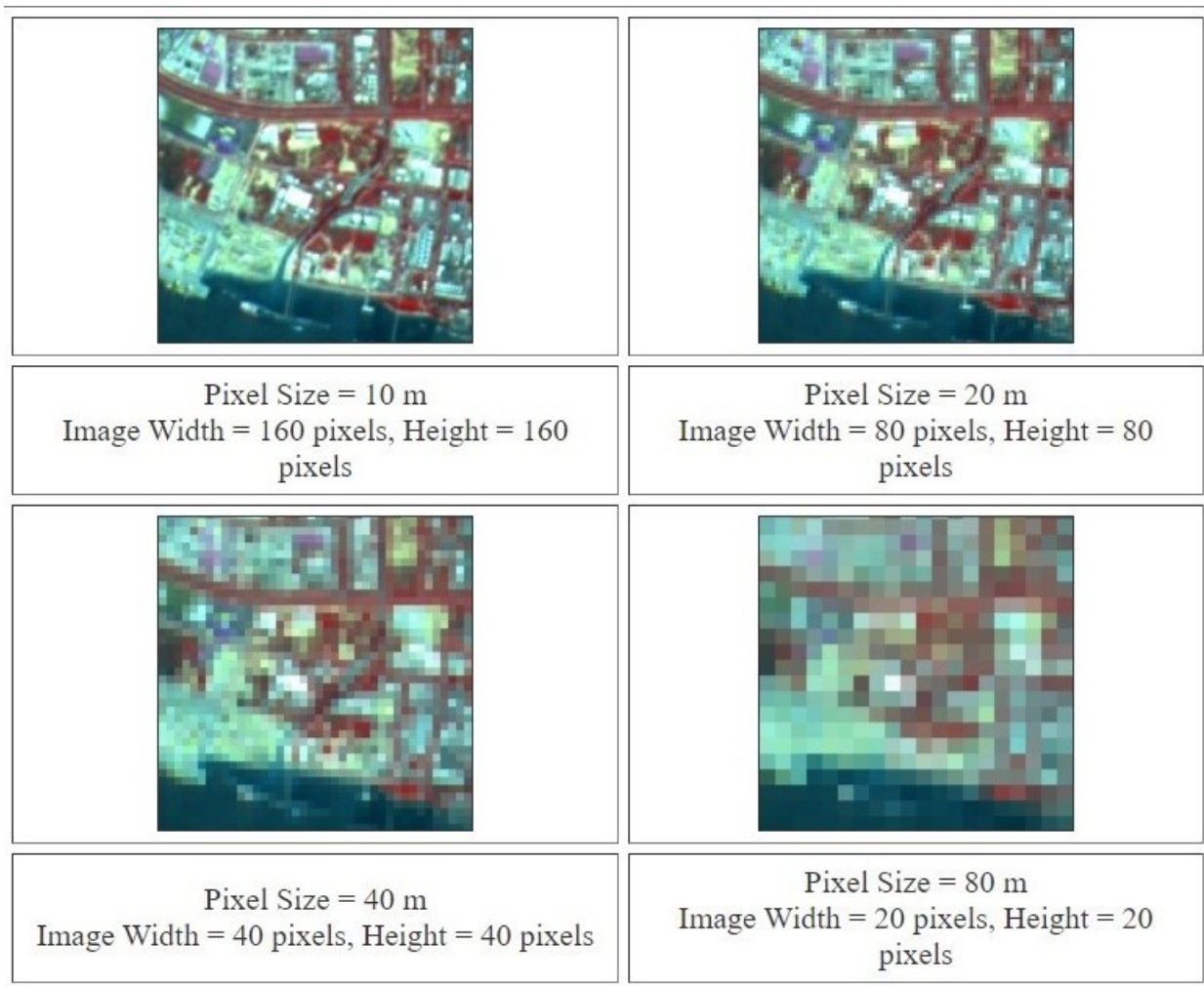
lähellä nämä pikselit ovat sarakkeissa ja riveissä järjestäytyneet, sitä tarkempia kuvia saadaan otettua. (DGZfp & IAEA 2012)

Pikselin rakenne



KUVA 8. Pikselin rakenne (Vidisco)

Yhdestä signaalikuvapistestä käytetään nimitystä pikseli. Yksittäisen pikselin koko digitaalisen radio-grafian paneeleista puhuttaessa on yleensä noin 50-143µm luokkaa. Mitä pienemmästä pikselin koosta on kyse, sitä paremmasta erotuskyvystä kuvassa puhutaan. On olemassa paneeleita, joiden yksittäisen pikselin koko voi olla jopa niin pieni kuin 30µ, mutta hitaan datankäsittelyn, paneelin pienen koon ja kalliiden tuotantohintojen takia eivät näin herkän erotuskyvyn omaavat paneelit ole yleistyneet teollisuuden saralla. Pikselin koko on suoraan verrannollinen kuvan spatiaaliseen resoluutioon ja yksityiskohtien määrään, mistä syystä digitalisoinnissa syntyneiden skannattujen arvojen, tai pikseleiden määrällä, on ratkaiseva vaikutus digitaalisen kuvan laatuun ja kuvan resoluutioon. (Suorsa 2023)

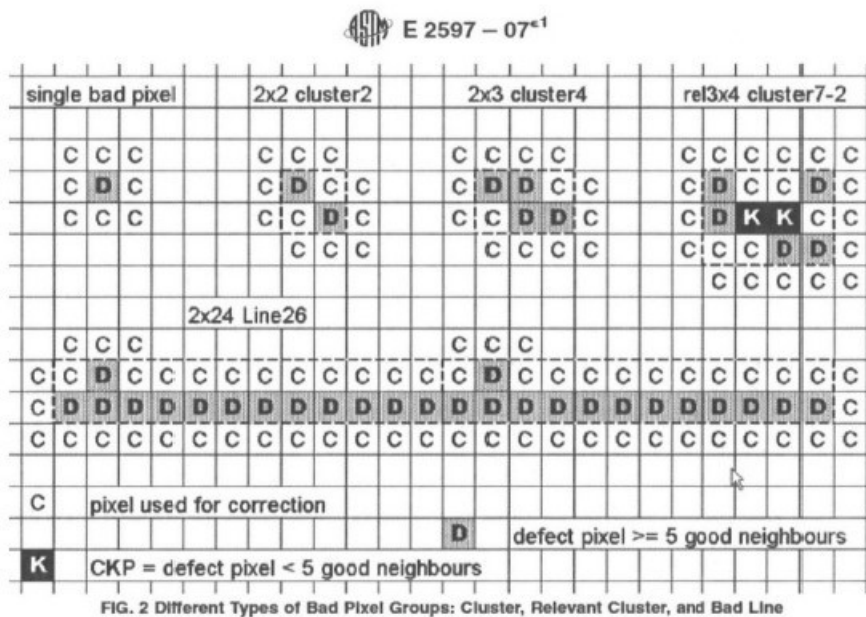


KUVA 9. Pikselin koon ja pikseleiden määrän vaikutukset erotuskyvyssä (Crisp 2001)

Useimmissa moderneissa digitaalisen radiografian laitteissa yhden matriisin pikseleiden määrä vaihtelee 512 x 512 ja 1024 x 1024 pikselien väleillä, mahdollisesti yltäen jopa 3072 x 2304 pikseliä kuvaa kohden. (Suorsa 2023)

5.7 Pikselin rakenne ja vialliset pikselit

Pikselistä, eli kuvan pienimmästä yksittäisestä osasta käytetään termiä dpi (dots per inch) eli pikseleiden määrää yhden tuuman sisällä. Jos viallisia pikseleitä ilmestyy liikaa dpi-alueelle, ei digitaalinen röntgenkuva tuota oikeanlaista harmaasävyarvoa. Tästä tapahtumasta käytetään nimeä cluster kernel pixel (CKP). (Suorsa 2023)



KUVA 10. Vialliset pikselit ja CKP (ASTM International 2020)

Pikselistä käytetään CKP nimitystä silloin, kun se ei omaa vähintään viittä toimivaa pikseliä vierellään. Digitaalisella radiografiolla otettu kuva pystyy kompensoimaan viallisen pikselin valottumista, jos viallista pikseliä ympäröi tarpeeksi monta toimivaa ja valottunutta pikseliä. (Suorsa 2023)

5.8 Harmaasävyarvo

Harmaasävystä puhuttaessa digitaalisessa kuvassa, tai kuvassa ylipäättensä, viitataan kuvan kaksiulotteiseen valon intensiteettifunktioon $f(x,y)$, missä x ja y ovat paikkakoordinaatit ja funktion f arvo on verrannollinen kuvan kirkkauteen, eli harmaasävyyden kussakin kuvan pisteessä. Harmaasävyyden määrä per pikseli on yleensä 2:n potenssi. Harmaasävyarvo on aina numeraalinen. (Jauhiainen 2006)

Dynaaminen alue kertoo, kuinka paljon valo- ja varjokohdissa on harmaasävyyttä. Dynaaminen alue vaikuttaa muun muassa siihen, miten paljon kuvankäsittelyä kuva sietää, rakeisuuden lisääntymättä liikaa. Harmaasävyn lukumäärä on sidonnainen dynaamisella alueella esiintyvään bittimäärään. Mitä enemmän bittejä, sitä suurempi on harmaasävyyden lukumäärä. Röntgenkuvan valotuksessa kannattaa myös pyrkiä käyttämään mahdollisimman suuri osa harmaasävyyden skaalasta, jolloin saadaan tallennettua suurin mahdollinen määrä informaatiota. (Suorsa 2023)

Digitaalisen radiografian kuvassa rikkovan aineenkoetuksen saralla ei ole riittäville harmaasävyarvoille säädetty vielä standardiperusteita, joilla voitaisiin viitata kuvassa vaadittaviin enimmäis- tai vähimmäisarvoihin. Kuvanlaadun kannalta ajateltuna harmaasävyarvojen olisi kuitenkin hyvä olla 50–90 % luokkaa, koska mitä korkeammalle harmaasävyarvojen prosentit nousevat, sitä korkeammalle signaali / kohina -suhde nousee. Esimerkiksi DEKRA:n sisäisissä ohjeissa ja ASTM Code Sec. V Article 2 standardissa on kuvanintensiteettiin kuvantarkkuuden todentamiseksi vaaditun indikaattorilangan vierestä otettu kantaa, kun taas SFS-EN ISO 17636-2:2022:en ei sitä vaadi. (Suorsa 2023)

5.9 Digitaalisen kuvan laatuun vaikuttavat tekijät

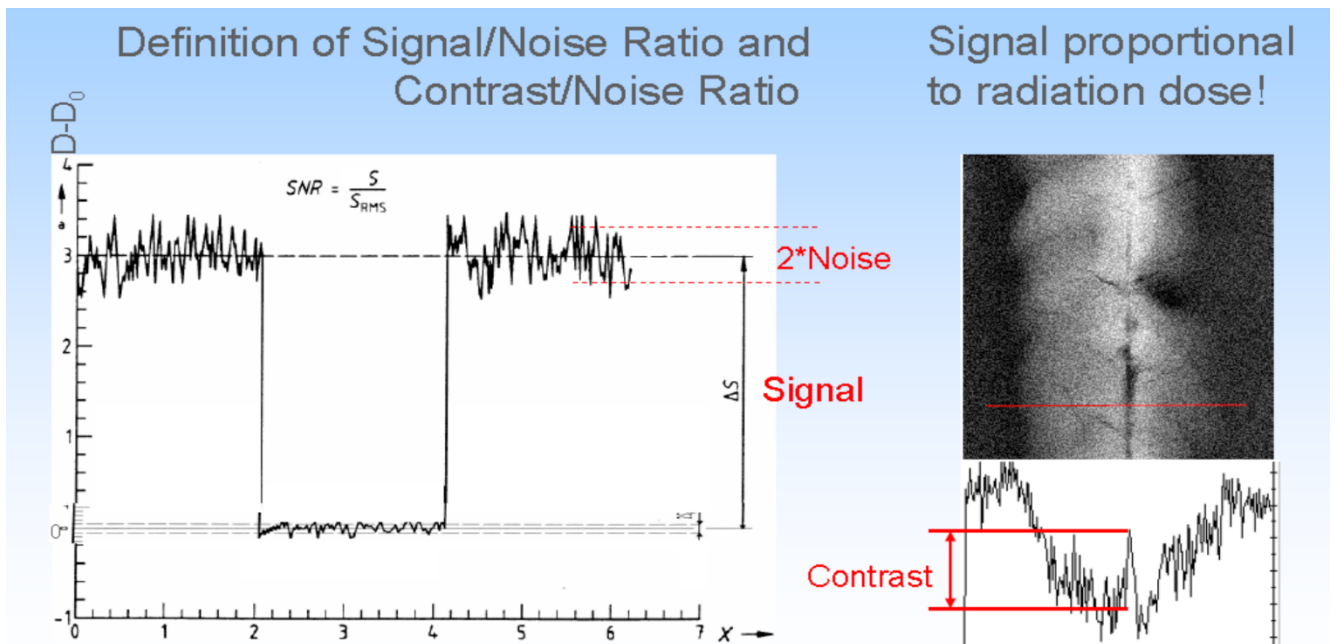
Digitaalisesta radiografiasta puhuttaessa kuvan laatuun vaikuttaa normaalien radiograafisten periaatteiden (esimerkiksi kuvausetäisyys – paneelietäisyys) lisäksi omat paneeliin kohdistuvat uniikit tekijät: CNR (kontrasti-kohinasuhde), SNR (signaali-kohinasuhde) & SRb (digitaalisen kuvan erotuskyky). Radiograafisten periaatteiden vaikutuksesta kuvan laatuun kerrottiin tarkemmin luvussa 4.3 Kuvan laatuun vaikuttavat tekijät. (DGZfp & IAEA 2012)

Homogeenisen materiaalin radiograafisessa tarkastuksessa syntyy aina säteilyn keskiarvosta poikkeava intensiteetti, joka hajoaa materiaalissa keskiarvon ympärille. Tätä keskiarvon ympärillä olevaa poikkeamaa kutsutaan kohinaksi. Kohinaa paneelitekniikassa voi aiheuttaa kaksi asiaa: riittämätön tai liian suuri säteily määrä ja paneelin sisäinen kohina. Detektorit voidaan luokitella niiden SNR- & SRb- arvojen mukaan. (DGZfp & IAEA 2012)

Kuvien saavuttama signaali-kohinasuhde riippuu valotuksesta ja paneelin kalibroinnista. Signaali-kohinasuhteen kasvua kuvaa kaksi kaavaa:

$$\text{SNR} = \text{mA} \times \text{min} \text{ tai } \text{SNR} = \text{GBq} \times \text{min}.$$

Missä SNR on signaali-kohinasuhde, mA on säteilyä tuottavan röntgenputken milliampeeriarvo ja min on valotus minuuteissa tai missä SNR on signaali-kohinasuhde, GBq on gigabecquerelliä ja min on valotus minuuteissa. (DGZfp & IAEA 2012)



KUVA 11. SNR ja CNR (Vidisco)

Suomen standardiliiton rikkomattoman aineenkoetuksen paneelitekniikkaa koskeva standardia SFS-EN ISO 17636-2:2022:en antaa laskukaavan normalisoidun signaali-kohinasuhteen arvolle. Normalisoidun SNR-suhde digitaalisen detektorin erotuskyvyille SR_b, lasketaan otetusta kuvasta saadusta SNR-arvosta kaavalla:

$$SNR_n = SNR \times 88,6 / SR_b$$

Jossa, SNR on kuvan signaali-kohinasuhde ja SR_b digitaalisen detektorin erotuskyky. (Suomen standardiliitto 2022)

Kalibroinnilla pyritään tasoittamaan yksittäisten pikseleiden vasteissa olevia eroja ja oikein tehdyllä kalibroinnilla kohina pienenee ja signaali-kohinasuhde kasvaa. Suuri SNR on saavutettu silloin, kun signaalin keskimääräinen intensiteetti on suuri verrattuna kohinaan, ja pieni silloin, kun signaalin keskimääräinen intensiteetti on pieni verrattuna kohinaan. Mitä suurempi SNR, sitä suurempi kuvan laatu ja mitä suurempi röntgensäteilyn intensiteetti, sitä suurempi SNR tulee olemaan. SNR mitataan aina käsittelemättömästä raakadata kuvasta ja ensisijaisesti perusaineelta eikä kohteen muutosvyöhykkeiltä. Jos kuitenkin mittaus on tehtävä muutosvyöhykkeeltä tai perusaineelta, kerrotaan standardin arvot 1:4:llä. Osat paneelitekniikan ohjelmista ilmoittavat kuvan SNR-arvon asettamalla kursorin halutun kohdan päälle, kun taas toisissa arvon laskeminen pitää tehdä manuaalisesti. Signaali-kohinasuhteella

on erittäin iso merkitys digitaalisessa radiografiassa, koska otettujen kuvien tarkastelemiseen käytetään tietokoneen näyttöä. (Suorsa 2023)

Kontrasti-kohinasuhde (CNR) on keskimääräisen intensiteetin ero digitaalisessa röntgenkuvassa esimerkiksi perusaineen ja virheen välillä. Pienten vikojen ja IQI-arvojen näkyvyys riippuu normalisoidusta kohinan ja kontrastin suhteesta (CNR_n) materiaalin ainepaksuuseroihin ja sivusuuntaisiin muotoihin kohti. CNR_n on normalisoitu CNR:n suhde teholliseen pikselikokoon digitaalisissa kuvissa. (Suorsa 2023)

BSR:n, eli paneelin erotuskyvyn mitataksaan tarvitsee paneelin käyttäjä kaksoislankaindikaattoria todetaksaan suurimman mahdollisen erotuskyvyn. Kaksoislankaindikaattori asetetaan paneelin päälle 2–5 astetta vinoon ja kuvasta löydettyä ohuinta lankaparia verrataan annetun standardin suurimpaan annettuun epäterävyyteen, saaden erotuskyvyn arvo. (Suorsa 2023)

Kuvan laatua suojataksaan sironnalta voidaan paneelitekniikassa tausta suojata teräs- tai tinalevyllä. Lyijylevyä ei käytetä, koska se voi heikentää kuvan laatua. Perinteisiä suuren säteilyn annosnopeuden omaavia röntgenlaitteita käytettäessä paneelin elektroniikkaosa on suositeltavaa suojata säteilyltä valotuksen aikana, mikäli kuvauskohde ei itsessään suoja sitä ja suojaaminen on käytännössä mahdollista. Suuria annosnopeuksia käytettäessä kuuluu myös noudattaa paneelien mahdollisia kV-rajoituksia. (Suorsa 2023)

6 OHJELMISTOT

6.1 Ohjelmiston alustaminen

Digitaalisessa radiografiassa, varsinkin paneelitekniikassa, ohjelmisto, sen luotettavuus ja toiminnot ovat kaikki kaikessa. Kuvalevytekniikassa ei ohjelmisto astu kuvaan ennen kuin itse kuvaus on suoritettu ja fosforifilmien skannaus alkaa, mutta paneelitekniikassa on ohjelma saatava toimimaan jo ennen kuvauksen aloittamista, riippumatta laitevalmistajasta. (Suorsa 2023)

Saadakseen edes mahdollisuudet alkaa huolehtimaan aikaisemmissa luvuissa mainituista signaali-kohinasuhteesta, viallisista pikseleistä tai geometrisesta epäterävyydestä pitää digitaalista laitteistoa käyttävän tarkastajan saada laitteisto, paneeli ja mahdolliset reitittimet (control hub) tai voimalähteet yhdistettyä langattomasti tai johdoittain ohjelmaa ajavaan prosessoriin, eli ohjausyksikköön, joka on yleensä joko tietokone tai tabletti. Digitaalisen radiografian laitteistot, ohjelmistoja myöten, tulevat tietysti kokonaisuudeltaan aina yhdeltä tietyltä laitevalmistajalta. Esimerkiksi suomalaisen Pexraytechin paneeleita ei tietenkään voi liittää Belgialaisen ICM:n laitteistoa ajavaan Sherlock-nimiseen ohjelmistoon. (Suorsa 2023)

Ohjelmistot on yleensä luotu ja asennettu jo valmiiksi helposti kuljeteltavalle tietokoneelle, joka myydään muiden digitaalisten radiografian tarvikkeiden mukana, mutta tietyillä laitevalmistajilla on lisensinostajan mahdollista saada tai siirtää omistettu ohjelma myös erilliselle prosessorille. (Suorsa 2023)

Minkä tahansa standardin mukaisesta hyväksyttävästä digitaalisesta röntgenkuvasta välittämättä, saadakse paneelin siirtämään minkäänlaista bittinnumeroista informaatiota ohjausyksikön suuntaan, on paneeli, välikappaleet ja ohjelmisto oltava yhteydessä toisiinsa. Tämän onnistuakseen ohjelma ei periaatteessa vaadi vielä röntgensäteilyä, sillä tietyillä ohjelmistoilla esimerkiksi paneelin kalibrointi aloitetaan ilman minkäänlaista altistusta röntgensäteilylle. (Suorsa 2023)

Paneelien kalibrointi on aina oltava kunnossa ennen tarkastuksen aloittamista, koska sillä on suora vaikutus esimerkiksi signaali-kohinasuhteeseen. Laitevalmistajasta, laitetta käyttävästä firmasta ja sitä sovellettavista standardeista riippuen ovat esimerkiksi viallisten pikseleiden, pimeysvasteen, ja säteilyvasteen kalibroinnit suoritettava jokaisen tarkastuskerran alussa, sekä paneelin vuosikalibroinnit tehtävä kerran vuodessa. (Suorsa 2023)

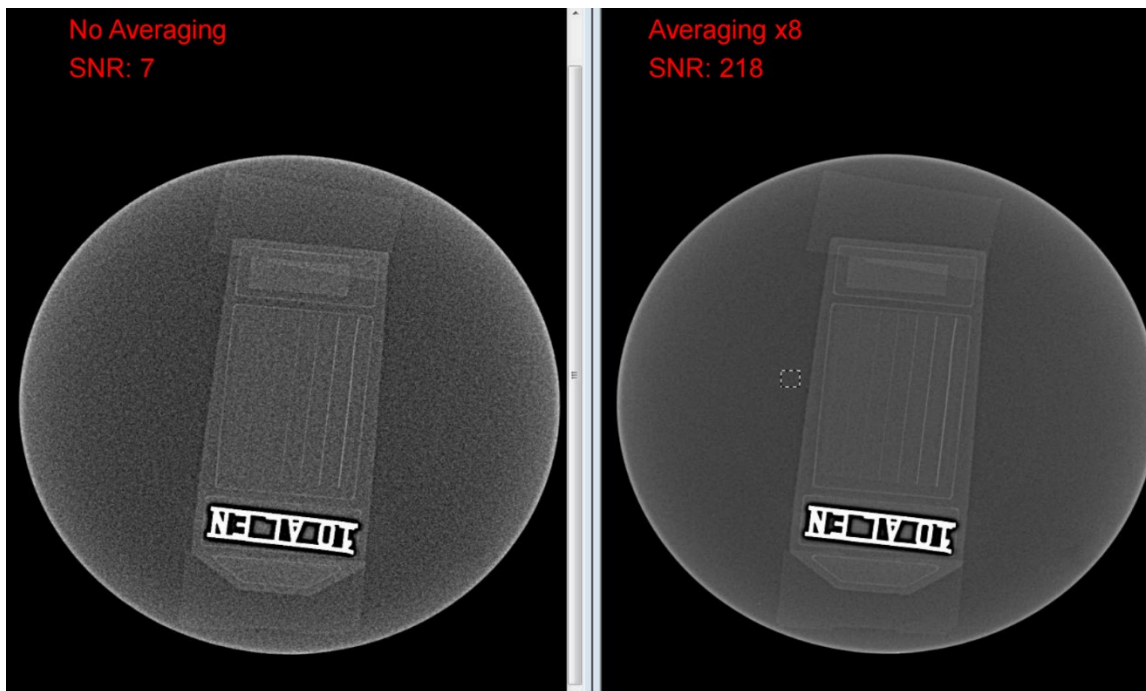
Useat ohjelmistovalmistajat päivittävät aika ajoin ohjelmistojaan muuttaen tiettyjä ikoneja toimintojen edessä tai tuoden päivityksien mukana uusia muutoksia omaan digitaalisen radiografian ohjelmaansa, joita tietyt ohjelmistot pyrkivät päivittämään aina internetyhteyteen kytkettäessä, mutta mikään virallinen standardi teollisuuden saralla ei tällä hetkellä pakota tarkastajaa käyttämään aina uusinta ohjelmistopäivitystä digitaalisen radiografian kuvausta suorittaessaan. (Suorsa 2023)

Tunnettuja digitaalisen radiografian tuotteiden valmistajia ovat esimerkiksi Vidisco, ICM, Dexela, GE, NovoDR ja Pexraytech. (Suorsa 2023)

6.2 Onnistuneen kuvan ottaminen

Onnistuneen kytkennän jälkeen on aika suorittaa kuvattavan kohteen röntgentarkastus. Jotta tarvittava määrä säteilyä kulkisi tarkastettavan materiaalin läpi, on oikeanlaiset säteilyarvot säädettävä aivan kuin filmitekniikassakin. Jos tarkastajan käytössä on saman laitevalmistajan röntgenputki ja paneelitekniikan laitteisto, voivat tietyt ohjelmat laskea tarvittavat kuvamäärät ja kuvausarvot, jos vaadittavat kuvaustekniset tiedot on syötetty ohjelmaan oikein. Muissa tapauksissa arvot, kuten kuvien määrä ja valotusaika per kuva, on valittava manuaalisesti. Paneelitekniikassa käytettävän röntgensäteilyn määrä on mahdollista pitää pienempänä kuin filmitekniikassa, koska paneelit pystyvät reagoimaan samaansa säteilyyn filmejä paremmin. (Suorsa 2023)

Keskiarvoistus tarkoittaa sitä, että ohjelma valottaa samasta kohteesta useamman kerran samanlaisen kuvan, joka keskiarvoistetaan, parantaen signaali-kohinasuhdetta, jolloin kuvan rakeisuus pienenee. Keskiarvoistuksella parannetaan siis kuvan laatua. (Suorsa 2023)



KUVA 12. Keskiarvoistuksen merkitys kuvan laatuun. (Vidisco)

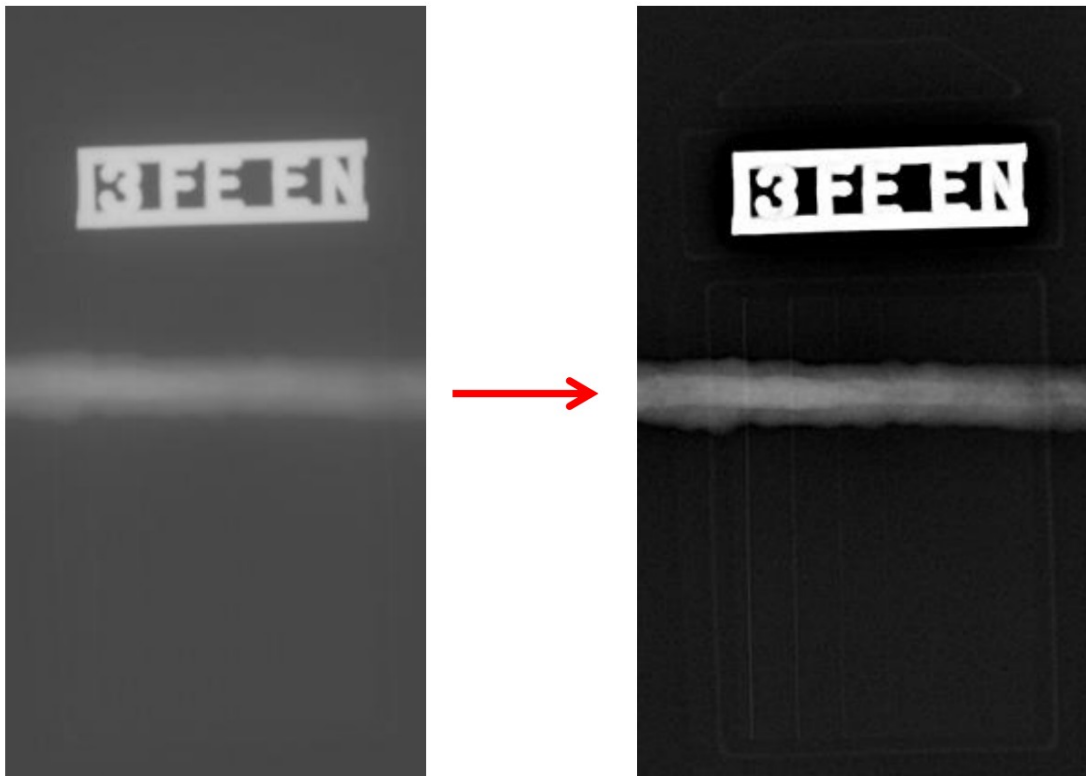
Onnistuneen digitaalisen kuvan ottamisen jälkeen, on käsittelemätön raakadata tallennettava ohjelman ja/tai standardin mukaisessa tiedostomuodossa, esimerkiksi tiff- tai diconde-tiedostomuodossa, ennen kuin voidaan alkaa käyttämään ohjelman kuvankäsittely ominaisuuksia. Osat digitaalisen radiografian ohjelmistoista tekevät tämän automaattisesti. (Suorsa 2023)

6.3 Kuvankäsittely

Paneelitekniikan ohjelmistojen kuvankäsittely toimintoja käytetään kuvien analysoimiseen, virheiden mittaamiseen ja merkitsemiseen. Käsittelemätöntä raakadata-kuvaa ei käytetä tarkastettavan kohteen luokitteluun. Digitaalisen radiografian paneelitekniikan ohjelmistot sisältävät mahdollisuuden harmaasävyarvojen muuttamiseen, joka mahdollistaa usean eri ainepaksuuden luokittelun samalta röntgenkuvalta, mahdollisuuden otetun kuvan suurentamiseen ja terävöittämiseen. Useat eri ohjelmat tarjoavat lukuisia erilaisia työkaluja, kuten esimerkiksi suurennuslaseja, terävöitys mahdollisuuksia ja käänteisvärejä harmaasävyisen röntgenkuvan lisäksi. Erilaisia mittatyökaluja ohjelmissa esiintyy myös laajasti, joilla voidaan esimerkiksi suoraan otetusta kuvasta mitoitaa havaitun epäjatkuvuuden pituus ja koko tai viivaprofiilin avulla määrittää sen tyyppi. Syvyyden määrittäminen pinnanalaisissa viivoissa on radiografiassa mahdotonta. (Suorsa 2023)

Mittatyökalujen kalibroinneista on tärkeää pitää hyvää huolta, sillä oli kyseessä miten pieni tai suuri paneeli tahansa, suurentaa paneeli aina röntgenkuvauksen kohdetta jonkin verran näytön ruudulle. Kalibroidut mittatyökalut kompensoivat tätä eroavaisuutta, eivätkö suurena esimerkiksi havaitun epäjatkuvuuskohdan kokoa sen oikeaa kokoa suuremmaksi. (Suorsa 2023)

Kuvauskohteen koosta, materiaalista ja valmistustavasta riippuen saatetaan esimerkiksi tietyiltä hitseiltä tai perusaineilta etsiä sille tyypillisiltä tai kriittisiltä paikoilta niille tyypillisiä vikoja. Näiden vikojen havaitsemiseksi auttavat paneelitekniikan ohjelmiin rakennetut filtrit ja suurennusmahdollisuudet tyyppivikojen löytämisessä. Oikean kohdan suurentaminen, harmaasävyillä suotuisan kontrastin hakeminen ja erilaisten filttareiden käyttö auttaa paikantamaan virheitä tavoin, joihin perinteinen filmitekniikka ei pysty yhtä helposti. (Suorsa 2023)



KUVA 13. Vidiscon ohjelman highpass filtering-toiminto. (Vidisco 2023)

Kuvan muokkauksen, luokittelun ja mahdollisten virheiden mitoittamisen sekä merkitsemisen jälkeen käsitelty röntgenkuva tallennetaan uudestaan. Käsitelty röntgenkuva on tallennettava uudestaan raakadata muodossa (esim. tiff tai diconde) sekä kuvamuodossa (esim. png tai jpeg). (Suorsa 2023)

6.4 Kuvan luokittelu

Digitaalisen röntgenkuvan luokittelu tapahtuu sen standardin mukaan, minkä mukaan kuvaus on suoritettu ja minkä standardin mukainen raportti tarkastuksesta tuotetaan. Suomessa digitaalisen paneelitekniikan mukaisen tarkastuksen voi suorittaa joko ASME- tai EN-standardin mukaan. (Suorsa, K. 2023)

Luokittelu on suoritettava hämärässä ja ennen luokittelua on tarkastajan totuteltava hämärää. Valonsäteiden heijastumista näytölle tulee estää. SFS-EN ISO 17636-2:2022:en mukaan digitaalisen röntgenkuvan luokittelussa on monitorin minikirkkauden oltava 250 cd/m^2 , harmaasävyarvojen oltava vähintään 256, näytettävän valovoiman vähimmäissuhde oltava 1:250 ja löydettävä vähintään miljoona pikseliä, joiden pikselikoko on $< 0,3 \text{ mm}$ (Suomen standardiliitto 2023)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TULOKSIEN ANALYSOINTI

Lähdin opinnäytetyössäni selvittämään digitaalisen radiografian soveltamista teollisuudessa, eli sen käyttöä rikkomattoman aineenkoetuksen saralla. Opinnäytetyön tavoitteena oli esitellä digitaalisen radiografian peruspiirteet sekä laitteistojen ja ohjelmistojen toimintaa. Myös filmitekniikan sijainti ja tulevaisuus digitaalisen röntgenin rinnalla kuului yhdeksi opinnäytetyöni tutkimuskysymyksistä.

Digitaalinen radiografia on ehdottomasti tullut jäädäkseen. Teollisuuden saralla syntyvät uudet standardit, yleistyvät laitevalmistajat ja jatkuvasti kasvava käyttö puhuvat puolestaan. Paneelitekniikan suurin myyntivaltti, välittömän tarkastustuloksen antaminen ja mahdollisten jatkokuvauksien laajentaminen, nopeuttavat projektien viemistä heti alusta aina loppuun saakka ja pitkässä juoksussa säästävät niin rahaa, aikaa, kuin vaivaa. Vaikka osa kuvauskohteista tänä päivänä vielä estävät paneelitekniikan soveltamisen, ei se tarkoita, etteikö näihin kysymyksiin tulevaisuudessa löytyisi vastauksia. Tieteen maailma kehittyy jatkuvasti nopeaa vauhtia ja tämän kehityksen yhteydessä voidaan pitää hyvinkin mahdollisena taipuvampien ja lämpöä paremmin kestävien paneelien kehitys.

Kysymykseen, korvaavatko digitaaliset radiografian tekniikat rikkomattomassa aineenkoetuksessa koskaan filmitekniikkaa täysin, on tällä hetkellä mahdotonta vastata. Vaikka tähän skenaarioon teollisuuden saralla löytyisi tietoteknilliset vastaukset, esimerkiksi kehittyneiden fosforifilmien kompensoidessa kohteita joihin paneelitekniikka ei pysty, pitää huomioon asiassa ottaa myös inhimilliset tekijät.

Yksi työni tutkimusongelmista otti kantaa siihen, miten muuttuvien ohjelmistojen perässä pysyminen aiheutti aika ajoin pienimuotoisia vaikeuksia opinnäytetyöni tekemisessä, koska esimerkiksi tiettyjen ohjelmistojen kohdalla jo valmiiksi raportoitu tieto saattoi kahden kuukauden päästä olla vanhentunut. Tämä ei kuitenkaan itse tarkastuksen saralla aiheuta ongelmia digitaalisen radiografian laitteistojen kanssa paljon aikaa viettävälle ihmiselle, mutta harvemmin ohjelmiin koskevalle tarkastajalle tämä voi tuottaa vaikeuksia. Digitalisaatiolla tarkoitetaan laajempaa yhteiskunnallista muutosta, joka tapahtuu, kun perinteisiä analogisia toimintoja ja prosesseja korvataan digitaalisilla ratkaisuilla tai teknologialla. Vaikka digitaalinen radiografia ei vaikuta yhteiskuntaamme kokonaisuutena, on digitaalisessa radiografiassa tietysti myös kyse toimintojen ja prosessien digitalisoitumisesta, joka on digitalisointia. (Opetusministeriö 2023) Tätä muutosta teollisuuden saralla on helppo verrata digitalisaatiosta yhteiskunnallisella tasolla kärsiviin, tai sen kanssa kamppaileviin ihmisiin. Digitaalisen radiografian ohjelmat ovat vielä suurimmaksi osaksi vieraskielisiä ja edellyttäen että ne saataisiin kaikki käännettyä niitä

käyttävän tarkastajan äidinkielelle, ei silti takaa, että jokainen työntekijä osaisi ohjelmistoja esimerkiksi kymmenen vuoden sisään käyttää.

Loin opinnäytetyössäni, toimeksiantajalleni oppaan digitaalisen radiografian eri ohjelmistojen oikeaoppiseen käyttöön. Sen toimivuudesta sitä tarvitsevalle tarkastajalle on teoriassa vaikea määritellä, koska sen tarve yhdelle voi olla mitätön ja toiselle erittäin tärkeä. Jatkokehitysmahdollisuutena näen jo käytössä olevan oppaan päivittämisen uusien ohjelmistopäivityksien, tai standardimuutosten mukaan, estäen materiaalin mahdollisen vanhentumisen.

LÄHTEET

AEL. 2019. Ultraäänitarkastus 1- ja 2- tasolle.

Dekra Industrial Oy. 2023a. Uutiset, artikkelit ja tapahtumat. Saatavissa: <https://www.dekra.fi/fi/uutiset-ja-ajankohtaiset/>. Viitattu 20.11.2023.

Dekra Industrial Oy. 2023b. Metallien pyörrevirtatarkistus. Saatavissa: <https://www.dekra.fi/fi/pyorrevirta-tarkastus-et/>. Viitattu 20.11.2023.

DGZfp & IAEA 2012. RT-D2 Digital Industrial Radiology Training Level 2.

Jauhiainen, J. 2006. Digitaalinen kuvankäsittely. Saatavissa: <https://www.oamk.fi/~jjauhiai/opetus/DIP/kuvankasittely.pdf>. Viitattu 20.11.2023.

Klemola, S. STUK säteilynlmaisimet. Saatavissa: <https://stuk.fi/documents/150192312/162661266/kirja1-4-sateily-ja-sen-havaitseminen-sateilyn-ilmaisimet.pdf/8277eccd-da0d-d741-97c3-b38cc6f4cca8/kirja1-4-sateily-ja-sen-havaitseminen-sateilyn-ilmaisimet.pdf?t=1684851440736>. Viitattu 20.11.2023.

Opetusministeriö 2023. Datatalousosaamisen perusteita perusopetukseen ja toiselle asteelle. Saatavissa: <https://www.oph.fi/fi/digiosaaminen/datatalousosaamisen-perusteita-perusopetukseen-ja-toiselle-asteelle>. Viitattu 20.11.2023.

SFS 17636-2:2022:en Non-destructive testing of welds – radiographic testing. Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. Helsinki: Suomen standardiliitto SFS.

Suorsa, K. 2023. Dekra DigiRT-koulutus rev. 11.

Taitotalo 2022a. Radiografinen tarkastus.

Taitotalo 2022b. Silmämääräinen tarkastus.

Toivonen, J. 2016 Tunkeumanestetarkastus tasoille 1- ja 2.

Åström, T. 2000. NDT-tarkastuskäsikirja magneettijauhetarkastus. Helsinki: Suomen hitsausteknillinen yhdistys, NDT-komitea.