

Eveliina Portin

HITSAUSSAUMOJEN RADIOGRAFISEN TARKASTUKSEN VAIKUTUS TYÖTUR- VALLISUUTEEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jorma Vihinen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Eveliina Portin: Hitsausaamojen radiografisen tarkastuksen vaikutus työturvallisuuteen
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Toukokuu 2023

Radiografinen tarkastus on yksi rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmistä, ja sitä käytetään laajalti metalliteollisuudessa. Menetelmä soveltuu erinomaisesti etenkin hitsausaamojen tarkastukseen, sillä nykyisillä tekniikoilla pystytään tuottamaan tarkkoja kuvia, joista kyetään analysoimaan perusaineen paksuutta ja tiheyttä. Radiografiassa käytetään röntgen- tai gammasäteilyä, jotka vaikuttavat työntekijöiden työturvallisuuteen monin tavoin, ja tämän työn tavoitteena onkin selvittää kirjallisuuslähteiden avulla, millaisia vaikutuksia säteilyllä on työsuojeluun ja -terveyteen.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään ensin radiografisen tarkastuksen teoriaa, jonka jälkeen syvennytään säteilyn aiheuttamiin terveydellisiin vaikutuksiin ja konkretisoidaan teollisuuden säteilytyöntekijöiden säteilyannosrajoja vertaamalla niitä esimerkiksi yleisimmistä lääketieteellisistä kuvantamisista saatuihin annoksiin. Lopuksi työssä käsitellään työsuojelua niin työterveyden kuin varsinaisten suojausmenetelmienkin kuten säteilymittariston ja pätevyttämisen kannalta.

Säteilyannoksia voidaan mitata monilla yksiköillä ja suureilla, joista osaa käytetään turvallisuussuunnitteluun ja osaa annosrajojen tarkkailuun. Suureissa voidaan ottaa huomioon erilaisia kertoimia, joilla pystytään arvioimaan tietyn työntekijäryhmän altistumista säteilylle. Arvioiden perusteella on laskettu annosrajat, jotka ovat säteilytyöntekijällä moninkertaiset väestöön verrattuna. Kuitenkin yksilölliset tekijät, kuten ikä, elintavat sekä terveydentila vaikuttavat merkittävästi työturvallisuuteen, ja siksi teollisuusradiografian parissa työskenteleville on laissa määritelty säännölliset työterveystarkastukset.

Työsuojelusta ja annosrajoista huolimatta jokainen työntekijä on yksilö, eikä laskennallisilla arvioilla ja määräyksien mukaisella suojelullakaan pystytä aina varmistamaan säteilyn vaikutuksia kehoon. Tämän vuoksi työterveyslääkäri voi missä tahansa työuran vaiheessa evätä työntekijän osallistumisen säteilytyöhön. Työntekijän työtehtävää voidaan myös väliaikaisesti muuttaa, jos annosrajat tulevat täyteen. Työnkuvaan kuuluvat myös säännölliset koulutukset sekä tutkinnon läpäiseminen vaadituin väliajoin, joilla varmistetaan työntekijän ajantasainen tietämys nykytekniikoista, todistetaan työkykyisyys ja vahvistetaan työntekijän ymmärrystä säteilytyön riskeistä ja vastuullisuudesta.

Avainsanat: radiografia, työturvallisuus, säteily, hitsaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RADIOGRAFIAN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA	3
2.1 Säteilylähteet	3
2.1.1 Röntgensäteilyn lähde	4
2.1.2 Gammasäteilyn lähde	5
2.2 Kuvanmuodostus	5
2.2.1 Kuvanmuodostus filmille	6
2.2.2 Vaihtoehtoisia tapoja kuvanmuodostukselle	8
3. SÄTEILYN VAIKUTUKSET TERVEYTEEN	9
3.1 Säteilystä peräisin olevat terveysongelmat	9
3.2 Säteilyannosrajat	10
3.3 Säteilyannosten vertailu	12
4. TYÖSUOJELU	15
4.1 Työterveys ja säteilytyöluokat	15
4.2 Valvonta- ja tarkkailualueet	17
4.3 Fyysiset suojausmenetelmät työpaikalla	18
4.4 Dosimetria	19
4.5 Päteyttäminen ja säteilysuojelukoulutus	21
5. YHTEENVETO	23
LÄHTEET	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ALARA	engl. As Low As Reasonably Achievable, optimointiperiaate
DNA	engl. Deoxyribonucleic Acid, deoksiribonukleiinihappo
ICRP	engl. International Commission on Radiological Protection, kansainvälinen säteilysuojelukomissio
NDT	engl. Non-Destructive Testing, rikkomaton aineenkoetus
STUK	Säteilyturvakeskus
a	vuosi
Gy	gray
h	tunti
keV	kiloelektronivoltti
nm	nanometri
Sv	sievert

1. JOHDANTO

Metalliteollisuudessa käytetään apuna rikkomattoman aineenkoetuksen (NDT, Non-Destructive Testing) menetelmiä (Campbell 2013, s. 234) tarkasteltaessa esimerkiksi hitsausauman laatua. Erityisesti paineenalaisessa hitsauksessa tulee olla tiukat standardit, jotta valmistettavien tuotteiden toimintakyky voidaan varmistaa ja jotta niiden käyttö on turvallista. Kun tuote on paineenalainen ympärivuorokautisesti, voivat pienetkin virheet metallissa tai hitsausaumoissa heikentää huomattavasti rakenteen lujuutta ja siten aiheuttaa laajoja tuhoja. Laadun varmistaminen valmistusvaiheessa on myös taloudellisesti kannattavampaa, sillä hajonneen tuotteen korjaaminen vaatii usein koko systeemin alasajoa.

Tarkastuksessa käytettäviin NDT-menetelmiin kuuluvat radiografian lisäksi muun muassa ultraääni-, magneettijauhe- ja tunkeumanestetarkastus (Väisälä et al. 2004, s. 256). Kuitenkin hitsausaumojen tarkastukseen juuri radiografia on paras vaihtoehto. Radiografiseen tarkastukseen lukeutuu kaikki tarkastus, joka tapahtuu käyttämällä sähkömagneettista ionisoivaa säteilyä eli röntgen- ja gammasäteilyä. (Campbell 2013, s. 233–235) Ionisoiva säteily aiheuttaa monenlaisia terveydellisiä uhkia työntekijöille, jotka altistuvat sille päivittäin.

Tässä työssä perehdytään siihen, miten säteilyn käyttö teollisuudessa vaikuttaa työntekijöiden työturvallisuuteen ja -suojeluun. Tutkimus on rajattu koskemaan paineenalaisten hitsausaumojen radiografista tarkastusta ja siitä aiheutuvan ulkoisen säteilyn vaikutusta työturvallisuuteen. Työ vastaa tutkimuskysymykseen: miten säteilylle altistuminen työssä vaikuttaa työturvallisuuteen teollisuusradiografiassa hitsausaumoja kuvattaessa?

Työssä esitellään ensin radiografisen laitteisto, eli miten ionisoivaa säteilyä saadaan tuotettua ja miten sitä voidaan hyödyntää saumarakenteiden analysoinnissa. Tämän jälkeen käsitellään säteilyn vaikutusta työntekijöiden terveyteen ja konkretisoidaan säteilytyöntekijälle määritettyjä säteilyannosrajoja vertailemalla niitä esimerkiksi lääketieteellisten

kuvantamisten säteilyannoksiin. Lopuksi tarkastellaan erilaisia keinoja suojautua säteilyltä ja erilaisia suojeluun liittyviä määräyksiä.

Tutkielma on tehty kirjallisuuskatsauksena, jossa lähteinä on käytetty luotettavia artikkeleita, kirjoja, ohjeita ja standardeja. Käytetty tieto on mahdollisimman uutta, mutta esimerkiksi Säteilyturvakeskus (STUK) ei ole päivittänyt säteilytyön ohjeita vuosiin. Voidaan kuitenkin olettaa, ettei tieto ole merkittävästi muuttunut. Lähteinä on käytetty sekä suomen- että englanninkielistä kirjallisuutta, ja tietoa on etsitty muun muassa Andorista, Google Scholarista sekä Säteilyturvakeskuksen nettisivuilta.

2. RADIOGRAFIAN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA

Metalliteollisuudessa valmistetaan paljon rakenteita, joiden tulee kestää suuriakin paineita tai painevaihteluita, ja näiden rakenteiden hajoaminen voi aiheuttaa mittavia tuhoja. Tällaisia rakenteita on esimerkiksi lentokoneissa, laivoissa ja silloissa ja näiden lisäksi myös erilaisissa paineastioissa, kuten höyryvoimaloissa, painekattiloissa ja turbiineissa. Pienetkin virheet hitsaussaumassa voivat merkittävästi heikentää rakenteen lujuutta ja siten ajan kuluessa aiheuttaa yhä isompia halkeamia ja lopulta koko rakenne saattaa pettää. Paineenalaisessa hitsauksessa on usein tarkkaan säädeltävä, kuinka suuri osuus saumoista tulee tarkastaa kuvaamalla, ja kuvauksia suunniteltaessa käytetään sekä eurooppalaisia EN- että amerikkalaisia ASME-standardeja riippuen maasta, joka vastaanottaa lopputuotteen. Esimerkiksi paineenalaisten vesiputkikattiloiden saumojen radiografinen tarkastusosuus on 5–100 %, osuuden vaihdellessa hitsaussauman tyyppin mukaan (SFS-EN 12952-6:2021:en, s. 13–15).

NDT-menetelmistä juuri radiografia sopii erityisen hyvin hitsattujen saumojen tarkastukseen (Campbell 2013, s. 234), sillä sen avulla voidaan helposti ja tarkasti määrittää kuvattavan materiaalin paksuus ja tiheys kuvattavalla alueella. Kuvattavan metallin alkuaikoinen paksuus, paksuus sekä joissain tilanteissa myös kuvauspaikan haastavuus tai tilanpuute vaikuttavat kaikki päätökseen kumpi radiografian lajeista, röntgen- vai gamma-kuvaus, valitaan (Väisälä et al. 2004, s. 257). Kuonasulkeumat, huokokset, perusaineen sulamattomuus tai epätäydellinen tunkeuma aiheuttavat poikkeavuuksia metallin tiheyteen tai paksuuteen, mikä voidaan havaita kuvasta erottuvana tummempana kohtana. Radiografian heikkoutena on kohtisuorien halkeamien hankala havaittavuus ilman, että kuvaus tehdään monesta eri suunnasta (Campbell 2013, s. 234), sillä kohtisuora halkeama saattaa näkyä kuvassa vain hyvin pienenä pisteenä, jolloin sitä ei välttämättä pysty erottamaan.

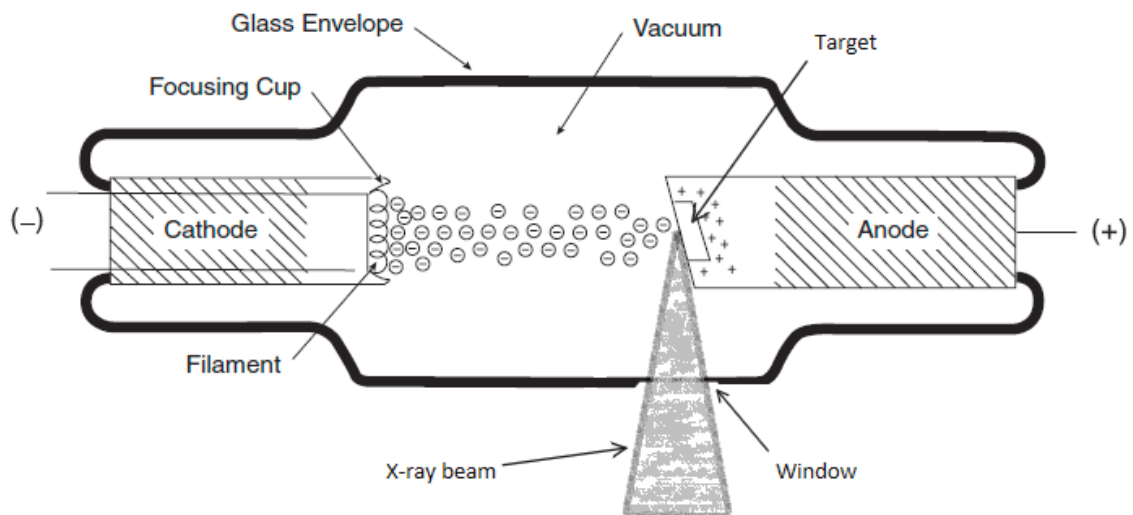
2.1 Säteilylähteet

Teollisuudessa on tärkeää saada erittäin tarkkoja kuvia, jotta pienetkin virheet hitsaussaumoissa pystytään havaitsemaan. Säteilylähteinä käytetään röntgen- tai gammasäteilyä: röntgensäteily tuotetaan röntgenputkessa, ja gammasäteily on peräisin hajoavasta

atomiytimestä (Hellier 2020, luku 6.3). Röntgensäteily on matalaenergisempää kuin gammasäteily (Iowa State University 2023), ja siksi niillä on eri käyttökohteet.

2.1.1 Röntgensäteilyn lähde

Röntgensäteilyllä kuvattaessa säteilylähteenä käytetään röntgenputkea, jossa katodilla muodostetaan sähkövirran avulla negatiivisesti varautuneita elektroneita. Vastakkaisella puolella putkea on positiivisesti varautunut anodi, joka vetää elektroneja puoleensa, kuten kuvasta 1 nähdään. Osuessaan anodimateriaaliin elektronit vuorovaikuttavat anodimateriaalin elektronien kanssa saaden aikaan röntgensäteilyä, jonka kykyä tunkeutua kuvattavaan materiaaliin voidaan kasvattaa lisäämällä säteilyn energiaa eli lyhentämällä sen aallonpituutta. Käytännössä tämä tehdään kasvattamalla katodin kautta kulkevaa sähkövirtaa, jolloin katodille muodostuu enemmän elektroneita. Kun samaan aikaan lisätään anodin jännitettä, saavat elektronit suuremman liike-energian, joka on suoraan verrannollinen säteilyn energiaan. (Hellier 2020, luku 6.2)



Kuva 1. Havainnekuva röntgenputken toiminnasta (perustuu lähteeseen Hellier 2020, luku 6.2).

Hellierin (2020, luku 6.2) mukaan tärkein röntgenkuvan laatuun ja tarkkuuteen vaikuttava tekijä on anodin vastaanottimen koko, sillä se määrittää suoraan saadun kuvan terävyyden. Toinen röntgenputken suunnitteluun vaikuttava tekijä on putken lämpeneminen. Jayaraman (2018, s. 386) kertoo, että vain 1 % elektronien energiasta saadaan muunnettua röntgensäteilyksi, sillä suurin osa liike-energiasta muuttuu lämmöksi. Röntgen-

putki vaatii suojauksen ympärilleen, ettei säteily siirry väärään suuntaan, mutta sen lisäksi siihen tarvitaan runsaan lämmöntuotannon takia myös jäähdytyslaitteisto, joka vaatii tilaa ja tekee laitteistosta myös painavamman (Jayaraman 2018, s. 387). Suuri lämmöntuotanto onkin yksi syy sille, miksi röntgenputkella tehtävät kuvaukset ovat suhteellisen matalaenergisiä; Hellier (2020, luku 6.2) mainitsee tekstissään, että yleisimmät teollisuuden röntgenkuvauksessa käytettävät energiat ovat suuruudeltaan 100–400 keV.

2.1.2 Gammasäteilyn lähde

Gammasäteily puolestaan saa alkunsa pienestä kuvauslaitteen sisällä olevasta kapselista, jossa on radioaktiivista ainetta. Aikaisemmin yleisin käytetty aine oli radium, mutta nykypäivänä yleisimpiä säteilylähteitä ovat luonnossa esiintyvät epävakaa isotootit koboltti-60 ja iridium-192 (Väisälä et al. 2004, s. 256). Hellier (2020, luku 6.2) esittelee tekstissään myös harvinaisempia isotooppeja, kuten cesium-137:n. Säteily on kuitenkin pysäyttämätöntä, jolloin suojeleminen on vaikeampaa ja kuvan laatu on usein heikompi kuin röntgenillä kuvattaessa. Gammakuvausta kuitenkin käytetään, kun kuvattava kohde on liian paksu röntgensäteilylle tai jos röntgenlaite ei fyysisesti sovellu kuvattavan kohteen kuvaamiseen. (Väisälä et al. 2004, s. 257–258)

Gammasäteily perustuu tiettyjen atomien ytimien hajoamiseen, kun niihin tuodaan ylimääräinen neutroni. Ytimen hajoessa se emittoi gammakvantteja, joita voidaan kohdentaa ja siten hyödyntää kuvauksessa. Gammasäteilyä käytetään radiografisessa kuvauksessa, sillä siitä saatava säteily on korkeaenergisempää kuin röntgenputkella tuotettu. Jos gammasäteilyn energioita vertaa röntgenputkella saataviin energioihin, koboltti-60 tuottaa 1 250 keV ja iridium-192 460 keV. (Iowa State University 2023) Suurempi energia tarkoittaa lyhyempää aallonpituutta ja siten parempaa tunkeutumiskykyä, kuten työssä aiemmin kerrottiin. Sen lisäksi, että gammasäteilyllä voidaan kuvata paksumpia materiaaleja, on se myös Väisälän et al. (2004, s. 258) mukaan edullisempaa ja laitteisto on helpommin liikuteltavissa. Gammakuvaus vaatii luotettavan suojauksen isotoopin ympärille, sillä sen säteilyä ei pystytä pysäyttämään milloinkaan.

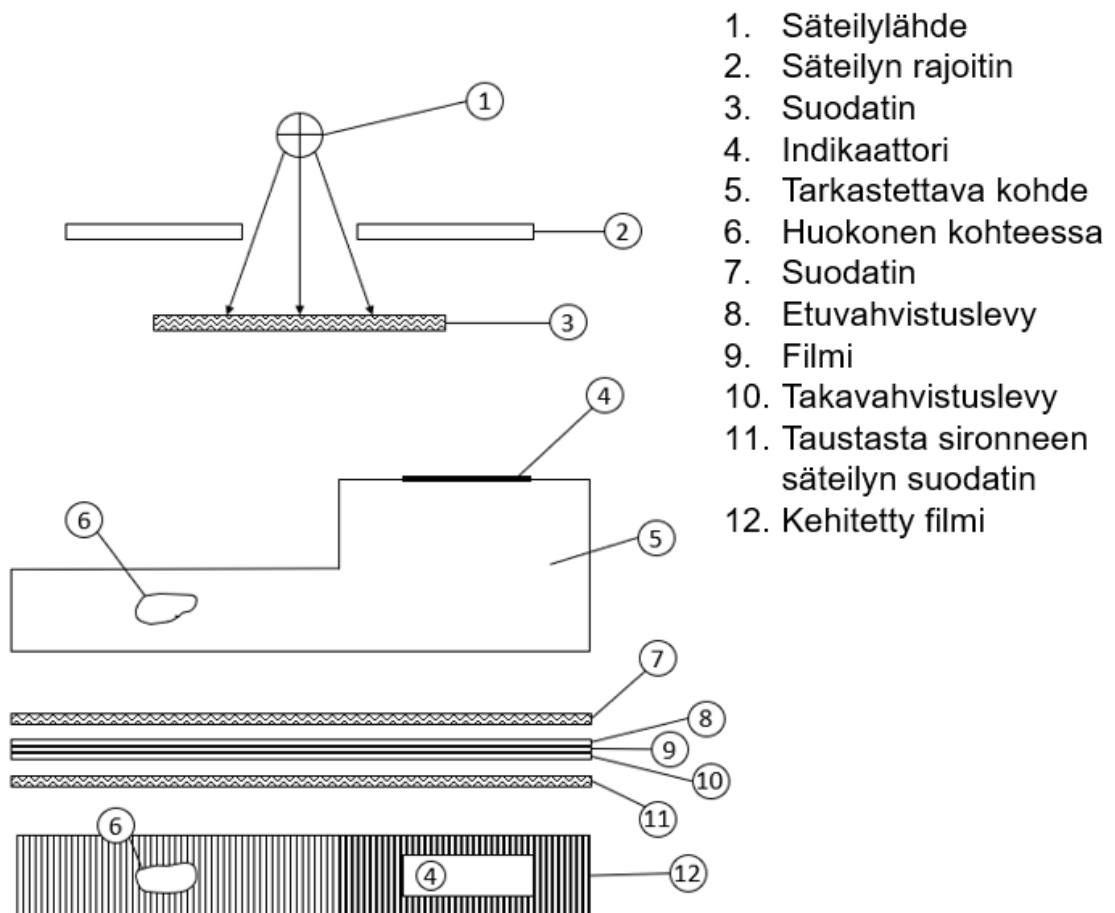
2.2 Kuvanmuodostus

Säteilyn kuljettua kuvattavan kohteen läpi kerätään informaatio talteen joko perinteisin tai digitaalisiin menetelmin. Kaikille tavoille yhteistä on kuitenkin se, että vastaanotin si-

jaitsee kuvattavan kohteen vastakkaisella puolella säteilylähteeseen nähden. Kuva nähdään varjokuvana, joka tarkoittaa, että mitä enemmän säteilyä on päässyt vastaanottimelle asti, sitä tummempi kuva on. Toisin sanoen kuvattava kohde näkyy vaaleana ja erilaiset virheet hitsausaumassa näkyvät tummempina (Vishwanath & Rohit 2019, s. 4), sillä virheiden alueella säteilyä on päässyt enemmän läpi, kun metalli on ohentunut tai harventunut virheen takia.

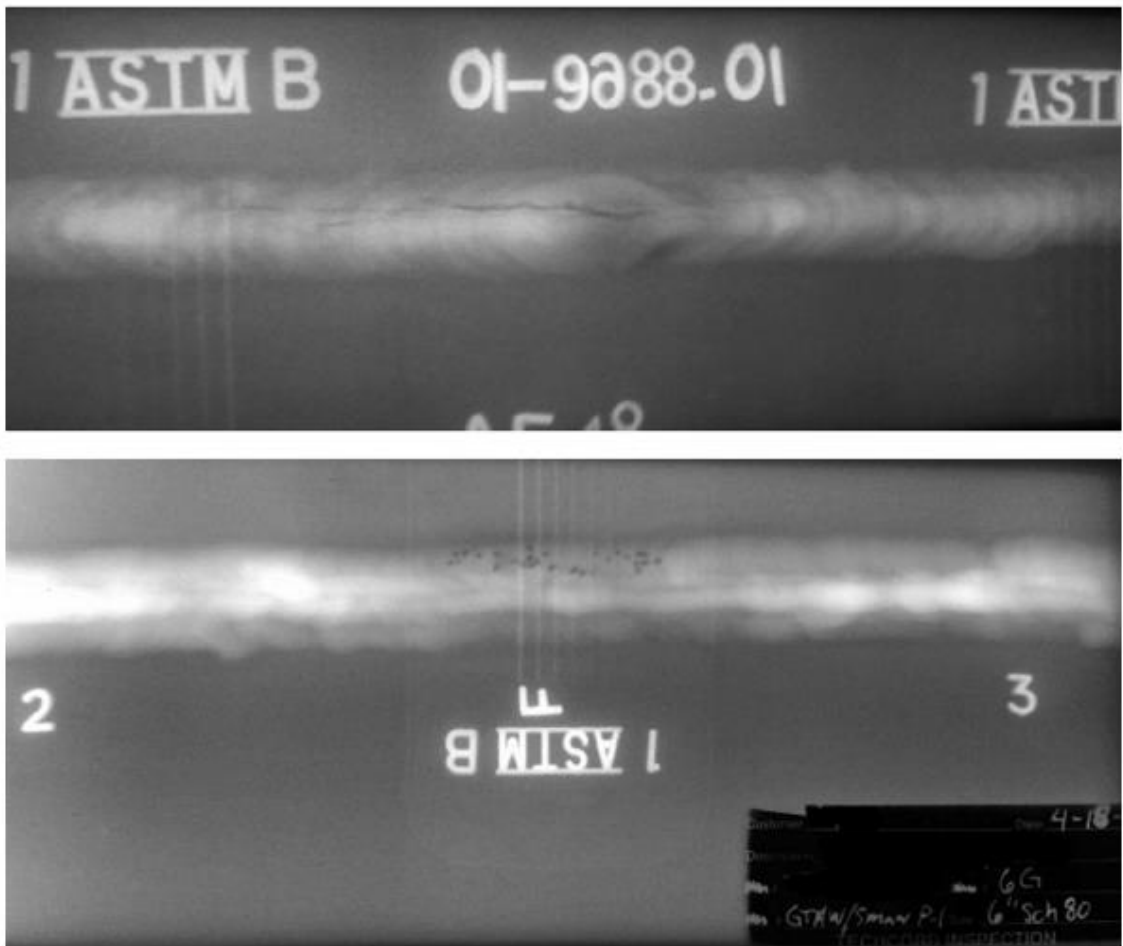
2.2.1 Kuvanmuodostus filmille

Perinteinen tapa muodostaa radiografinen kuva teollisuudessa on filmi. Kun kuva muodostetaan filmille, voidaan kuvasta 2 nähdä, että säteilyä pitää suodattaa ja vahvistaa sekä ennen filmiä että sen jälkeen. Säteiläytyksen jälkeen filmi tulee vielä kehittää, joten kuvauksen tulosta ei nähdä heti.



Kuva 2 Filmikuvauksen laitteisto (perustuu lähteeseen Åström 1990, s. 56)

Filmissä on useita päällekkäin olevia kerroksia, joista alimmaisena ja päällimmäisenä ovat emulsiokerrokset, joissa on hopeahalogenidikiteitä leijumassa gelatiinissa. Kiteet reagoivat röntgensäteilyyn ja valoon, jonka vuoksi kuvaukset täytyy suorittaa pimeässä. Kehitettäessä filmi upotetaan joko manuaalisesti tai laitteiston avulla emäksiseen liuokseen, joka saa aikaan hopeahalogenoidikiteiden muuttumisen metalliseksi hopeaksi. Alueilla, joilla säteilyä pääsee runsaasti kuvattavan materiaalin läpi, muodostuu enemmän metallista hopeaa, joka saa kuvan näyttämään tummalta. Täten esimerkiksi metalliputki näkyy kuvassa vaaleana ja hitsaussauma näyttää vielä sitäkin vaaleammalta, sillä saumakohta on paksumpi kuin muu putki, kuten kuvasta 3 nähdään. (Hellier 2020, luku 6.5)



Kuva 3 Filmillä olevan kuvan ylemmässä saumassa on havaittavissa pitkittäinen halkeama ja alemmassa saumassa huokosia (Hellier 2020, luku 6.9)

2.2.2 Vaihtoehtoisia tapoja kuvanmuodostukselle

Nykyään on käytössä myös monia muita tapoja vastaanottaa radiografista säteilyä. Campbell (2013, s. 249–251) esittelee muun muassa radiografisen paperin, kserografian ja fluoresoivan näytön, mutta Kulkas (2022) kertoo, että digitaalista menetelmää saataan joissain yrityksissä ja tuotteissa jopa jo vaatia, joten se tulee luultavasti tulevaisuudessa syrjäyttämään monet muut menetelmät.

Digitaalisessa kuvanmuodostuksessa sauman taakse asetetaan digitaalinen paneeli, jossa on fosforikiteitä ja näiden kiteiden elektronit virittyvät altistuttuaan ionisoivalle säteilylle. Viritystila puretaan laserenergialla, jolloin emittoituu näkyvää valoa, joka pystytään muuntamaan digitaalisiksi biteiksi ja siten luettavaksi kuvaksi. (Deprins 2004, s. 591) Digitaalinen kuva muodostuu näytölle heti kuvauksen jälkeen. Harjula (2012) kertoo digitaalisesta kuvanmuodostamisesta olevan myös muita hyötyjä, kuten paneelin herkkyys havaita röntgensäteilyä, jota voidaan Kulkaksen (2022) mukaan hyödyntää paksuuden mittauksessa. Kulkas (2022) kuitenkin tuo esille, että digitaalinen radiografia vaatii työntekijöiltä enemmän resursseja kuin perinteiset kuvaustavat, sillä digitaalinen paneeli vaatii säteilyn käsittelyä ennen kuvan ottoa ja paneelit ovat usein vielä suurikokoisia ja siten hankalia käsiteltäviä teollisuusolosuhteissa (kuva 4).



Kuva 4 Hitsaussaumojen tarkastusta digitaalisella radiografialla, kun säteilylähteenä käytetään röntgenputkea. (I.TEC 2023)

3. SÄTEILYN VAIKUTUKSET TERVEYTEEN

Teollisuudessa toimivat tarkastajat luokitellaan säteilytyöntekijöiksi, sillä he joutuvat työnkuvasta riippuen lähes päivittäin alttiiksi normaalia suuremmalle säteilymäärälle. Ihminen altistuu erityyppisille säteilyille normaalisti joka päivä, sillä muun muassa avaruudesta ja kehossa olevasta kaliumista saadaan luonnon taustasäteilyä (Castrén & Annanmäki 1988, s. 199), ja maaperä ja juomavesi altistavat radonsäteilylle (Castrén & Annanmäki 1988, s. 216). Ympäristöstä peräisin olevan säteilyn vuoksi väestölle on täytynyt määrittää säteilyannosrajat, jotka pitää ottaa huomioon myös säteilytyöntekijöiden annosrajoja määritettäessä. Teollisuuden säteilytyöntekijöiden lisäksi ylimääräiselle säteilylle altistuvat esimerkiksi ydinvoimalatyöntekijät sekä sairaalan ja lentokoneiden henkilökunta.

Jotta säteilystä aiheutuisi terveydellisiä haittoja, täytyy sen olla ionisoivaa säteilyä. Sähkömagneettisesta säteilystä vain röntgen- ja gammasäteily ovat ionisoivia. Säteily on ionisoivaa, kun sen aallonpituus on alle 400 nm, jolloin säteilyllä on tarpeeksi energiaa pystyäkseen irrottamaan elektroneita tai muilla tavoin hajottaa atomi. (STUK 2020) Energiamäärä on tarpeeksi suuri läpäisemään ihmiskehon, mikä voi aiheuttaa kehossa vaurioita.

3.1 Säteilystä peräisin olevat terveysongelmat

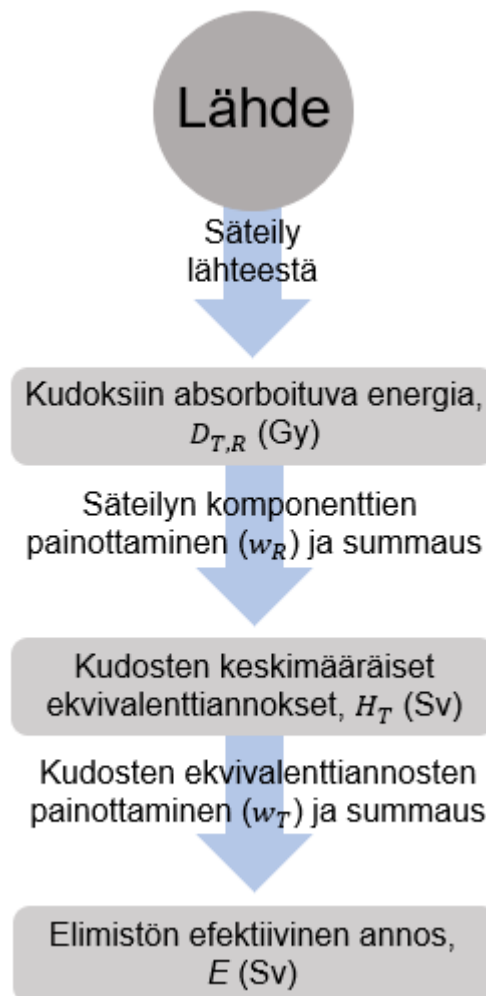
Tunnetuin säteilystä peräisin oleva sairaus on syöpä. On kuitenkin monia muitakin sairauksia ja vammoja, joita sähkömagneettinen säteily aiheuttaa, kuten säteily sairaus ja palovammat. Säteilyn aiheuttamat terveysvaikutukset voidaan jakaa deterministisiin ja stokastisiin vaikutuksiin. Deterministiset vaikutukset tulevat ilmi suurien säteilyannosten, käytännössä onnettomuuksien, yhteydessä aiheuttaen muun muassa säteily sairautta, palovammoja, silmän sairauksia ja haitallisia vaikutuksia sukurauhasiin. Stokastiset vaikutukset sen sijaan aiheuttavat syöpää ja perinnöllisiä haittoja, ja näiden todennäköisyys kasvaa kokonaisannoksen kasvaessa. Suurin ero determinististen ja stokastisten vaikutusten välillä onkin juuri säteilylle altistumisen määrä ja se, että deterministiset haittavaikutukset johtuvat solukuolemista, kun taas stokastiset vaikutukset johtuvat perimässä tapahtuvista mutaatioista. (Paile 2002, s.44–46)

Vaikka absorboitunut annos ja efektiivinen annos pystyttäisiinkin mittaamaan tai määrittämään laskennallisesti, voi säteily Mustosen ja Salon (2002, s. 29) mukaan jakautua hyvinkin epätasaisesti kudokseen ja aiheuttaa sen, että osa soluista joutuu alttiiksi lähes kaikelle säteilylle ja osa soluista selviää ilman säteilyä. Tämä vaikeuttaa merkittävästi säteilysuojelua. Sähkömagneettinen säteily luokitellaan karsinogeeniksi, ja se on yksi merkittävä tekijä syövän syntymisessä, joka taas on yleisesti tunnettu säteilyn aiheuttama terveydellinen ongelma. Nikkola et al. (2023) kertoo, että karsinogeenit vaikuttavat juuri niihin kohtiin solujen deoksiribonukleiinihappoa (DNA, Deoxyribonucleic Acid), joissa mutaation tapahtuminen vaikuttaa eniten solujen kasvuun ja jakautumiseen. Suurin osa säteilylle altistuneista soluista kuolee, mutta hengissä selviäviin soluihin se saattaa aiheuttaa mutatoitumista, jos solun puolustusmekanismit eivät pysty korjaamaan aiheutuneita vaurioita. Säteily reagoi vesiatomien kanssa saaden aikaan reaktioherkkiä radikaaleja. Nämä taas reagoivat DNA-molekyylien kanssa aiheuttaen esimerkiksi DNA-juosteen katkeamisen tai muutoksia sen rakenneosissa. (Mustonen & Salo 2002, s. 30–31) Voidaan päätellä, että säteily on merkittävä syövän aiheuttaja, jos keho absorboi sitä runsaasti, mutta toisaalta myös jo pieni määrä voi aiheuttaa DNA:n mutatoitumista. Nikkolan et al. (2023) tekstissä mainitaan syövän olevan geneettinen sairaus, joten myös ihmisen geneettinen perimä ja muut yksilölliset ominaisuudet vaikuttavat säteilystä seuraaviin ongelmiin.

3.2 Säteilyannosrajat

Jotta voidaan tutkia säteilyn vaikutusta terveyteen ja sitä kautta työturvallisuuteen, pitää ensin määrittää säteilyannokset, jotka eivät saa ylittyä työtehtävän takia. Tässä tarkastelussa ei oteta huomioon mahdollisia säteilyonnettomuuksia ja oletetaan, että säteilyn lähde on ihmiskehon ulkopuolella. Säteilyn määrää voidaan tutkia monin eri tavoin, mutta jokaisessa tavassa on omat haasteensa. Marttila (2002, s. 76) toteaa tekstissään, että jokainen säteilylaji vaurioittaa kehoa eri tavoin ja siksi pelkästään absorboituneen energian perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä säteilyn haitallisuudesta. Säteilyn absorboituessa kehoon, sen aiheuttamiin vahinkoihin vaikuttavat muun muassa se, millainen energijakauma säteilyllä on, miten se jakautuu eri kudoksiin ja kunkin kehon yksilölliset erot (Marttila 2002, s. 76). Tästä voidaan päätellä, että esimerkiksi sairaudet ovat voineet heikentää kehon kudoksia jo valmiiksi, jolloin säteily saattaa vaikuttaa haitallisemmin.

Säteilyannoksien tutkimiseen säteilytyössä käytetään pääsääntöisesti ekvivalentti- ja efektiivisiä annoksia määrittämään turvalliset rajat työskentelylle (Marttila 2002, s. 77). Marttilan mukaan ekvivalenttiannos voidaan laskea, kun tiedetään keskimääräinen absorboitunut annos ja halutun elimen tai kudostyyppin reagointi säteilyyn. Efektiivinen annos on laskennallinen arvo koko kehon absorboimalle säteilylle, kun otetaan huomioon säteilyn komponentit ja kansainvälisen säteilysuojelukomission (ICRP, International Commission on Radiological Protection) määrittämät eri kudostyyppien painotuskertoimet, kuten kuvassa 5 (Marttila 2002, s. 83). Kuitenkin nämäkin ovat vain yleistyksiä, eikä painotuskertoimissa voida ottaa huomioon kudokseen vaikuttavia tekijöitä, kuten ikää, sukupuolta ja elintapoja. Yksinkertaistamalla on kuitenkin pystytty määrittämään keskimääräiset annosrajat, joita enempää säteilytyöntekijä ei saa säteilylle altistua.



Kuva 5 Havainnekuva säteilyn komponenttien ja kudosten painotuskertoimien vaikutuksesta säteilyannoksien laskentaan. (perustuu lähteeseen Marttila 2002, s. 83)

Työskentelytilojen suunnittelussa voidaan käyttää apuna annosekvivalenttia. Tämä eroaa ekvivalenttiannoksesta siten, että se ei ota huomioon tilastollisia elementtejä, vaan siinä oletetaan, että säteily absorboituu tällöin pistemäiseen massa-alkioon. Annosekvivalentin määrityksessä käytetään 200 keV:n röntgensäteilyä. (Marttila 2002, s. 77). Toisen suunnittelua tukeva mittaustapa on fantomi. Tällä menetelmällä voidaan havaita kehoon absorboitunut annos ja säteilyn jakautuminen kehon eri osien välillä. Fantomi on ihmiskehon muotoinen, palikoista koottu tutkimusväline, joka on tehty ihmiskudosta vastaavasta materiaalista. (Marttila 2002, s. 83–84)

3.3 Säteilyannosten vertailu

Vertailua eri säteilyöntekijöiden välillä on haastavaa tehdä, sillä säteilyä voidaan mitata monin erilaisin keinoin, kuten aikaisemmin on kerrottu. Vertailemalla efektiivisiä annoksia keskenään otetaan huomioon kaikki säteilyn haitallisuuteen vaikuttavat tekijät. Pelkäämään absorboituneita annoksia vertailemalla jäisi ottamatta huomioon säteilyn lajin vaikutukset sekä kehon eri kudostyyppien säteilyherkkyys. Ei ole myöskään mielekästä vertailla vain tiettyyn elimeen kohdistuvaa säteilyä, kun säteilytyössä koko keho altistuu säteilylle eikä vain yksittäinen elin. Toisaalta joissain tapauksissa saattaa olla myös relevanttia vertailla annosnopeuksia, jolloin vertaillaan ihmisen tietyn ajan sisällä saamaa efektiivistä säteilyannosta (STUK 2021). Annosnopeuden yksikkö on usein Sv/h, mutta säteilyöntekijöiden annosrajoja tarkasteltaessa puhutaan usein myös vuosisaannosta (Sv/a).

Efektiivisiä annoksia tarkasteltaessa normaaliin väestöön kuuluvan henkilön säteilyrajaksi on määritelty 1 mSv vuodessa. Säteilyöntekijällä vuosisaanto saa kuitenkin olla jopa 50-kertainen. Säteilytyössä rajat on määritelty siten, että keskimääräinen vuosisaanto viiden vuoden ajalta ei saa olla yli 20 mSv:iä eikä yksittäisenä vuonna säteilyannos saa ylittää 50 mSv:iä. (Pukkila 2004, s. 311) Yleensä säteilyannokset ilmoitetaan efektiivisinä annoksina tai annosnopeuksina. Vertailu eri lähteistä peräisin olevien säteilyannosten välillä voidaan tehdä monien suureiden tai yksiköiden avulla, mutta eri suureet eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Taulukkoon 1 on koottu luonnon taustasäteilyn, yleisten lääketieteellisten kuvantamisien, lentomatrustamisen ja säteilytyön aiheuttamat efektiiviset annokset.

Taulukko 1 Eri säteilylähteiden aiheuttamia efektiivisiä annoksia. (sovellettuna lähteistä Tapiovaara et al. 1988, s. 249; Pukkila 2004, s. 312; STUK 2021)

Yksittäisten tapahtumien efektiiviset annokset	E (mSv)	Oireet tai altistuksen syy
	6 000	vuorokaudessa saatuna saattaa johtaa kuolemaan
	1 000	säteilytauti-oireita
	0,1	keuhkojen röntgenkuvaus
	0,08	säteilytyöntekijän keskimääräinen päivittäinen annosraja (laskettu vuotuisesta annosrajasta jakamalla keskimääräisellä työpäivien määrällä vuodessa (258))
	0,01	hampaiden röntgenkuvaus
Vuodessa kertyvät efektiiviset annokset	E (mSv)	
	50	säteilytyöntekijän annosraja
	20	säteilytyöntekijän annosraja viiden vuoden keskiarvona
	5,2	väestön normaalisaanti (esim. luonnon taustasäteily)
	2	lentohenkilökunnan vuosisaanti
0,7	lääketieteellisistä kuvauksista johtuva keskimääräinen vuosisaanti potilaalle	

Efektiivistä annosta ei voida mitata suoraan ilmasta millään mittarilla, mutta henkilöannosekvivalentti ja pinta-annos voidaan mitata kehosta, eritteistä tai näytteistä. Laskennallisessa efektiivisen annoksen kertymässä otetaan huomioon suun ja hengityksen kautta kehoon ajautuneiden radioaktiivisten aineiden aktiivisuus ja annosmuuntokertoimet sekä henkilön ikä. Laskennallinen arvo efektiiviselle annokselle voidaan laskea kaavalla

$$E(\tau) = \sum_j h(g)_{j,s} \cdot J_{j,s} + \sum_j h(g)_{j,h} \cdot J_{j,h} \quad (1)$$

jossa E on efektiivinen annos, τ on aika, jona kertymä määritetään, $h(g)$ on kehoon joutuneen radionuklidin j annosmuuntokerroin ikäryhmään g kuuluvalla ihmisellä ja J on kehoon päätyneen radionuklidin aktiivisuus. Alaindeksit s ja h viittaavat suuhun ja hengitykseen. (ST-ohje 7.2 2014, s. 5; ST-ohje 7.3 2014, s. 3) Käytännössä siis taulukon 1 arvot ovat vain arvioita, sillä esimerkiksi ikäryhmät ovat hyvin laajoja eivätkä ne ota huomioon yksittäisen henkilön terveystietoja.

Efektiivisten annosten lisäksi vertailua voidaan suorittaa käyttämällä annosnopeuksia eri alueilla ja eri tilanteissa. Annosnopeutta voidaan mitata suoraan ilmasta käyttäen joko yleis- tai perusmittaria (VAL-ohje 4 2008, s. 7–8). Taulukossa 2 on koottuna vertailuarvoja annosnopeuksien suhteen.

Taulukko 2 Säteilyn annosnopeuksia eri alueilla ja työympäristöissä. (perustuu lähteisiin ST-ohje 5.6 2012, s. 6; STUK 2021)

Tarkasteltava kohde	Annosnopeus ($\mu\text{Sv/h}$)
Valvonta-alue	60
Tarkkailualue	7,5
Lentäminen 10 km korkeudessa	5
Luonnon taustasäteily	0,04–0,30

4. TYÖSUOJELU

On välttämätöntä, että säteilytyölle on säädetty lakeja ja että siihen on tiukat standardit. Jos näin ei olisi, voisi työstä aiheutua mittavia haittoja niin yksilöille, yrityksille kuin yhteiskunnallekin. Säteilytyöntekijöiden terveydentilaa on seurattava normaalia tarkemmin ja heidän soveltuvuutensa työhön tulee arvioida hyvin perusteellisesti. Säteilylaissa on määritelty, kuinka usein säteilytyöntekijöillä tulee olla terveystarkastuksia ja millaista säteilynsuojelua heidän tulee käyttää.

Säteilytyösuojelu perustuu edelleen vanhoihin kolmeen peruseriaatteeseen: aikaan, etäisyyteen ja säteilynsuojaukseen (Hellier 2020, luku 6.8). Yksinkertaistettuna säteilynsuojelu on siis mahdollisimman lyhyt altistusaika, mahdollisimman kaukana säteilylähteestä ja työskentelyä vain tarpeeksi paksun ja aukottoman suojauksen takana. Suomessa STUK on lisäksi määrittänyt, ettei kuvausta pidä suorittaa, jos työntekijän säteilyannos ylittyy, ja tämän lisäksi käytössä ovat myös oikeutus- ja ALARA-periaatteet (engl. As Low As Reasonably Achievable). Oikeutusperiaatteella tarkoitetaan sitä, että kuvausta ei tule suorittaa, jos siitä aiheutuva haitta on suurempi kuin siitä saatava hyöty ja ALARA-periaate tarkoittaa, että säteilyaltistus on pidettävä mahdollisimman alhaisena. (ST-ohje 1.1 2013, s. 3)

4.1 Työterveys ja säteilytyöluokat

Työterveys on erityisen merkityksellinen, kun puhutaan säteilytyöstä ja siksi sille on määritetty erillinen laki ja asetus. Käytännössä työterveystarkkailun tarkoituksena on varmistaa työntekijän soveltuvuus työhön tai määrittää, voiko kyseinen työntekijä edelleen jatkaa säteilytyössä ja miten säteily vaikuttaa työntekijän terveyteen, jos annosrajan epäillään ylittyvän (ST-ohje 7.5 2014, s. 3). Vastuu työturvallisuudesta on työnantajalla, jolloin sillä on velvollisuus järjestää työtarkkailua ja nimetä vastaava lääkäri.

Työnantajan tulee myös jaotella työntekijät säteilytyöluokkiin A ja B (ST-ohje 7.5 2014 s. 3). Säteilytyöluokkaan A kuuluvat työntekijät, joiden efektiivinen annos voi olla suurempi kuin 6 mSv vuodessa tai silmän mykiön, raajojen tai ihon ekvivalenttiannos on suurempi

kuin kolme kymmenesosaa niille määritellyistä annosrajoista. B-luokkaan kuuluvat kaikki muut säteilytyöntekijät. (Pukkila 2004, s. 312–313). Erottelu on tarpeellista, sillä A-luokan työntekijät altistuvat huomattavasti suuremmille säteilyannoksille, ja siten heidän terveytensä on huomattavasti alttiimpi haitallisille vaikutuksille.

Säteilytyöluokkaan A kuuluvat henkilöt käyvät viranomaisen hyväksymän työterveyslääkärin alkutarkastuksessa ja mahdollisesti uudessa tarkastuksessa, mikäli työnkuva muuttuu merkittävästi (ST-ohje 7.5 2014, s. 3–4). Tarkastuksissa käydään läpi muun muassa työntekijän sairaushistoria, tehdään laboratoriotutkimuksia ja esimerkiksi keuhkojen tai munuaisten kunto tarkastetaan, jos työnkuva sitä vaatii. Alkutarkastuksen jälkeen säteilytyöluokkaan A kuuluvalla työntekijällä pitää antaa mahdollisuus käydä vuosittain terveystarkastuksessa, mutta pakollisia tarkastuksia on kolmen vuoden välein. Välivuosina työterveyslääkäri on velvollinen tarkastamaan työntekijän säteilyaltistusmäärät ja työntekijän pitää tehdä kirjallinen ilmoitus terveydentilastaan. Vastaavan lääkärin täytyy olla aina ajan tasalla työtehtävien tai työntekijän terveydentilan muutoksista, joiden perusteella vastaava lääkäri voi määrätä ylimääräisiä tarkastuksia. (ST-ohje 7.5 2014, s.5–6)

Säteilytyöluokkaan B kuuluvalla työntekijällä on myös alkutarkastus, mutta sen ei tarvitse olla yhtä kattava kuin A-luokan tarkastuksen. Säteilytyöluokan B työntekijälle ei ole myöskään määritetty säännöllisiä terveystarkastuksia, eikä työterveyslääkärin ole pakko olla viranomaisten hyväksymä. (ST-ohje 7.5 2014, s. 8) Alkutarkastus myös B-luokan työntekijöille on kuitenkin perusteltua, sillä he voivat saada jopa kuusinkertaisen säteilyaltistuksen verrattuna normaaliin väestöön. Alle 18-vuotiaita työntekijöitä ei varsinaisesti luokitella kumpaankaan säteilytyöluokkaan, mutta heitä on kuitenkin suojeltava vähintään samoin menetelmin kuin B-luokan työntekijöitä (Pukkila 2004, s. 313).

Työntekijän työskentelyä säteilytyössä voidaan rajoittaa, jos työntekijä on raskaana tai imettää, hän on altistunut huomattavasti annosrajoja suuremmalle säteilymäärälle, saanut sairauskohtauksen (ST-ohje 7.5 2014, s. 4, 6, 10), tai hän on alle 18-vuotias (Pukkila 2004, s. 313). Säteilytyön edellytykset ovat turvallinen työympäristö, toimiva ja huollettu laitteisto sekä koulutettu henkilökunta. Säteilyturvakeskuksen säännöstössä painotetaan työntekijän ymmärrystä työn vaativuudesta, riskeistä ja vaikutuksista niin itsen kuin ym-

päristöönkin sen sijaan, että keskityttäisiin pelkästään terveystarkastusten läpäisemiseen. Säteilytyössä työntekijän oma asenne on tärkeä osa toimivaa säteilysuojelua. (ST-ohje 7.5 2014, s. 10)

4.2 Valvonta- ja tarkkailualueet

Valvonta- ja tarkkailualueiden koot riippuvat siitä, tehdäänkö kuvaus suljettuna vai avoimena asennuksena, eli toisin sanoen siitä, tapahtuuko kuvaus eristetyssä kuvaushuoneessa vai sen ulkopuolella. Avoin asennus tarkoittaa tilannetta, jossa kuvaus tapahtuu kuvaushuoneen ulkopuolella eristetyllä ja valvotulla alueella (ST-ohje 5.6 2012, s. 6). Suljetussa asennuksessa kuvauslaitetta pystytään hallinnoimaan kuvaushuoneen ulkopuolelta ja täten työskentely on usein turvallisempaa eikä ulkopuolisia ihmisiä joudu säteilykeilan alueelle vahingossa (ST-ohje 5.6 2012, s. 7). Eri kuvausasennukset vaativat erilaiset suojaustoimenpiteet.

Riippumatta kuvausasennuksesta, on molemmissa määritetty valvonta- ja tarkkailualueet ja niiden suurimmat sallitut vuosi-, efektiiviset ja ekvivalenttiannokset sekä annosnopeudet. Tarkkailualueeksi luokitellaan alueet, joissa työntekijä altistuu säteilylle, mutta joita ei luokitella valvonta-alueiksi. Tarkkailualueella esimerkiksi efektiivinen annos saa ylittää arvon 1 mSv vuoden aikana. (ST-ohje 1.6 2009, s. 7) Avoimessa asennuksessa tarkkailualueeksi lasketaan alue, jossa annosnopeus ylittää arvon 7,5 $\mu\text{Sv/h}$, kun taas suljetussa asennuksessa on määritetty, ettei kyseinen arvo saa ylittyä missään tapauksessa kuvaushuoneen ulkopuolella. (ST-ohje 5.6 2012, s. 6–7)

Valvonta-alueeksi luokitellaan avoimessa asennuksessa alue, jossa annosnopeus voi ylittää arvon 60 $\mu\text{Sv/h}$. Suljetussa asennuksessa valvonta-alueeksi luokitellaan kuvaushuone, eikä sille ole erikseen määritelty maksimiannosnopeuksia, kunhan annosnopeudet eivät huoneen ulkopuolella ole suurempia kuin 7,5 $\mu\text{Sv/h}$. (ST-ohje 5.6 2012, s. 6–7) Valvonta-alueella efektiivinen annos voi olla suurempi kuin 6 mSv vuodessa ja tämän takia valvonta-alueille on asetettu tiettyjä edellytyksiä työntekijöiden ja sivullisten suojaamiseksi. Tärkeimpiä näistä ovat valvonta-alueen merkitseminen, säteilymittarit ja mahdolliset henkilökohtaiset mittarit, suojavaatteet sekä säteilylähteiden riittävät merkinnät. (ST-ohje 1.6 2009, s. 7) Teollisuusradiografiassa kaikki säännöllisesti valvonta-alueella työskentelevät sijoitetaan säteilytyöluokkaan A (ST-ohje 1.6 2009, s. 20).

Valvonta-alueelle ei saa päästää ketään kuvausryhmän ulkopuolisia, ei edes silloin, kun kuvaus ei ole käynnissä. Myös tarkkailualueella työskentely ja oleskelu on kiellettyä, mutta ohikulku on sallittua. Kuvauspaikan läheisyydessä sijaitsevilla oleskelutiloissa tulee ottaa huomioon, ettei yksittäisen sivullisen työntekijän vuosiansio saa ylittää arvoa 0,3 mSv. (ST-ohje 5.6 2012, s. 6) Työpaikalla voi olla sekä tarkkailu- että valvonta-alueita, vain toisia näistä, ne voivat olla hajautettuna tai ne voivat olla tilapäisiä (ST-ohje 1.6 2009, s. 7). Käytännössä tämä voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että kuvattava kohde on fyysisiltä ominaisuuksiltaan sellainen, ettei sitä voida kuvata erillisessä huoneessa, eikä kuvauksia tarvitse välttämättä tehdä joka päivä. Tällöin tuotantotilaan voidaan asettaa tilapäiset valvonta- tai tarkkailualueet.

4.3 Fyysiset suojausmenetelmät työpaikalla

Fyysisillä suojausmenetelmillä pyritään suojelemaan niin säteilytyöntekijöitä kuin sivullisia työntekijöitäkin ja samalla säteilyn alaisista alueista pyritään tekemään suojattuja ja helposti vältettäviä. Fyysisiä suojausmenetelmiä ovat esimerkiksi suojavaatteet, lyijyseinät ja varoitusvalot. Säteilytyöntekijöiden on käytettävä suojavaatteita ja -hanskoja, jos työnkuvaan kuuluu kontaminaatoriski radioaktiivisen aineen käytön takia (ST-ohje 1.6 2009, s. 13). Kaikki säteilynsuojelusuunnitelmat tulee hyväksyttävä STUK:lla ja tarvittaessa se myös auttaa suunnitelman laatimisessa (ST-ohje 1.6 2009, s. 4).

Tiloissa, joissa on mahdollista altistua säteilylle, on oltava säteilystä varoittavat kyltit sijoitettuna esimerkiksi ovenpieliin. Lisäksi voidaan käyttää valkoista tai keltaista valoa silloin, kun alueelle ei ole suositeltavaa mennä ja punaista valoa silloin, kun alueelle ei saa mistään syystä mennä muut kuin säteilytyöntekijät. Jos kuvaus tapahtuu suljetussa asennuksessa, täytyy valvonta-alue rajata ulkopuolisilta esimerkiksi lukituilla ovilla ja kulunvalvonnalla. (ST-ohje 1.10 2011, s. 6) Lisäksi säteilylähteen suojausäiliössä tulee olla lukituslaitte (ST-ohje 5.6 2012, s. 5). Avoimessa asennuksessa tehtävän kuvauksen ajaksi kuvausalue, eli valvonta-alue, on rajattava ulkopuolisilta työntekijöiltä käyttäen esimerkiksi puomeja tai lippusiimaa, jos kuvauspaikka ei ole tarpeeksi avoin siihen, että sitä voitaisiin tehokkaasti valvoa (ST-ohje 5.6 2012, s. 6).

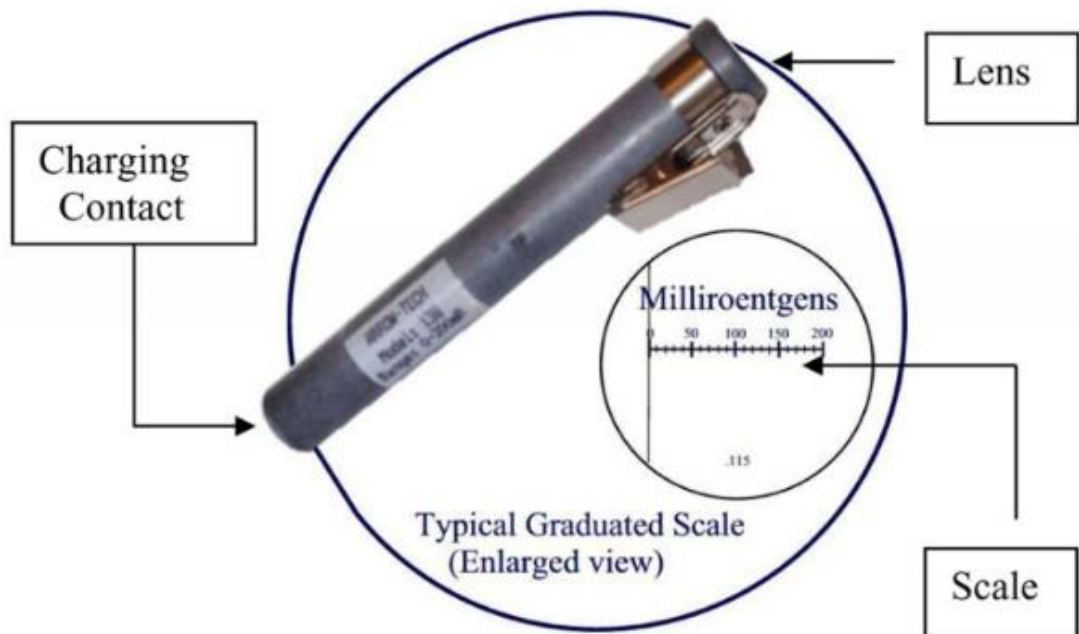
Kuvauksen aikana täytyy tietyissä tapauksissa avoimessa asennuksessa käyttää siirreltäviä seiniä, jotka ovat useimmiten tehty lyijystä tai betonista. Näillä seinillä pyritään estämään säteilyn leviäminen ympäristöön. Primäärisäteilykeilaa voidaan rajata rajoittimien ja suuntauspuikkojen avulla, mutta joissakin tapauksissa kuvattavan kohteen takia primäärisäteilyä ei pystytä rajaamaan pelkästään kuvausalueelle. Tällöin siirreltävä suojaus on oltava välittömästi kuvauskohteen takana. (ST-ohje 5.6 2012, s. 6) Primäärisäteilyn lisäksi työntekijöitä pitää suojata sironneelta säteilyltä, jonka annosnopeus voi olla huomattavan suuri odottamattomalla alueella (ST-ohje 1.10 2011, s. 4).

Säteilysuojelua suunniteltaessa tulee ottaa huomioon annosrajoitukset, jotka voidaan mitata tietyistä paikasta säteilymittareilla. Lisäksi on määritelty suunta- ja oleskelutekijät, jotka ovat skaalattu kertoimien 0,1 ja 1 välille sen mukaan, paljonko primäärisäteilyä on odotettavissa tiettyyn suuntaan. Säteilylaitteen toimintajännite sekä säteilyn kenttäkoko ja annosnopeus vaikuttavat merkittävästi suojauksen suunnitteluun, mutta näidenkin arviointiin pystytään käyttämään pelkästään odotettavissa olevia arvoja. Suositeltavaa on sijoittaa säteilylähteet siten, ettei lähistöllä ole muuta toimintaa, tai että säteilyä ei kohdistettaisi säännöllisessä käytössä oleviin tiloihin. Suunniteltaessa suojausta pitää erilaiset rakenteiden heikot kohdat pystyä ottamaan huomioon mahdollisimman hyvin. Tällaisiksi kohdiksi luokitellaan esimerkiksi ikkunat ja ovet, tai betonisuojauksessa olevat ontelot. (ST-ohje 1.10 2011, s. 4–5) Omakohtaisen työkokemuksen perusteella hyviä suojelukäytänteitä ovat myös kuvaaminen ainoastaan muiden työntekijöiden taukojen aikaan ja taukotiloihin sijoitetut varoitusvalot, jotka kertovat kuvauksen olevan vielä käynnissä, eikä tuotantotilaan saa tällöin mennä. Lisäksi taukotiloihin oli sijoitettu annosmittarit, joita tarkkaillaan tietyin väliajoin ja varmistetaan, että taukotila on turvallinen myös kuvausten ollessa käynnissä.

4.4 Dosimetria

Dosimetria on tieteenala, joka mittaa säteilyä ja dosimetri on tähän tarkoitukseen käytetty mittalaite (TEPA-termipankki 2023). Dosimetria voidaan jakaa ryhmä- ja yksittäistarkkailuun, joita käytetään joko työpaikan työolojen tutkimiseen tai yksittäisen työntekijän annostarkkailuun. Ulkoista säteilyä tulee mitata teollisuusradiografiassa kaikilla säteilytyöntekijöillä henkilökohtaisilla annosmittareilla, jotka yleensä sijoitetaan työvaatteiden ulkopuolelle rintaan. Lisäksi säteilylaki määrää, että säteilytyöntekijöiden tulee käyttää säteilyhälytintä tai hälyttävää annosmittaria. Mittarit ovat yleensä kiinni työntekijän rinnassa,

jotta kaikki säteily tallentuisi esteettömästi ja vaimentumattomasti. Dosimetri voi olla esimerkiksi kuvan 6 kaltainen kynän mallinen taskumittari. Jos pitää saada selville esimerkiksi silmän tai sormien altistus säteilylle, tarvitaan mittareita myös muualle kehoon. (ST-ohje 7.1 2014, s. 5–7)



Kuva 6 Kyseinen taskudosimetri pystyy havaitsemaan röntgen- ja gammasäteilyä, joiden sisältämä energia on välillä 16–2 000 keV (RPD 2023)

Säteilytyöluokkaan A kuuluvilla työntekijöillä täytyy järjestää henkilökohtainen annostarkkailu, ja sen pitää ottaa huomioon niin ulkoinen kuin sisäinenkin säteily (ST-ohje 7.1 2014, s. 5). Kuten työssä aikaisemmin todettiin, käytännössä kaikki teollisuusradiografian parissa työskentelevät säteilytyöntekijät kuuluvat A-luokkaan. Säteilyannostarkkailu on heillä tehtävä kuukauden jaksoissa (ST-ohje 5.6 2012, s. 3). Henkilökohtaisia mittareita on erilaisia, ja ne soveltuvat eri käyttötarkoituksiin tai niillä voidaan mitata erityyppistä säteilyä. Jokaisessa säteilyn ilmaisimessa toimintaperiaate on sama: säteily ionisoi mittalaitteessa olevan väliaineen atomeja aiheuttaen väliaineeseen muutoksia, joita voidaan myöhemmin tulkita (Klemola 2002, s. 116).

Filmidosimetrit koostuvat kalvoista ja suodattimista, jotka pystyvät havaitsemaan säteilyä laajalla energia-alueella ja niistä voidaan tunnistaa säteilyn tyyppi. Filmidosimetrien tiedot pitää käsitellä laboratoriossa, ja vaikka tämä on aikaa vievä prosessi, on menetelmä silti yksi tärkeimmistä tietolähteistä työntekijän säteilyannoksia tarkkailtaessa. Usein juuri filmidosimetrialla kerätään tietoja työntekijän henkilökohtaiseen terveystiedostoon. (Hellier 2020, luku 6.8) Tiedostoon kerätään kaikki tiedot teollisuudessa työskentelevän työntekijän jo aiemmin tehdyistä säteilytöistä, säteilyseurantadata ja tarpeelliset terveydelliset tiedot. Tiedostoa on säilytettävä vielä vuosikymmeniä työn päätyttyäkin. (ST-ohje 7.5 2014, s. 7)

Muita laajassa käytössä olevia mittareita ovat ionisaatiokammiot, joista säteilyaltistus voidaan lukea suoraan laitteesta, ja ne ovat käytännöllisiä käyttää teollisuudessa pienen kokonsa ansiosta. Myös termolosteilmäsimet soveltuvat tuotanto-olosuhteisiin, sillä tiedot voidaan lukea nopeasti ja niitä voidaan käyttää uudelleen, toisin kuin esimerkiksi filmidosimetrin filmi on vaihdettava tietojen keruun yhteydessä. Fotoluminesenssilasiin puolestaan muodostuu fluoresoivia alueita niiden altistuessa säteilylle ja näitä alueita voidaan myöhemmin tutkia ultraviolettivalolla. (Hellier 2020, luku 6.8) Klemola (2002, s. 120–130) esittelee lisäksi muita säteilymittarityyppejä, jotka voidaan luokitella kaasutäyteisiin, tuike- ja puolijohdeilmäsimiin. Suurimpia eroja eri ilmaisimien välillä ovat niiden reagoitiherkkyys säteilyyn, toiminnan nopeus ja käyttöikä (Klemola 2002, s. 121–122, 126).

Säteilyturvakeskuksen mukaan työnantaja on velvoitettu hankkimaan jokaiselle kuvausryhmälle annosnopeusmittarin ja varmistamaan, että ne ovat asianmukaisesti kalibroidut ja jäljitettävissä. Lisäksi jokaisen säteilytyöntekijän varustukseen kuuluu henkilökohtainen annosmittari ja säteilyhälytin. Hälyttimen tarkoituksena on varoittaa liian suureksi kasvaneesta annosnopeudesta. (ST-ohje 5.6 2012, s. 4)

4.5 Pätevöittäminen ja säteilysuojelukoulutus

Säteilysuojelukoulutuksen yksi tärkeimmistä tehtävistä turvallisten toimintatapojen varmistamisen lisäksi on vaikuttaa työntekijöiden asenteisiin työturvallisuutta kohtaan (Hellier 2020, luku 6.8). Jokaisessa teollisuusalan yrityksessä, jossa tarkastus voidaan suorittaa radiografisin menetelmin, pitää olla nimettynä siitä vastaava johtaja, joka täyttää pätevyysvaatimukset. Vastaava johtaja on vastuussa työpaikalla käytettävistä laitteista

ja niiden toimintakunnosta, säteilyturvallisuudesta ja sen riittävydestä, säteilyonnettomuuksien riskien tunnistamisesta sekä työntekijöiden opastamisesta. (ST-ohje 1.6 2009, s. 3–5)

Radiografisia tarkastuksia suorittavien henkilöiden tulee käydä läpi tietyt koulutukset ennen kuin heidät voidaan päteväittää työhön. Koulutuksia järjestetään kolmella eri pätevyystasolla: taso 1 kouluttaa tarkastajan toimimaan korkeamman tason tarkastajan valvonnassa, tason 2 tarkastaja voi suorittaa ja valvoa tarkastuksia sekä valita käytettävän NDT-tekniikan ja tason 3 koulutuksen käynyt tarkastaja voi toimia edellä mainittujen tehtävien lisäksi myös vastaavana johtajana. Kullekin tasolle on määritelty tarvittava määrä koulutuspäiviä ja esimerkiksi suoraan tasolle 3 pyrkivän tarkastajan on käytävä vähintään 20 päivää koulutusta. (SFS-EN ISO 9712:2022, s. 17–19) Koulutuspäivien lisäksi tarkastajaksi pyrkivällä pitää olla käytännön kokemusta tasosta riippuen 45–540 tuntia (SFS-EN ISO 9712:2022, s. 20).

Kouluttautumisen lisäksi pätevoitymiseen ja sertifiointiin tarvitaan tutkinto, joka koostuu teoriaosuudesta ja käytännön kokeista. Tutkintojen laajuus ja sisältö määräytyy suoritettavan tason mukaan. Sertifiointi on voimassa enintään viisi vuotta kerrallaan ja ylemmän tason sertifiointia voi hakea suorittamalla tasoon vaadittavat puuttuvat tutkinnon osat. (SFS-EN ISO 9712:2022, s. 22–23, 28) Lisäksi työntekijältä vaaditaan riittävä näkökyky ja erityisesti eri harmaan sävyjen tunnistaminen on tärkeää kuvia tulkittaessa. Lähinäkökyky tulee pystyä osoittamaan vuosittain ja todistus värinäkökyvystä saa olla enintään 5 vuotta vanha ennen sertifiointia. (SFS-EN ISO 9712:2022, s. 21)

5. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tutkia kirjallisuuslähteiden avulla röntgen- ja gammasäteilyn, eli radiografian, vaikutusta työturvallisuuteen metalliteollisuudessa paineenalaisia hitsaus- saumoja tarkastettaessa. Työn alussa esiteltiin radiografiaa teoreettisesti, jossa keskityttiin säteilyn tuottamiseen sekä sen vastaanottamiseen, sillä näiden ymmärtäminen on oleellista säteilyturvallisuutta pohdittaessa.

Seuraavaksi työssä käsiteltiin ionisoivan sähkömagneettisen säteilyn vaikutusta ihmisen terveyteen. Säteily saattaa aiheuttaa monia erilaisia sairauksia, joista yleisimpiä esiteltiin työssä. Myös niiden syntymekanismeista kerrottiin hieman. Tämän jälkeen käytiin läpi säteilylaissa määritellyt säteilytyöntekijöiden annosrajat ja erilaisia tapoja määrittää kehoon päätynyttä säteilyä. Säteilyannoksen laskemiseen voidaan käyttää esimerkiksi säteilyn komponenttien kertoimia tai kuduskertoimia sen mukaan, halutaanko laskea absorboitunut annos, yksittäisen elimen saama annos vai altistumisen määrä koko keholle. Efektivistä annosta laskettaessa otetaan kaikki eri kertoimet huomioon, joten vertailussa eri säteilytyöntekijöiden saamien annosten välillä päädyttiin käyttämään koko elimistön efektiivisiä annoksia. Vertailussa oli mukana myös yleisimmät lääketieteelliset toimenpiteet sekä luonnosta peräisin oleva säteily, jotta säteilyannoksien suuruuksien hahmottaminen olisi helpompaa.

Viimeisenä työssä käsiteltiin työsuojelua ja siihen liittyvää säännöstöä. Työturvallisuus säteilytyössä pohjautuu säteilylakiin, jonka perusteella STUK julkaisee ohjeita, jotka ovat helpompilukuisia kuin lakipykälät. Työntekijät jaotellaan lain mukaan säteilytyöluokkiin A ja B, ja työskentelyalueet valvonta- ja tarkkailualueisiin. Sekä työluokat että alueet määritellään saatavan säteilyn perusteella, jonka mukaan määräytyvät esimerkiksi työterveyshuollon laajuus ja suojausmenetelmät. Näihin menetelmiin kuuluvat työympäristössä esimerkiksi liikuteltavat lyijyseinät ja säteilymittarit. Henkilökohtaisten ja ryhmämittareiden lisäksi on myös aluekohtaisia mittareita, joilla voidaan varmistaa säteilytyön ulkopuolisten työntekijöiden turvallisuus. Säteilytyöntekijöiden tulee käydä koulutuksia, joita järjestetään kolmella eri tasolla, ja koulutuksen jälkeen he saavat pätevyyden suorittaa kuvauksia, suunnitella niitä tai toimia vastaavana johtajana. Koulutuksen lisäksi pätevoittämiseen kuuluu todistus näkökyvystä, tarpeeksi käytännön työkokemusta sekä läpäisty tutkinto.

Säteilytyöntekijöille on määritetty annosrajat säteilylaissa ja näiden arvioidaan olevan turvalliset suurimmalle osalle työntekijöistä. Säteily ei kuitenkaan aina kohdistu kehoon tasaisesti, joka vaikeuttaa merkittävästi säteilysuojelua ja saattaa aiheuttaa yllättäviä muutoksia solujen toimintaan. Käytännössä kaikki teollisuuden säteilytyöntekijät luokitellaan säteilytyöluokkaan A, jolloin heillä on huomattavasti enemmän työterveyskäyntejä ja laajempia tutkimuksia kuin muilla työntekijöillä. Teollisuuden säteilytyöntekijöiden terveydentila arvioidaan huolellisesti ennen työn aloittamista, mutta myös työuran aikana ja henkilö voidaan jos tahansa poistaa säteilytyöstä, jos terveyden huomataan vaarantuvan.

Säteilytyötä tekevien työturvallisuuteen vaikuttavat paljon myös suojausmenetelmät, sillä ne saattavat hidastaa työntekoa tai tuntua turhilta, koska säteilyä ei pysty aistimaan. Säteilytyöntekijät ovat kuitenkin oman turvallisuutensa lisäksi vastuussa myös muiden työntekijöiden ja väestön terveydestä, sillä säteilyonnettomuudet vaikuttavat myös työpaikan ulkopuolisiin henkilöihin. Tämän vuoksi säteilykoulutuksessa painotetaan osaamisen lisäksi myös huolellista ja aidosti kiinnostunutta asennetta säteilysuojelua kohtaan.

LÄHTEET

Campbell, F. (2013) *Inspection of metals: understanding the basics*. Materials Park: ASM International.

Castrén, O. & Annanmäki, M. (1988) Luonnonsäteily. Teoksessa H. Toivonen, T. Rytömaa & A. Vuorinen (toim.) *Säteily ja turvallisuus*. Säteilyturvakeskus, Helsinki, s. 197–222.

Deprins, E. (2004) *Computed radiography in NDT applications*. Insight, Northampton. Vol. 46 (10), s. 590–593.

Harjula, H. (2012) Citius-altius-fortius- NDT menetelmien kehitys tarkoittaa uusia mahdollisuuksia. *Inspecta Oy*. Saatavissa (viitattu 22.1.2023): https://shy.fi/portals/shy/iBooklet/2012/ht_4_12/files/assets/basic-html/page73.html

Hellier, C. (2020) *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 3E. Kolmas painos. McGraw-Hill Education, New York, N.Y.

Iowa State University (2023). *Radiography testing*. Saatavissa (viitattu 10.3.2023): <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Radiography/index.xhtml>

I.TEC (2023). *Digital Radiography Solutions for NDT Applications*. Saatavissa (viitattu 4.5.2023): <https://itecingeneria.com.ar/digital-radiography-solutions-for-ndt-applications/>

Jayaraman, T. (2018) *Principles of Radiography*. Teoksessa A. Ahmad & L. Bond (toim.) *Nondestructive Evaluation of Materials*. ASM International, s. 383–409.

Klemola, S. (2002) Säteilyn ilmaisimet. Teoksessa T. Ikäheimonen (toim.) *Säteily ja sen havaitseminen*. Säteilyturvakeskus, Helsinki, s. 116–134.

Kulkas, M. (2022) Selkeä visio ja pitkäjänteinen työ on nostanut Kiwa Inspectan digitaalisen radiografian osaamisen maailman huipulle, *Hitsaustekniikka*, nro. 6, s. 15–17.

Marttila, O. (2002) Suureet ja yksiköt. Teoksessa T. Ikäheimonen (toim.) *Säteily ja sen havaitseminen*. Säteilyturvakeskus, Helsinki, s. 66–92.

Mustonen, R. & Salo, A. (2002) Säteily ja solu. Teoksessa W. Paile (toim.) *Säteilyn terveysvaikutukset*. Säteilyturvakeskus, Helsinki, s. 28–42.

Nikkola, J., Jokela, T. & Seppälä, T. (2023) Miten ja miksi syöpä leviää?, Duodecim, nro 139, s. 193–202. <https://www.duodecimlehti.fi/duo17544>

Paile, W. (2002) Säteilyn terveystvaikutukset. Säteilyturvakeskus, Helsinki.

Pukkila, O. (2004) Säteilyn käyttö. Säteilyturvakeskus, Helsinki.

RPD. (2023) Direct Reading Dosimeter. Saatavissa (viitattu 4.4.2023): <https://www.rpdinc.com/direct-reading-dosimeter-1263.html>

SFS-EN ISO 9712:2022 (2022) Rikkomaton aineenkoetus. NDT-henkilöiden pätevänti ja sertifiointi. Yleisperiaatteet, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, Helsinki, 94 s.

SFS-EN 12952-6:2021:en. (2021) Water-tube boilers and auxiliary installations. Part 6: Inspection during construction, documentation and marking of pressure parts of the boiler, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, Helsinki, 31 s.

STUK. (2020) Ionisoiva säteily. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on/ionisoiva-sateily>

STUK. (2021) Esimerkkejä säteilyannoksista. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.stuk.fi/aiheet/sateilyvaara/esimerkkeja-sateilyannoksista>

ST-ohje 1.1 (2013) Säteilytoiminnan turvallisuus, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

ST-ohje 1.6 (2009) Säteilyturvallisuus työpaikalla, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

ST-ohje 1.10 (2011) Säteilylähteiden käyttötilojen suunnittelu, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

ST-ohje 5.6 (2012) Säteilyturvallisuus teollisuusradiografiassa, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

ST-ohje 7.1 (2014) Säteilyaltistuksen seuranta, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

ST-ohje 7.2 (2014) Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperusteet, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

ST-ohje 7.3 (2014) Sisäisestä säteilystä aiheutuvan annoksen laskeminen, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

ST-ohje 7.5 (2014) Säteilytyötä tekevien työntekijöiden terveystarkkailu, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

Tapiovaara, M., Järvinen, H., Asikainen, M., Kaituri, M. & Väisälä, S. (1988) Säteilyn käyttö lääketieteessä ja teollisuudessa. Teoksessa H. Toivonen, T. Rytömaa & A. Vuorinen (toim.) Säteily ja turvallisuus. Säteilyturvakeskus, Helsinki, s. 223–288.

TEPA-termipankki (2023) Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2023): <https://termipankki.fi/tepa/fi/>

VAL-ohje 4 (2008) Kannettavien säteilymittarien laatu- ja tarkastusvaatimukset, Säteilyturvakeskus, Helsinki.

Vishwanath, R. & Rohit, B. (2019) A Review on Inspection and Maintenance of FRP Structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 520 (1), 12003–

Väisälä, S., Korpela, H. & Kaituri, M. (2004) Säteilyn käyttö teollisuudessa ja tutkimuksessa. Teoksessa O. Pukkila (toim.) Säteilyn käyttö. Säteilyturvakeskus, Helsinki, s. 256–295.

Åström, T. (1990) NDT-menetelmien kehitysnäkymät hitsausliitosten tarkastuksessa. Metalliteollisuuden kustannus, Helsinki.