

Ksenia Sokolova

Digitaalisen radiografian käyttö telakalla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

28.4.2017

Tekijä Otsikko	Ksenia Sokolova Digitaalisen radiografian käyttö telakalla
Sivumäärä Aika	43 sivua + 2 liitettä 28.4.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	Osastopäällikkö Lauri Kujala Lehtori Juha Kotamies
<p>Työssä perehdyttiin digitaalisen radiografian toimintaan ja arvioitiin sen soveltuvuutta telakkaolosuhteisiin. Digitaalinen radiografia on yksi NDT-tarkastusmenetelmistä, jossa käytetään filmin sijaan kuvauspaneelia, jolla saadaan heti luokiteltavaksi valmis digitaalinen kuva. Tarkastukset suoritettiin alihankkijan toimesta rakennusvaiheessa olevalla jäänmurtajalla Helsingin telakalla.</p> <p>Tavoitteena oli saada kuvauskokeissa standardinmukaisia kuvia digitaalisella röntgentarkastuksella, kartoittaa menetelmän edut ja haitat telakkakuvauksen kannalta sekä verrata menetelmää perinteiseen radiografiaan. Pääpaino tarkastuksissa oli eripaksuisten levyjen liitosten kuvaaminen, joka filmitekniikalla vaatii useamman kuvan ottamisen, jotta molemmat levyvahvuudet tulevat näkyviin.</p> <p>Tarkastukset tehtiin sekä laivalla että laboratoriossa. Laivalta valittiin kaksi NDT-suunnitelman mukaista kuvauskohdetta, jotka kuvattiin sekä perinteisellä että digitaalisella menetelmällä. Laboratoriossa kuvattiin kaksi eripaksuista hitsattua levyä ja yksi putkiliitos. Tarkastuksiin kulunut aika ja kuvausarvot kirjattiin ylös vertailuja varten. Tuloksena saatiin kolme standardinmukaista kuvaa, joista yhdestä tehtiin myös tarkastuspöytäkirja.</p> <p>Kokeet osoittivat digitaalisen radiografian toimivan hyvin telakkaolosuhteissa, ja sen avulla tarkastukset voisivat periaatteessa edetä nopeammin. Digitaalista kuvaa on helpompi luokitella filmiin verrattuna, ja todennäköisyys kuvan epäonnistumisesta on alhaisempi.</p> <p>Työssä esitetty menetelmien kustannusvertailu perustuu arvioon ja asiantuntijoiden antamiin tietoihin. Yleisesti ottaen digitaalinen radiografia on tässä vaiheessa kalliimpi vaihtoehto, ja todennäköisesti sitä joudutaan ainakin toistaiseksi käyttämään perinteisen radiografian rinnalla.</p> <p>Seuraavat vaiheet voisivat sisältää tarjouspyynnön laatimisen, kuvauspisteiden valitsemisen sekä selvittämisen, täyttääkö digitaalinen menetelmä telakan kaikki vaatimukset jatkuvassa käytössä.</p>	
Avainsanat	röntgen, digitalinen radiografia, NDT, rikkomaton aineenkoetus

Author Title	Ksenia Sokolova Digital Radiography at a Shipyard
Number of Pages Date	43 pages + 2 appendices 28 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructors	Lauri Kujala, Manager of Blocks Department Juha Kotamies, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to conduct digital radiography (DR) tests at a shipyard and decide whether the method meets the requirements of the shipbuilding environment. In addition, another objective was to test if it is faster than traditional radiography (RT). This study was commissioned by Arctech Helsinki Shipyard inc.</p> <p>Digital radiography uses a digital detector array (DDA) instead of x-ray films and operates with a lower voltage. Therefore, it is environmentally safer compared to the traditional radiography. The tests were carried out both on a vessel and in a laboratory. Firstly, the testing places on the vessel were chosen from the NDT plan and the sample plates with different material thicknesses were welded. Different thicknesses were needed to accomplish a joint, where traditional radiography normally uses a multi-film technique. Secondly, the test was conducted by a subcontractor and test results were recorded. Finally, the advantages and disadvantages of digital radiography were discovered and compared to traditional radiography.</p> <p>The tests indicated that at the beginning stage digital radiography is as fast as traditional radiography, but it requires a lower amount of physical work, e.g. film development is missing. Because digital radiography is a new technique, it is more expensive than traditional testing and, due to the large size of DDA, it can be used mostly in easily accessible places.</p>	
Keywords	X-ray, digital radiography, NDT, non-destructive testing

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Radiografian periaate	3
2.1	Röntgensäteily	3
2.2	Gammasäteily	4
2.3	Kuvaaminen filmitekniikalla (RT)	4
2.3.1	Laitteet	5
2.3.2	Tarkastuksen suoritusjärjestys	7
2.4	Kuvaaminen digitaalisella radiografialla (DR)	8
2.4.1	Laitteet ja ohjelmisto	9
2.4.2	Kuvauksen suoritusjärjestys	13
3	Kuvauskokeet	13
3.1	Aikaisemmat tutkimukset	13
3.2	Käyttökohteet telakalla	14
3.3	Kuvaussuunnitelma	15
3.4	Kuvauskokeiden suorittaminen	17
3.4.1	Kuvaukset laivalla	17
3.4.2	Koepalojen tarkastus laboratoriossa	19
4	Kuvauskokeiden tulokset	21
4.1	RT29	21
4.2	RT33	23
4.3	Koe 1	25
4.4	Koe 2	29
4.5	Koe 3	31

5	Menetelmien vertailu	33
5.1	Tärkeät asiat telakkakuvauksen kannalta	34
5.2	Perinteinen ja digitaalinen radiografia rinnakkaisessa käytössä	38
6	Yhteenveto	39
	Loppusanat	41
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. Laivapiirustus	
	Liite 2. Tarkastuspöytäkirja	

Lyhenteet

AHS	<i>Arctech Helsinki Shipyard Oy</i>
CR	<i>Computed Radiography.</i> Tietokoneavusteinen radiografia
DDA	<i>Digital Detector Array.</i> Kuvauspaneeli
DR	<i>Digital radiography.</i> Digitaalinen radiografia
NDT	<i>Non-destructive testing.</i> Rikkomaton aineenkoetus
RMRS	<i>Russian Maritime Register of Shipping</i>
RT	<i>Radiographic testing.</i> Radiografinen testaus
SNR _N	<i>Normalized signal-to-noise ratio.</i> Normalisoitu signaali-kohinasuhde
UT	<i>Ultrasonic testing.</i> Ultraäänitarkastus

1 Johdanto

Kolmenkymmenen viime vuoden aikana tekniikka on kehittynyt nopeasti. Se on vaikuttanut suuresti ihmisten elämään ja ennen kaikkea ajanhallintaan. Päätöksiä ja toimenpiteitä tehdään entistä nopeammin. Teollisuudessa projektien ajanhallinta edellyttää hyvää teoreettista pohjaa ja teknistä osaamista. Näin ollen nykyään teollisuusalalla toimivat yritykset pyrkivät tarjoamaan kilpailukykyisiä ja mahdollisimman nopeasti valmistettavia tuotteita. Tällainen vauhdikas projektitoiminta vaatii tuotteiden tarkkaa ja nopeaa laadunvalvontaa, ja ilman pitkälle kehittyntä tekniikkaa se olisi ongelmallista. Tässä työssä arvioidaan digitaalisen röntgentarkastuksen sopivuutta telakkaolosuhteisiin ja sen mahdollista vaikutusta NDT-tarkastusten suorittamisnopeuteen.

Arctech Helsinki Shipyard Oy

Arctech Helsinki Shipyard Oy on arktiseen laivanrakennukseen ja meriteknologiaan erikoistunut yritys. Sen historia alkoi vuonna 1865, kun Helsinkiin perustettiin Helsingfors Skeppsdocka -niminen telakka.

Telakalla on vankka kokemus laivansuunnittelusta ja -rakennuksesta. Se panostaa jatkuvaan kehitykseen ja innovatiivisen suunnittelun kautta parhaiden ratkaisujen toimittamiseen arktiselle merenkululle. Telakan päätuotteita ovat jäänmurtajat ja vaativat huolto- ja monitoimialukset. Yrityksen tuotevalikoima laajenee sitä mukaa kun ennen rakentamattomia aluksia luovutetaan tilaajalle. Viime aikana pääasiakkaita ovat olleet öljy- ja kaasuteollisuudessa toimivat yritykset.

Arctech Helsinki Shipyard Oy sijaitsee Helsingin Hietalahdessa työllistäen noin 1400 henkilöä. Yrityksen omistaa venäläinen United Shipbuilding Corporation. [22.]

Työn tavoite

Tämän insinööriyön tavoitteena on kartoittaa mahdollisuudet siirtyä perinteisestä radiografiasta digitaaliseen radiografiaan, vertaamalla menetelmien tehokkuutta ja kannattavuutta telakkaolosuhteissa ajankäytön ja kustannusten kannalta.

Työssä käsitellään kuvauksen teoriaa ja esitetään laivalla pidettyjen kuvauskokeiden tulokset. Kuvauskokeet suoritettiin alihankkijayrityksen toimesta. Työn tarkoituksena oli tehdä vertailu, jonka perusteella päätetään digiradiografian käytöstä telakalla.

Radiografisen menetelmän käyttö edellyttää kahden standardin noudattamista: standardia SFS-EN ISO 17636-1 [20], mikä käsittelee röntgen- ja gammakuvausta filmitekniikalla ja SFS-EN ISO 10675-1 [21], joka käsittelee RT-kuvauksen hyväksymisrajoja.

Tutkittavaksi valittujen kohteiden kuvauskokeet tehdään standardin SFS-EN ISO 17636-2 (Röntgen- ja gammakuvaus digitaalitekniikalla) mukaan [17]. Kokeiden jälkeen verrataan molempia menetelmiä seuraavien kohtien osalta:

- laitteiston koko ja käytettävyys
- luoksepäästävyys laitteineen
- kuvaukseen käytetty aika
- säteilyvoimakkuus
- erityiset toimenpiteet
- kuvien tulkitsemiseen käytetty aika
- pöytäkirjat
- tallenteiden arkistointi
- kustannukset.

Työssä ei perehdytä radiografisen tarkastuksen yksityiskohtiin, kuten kuvanmuodostumiseen filmiin, kuvaus- ja filmitekniikan valintaan tai filmien kehitykseen. Digiradiografisesta kuvauksesta kerrotaan tärkeimmät asiat jättäen kuitenkin mainitsematta ne yksityiskohdat, joihin tilaajalla ei ole vaikutusta, kuten kuvan analysointi ja laitteiden asetusten säätäminen.

2 Radiografian periaate

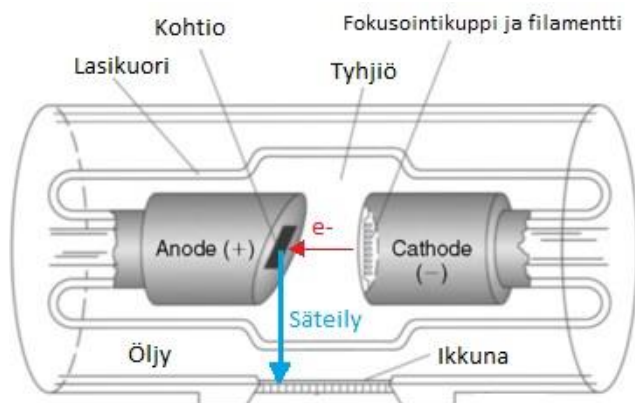
Radiografian tarkoitus on paljastaa materiaalin sisään muodostuneita epäjatkuuskoh-
tia. Sillä saa näkyviin kaksi- ja kolmiulotteisia vikoja. Telakoilla radiografista tarkastusta
(myöhemmin RT) käytetään hitsausliitosten laadun varmistamisessa. Useimmiten hitsiin
syntyvät viat ovat kaasuhuokokset ja -ontelot, halkeamat, huokosryhmät ja kuonasu-
lkeumat. Valmiissa filmissä ne näkyvät tummina kohtina. Vajaa hitsautumissyvyys ja reu-
nahaava näkyvät kuvissa myös. [19.]

Radiografisessa tarkastuksessa käytetään kahta erilaista tapaa kuvata kohteita: käyttä-
mällä röntgenputkea tai käyttämällä isotooppia, joka lähettää ionisoivaa gammasäteilyä.

2.1 Röntgensäteily

Röntgensäteilyn havaitsi vuonna 1895 Würzburgin yliopiston fysiikan professori, Wilhelm
Conrad Röntgen, tutkiessaan katodisäteitä. Hän huomasi, että katodiputkessa syntyvät
aallot pystyvät läpäisemään myös kiinteitä aineita. Koska tämän tyyppisestä säteilystä ei
ollut ennestään tietoa, hän antoi sille *X-rays* -nimen. [9.] Myöhemmin röntgensäteilyn
todistettiin olevan sähkömagneettista säteilyä kuten valo, lämpö ja radioaallot. Sen aal-
lonpituus vaihtelee 10^{-6} - 10^{-12} m:n välillä [7].

Röntgensäteily syntyy lasikuorisessa röntgenputkessa (kuva 1), jonka sisällä on tyhjiö.



Kuva 1. Röntgenputken rakenne [1].

Tärkeimmät putken osat ovat katodi ja anodi, joiden välissä on suuri jännite-ero. Katodi lähettää elektronisuihkun anodissa sijaitsevaan kohtioon, ja jännite-eron ansiosta elektronit irtoavat katodin hehkulangasta ja kiihtyvät. Kohtion materiaalina käytetään volframia sen korkean sulamispisteen vuoksi (3 422 °C), koska törmätessään kohtioon elektronit vapauttavat energiaa, josta suurin osa on lämpöä ja vain pieni osa ionisoivaa säteilyä. [7.]

Röntgensäteilyn hyvä puoli on sen ohjattavuus, sillä säteileminen loppuu, kun röntgenputken virta katkaistaan. Tämä on tärkeä ominaisuus paikoissa, joissa liikkuu paljon ihmisiä ja tilaa on vaikea pitää tyhjänä kokonaan. Tällaisia paikkoja ovat voimalaitokset, telakat, rakennustyömaat ja muut teollisuuden alat, jotka vaativat ihmisten läsnäoloa.

2.2 Gammasäteily

Gammasäteilyn (γ -säteilyn) löysi ranskalainen tutkija Paul Ulrich Villard viisi vuotta röntgensäteilyn havaitsemisen jälkeen. Tutkiessaan radiumin lähettämiä katodisäteitä Villard huomasi lasinegatiiveille muodostuneita heikkoja viivoja beetasäteilyn ulottumattomalla etäisyydellä, ja siitä hän päätteli säteilyn olevan jotain muuta kuin hiukkassäteilyä. [9.]

Gammasäteily syntyy radioaktiivisen aineen atomiydinten hajoamisesta. Tämä säteily on sähkömagneettista aaltoliikettä, jonka aallonpituus on lyhyempi kuin röntgensäteilyn, ja täten sen energia on korkeampi. Tämä tarkoittaa, että gammasäteily tunkeutuu aineeseen syvemmälle kuin röntgensäteily. [16.] Sen ansiosta gammasäteilyä käytetään, kun kuvattava materiaali on oikein paksu eikä röntgensäteilyn voimakkuus riitä. Suomessa on vain muutama paikka, jossa käytetään tätä menetelmää. Yleisimmin käytettyjä ovat suurenergiasäteilylähteet, kuten Ir-192, Cs-137 ja Co-60, mutta myös sekä matala- että suurenergioita omaava Tm-170 ja matalaenergialähde Yb-169 ovat käytössä. [7.] Näiden säteilylähteiden haittapuolena röntgensäteilyyn nähden voi pitää niiden jatkuvaa säteilyenergiaa, koska sitä ei voi säädellä [18].

2.3 Kuvaaminen filmitekniikalla (RT)

Filmiradiografian ensimmäinen standardi ilmestyi 1970-luvulla, jonka jälkeen siitä julkaistiin useita muutettuja ja täydennettyjä painoksia. Menetelmä on hyvin tunnettu sekä yleisesti hyväksytty, ja siksi sitä laajasti käytetään teollisuuden eri aloilla, joilla on tarvetta

tutkia aineen mahdollisia sisäisiä muutoksia tai epäjatkuvuuskohtia. Käyttökohteita löytyy muun muassa öljytuotannosta, laivan- ja lentokonerakentamisesta, ampumatarvikkeiden tarkastuksesta ja rakennustekniikasta [2].

2.3.1 Laitteet

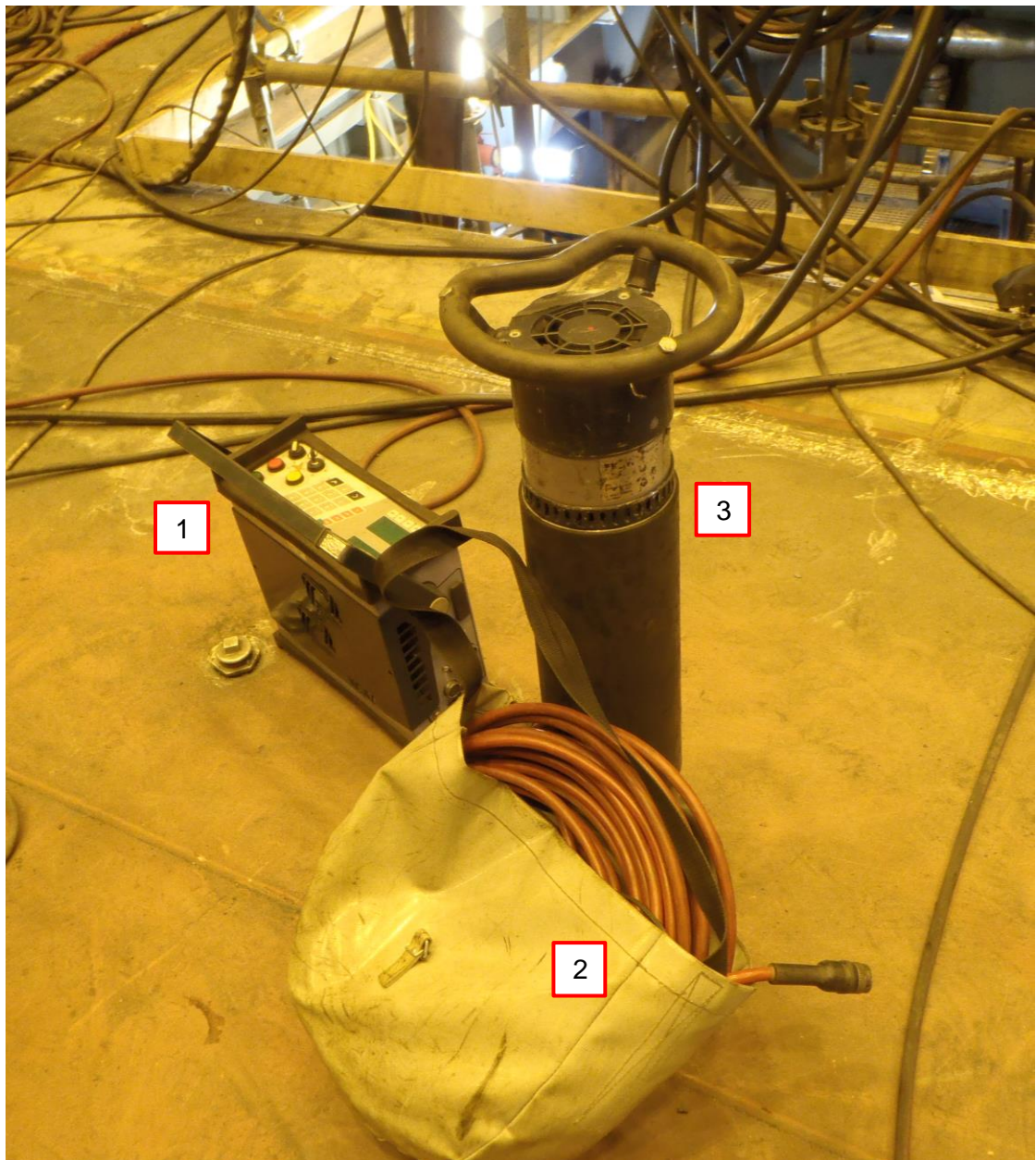
Radiografista tarkastusta voi suorittaa puolialto-, suurtaajuus- ja tasajänniteröntgenlaitteilla. Tarkastuskohteen ominaisuuksista riippuen valitaan se laitekokonaisuus, joka sopii kuvaamiseen parhaiten.

Suurtaajuusröntgenlaite on ulkoiselta rakenteeltaan puolialtoröntgenlaitteen kaltainen, mutta sen ohjauspöydän ja röntgenputken painot ovat noin puolet puolialtoröntgenlaitteiden painosta. Sen vuoksi suurtaajuusröntgenlaitteet sopivat hyvin ahtaisiin paikkoihin.

Tasajänniteröntgenlaitteiden säteily on läpäisykykyisempää kuin puolialtoröntgenlaitteissa, ja täten ne voivat painaa jopa 200 kg. Jäähdytyskoneisto vaatii enemmän tilaa ja tuo samalla lisää painoa. Näitä laitteita ei kuitenkaan tarvitse kantaa käsin, vaan ne kuljetetaan omassa telineessään.

Röntgenputkien painot vaihtelevat paljon niiden tehosta riippuen. Mitä tehokkaampi putki, sitä enemmän se painaa. Puolialtoröntgenputken paino vaihtelee 15 - 35 kg, mutta uusimmat putket voivat painaa vain 17 kg ja silti olla hyvin korkeatehoisia. [7.]

Helsingin telakalla käytetään puolialtoröntgenputkea sen pienen painon ja hyvän liikuteltavuuden ansiosta. Laitekokonaisuuteen (kuva 2) kuuluu: ohjauspöytä, josta käynnistetään valotus, sekä säädetään putken jännitevoimakkuus ja virta-arvo; ohjauspöydän virtakaapeli; ohjauskaapeli, joka kytketään ohjauspöytään ja röntgenputkeen; röntgenputki.



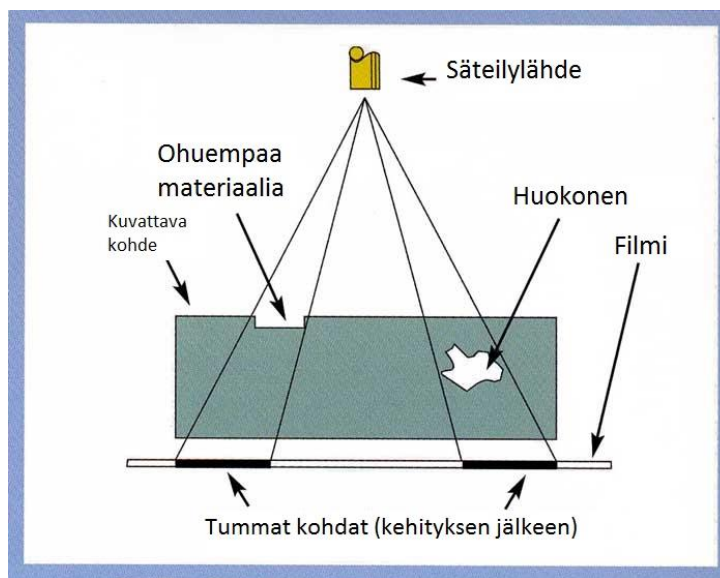
Kuva 2. 1 – Ohjauspöytä, 2 – ohjaukkaapeli, 3 – röntgenputki.

Puoliaaltoröntgenputki painaa noin 30 kg sisäänrakennetun muuntajan takia. Ilman röntgenputkea tämä kokonaisuus painaa noin 40 kg.

Perinteisessä radiografiassa kuva tallentuu filmille. Niitä löytyy erikokoisia ja -herkkyysisiä, jolloin valinta riippuu tarkastustasosta (A tai B). Nykyaikaiset filmit on pakattu tiiviiseen suojapaperiin, joka ei läpäise valoa ja vettä. Sen lisäksi suojapaperi sisältää vahvistuslevyjä, jotka suojaavat filmiä kuvauksen aikana takaa tulevalta hajasäteilyltä. Filmiä voi taittaa ja joitakin filmityyppejä voi myös leikata sopivaksi, mikä helpottaa putkistojen ja ahtaiden paikkojen kuvausta.

Tarkastustason valinta riippuu tarkastettavasta kohdasta. Vaativien paikkojen, kuten painesäiliöiden, tai pienten osien kuvauksessa käytetään tarkempaa tarkastustasoa B ja hienorakeista filmiä, jonka luokka voi olla GI tai GII. Yleinen tarkastustaso on A, ja silloin on valittava GIII tai sitä hienorakeisempaa filmiä. Rakeisuus näkyy kuvassa eräänlaisena kohinana. [18.]

Valotuksen ajaksi filmi sijoitetaan toiselle puolelle tarkastettavaa kohdetta (kuva 3). Sitteen filmi kehitetään koneessa, mikä kestää noin 8 minuuttia. Kehityksen jälkeen filmi on valmis luokiteltavaksi ja arvioitavaksi. [7.]



Kuva 3. Filmin ja säteilylähteen sijoitus [14].

Valmiissa filmissä ohut materiaali näkyy tummana ja paksumpi vaaleana. Tummempi väri johtuu siitä, että ohuempi kohta saa enemmän säteilyä.

Kehitetyt filmit katsotaan erillisillä katselulaitteilla, joiden valomäärää voi säätää. Filmin on täytettävä kuvalaadun vaatimukset, jotka löytyvät standardista SFS-EN ISO 19232-1/2 [23] ja kuvatarkkuuden vähimmäisvaatimukset, jotka ovat esitetty standardissa SFS-EN ISO 17636-1 [20].

2.3.2 Tarkastuksen suoritusjärjestys

RT-kuvaukset suoritetaan yleensä varhain aamulla. Tarkastajat tulevat paikalle noin kolme tuntia ennen päivävuoron alkua, koska silloin laivalla ei ole vielä työntekijöitä.

Kuvauksen suoritusjärjestys riippuu tarkastajasta, mutta se voisi olla seuraava:

1. Tutustutaan kuvauskohtaan ja piirustuksiin sekä puhdistetaan tarkastuspinta.
2. Tarkistetaan kuvattavan materiaalin aineenpaksuus säteilyn suunnasta.
3. Käynnistetään röntgenputken esilämmitys. Sen voi aloittaa myös aikaisemmin.
4. Sijoitetaan säteilylähde.
5. Asetetaan indikaattorit ja lyijytunnukset paikoilleen.
6. Asetetaan sopiva filmi.
7. Suojataan kohde hajasäteilyltä ja reunakuvauksessa rajataan kappaleen reuna.
8. Valitaan kuvausjännite ja valotusaika.
9. Valotus.
10. Kehitetään filmi ja tarkistetaan valotusarvot. Tarvittaessa kuvaus toistetaan.
11. Luokitellaan kuva.
12. Kuvauksesta laaditaan pöytäkirja. [18.]

Kuvauskokeissa noudatettiin suurin piirtein samaa järjestystä.

2.4 Kuvaaminen digitaalisella radiografialla (DR)

Digitaalinen radiografia perustuu kuvaustekniikkaan, jolla saadaan harmaasävykuva suoraan tietokoneen näytölle. Tämän mahdollistaa DDA-paneeli, jota DR-menetelmässä käytetään filmin sijaan. Tällöin kuva pystytään analysoimaan ja luokittelemaan heti valotuksen jälkeen.

2.4.1 Laitteet ja ohjelmisto

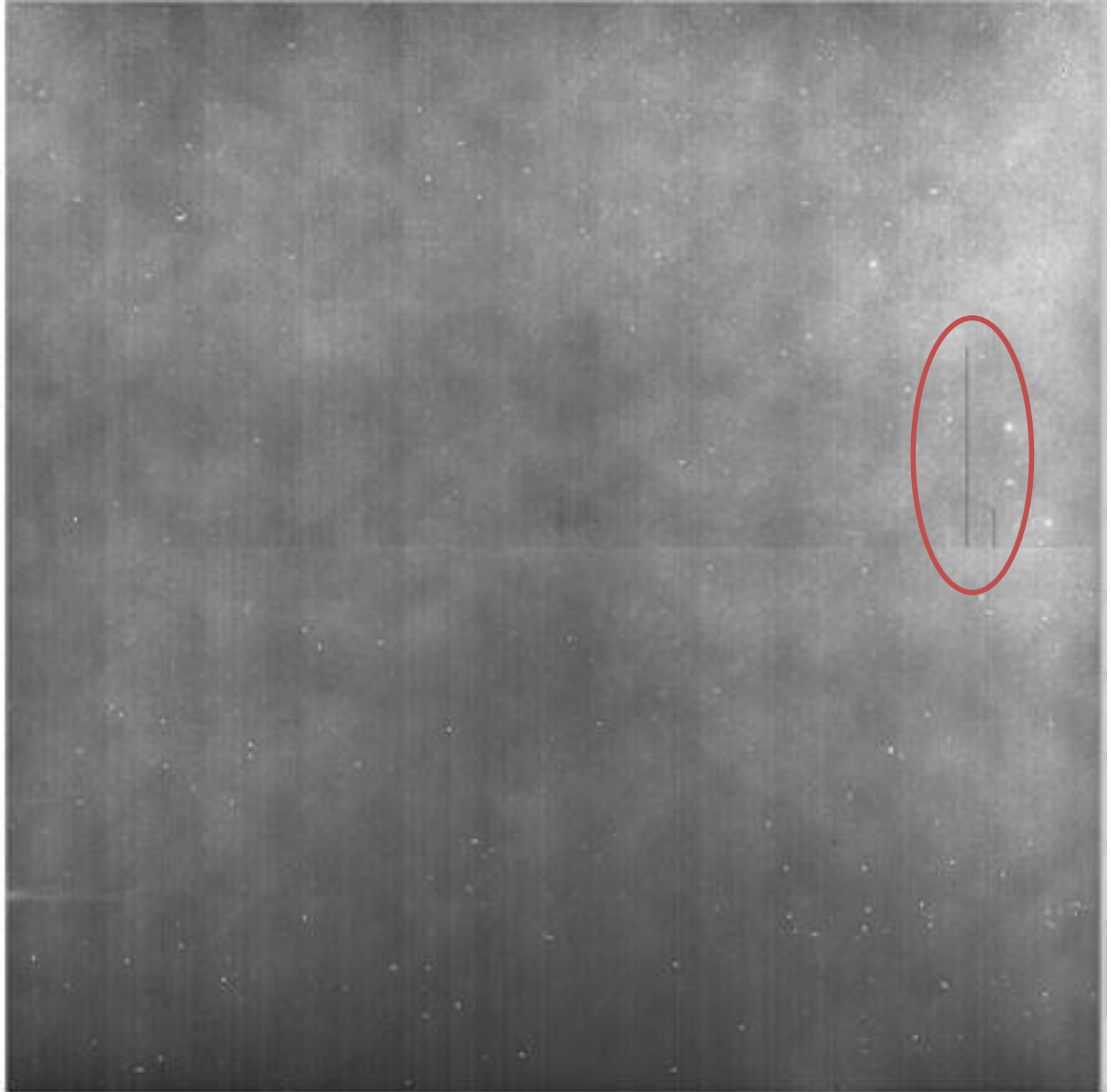
Vidisco on yksi digitaalisen radiografian laitteiden valmistajista. Kuvauskokeissa käytettiin sen tarjoamaa BlazeXPro-kuvauspakkausta. Siihen kuuluu: DDA-paneeli, ohjaus- ja virtakaapelit, kannettava tietokone ohjelmiseen sekä pulssiröntgenlaite (kuvauskokeissa säteilylähteenä käytettiin röntgenputkea) [4].

DDA-paneeleja löytyy eri kokoja. Kuvauskokeissa käytettävän paneelin kuva-alue oli 260 x 320 mm ja fyysinen koko 403,5 x 422 x 22 mm. Tämän paneelin harmaasävyjen määrä on 16 384, mikä tekee kuvasta hyvin informatiivisen. [4.]

Paneeli toimii sekä langallisella että langattomalla yhteydellä. Kuvauskokeissa käytettiin langallista, koska muuten vahvan yhteyden muodostaminen olisi hankalaa ja kuvaaminen kestäisi pidempään, se johtaisi myös pidempään valotusaikaan.

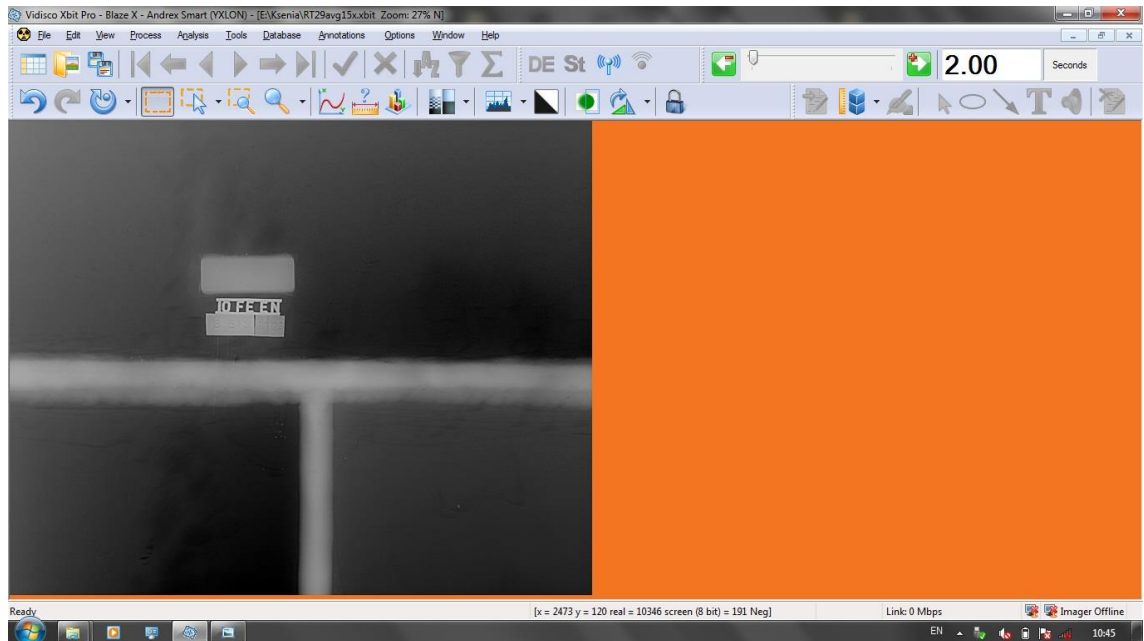
Valmistajan paneeleja voi vaihtaa keskenään. Esimerkiksi BlazeXPron sijaan voi kytkeä muunkokoisen mallin, kuten FlashXPron (342 x 432 mm), RayzorXPron (222 x 222 mm) tai BoltXPron (145 x 114 mm). [5.] Siinä tapauksessa ohjelma voi vaatia lisäsäätöä, koska paneelien asetukset jossain määrin poikkeavat toisistaan.

Ennen varsinaista kuvausta on säädettävä Vidiscon tarjoaman XbitPro-ohjelman asetukset ja kalibroitava DDA-paneeli. Kalibrointi tapahtuu kytkemällä paneeli tietokoneeseen, minkä jälkeen ohjelmassa käynnistetään kuvaus ilman valotusta. Kalibroinnilla varmistetaan paneelin kunto, esimerkiksi kuolleiden pikseleiden tai edellisestä kuvauksesta jääneiden vaikutusten varalta (ns. Burn in -ilmiö) [13.] Säteilemätön ja kalibroimaton kuva on harmaa (kuva 4), ja siinä saattaa näkyä edellisessä valotuksessa olleen esineen haamukuva tai muita vikoja. [3.]



Kuva 4. Säteilemätön ja kalibroimaton kuva, jossa näkyy kuolleita pikseleitä [3].

Valituksen jälkeen kuvat luokitellaan XbitPro-ohjelmassa. Ohjelman käyttöliittymä on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Vidisco XbitPro -ohjelman ikkuna.

NDT-tarkastaja voi käyttää kuvien luokitteluun laajan spektrin toimintoja, mutta yleisimmät toiminnot ovat SNR-arvon määrittely ja harmaasävyjen säätäminen. Terävöintiä ja kolmiulotteisuutta voi lisätä myöhemmin ja saada tällöin vikoja paremmin näkyviin. [15.]

Seuraavassa luetellaan ne arvot, jotka kuvasta on määritettävä sekä esitetään tärkeimpiä toimintoja, joilla kuva-arvoja voidaan säädellä.

Arvo

Selitys

Harmaasävyjen säätö

Tällä toiminnolla saadaan paremmin näkyviin kuvan yksityiskohtia. Esimerkiksi tumma kuva muutetaan vaaleammaksi ja tällöin tummissa kohdissa olevat virheet tulevat paremmin näkyviin. Kuvan alkuperäinen data ei tässä tapauksessa häviä, mutta kuvan erotuskyky paranee. Filmimenetelmässä tämä arvo vastaa mustumaa, ja säätö tapahtuu lisäämällä katselulaitteen kirkkautta.

Kuvatarkkuus	Kuvasta määritetään kuvatarkkuus näkyvien indikaattorilankojen määrän perusteella. Standardista SFS-EN ISO 17636-2 löytyy vaatimukset pienimmälle näkyvälle indikaattorilangalle [17].
SNR-arvo	Signaali-kohinasuhde määrittää periaatteessa koko kuvan laadun. Kuva on kohinainen, jos SNR-arvo on matala. Kuva on sitä tarkempi, mitä korkeampi SNR-arvo on. Kuvassa 6 on esitetty SNR-arvon vaikutus laatuun.



Kuva 6. Vasemmalla SNR-arvo 4, oikealla SNR-arvo 20 [3].

Toiminto	Selitys
Automatic Stitching	Toiminto yhdistää kahden kuvan reunat pikselin tarkkuudella. Tätä käytetään, kun tarkastusalue on pidempi kuin paneelin koko.
Manual averaging	Tällä toiminnolla valituksen aikana otetaan samasta kohdasta monta kuvaa peräkkäin. Lopussa ohjelma yhdistää ne ja kehittää yhden hyvin tarkan kuvan. [13.]

Terävöinti Tarkennustoiminnolla saa joko koko kuvan tarkemmaksi tai vain tarkastettavan osan kuvasta. Tarkennus lisää kuvaan kohinaa ja täten alentaa SNR-arvoa. [10.]

2.4.2 Kuvauksen suoritusjärjestys

Kuvauksen esivalmistelut ovat vastaavat kuin perinteissä menetelmässä, paitsi että röntgenputken lämmitessä toinen tarkastajista voi kalibroida paneelin, säätää ohjelman asetuksia ja saada kuvauspaikan kuntoon.

Ohjelman asetuksiin syötetään yhden valotuksen aikana otettavien kuvien määrä. Säteilijännite, virta ja valotuksen aika syötetään ohjauspöytään. Kun alue on rajattu ja kuvauspaikka valmis, säteilylähde ja kuvauspaneeli asetetaan eri puolille tarkastuskohdetta. Tämän jälkeen käynnistetään samaan aikaan sekä valotus että kuvausohjelma. Valotus lopetetaan, kun ohjelma on ottanut tarvittavan määrän kuvia. Kuvan kehitettyä tarkastaja analysoi siitä SNR-arvon, laskee näkyvien indikaattorilankojen määrän, säätää harmaasävyjä ja tarkistaa, että kuva on läpäissyt standardin vaatimukset.

Mikäli kuvasta tuli epätarkka tai muusta syystä se ei läpäissyt standardin vaatimuksia, arvioidaan mikä arvo olisi voinut siihen vaikuttaa, minkä jälkeen tehdään ohjelmaan tai säteilyarvoihin tarvittavat muutokset ja otetaan uusi kuva.

Kuvat tallentuvat xbit-muodossa, mutta niitä voi ohjelman avulla tallentaa esimerkiksi jpeg-muotoon.

3 Kuvauskokeet

3.1 Aikaisemmat tutkimukset

DR-tekniikka on kehittynyt jo pitkälle, joten vastaavista menetelmän soveltuvuustesteistä löytyy paljon tietoa. Telakan kuvauskokeisiin valmistauduttiin osittain nojautuen verkosta löytyviin raportteihin ja radiografian asiantuntijoiden antamiin neuvoihin. Seuraavassa on lyhyt katsaus löydetyistä raporteista.

Kuten on kerrottu aiemmin, digitaalista radiografiaa käytetään öljyntuotannossa. Sitä on testattu mm. öljyputkien valmistusvaiheen tarkastuksessa. Testaajat kuvasivat putkia, joiden paksuuserot vaihtelivat 4,85 - 32,30 mm. Tulokset osoittavat, että kaikilla paksuuksilla on pystytty saavuttamaan standardin kuvanlaatuvaatimukset lyhyemmällä valotusajalla verrattuna perinteiseen radiografiaan. [11.]

Toisessa tutkimuksessa arvioitiin DR:n soveltuvuutta öljynjalostamon kenttäkäyttöön. Testaukset suoritettiin ensin laboratorioissa ja sitten kenttäolosuhteissa. Käytössä oli Vidiscon valmistama kuvauspakkaus ja Ir-192-säteilylähde. Testaajat pystyivät saamaan 33 kuvaa eri paikoista kolmessa tunnissa. Tutkimuksen loputtua todettiin, että testeihin oli käytetty paljon vähemmän aikaa, kuin oli etukäteen ajateltu. Digitaalisen radiografian myönteisenä puolena pidettiin lyhyempää valotusaikaa, ja sitä, ettei laitosta tarvitse ajaa alas testien ajaksi. Pienentyneen valotusajan vuoksi NDT-tarkastajat altistuivat säteilylle vähemmän. Tutkimuksen johtopäätökset kuvaavat menetelmän soveltuvan hyvin öljynjalostamon olosuhteisiin. [12.]

3.2 Käyttökohteet telakalla

AHS:lla radiografista kuvausta käytetään laivan lohko- ja runkovaiheissa, sekä varustelumateriaalin laadunvarmistuksessa (esim. putket ja putkiliitokset). NDT-suunnitelman mukaan RT-kuvaukset tehdään päittäisliitoksista lohkorajoilla.

Radiografinen kuvaus suoritetaan standardin SFS-EN ISO 17636-1 mukaan [20.] Jokaisen laivan NDT-suunnitelmassa on määritetty yleisimpien NDT-menetelmien tarkastuspisteiden vähimmäismäärä. Niiden sijainnit ovat merkitty piirustuksiin. Ultraäänitarkastuksen ja radiografisen kuvauksen tarkastuspisteiden vähimmäismäärä lasketaan RMRS:n sääntöjen mukaan (kaava 1):

$$n = \frac{L(B+D)}{45 \cdot 1,2} \quad (1)$$

Jossa:

n - tarkastuspisteiden lukumäärä

L - laivan pituus, m

B - laivan leveys, m

D - korkeus pääkanteen, m

Pisteiden vähimmäismäärä kuvattavalla laivalla on 80. Ultraäänitarkastus korvataan radiografisella kuvauksella, kun levyn paksuus on pienempi kuin 8 mm. [24.]

Kuvaukset suoritetaan sitä mukaa kun kuvauspaikkojen saumat on hitsattu. Mikäli hitsistä löytyy hyväksymisrajan ylittävä vika, tehdään sakkokuvaus. Paikasta otetaan uusi kuva, kun hitsivirhe on korjattu.

Radiografiaa käytetään myös laboratorioissa, jossa kuvataan hitsaajien pätevointiteissä valmistettuja kappaleita. Laboratorio on varustettu ohjaustilalla, josta valotus käynnistetään, sekä lyijyseinämällä eristetyllä kuvaushuoneella. Huoneen seinämät estävät tehokkaasti säteilyn pääsemistä tilan ulkopuolelle, joten oleskelu ohjaustilassa on turvallista.

3.3 Kuvaussuunnitelma

Kuvauskokeita suunniteltaessa oli tarkoituksena valita toisistaan eroavia kuvauspaikkoja. Valintaan vaikuttivat seuraavat tekijät:

- paikkojen rakenne-erot
- kuvaustarve
- aineen paksuus

- sijainti
- luoksepäästettävyyden laitteineen
- kuvauskokeiden määrä.

Alussa päätettiin valottaa neljä kohtaa. Yksi kohta pääkannen alueelta, toinen jäykkääjien hitsausliitoksesta, kolmas ahtaasta tilasta tanktopissa ja neljäs profiilihitsauksesta. Käytyä laivalla yhden tarkastajan kanssa, todettiin, että kuvaus laidoituksesta ei onnistu, sillä laiva oli jo laskettu vesille ja viety lähelle laituria, joten etäisyyttä kuvauspisteelle ei riittäisi. Sen tilalle hitsauspajalta tilattiin koekappale, jonka paksuusero hitsauskohdassa oli 6 mm.

Myös tanktopissa sijaitseva paikka oli todellisuudessa niin ahdas ja monimutkainen järjestää kuvaus, että tästä ajatuksesta luovuttiin. Laivalta valittiin helpompi kohta, josta virallisen suunnitelman mukaan piti tehdä uusintakuvia perinteisellä radiografialla. Tällöin olisi mahdollisuus verrata RT- ja DR-menetelmiä keskenään.

Puhelinkeskustelussa DR-kuvaajan kanssa oli sovittu, että otetaan kaksi kuvaa laivasta ja sen jälkeen siirrytään laboratorioon valottamaan hitsatut koepalat.

Valittujen kuvauspaikkojen tunnistenumerot ovat RT29 ja RT33. Niiden tarkka sijainti löytyy liitteestä 1.

3.4 Kuvauskokeiden suorittaminen

3.4.1 Kuvaukset laivalla

Tarkastukseen osallistui kaksi tarkastajaa. Alussa yksi oli valvomassa röntgenputken lämmitystä, joka kesti noin puoli tuntia, ja toinen kytki kaapeleita ja asetti DR-laitteiston käyttökuntoon. Laittekokonaisuus pakattuna näkyy kuvassa 7. Kuljetuslaukku on suurrehko tuotantoympäristöön, mutta jos kuvauksia suoritetaan usein, siitä voi tehdä kenttäpakkauksen, joka on mukavampi kuljettaa paikasta toiseen.



Kuva 7. DR-laitteet pakattuna kuljetuslaukkuun.

Kuvaukset aloitettiin noin kello 5.50. Kuvattavan alueen valvoi yksi tarkastaja, koska laivalle pääsi vain yhtä kulkua pitkin.

Ennen varsinaista kuvausta piti kalibroida DR-laitteisto. Yleensä kalibrointi onnistuu nopeasti, mutta tässä tapauksessa siihen meni noin 15 minuuttia siitä syystä, että tietokone ei saanut yhteyttä paneeliin. Seuraavissa kuvauksissa kalibrointiin ja ohjelman asetusten säätämiseen kului alle 5 minuuttia.

Kun laitteiston asetukset oli säädetty, lämmitetty röntgenputki asetettiin pääkannessa olevan kuvattavan kohdan alle (kuva 8). Lankaindikaattori ja kuvatunnukset kiinnitettiin säteilylähteen puolelle (merkitty keltaisella kehyksellä).



Kuva 8. Piste RT29 kuvaus.

DDA-paneeli laitettiin sauman päälle (kuva 9).



Kuva 9. DDA-paneeli pisteen RT29 päällä.

Pisteen valotusajaksi valittiin 9 minuuttia, joiden aikana ohjelma otti peräkkäin 15 kuvaa.

Pisteen RT29 kuvauksen jälkeen kaapelit ja röntgenputki siirrettiin kuvaamaan RT33 pistettä. Sitä kuvattiin sekä perinteisellä radiografialla että digitaalisella.

Kello 6.30 lohkolle saapui ensimmäisiä työntekijöitä ja tarkastus oli lopetettava. Laitteet siirrettiin laboratorioon ja pisteen RT33 filmi vietiin kehitettäväksi.

3.4.2 Koepalojen tarkastus laboratoriossa

Laboratoriokuvaukset aloitettiin koepalasta, joka oli tilattu edellisenä iltana. Koepala asetettiin DDA-paneelin päälle ja röntgenputken aukko osoitettiin kohti kuvattavaa kohdetta. Lankaindikaattori ja kuvatunnukset laitettiin koepalan päälle (kuva 10). Ohjelman ase-

tuksia säädettiin sopiviksi ja paneeli kalibroitiin. DDA-paneelin elektroniikka suojattiin lyijypalalla, koska se on herkkä toistuvalla säteilyllä ja laboratorio-olosuhteissa osui suoraan säteilykeilan alueelle. Kaikkien järjestelyjen jälkeen kuvaustilan lyijyovi suljettiin ja aloitettiin valotus.



Kuva 10. Kuvaus laboratoriossa. Paneeli ja koekappale ympäröity keltaisella.

Levystä tehtiin kaksi kuvaa: yksi valottamalla yhden kerran ja toinen 12 kertaa käyttämällä Manual Averaging -toimintoa.

Seuraavaksi valottiin 16 mm:n paksuista levyä, josta otettiin myös 2 kuvaa sekä yksi filmikuva. Ensimmäinen kuva tehtiin yhdellä valotuksella ja toinen ottamalla 8 kuvaa valotuksen aikana. Filmi, joka saatiin tästä levystä, meni pilalle kehityskoneessa. Sen mustuma-arvo oli liian korkea, jotta sitä olisi voitu tarkastella. Uutta kuvaa tästä levystä ei ollut tehty.

Ellipsikuvausta kokeiltiin myös, mutta kuva ei läpäissyt standardin vaatimuksia, eikä asetusten säätöön ollut järkevää käyttää enempää aikaa.

Kuvausten jälkeen siirryttiin toimistoon tutustumaan kuviin ja kehitettyihin filmeihin tarkemmin.

4 Kuvauskokeiden tulokset

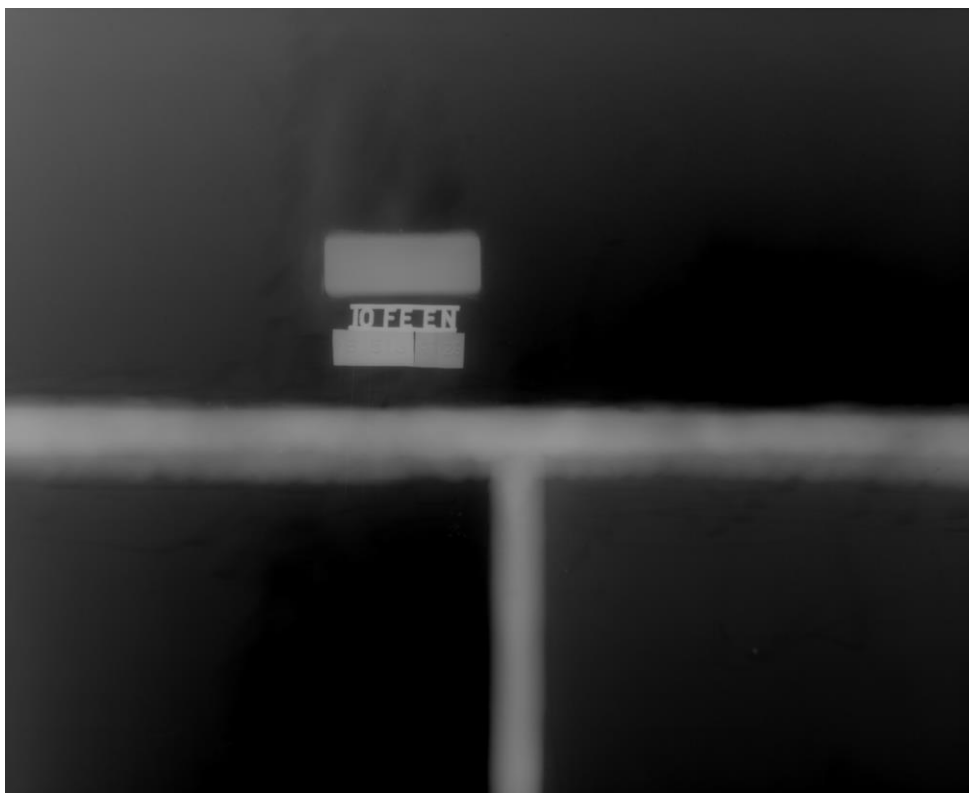
Kuvauskokeita varten oli luotu lomake, johon merkittiin kuvausarvot ja kuvausvaiheisiin kulunut aika. Kerätyt tiedot löytyvät selityksineen jokaisen kuvan kohdalta. Jokaisella kuvauskokeella on myös oma numeronsa, joka löytyy kappaleen otsikosta ja röntgenkuvasta.

4.1 RT29

Kuvauspiste sijaitsi pääkannella, joten pääsy oli helppoa. Seuraavassa on samasta kohteesta kaksi kuvaa (kuvat 11 ja 12). Kuvien harmaasävyarvoja on hieman muutettu tulkitsemisen helpottamiseksi. Arvot ovat esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. RT29. DR-kuvauksessa käytetyt arvot.

RT 29	
Aineenpaksuus	12 mm
Säteilyjännite	120 kV
Säteilyvirta	2 mA
Valotusaika / kuvien määrä	9 min / 15 kpl
SNR _N	vaadittu 168 / saavutettu 197



Kuva 11. RT29. Standardinmukainen kuva.



Kuva 12. RT29. Hiomalaitteen jäljet. Ei standardinmukainen kuva.

Kuvatun kohteen yksityiskohdat ovat kuitenkin paremmin näkyvissä säädön jälkeen (kuva 12). Hitsausseaman ympärillä näkyy hiomalaitteen jälkiä.

Tästä pisteestä on myös tehty tarkastuspöytäkirja, joka löytyy liitteestä 2.

4.2 RT33

Kuvauspiste sijaitsee tweendeck-kannella, jonne luoksepäästävyys oli melkein yhtä hyvä kuin edellisessä pisteessä. Tästä tarkastuskohdasta otettiin sekä DR- että RT-kuvia. Digitaalisella radiografialla otettu kuva ei saavuttanut standardin vaatimaa SNR-arvoa, eikä siitä ole tehty uutta kuvaa. Laivalle saapui työntekijöitä ja valotus keskeytettiin turvallisuussyistä.

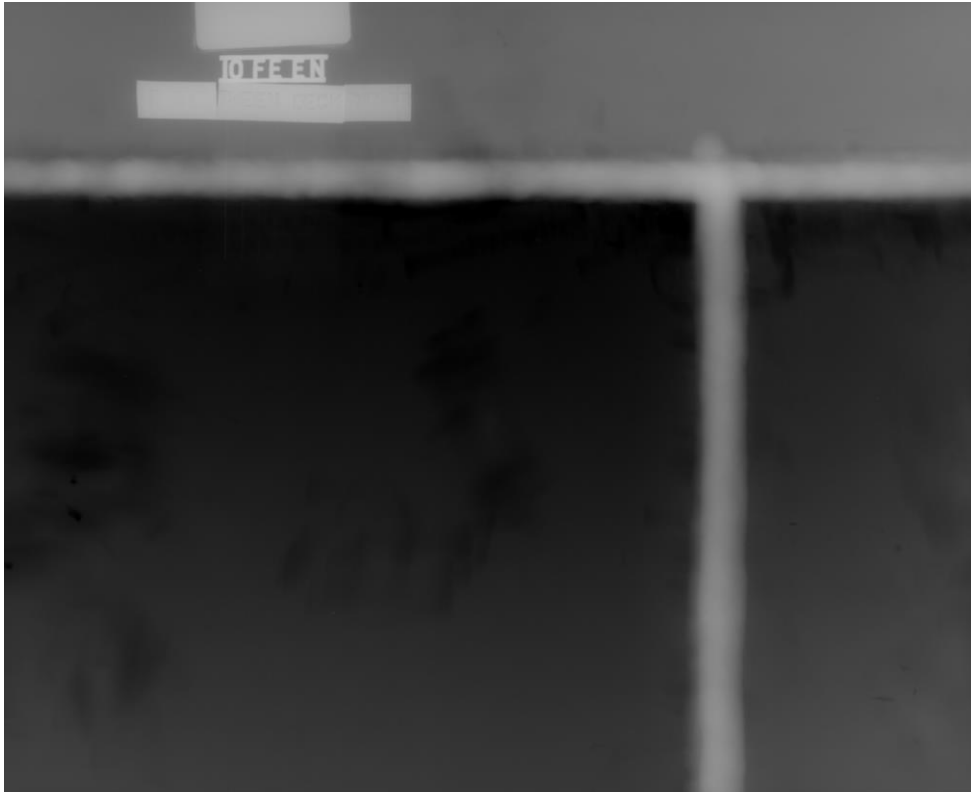
Kuvassa 13 hitsin risteyskohdassa oleva halkeama ei erotu riittävän hyvin. Kun samaan kuvaan lisätään kolmiulotteisuutta, edellä mainittu vika näkyy hyvin tarkasti (kuva 14). Tätä kuvaa ei voi liittää tarkastuspöytäkirjaan, mutta sillä pystyy todentamaan vian olemassaolon.

Kehitetty filmi löytyy telakan arkistosta.

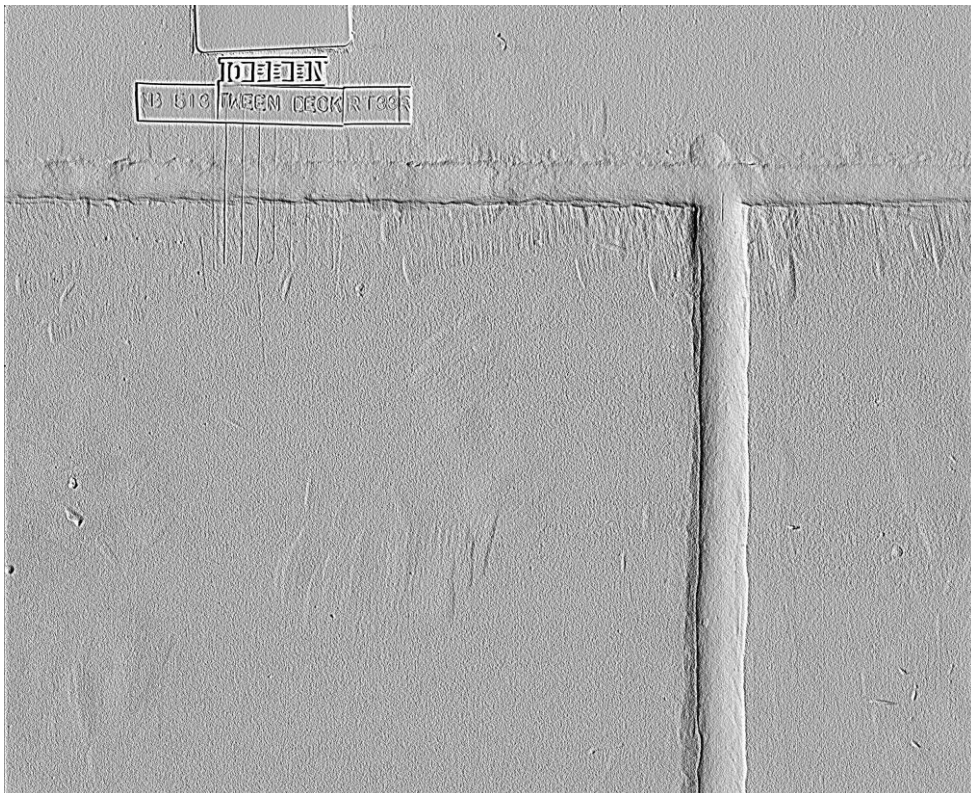
Taulukossa 2 on esitetty molempien menetelmien kuvausarvot.

Taulukko 2. RT33. DR- ja RT -kuvauksissa käytetyt arvot.

RT33		
Menetelmä	DR	RT
Aineenpaksuus	11 ja 9 mm	
Säteilyjännite	110 kV	185 kV
Säteilyvirta	2 mA	4 mA
Valotusaika / kuvien määrä	9 min / 15 kpl	1 min
DDA-paneelin / filmin tyyppi	VIDISCO BlazeXPro	AGFA Structurix Vacupac D5 Pb
DDA-paneelin / filmin koko	260 x 320 mm	100 x 480 mm



Kuva 13. RT33. Ei standardinmukainen DR-kuva.



Kuva 14. RT33. Lisätty kolmiulotteisuutta. Ei standardinmukainen DR-kuva.

4.3 Koe 1

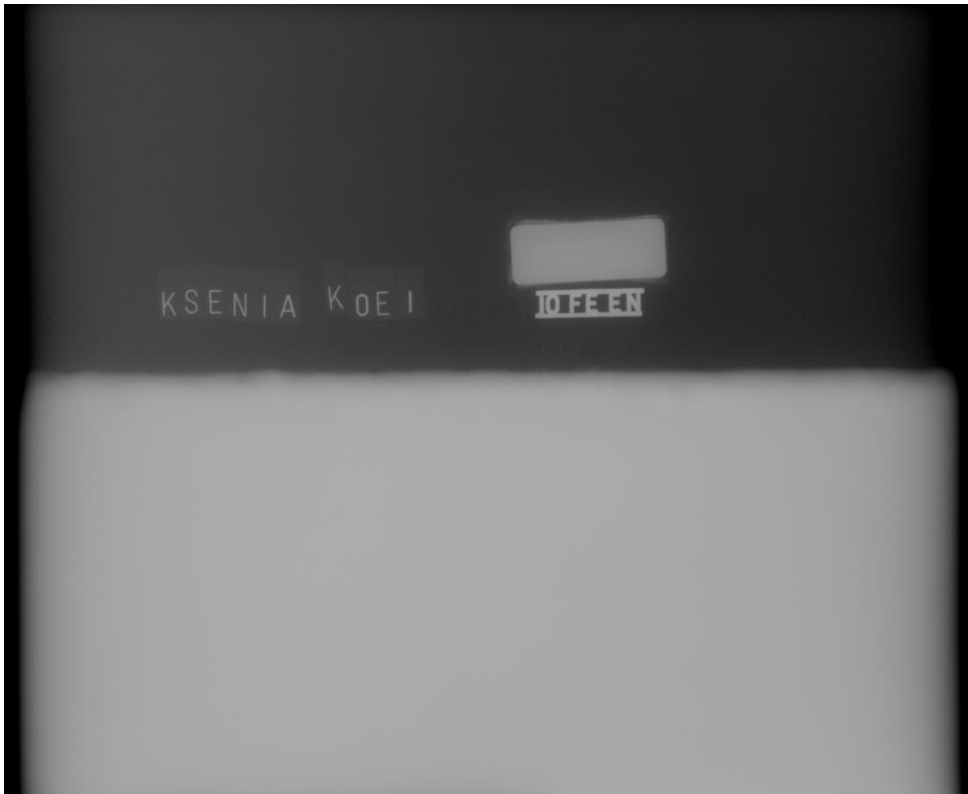
Kuvauksessa käytetty koepala on valmistettu kahdesta eripaksuisesta levystä, joiden paksuusero on 6 mm. Taulukossa 3 ilmoitetaan molempien levyjen paksuudet.

Tämän palan kuvauksen päämäärä oli tarkistaa, kuinka hyvä kuva on mahdollista saada levyjen välisestä hitsausseamasta, kun levyt ovat eri vahvuisia. Kappaleen aineenpaksuus vastaa laivan laidoituksessa käytettävän materiaalin paksuutta, ja paksuusero vastaa joissakin kohdissa laivaa olevaa paksuuseroa. Laivan asemasta johtuen, laidoituksen DR-kuvausta ei ollut mahdollista suorittaa, joten päädyttiin siihen, että koepalan tarkastus olisi helpompi vaihtoehto tässä tapauksessa.

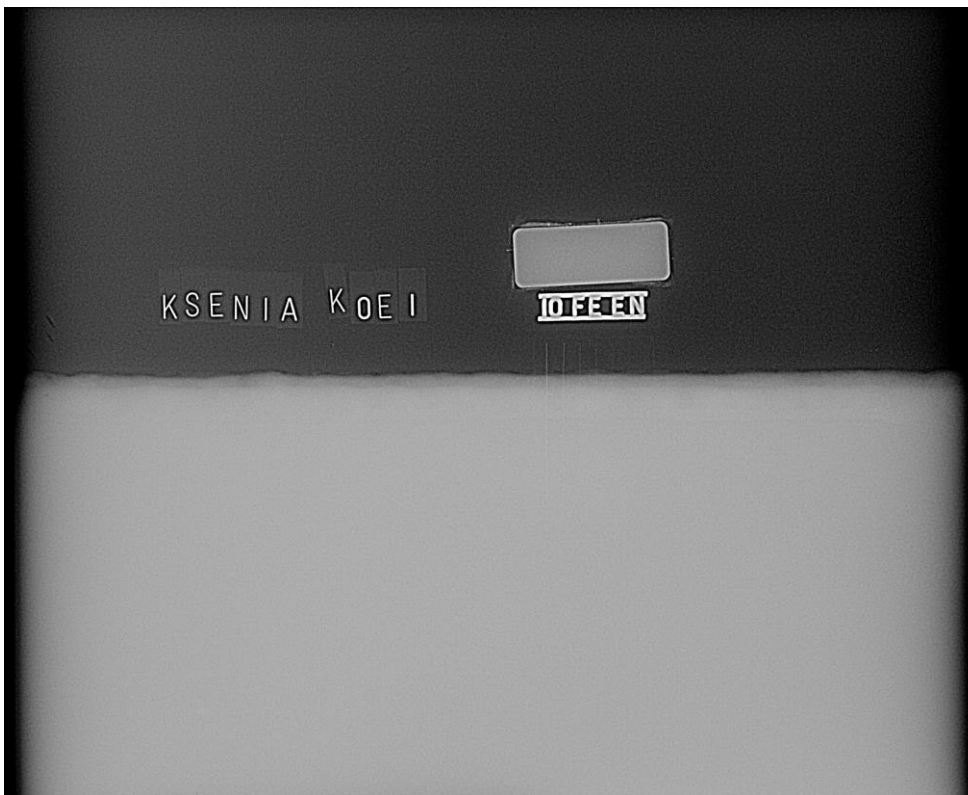
Palasta tehtiin kaksi kuvaa. Ensimmäinen oli luotu Manual averaging -toimintoa käyttäen ja toinen tehtiin vertailuksi ottamalla vain yksi kuva, jolloin sen laatu vastaisi filmiradiografialla tehtyä kuvaa. Ensimmäisen kuvan harmaasävyjä oli säädetty useamman kerran ja saadut tulokset tallennettu jpeg-muodossa (kuvat 15-18). Näissä kuvissa sauman eri kohtia pystytään katsoa tarkemmin.

Taulukko 3. Koe 1. DR-kuvauksessa käytetyt arvot.

Koe 1	
Aineenpaksuus	8 ja 14 mm
Säteilyjännite	110 kV
Säteilyvirta	1 mA
Valotusaika / kuvien määrä	5 min / 12 kpl ja 1 min
SNR _N	405
Lankaindikaattori	W15



Kuva 15. Koe 1. Standardinmukainen DR-kuva.



Kuva 16. Koe 1. A. Harmaasävyjen säädön jälkeen.



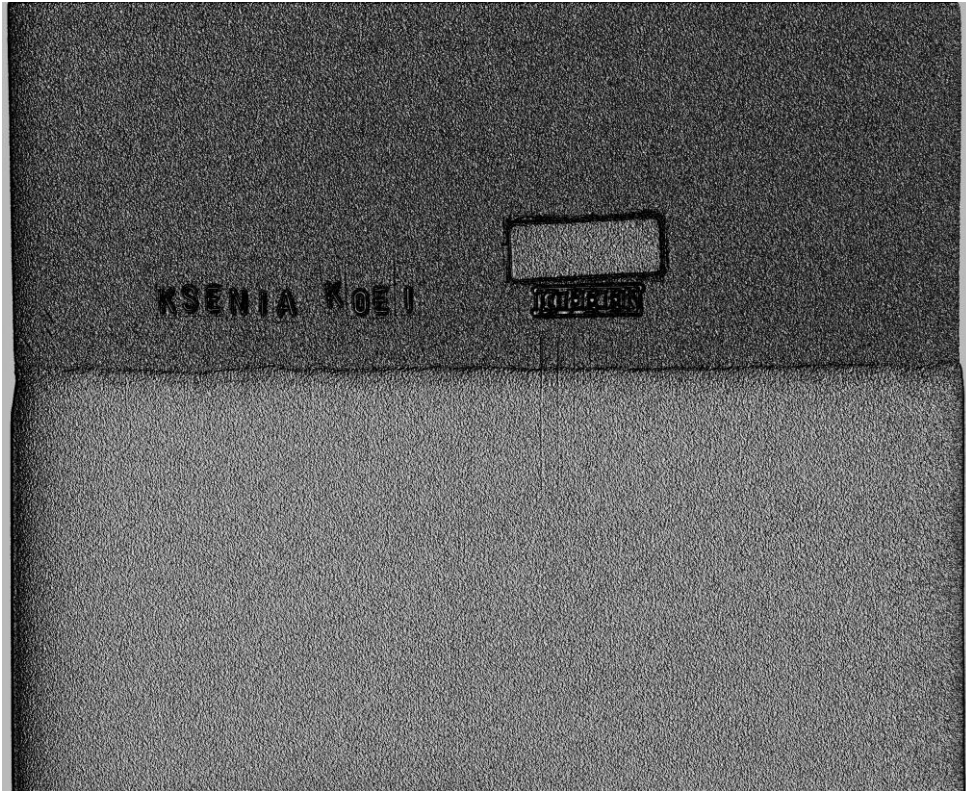
Kuva 17. Koe 1. B. Harmaasävyjen säädön jälkeen.



Kuva 18. Koe 1. C. Harmaasävyjen säädön jälkeen.

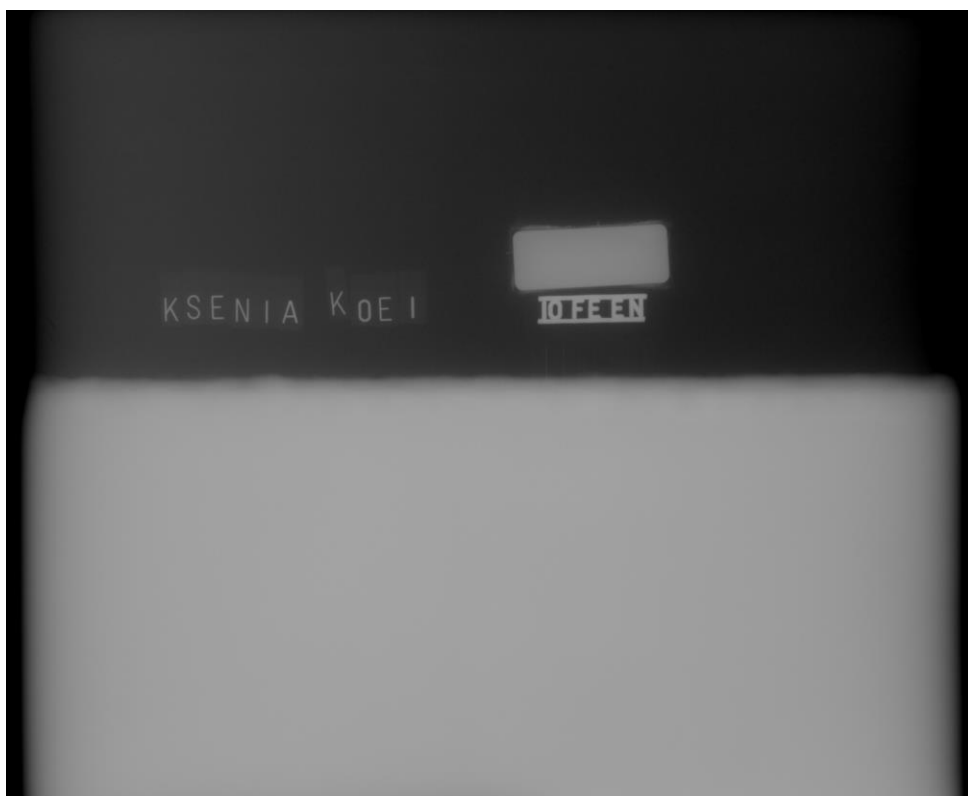
Kuvissa 17 ja 18 hitsaussauma on hyvin näkyvissä. Tarkastajan mukaan 6 mm:n paksuuserosta huolimatta levyä ei tarvinnut kuvata kaksoiskuvamenetelmällä.

Kolmiulotteisuuden lisääminen ei paranna hitsin erottuvuutta, koska siitä puuttuu kupu (kuva 19). Samasta syystä kuvassa 15 hitsiä on vaikea erottaa.



Kuva 19. Koe 1. Kuvaan on lisätty kolmiulotteisuutta. Ei standardinmukainen kuva.

Kuva 20 esittää kuvanlaatua, jos saumaa kuvattaisiin perinteisellä menetelmällä.



Kuva 20. Koe 1. Valotus 1 min digitaalisella menetelmällä.

4.4 Koe 2

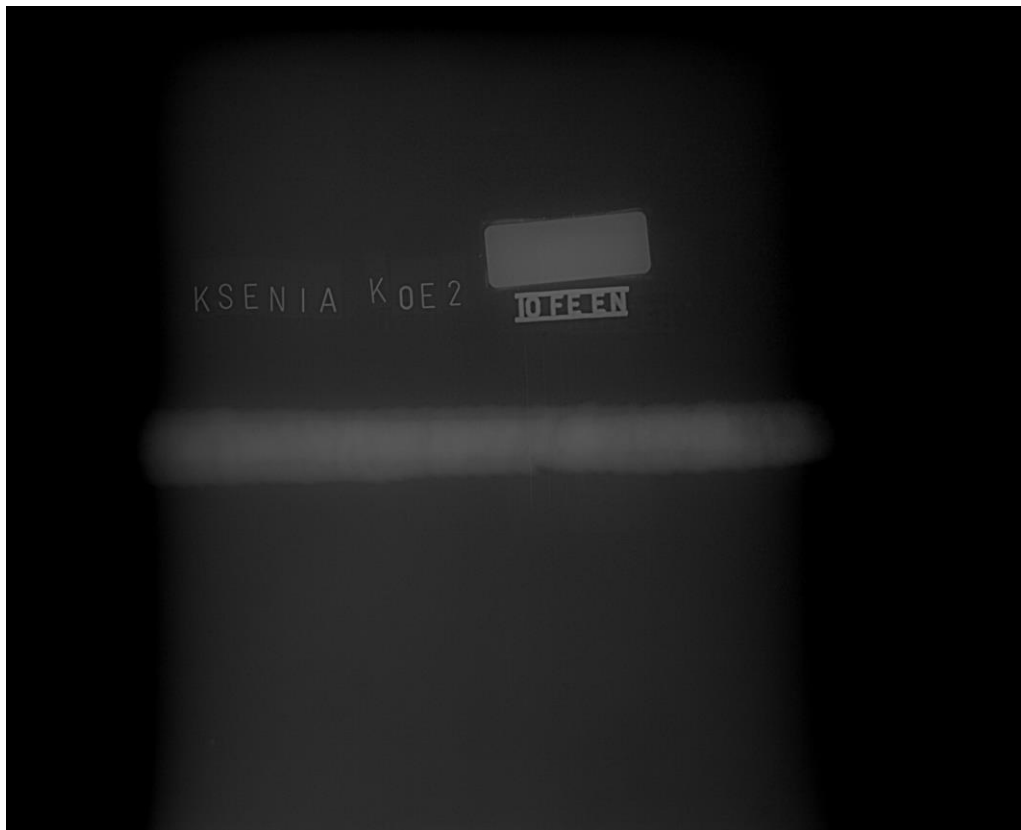
Kokeessa käytettiin tasapaksuisista levyistä hitsattua palaa, josta otettiin kaksi kuvaa digitaalisella radiografialla ja yksi perinteisellä. Kuva 21 on tehty Manual averaging -toimintoa käyttäen ja kuva 22 valottamalla levy minuutin ajan ja ottamalla yksi kuva. Digitaaliset kuvat läpäisivät standardin vaatimukset.

Perinteisellä radiografialla otetun kuvan kehitys epäonnistui filmin juuttuessa koneeseen, eikä tulosta pystytty luokittelemaan edes kirkkaalla katselulaitteella. Tätä voi pitää perinteisen radiografian heikkoutena.

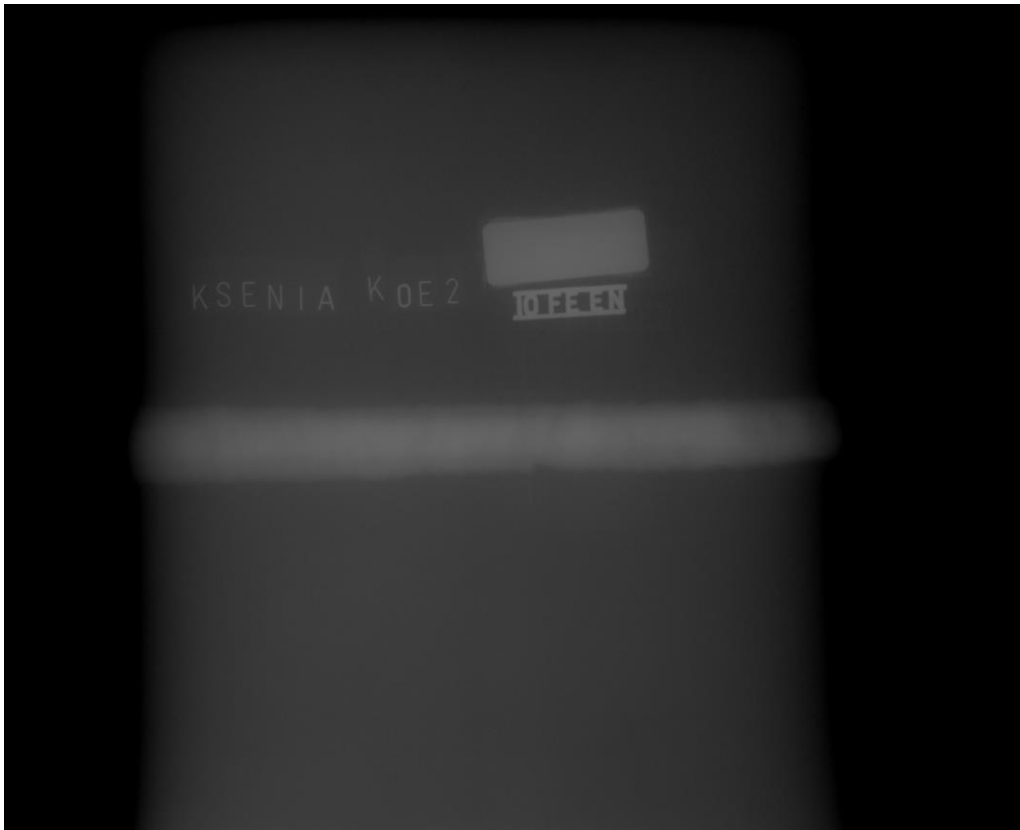
Taulukossa 4 on esitetty kuvauksessa käytetyt säteilyarvot.

Taulukko 4. Koe 2. DR- ja RT-kuvauksissa käytetyt arvot.

Koe 2		
Aineenpaksuus	16 mm	
Menetelmä	DR	RT
Säteilyjännite	110 kV	185 kV
Säteilyvirta	1 mA	2 mA
Valotusaika / kuvien määrä	4 min / 8 kpl ja 1 min	2 min
SNR _N	580	-
Lankaindikaattori	W13	
Paneelin / filmin tyyppi	VIDISCO BlazeXPro	AGFA Structurix Vacupac D5 Pb
Paneelin / filmin koko	260 x 320 mm	100 x 240 mm



Kuva 21. Koe 2. Manual averaging -toiminnolla otettu kuva. 4 min / 8 kuvaa.



Kuva 22. Koe 2. Valotus 1 min / 1 kuva.

Kuvien välinen ero näkyy tarkkuudessa. Pidemmällä valotuksella otettu kuva on tarkempi kuin vähemmän valotettu kuva. Tarkkojen kuvien ottaminen on yksi tärkeimmistä digitaalisen radiografian ominaisuuksista.

4.5 Koe 3

Viimeisen kokeen suorittamisesta päätettiin vasta laboratoriossa. Sieltä löytyi putki, josta tutkimisen kannalta olisi hyvä tehdä ellipsikuvaus. Putkesta otettiin kaksi kuvaa, joista toisen kuvan tarkoitus on esittää laatua, joka yleensä saadaan valottamalla materiaali perinteisellä menetelmällä. Esitetyt kuvat 23 ja 24 eivät kuitenkaan läpäisseet standardin SFS-EN ISO 10675-1 [21] vaatimuksia, koska oli hankala löytää sopivat säteilyarvot hyvin lyhyessä ajassa. Ajan salliessa olisi mahdollista saada standardimukaisen kuvan. Kuvausarvot löytyvät taulukosta 5.

Taulukko 5. Koe 3. Ellipsikuvauksen säteilyarvot.

Koe 3	
Putken seinämäpaksuus	4 mm
Säteilyjännite	90 kV
Säteilyvirta	1 mA
Valotusaika / kuvien määrä	4 min / 8 kpl ja 1 min
SNR _N	ei saavutettu



Kuva 23. Koe 3. Manual averaging -toiminnolla saatu kuva.



Kuva 24. Koe 3. Vertailukuva.

Kuten kuvista 23 ja 24 näkyy, ensimmäinen on tarkempi, vaikkakin tummempi. Lankaindikaattorit ovat melkein näkymättömiä molemmissa kuvissa, joten luokittelu on mahdotonta.

5 Menetelmien vertailu

Tässä osiossa verrataan perinteistä ja digitaalista radiografiaa perustuen kuvauskokeiden tuloksiin ja internetistä saatuihin tietoihin. Lisää tietoa, josta oli paljon hyötyä vertailun tekemisessä, antoi Dekralla toimiva digitaalisen radiografian asiantuntija Petteri Lehto [8].

5.1 Tärkeät asiat telakkakuvauksen kannalta

Kuvan käyttömuoto

Digitaalisella radiografiolla kuvat saadaan alkuperäisessä xbit-muodossa, mutta ohjelman puuttuessa asiakas voi saada kuvat myös jpeg-muodossa. Kuvan digitaalisesta muodosta on hyötyä, koska kopioita voi olla useita, eikä niitä tarvitse lähettää postitse kuten filmejä. Digitaalisten kuvien säilytys ei vaadi fyysistä tilaa, filmit taas säilytetään arkistossa, joka vaatii tiettyjä olosuhteita.

Kuvan koko

Kuvauspaneeleista löytyy pieni kokovalikoima, ja niistä käytetään yleensä sellaista, jonka fyysinen koko ja valmiin kuvan koko sopivat tuotanto-oloihin parhaiten. Filmejä taas löytyy hyvin laaja valikoima ja jotkut niistä voi leikata sopivan kokoisiksi, esimerkiksi outoja kulmia kuvattaessa. Tarkastussuunnitelman mukaan hitsin vähimmäistarkastuspituus RT-tekniikalla on 0,48 m. DDA-paneelia, joka kattaisi tämän pituuden yhdellä kuvalla, ei ole käytännöllistä käyttää telakan olosuhteissa. Pienemmällä paneelilla pääsee rajoitetusti kuvaamaan ahtaissa paikoissa, mutta 0,48 m:n hitsin kuvaaminen on mahdollista vain ottamalla kaksi kuvaa, jotka on silloin sijoitettava limittäin. Perinteisellä radiografiolla tämä hoituu yhdellä 10 x 48 cm:n filmillä.

Kuvaus

Tarkastussuunnitelman mukaan lyhin kuvauspituus on 0,48 m, mikä vaatii suurta paneelia. Paneelin suuri koko rajoittaa sen käyttöä ahtaissa tiloissa. Filmi sopii ahtaisiin olosuhteisiin paremmin ohuen muodon ansiosta. Sitä voi taittaa, leikata ja muotoilla haluamallaan tavalla. Filmikuvaus on myös kätevä putkien sektorikuvauksessa, jolloin saadaan yksi kuva. Paneelia sen sijaan ei voi taittaa, joten sektorikuvauksessa joutuu todennäköisesti ottamaan monta kuvaa peräkkäin. Tällaisissa kuvissa on myös jonkinlainen perspektiivivääristymä, mikä hankaloittaa luokittelua. Paneelin paksuus on noin 25 mm ja kokonaiskoko on paljon kuva-aluetta suurempi, mikä tuo paneeliin käyttämättömyyttä fyysistä pinta-alaa.

Paneelin ja filmin suojaus

Paneeleille löytyy suojakoteloita, jotka estävät pölyn tunkeutumista laitteen sisään. Kotelo ei kuitenkaan suojaa paneelia kolhuilta ja iskuilta, jotka voivat vaurioittaa sitä. Filmi on yleensä pakattu tiiviiseen kuoreen, joten sitä voi vapaasti käyttää telakan pölyisessä ympäristössä.

Tarkastusolosuhteet

Valmistajat asettavat omia raja-arvoja paneelin käyttölämpötiloille ja olosuhteille. Luonnollisesti sekä liian korkea että matala lämpötila voi vaurioittaa paneelin elektroniikkaa pysyvästi, mukaan lukien kaapelin ja liittimet, mutta BlazeXPron valmistaja vakuuttaa että paneelia voi käyttää -20 – +40°C:ssa. Filmiä voi vapaasti käyttää hyvin kylmissä olosuhteissa.

Sakkokuvaus

Tarkastetusta kuvauspisteestä, jossa todettiin olevan hitsausvirhe, on otettava ainakin kaksi uutta kuvaa, niin sanottua sakkokuvaa. Sakkokuvien sijainti riippuu alkuperäisestä kuvauspisteestä. Ne voidaan sijoittaa joko molemmille puolille kuvauspistettä tai peräkkäin. Mikäli myös sakkokuvissa ilmenee virheitä, otetaan lisäkuvia, aina 2 kappaletta kuvauspistettä kohti. Tarkastusta jatketaan, kunnes hitsausvirheitä ei enää löydy tai kun koko hitsistä on tarkastettu 100 %.

Silloin kun käytössä on perinteinen menetelmä, otetaan sakkokuvat vasta seuraavana päivänä. Syynä on se, että filmien kehitys ja kuvien luokittelu tapahtuvat vasta kuvausten päätyttyä. Silloin ei ole enää mahdollista käydä ottamassa uusia kuvia. Digitaalista menetelmää käyttäen säästettäisiin ainakin yksi päivä, koska sakkokuvat voitaisiin ottaa saman tien.

Kuvausaika

Taulukossa 6 esitetään arvio yhteen kuvaan kuluneesta ajasta perinteisellä ja digitaalisella radiografiolla. Arvio perustuu kuvauskokeissa saatuihin arvoihin.

Vertailuun ei ole otettu valmistautumiseen kulunutta aikaa, kuten röntgenputken lämmitystä, filmin tai kuvauspaneelin asettelua ja indikaattorien kiinnittämistä, koska nämä toimenpiteet vievät saman verran aikaa molemmissa menetelmissä. Kuvien luokittelussa ei ajallisesti ole suurta eroa.

Taulukko 6. Arvio kuvausajasta.

Menetelmä	DR	RT
Valotusaika	2 - 9 min	1 - 3 min
Kuvan käsittely ohjelmassa / kehitys	4 - 7 min	~10 min
Yhteensä:	6 - 16 min	11 - 13 min

Taulukosta nähdään, että kuvausaika ei eroa paljon menetelmien välillä.

Tarkkailualue

Tarkastajat noudattavat omia ohjeitaan ja tarkkailualue rajataan niiden perusteella. Digitaalisessa radiografiassa säteilyarvot ovat melkein kaksi kertaa pienemmät kuin perinteisessä, mikä tarkoittaa, että rajattu alue voi olla suppeampi. Tankkikuvauksissa rajattavan alueen pinta-alaan vaikuttaa myös laipoiden säteilyn vaimennuskerroin.

Eripaksuisten materiaalien kuvaus

Laivalla on monia kohtia, joissa paksuusero on huomattava. Perinteisessä radiografiassa eripaksuisen materiaalin kuvauksessa käytetään kaksoiskuvamenetelmää, jolloin molemmista paksuuksista otetaan oma kuva ja luokitellaan ne erikseen.

Digitaalisessa menetelmässä on taas mahdollista ottaa tietyin rajoituksin yksi kuva ja säätää mustumaa ohjelmallisesti. Ensimmäisessä kokeessa 6 mm:n paksuusero oli suurin, jolla oli vielä mahdollista saada hyvä kuva, mutta kappale, jonka paksuusero on suurempi, tulee kuvata kaksoiskuvamenetelmällä.

Paneelin ja filmin arvot

Digitaalisen menetelmän tarkat kustannukset eivät olleet saatavissa, mutta tiedetään, että paneelin käyttöön liittyy vaurioitumisriski, mikä todennäköisesti nostaa kokonaiskustannuksia. Paneelin vaurioituessa korjaus on kallista, kuten myös itse paneeli, jonka hinta mallista riippuen vaihtelee 30 000 - 50 000 e. Filmin vaurioituessa kokonaiskustannukset nousevat vain filmin arvolla, mikä on suunnilleen 10 euroa. [8].

Kalibrointi

Filmien luokitteluun käytetään katselulaitteita ja mustumamittaria, mutta ne vaativat ajoittaista kalibrointia, mikä lisää kustannuksia. Digitaalisessa menetelmässä kalibrointilaitteita ei tarvita, joten niistä ei aiheudu kustannuksia. Joskus virheiden koon määrittämistä varten on kalibroitava ohjelman mittatyökalu kalibrointikappaleella. [8.]

Digitaalisessa radiografiassa käytetään kannettavaa tietokonetta, jonka ohjelmisto saattaa vaatia ajoittaista päivittämistä ja toimivuuden varmistamista, mikä vie tarkastajan aikaa ja nostaa täten kustannuksia.

DR-menetelmän kannattavuus

DR-tekniikan hintoja ei ollut mahdollista saada, koska monet yritykset, jotka tarjoavat tätä palvelua, laativat tilaajalle erillisen tarjouksen. Sen perusteella olisi helpompi ymmärtää, paljonko kuvia on otettava tietyn ajanjakson aikana, jotta digitaalisen menetelmän käyttö olisi kannettavaa. Kuvauskokeet, jotka alihankkijayritys oli tarjonnut, kuuluivat markkinointiin, ja täten laskua niistä ei ole tullut. Se oli hyvä asia, mutta toimi samalla rajoittavana tekijänä tulosten vertailussa.

Meyer Werft -telakalla toimiva NDT-asiantuntija Sander Karsten otti digitaalisen radiografian käyttöön joitakin vuosia sitten. Nykyään telakalla on käytössä rinnakkain kaksi kuvausmenetelmää: tietokoneavusteinen (CR) ja digitaalinen. Takaisinmaksuaika oli lyhyt, mihin kuitenkin vaikutti paljon otettavien kuvien määrä ja yhdessä vuodessa luovutettujen laivojen määrä. Telakalla joudutaan ottamaan vuoden noin 7 000 kuvaa vuodessa ja laivoja luovutetaan keskimäärin kolme kappaletta. [6.] Kuitenkin tämän perusteella on vaikea laskea takaisinmaksuaika ja tehdä päätös DR-menetelmän ottamisesta käyttöön, edes osittain, koska Meyer Werft ja Arctech eroavat paljon kooltaan.

Kokonaiskatsauksena kustannuksiin digitaalinen radiografia on kalliimpi, kuin perinteinen. Molempien menetelmien rinnakkaiskäyttö on mahdollista, mutta niiden ylläpitäminen yhtä aikaa on kalliimpaa.

Digitaalinen menetelmä pienentää paperityön määrää sekä sulkee kokonaan pois filmien arkistoinnin, epäonnistuneet filmit ja kehityskemikaalien hävittämisen. Kestävän kehityksen kannalta siirtyminen digitaaliseen tekniikkaan olisi tärkeä vaihe telakan toiminnassa.

5.2 Perinteinen ja digitaalinen radiografia rinnakkaisessa käytössä

Venäjän luokituslaitoksen sääntöjen mukaan jokaisesta tarkastuspisteestä otettu kuva on luokiteltava ja siitä on laadittava pöytäkirja, josta käy ilmi onko kuvattu hitsi hyväksytty. Tällä hetkellä radiografisen tarkastuksen suorittajat seuraavat yleensä samaa tarkastusjärjestystä, jonka mukaan kuvien luokittelu tapahtuu tarkastuksen lopussa, juuri ennen työntekijöiden tuloa laivalle. Tästä johtuen sakkokuvaukset siirretään yleensä seuraavalle mahdolliselle päivälle.

Digitaalista radiografiaa käyttäen tarkastusta olisi mahdollista laajentaa ja ottaa sakkokuvat heti, mikäli tarkastuspisteestä löytyy hyväksymisrajat ylittäviä virheitä. Myös korjauskohdat voitaisiin merkitä kuvauksen yhteydessä. [8.] Tällainen muutos vaatisi todennäköisesti NDT-suunnitelman muuttamista.

DR-menetelmän voitaisiin ottaa perinteisen radiografian rinnalle, tarkastettaessa esimerkiksi sellaisia paikkoja, joihin pääsy on suhteellisen helppoa, kuten kansipuolen lohkorajat, ja jättää monimutkaisemmat kohdat perinteisen radiografian varaan, esimerkiksi putkien sektorikuvaukset. Lohkorajoissa voi myös esiintyä paneelille hankalia kohtia, joissa kuvaussuunta on alhaalta tai pystysuora. Siinä tapauksessa tarvittaisiin erityisiä paneeliliikkeitä, mutta voi olettaa, että alihankkijayritys sisällyttäisi kuvaustarvikkeet tarjoukseen. Vaihtoehtona nämäkin kohdat voisi kuvata filmille.

Tietysti mitä enemmän kuvia otetaan digitaalisella menetelmällä, sitä kannattavampaa sen käyttö tulee olemaan.

6 Yhteenveto

Tutustuesssa digitaaliseen radiografiaan liittyviin artikkeleihin aihe vaikutti oikein tarkalta ja suppealta. Menetelmästä löytyi paljon tietoa, mutta enimmäkseen lääketieteellisiä tutkimuksia. Julkaisuja, jotka käsittelivät nimenomaan DR:n käyttöä telakalla oli vain kourallinen. Tämä johti siihen, että opinnäytetyön keskivaiheessa lista kysymyksistä, joista olisi mielenkiintoista kirjoittaa, paisui yli eikä vastauksia löytynyt.

Tarkastusten jälkeen listasta jätettiin osa kysymyksistä pois, koska niiden vaikutus itse tarkastusprosessiin oli vähäinen. Muista päätettiin esittää vain kuvauksen kannalta oleelliset asiat. Tässä vaiheessa oli otettu yhteyttä sekä Suomen että ulkomaan NDT-asiantuntijoihin. Keskustelut heidän kanssaan olivat antoisat ja osaan kysymyksistä saatiin välittömästi vastaukset.

Työssä oli tärkeintä tutustua tarkemmin digitaalisen radiografian käyttöön telakkaolosuhteissa. Hyvä valmistautuminen kokeiden suorittamiseen oli ratkaiseva, koska tarkastusten pohjalta oli tarkoitus rakentaa lopputulokset ja tehdä päätelmät työn onnistumisesta. Kokeiden aikana tulleet vastaan epäkohdat antoivat arvokasta tietoa vertailujen tekemisessä ja näyttivät, että myös ne ovat olennainen osa röntgentarkastusta.

Kokeilla saatiin selville, mitä digitaalinen radiografia on käytännössä, ymmärrettiin, kuinka se toimii, ja tutustuttiin etuihin, jotka se tuo mukanaan. Menetelmän toimivuus oli moitteeton, lukuun ottamatta viivästyksiä tarkastuksen alussa. Oli mielenkiintoista nähdä tulokset heti laivalla ja päättää uusintakuvausten tarpeesta.

Tarkastusajan seurannalla oli tärkeä rooli koko kuvauksen aikana, koska ilman sitä ei olisi pystytty ymmärtämään, kumpaan menetelmään kuluu enemmän aikaa. Vaikka lopputulokset osoittivat, että tarkastus molemmilla menetelmillä kestää yhtä kauan, on otettava huomioon, että digitaalinen menetelmä oli koekäytössä, ja sen takia tarkastukset kestivät hieman pidempään. Jos menetelmä otettaisiin käyttöön, ajan myötä digitaalinen tarkastus saisi rutiininomaisen luonteen ja sujuisi todennäköisesti nopeammin.

Muita vertailuja varten merkittiin muistiin myös tarkastusten kuvausarvot. Näin todettiin, että digitaalisessa röntgenkuvauksessa säteily on vähäisempää, siksi tarvitaan pienempää tarkkailualueita. Työturvallisuuden kannalta tämä pieni muutos tulevaisuudessa

mahdollistaisi hitsaajien ja DR-tarkastajien samanaikaisen työskentelyn, vaarantamatta ensimmäisten terveyttä.

Erilaisia DR-kuvauksen positiivisia puolia esiteltiin luvussa 5.1, niistä tärkeimpänä ominaisuutena voi pitää mahdollisuutta analysoida hitsin laatu välittömästi ja toistaa kuvaus heti. Lisäksi kuvien digitaalinen muoto sallii lähettää ne sähköpostitse ja lisätä tarvittaessa myös tarkastuspöytäkirjaan.

Työssä tarkasteltiin pinnallisesti molempien menetelmien kokonaiskustannuksia, mutta tarkat arvot jäivät selvittämättä. Tätä voisi tutkia seuraavassa vaiheessa, jos tai kun, päätetään siirtyä digitaaliseen menetelmään. Tarjouspyynnön tekeminen auttaisi kustannusten vertailussa sekä todennäköisesti myös tarkastuspisteiden valitsemisessa.

Sakkokuvien ottaminen on käytännössä mahdollista heti, mutta työtapojen muuttamisesta pitää sopia erikseen, sekä tehdä sen mukaiset muutokset aiheita käsitteleviin asiakirjoihin. Jos tällainen muutos saataisiin aikaan, tulisi tarkastustoiminnasta nopeampaa ja helpompaa.

Tulevaisuudessa menetelmien rinnakkaiskäyttöä voisi kokeilla myös väliaikaisesti ja toimivuuden varmistuessa ottaa digitaalisen röntgentarkastuksen pysyvään käyttöön.

Tämä aihe tarjosi mahtavan mahdollisuuden tutustua syvemmin tarkastustoimintaan ja uusimpaan NDT-tekniikkaan. Ilman sitä ei olisi pystytty arvioimaan muutosten tarvetta laadunvarmistuksessa tai kokonaisuudessaan ymmärtämään, pystyykö telakka toimittamaan asiakkailleen aluksia hieman lyhennetyllä aikataululla.

Loppusanat

Haluaisin kiittää tuotantopäällikkö Jarmo Saramiestä tämän työn mahdollistamisesta ja lohkopäällikkö Lauri Kujalaa hänen neuvoistaan työn kirjoittamisessa ja kannustamisestaan, kun tulosten analysointi tuntui hankalalta ja monimutkaiselta.

Erityiset kiitokset kuuluvat hitsausinsinööri Eero Nykäselle, sillä hän on antanut tämän aiheen ja myöhemmin tilannut Dekralta digitaalisen tarkastuksen telakalle juuri tätä työtä varten. Hän on myös auttanut joka kerta, kun ilmeni epäselviä kohtia. Olen oikein kiitollinen Petteri Lehdolle (Dekra), hänen kysymyksiini antamistaan laajoista vastauksista, jotka auttoivat suuresti tekstin luomisessa ja päätelmien teossa. Suuret kiitokset NDT-tarkastajille Nikke Lainepää ja Pavel Väisänen, sillä he olivat aina valmiina vastaamaan loputtomiin kysymyksiini koskien tarkastusten suorittamista.

Suuri kiitos ohjaajalleni lehtori Juha Kotamiehelle kannustamisestaan ja avustaan koko prosessin aikana.

Lähteet

- 1 Anatomy of the X-ray Machine. 2016. Verkkodokumentti. Veterian key. <<http://veteriankey.com/anatomy-of-the-x-ray-machine/>>. Luettu 10.11.2016.
- 2 Applications. 2016. NOVO Digital Radiography. Verkkodokumentti. <<http://www.novo-dr.com/ndt-applications>>. Luettu 5.12.2017.
- 3 Bavendiek, Klaus ym. 2007. Digital detector arrays (Flat panel detectors). Verkkodokumentti. YXLON. <<http://www.ndt.net/article/imagingNDE2007/Bavendiek2.pdf>>. Luettu 29.11.2016.
- 4 BlazeXPro. Verkkodokumentti. Vidisco. <http://www.vidisco.com/ndt_solutions/ndt_info_center/ndt_wiki_x_ray>. Luettu 12.11.2016.
- 5 FlashXPro Digital radiography system. 2016. Verkkodokumentti. Vidisco. <http://www.vidisco.com/ndt_solutions/ndt_systems/flashx_pro>. Luettu 1.12.2016.
- 6 Karsten, Sander. 2017. Laboratoriopäällikkö, Meyer Neptun Group, Papenburg. Sähköpostikeskustelu 13.3.2017.
- 7 Kon-67.3301 Rikkomattomat tarkastusmenetelmät. 2015. Luentomateriaali. Aalto-yliopisto.
- 8 Lehto, Petteri. 2016. Aluepäällikkö Etelä-Suomi, Dekra, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 8.12.2016.
- 9 Malley, Marjorie Caroline. 2007. Radioactivity: A History of a Mysterious Science. Oxford University Press.
- 10 NDT Wiki X-ray - the Digital X-ray Encyclopedia. 2016. Vidisco. <http://www.vidisco.com/ndt_solutions/ndt_info_center/ndt_wiki_x_ray>. Luettu 15.11.2017.
- 11 Olivera, Davi ym. 2010. Application of the digital radiography in weld inspection of gas and oil pipelines. Verkkodokumentti. <http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_04_01.pdf> Luettu 1.10.2016.
- 12 Pincu, Ron ym. 2011. Advanced Digital Radiography for Field NDT. Verkkodokumentti. International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography. <<http://www.ndt.net/article/dir2011/papers/we23.pdf>>. Luettu 5.12.2016.
- 13 Pincu, Ron ym. 2010. Technical highlights for NDT digital radiography (X-Ray) inspection. Verkkodokumentti. Vidisco LTD. <http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_04_04.pdf>. Luettu 17.10.2016.

- 14 Röntgenkuvauksen periaate. 2017. Kuva. Verkkodokumentti. <<https://www.nde-ed.org/GeneralResources/MethodSummary/RT1.jpg>>. Luettu 13.1.2017.
- 15 Schulenburg, Lennart . 2016. Introduction to image processing in Digital Radiography (DR) for NDT. Verkkodokumentti. LinkedIn Corporation. <<https://www.linkedin.com/pulse/introduction-image-processing-digital-radiography-dr-ndt-schulenburg>>. Luettu 8.10.2016.
- 16 Eskola, Sisko Maria ym. 2007. Fotoni 8. Aine ja säteily. Helsinki: Otava.
- 17 SFS-EN ISO 17636-2. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Radiografinen kuvaus. 2013. Röntgen- ja gammakuvaus digitaalitekniikalla. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 18 Teollisuusradiografia, Agfa NDT. 1989. Agfa.
- 19 Ukkonen, Pentti. 1991. Radiografinen tarkastus. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys R.Y. NDT komitea.
- 20 SFS-EN ISO 17636-1. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Radiografinen kuvaus. 2013. Röntgen- ja gammakuvaus filmitekniikalla. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 21 SFS-EN ISO 10675-1. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Radiografisen kuvauksen hyväksymisrajat. 2016. Teräs, nikkeli, titaani ja niiden seokset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 22 Arctech. 2017. About us. <<http://arctech.fi/about-us/>>. Luettu 1.10.2016.
- 23 SFS-EN ISO 19232-1/2. Non-destructive testing. Image quality of radiographs. 2013. Determination of the image quality using wire-type image quality indicators. Determination of the image quality using step/hole-type image quality indicators. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

