



ELEKTRONISEN DOSIMETRIN NEUTRONIKORJAUSKERTOIMEN MÄÄRITYS

Lappeenrannan-lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Sanni Tyni

Tarkastajat: TkT Elina Hujala

Julia Viljanmaa

Einari Mattila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Sanni Tyni

Elektronisen dosimetrin neutronikorjauskertoimen määrittäminen

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

32 sivua, 9 kuvaa, 6 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: TkT Elina Hujala, Julia Viljanmaa, Einari Mattila

Avainsanat: neutronisäteily, dosimetria, säteilyannos, korjauskerroin

Tämä kandidaatintyö on tehty Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilysuojeluorganisaatiolle. Loviisan voimalaitoksella otettiin vuoden 2019 lopulla käyttöön uusi, neutroniannosta mittaava moduuli, jonka tarkoituksena on antaa reaaliaikaista tietoa neutroniannosnopeudesta ja -annoksesta sellaisissa työtehtävissä, joissa mahdollisesti altistuu neutronisäteilylle. Monet säteilymittarit täytyy kalibroida korjauskertoimen avulla vastaamaan käyttökohteiden erilaisia säteilylähteitä. Tässä työssä jatketaan selvitystä korjauskertoimen määrittämiseksi neutronimoduuliin.

Korjauskertoimen määrittämiseksi voimalaitoksella tehtiin mittauksia, joissa testimittarit altistettiin neutronisäteilylle kolmessa eri kohteessa. Mittauksia toteutettiin kaksi kertaa jokaisessa paikassa, jotta tulokset olisivat luotettavampia. Korjauskertoimen määrittäminen on tärkeää, koska neutronimoduulin avulla voidaan tarkkailla työntekijöiden neutroniannosta lyhyellä aikavälillä ja siten esimerkiksi ehkäistä suuria yksittäisiä annoksia.

Neutronimoduuli ei mittaa virallisia säteilyannoksia vaan toimii apuvälineenä lyhyen aikavälin annos seurannassa.

Tehtyjen mittausten perusteella havaittiin, että moduulin näyttämät neutroniannokset olivat kaikissa kohteissa huomattavan paljon pienempiä verrattuna virallisiin neutroniannosmittareihin. Mittaukset onnistuivat kahdella kolmesta mittauspaikasta, ja näiden tulosten perusteella pystyttiin laskemaan mahdollinen uusi korjauskerroin, joka olisi sopiva käytettäväksi molemmilla laitoksilla.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ SISÄLLYSLUETTELO SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Loviisan voimalaitos	1
1.2	Säteily ydinvoimalaitoksella	1
1.3	Lähtökohdat	2
2	SÄTEILYANNOS	3
2.1	Säteily	3
2.2	Ulkoisen säteilyaltistuksen seuranta	4
2.3	Säteilyn suureet	5
2.3.1	Absorboitunut annos ja ekvivalenttiannos	5
2.3.2	Henkilöannosekvivalentti	6
2.3.3	Efektiivinen annos	6
3	NEUTRONISÄTEILY	7
3.1	Neutronisäteilyn lähteet ydinvoimalaitoksella	7
3.2	Neutronisäteilyn mittaaminen	8
3.2.1	Korjauskerroin neutronidosimetriassa	8
3.2.2	Termoloistedosimetri	9
3.2.3	Elektroninen dosimetri DMC 3000 N	11
3.2.4	Digipig/ 2222A neutroni-ilmaisim	13
4	MENETELMÄT NEUTRONIANNOSMITTAUKSIIN	15
4.1	Koejärjestelyt	15
4.1.1	Mittausvälineet	15
4.1.2	Mittauspaikkojen valinta ja alkumittaukset	16
4.2	Laskenta	20
4.2.1	Korjauskertoimen määrittäminen	20
5	TULOKSET	21
5.1.1	LO1 mittaustulokset	21
5.1.2	LO2 mittaustulokset	23
6	POHDINTA	24
6.1	Mittaustulosten analysointi	24
6.2	Mittausvirheen arviointi	26
6.2.1	Dosimetrien mittausepävarmuus	26
6.2.2	Mittausjärjestelystä aiheutuva virhe	26
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	28
8	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET	31

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

D	absorboitunut annos	[J/kg]	-
$H_{T,R}$	ekvivalenttiannos	[J/kg]	
H_p	henkilöannosekvivalentti	[J/kg]	
$D_{T,R}$	keskimääräinen absorboitunut annos	[Sv]	
w_R	säteilylajin laatukerroin	[-]	
w_T	elimien ja kudosten painotuskerroin	[-]	
E	efektiivinen annos	[Sv]	
m	massa	[kg]	

Kreikkalaiset

α	alfasäteily	[-]	
β	beetasäteily	[-]	
γ	gamma-säteily	[-]	
ε	keskimääräinen energian määrä	[J]	

Alaindeksit

R	säteilylaatu
T	kudoslaatu

Lyhenteet

ALARA	As Low as Reasonably Achievable
AmBe	Amerikium-beryllium
DNA	Deoksiribonukleiinihappo
ICRP	International Commission on Radiological Protection
LO1	Loviisa 1
LO2	Loviisa 2
STUK	Säteilyturvakeskus
TLD	Termoloistedosimetri
LiB	Litiumboraatti
LiF	Litiumfluoridi
VVER	Venäläissuunnitteinen painevesireaktori

1 JOHDANTO

1.1 Loviisan voimalaitos

Fortumin omistamana Loviisan Hästholmenissa toimii kaksi ydinvoimalaitosyksikköä, Loviisa 1 ja Loviisa 2, jotka on otettu käyttöön vuosina 1977 ja 1980. Käyttöluvut ovat tällä hetkellä voimassa vuosiin 2027 ja 2030 asti. Voimalaitoksessa on kaksi VVER-tyyppistä painevesireaktoria, joiden molempien kapasiteetti on 507 MW. Laitos tuottaa vuoden aikana yhteensä noin 8 TWh sähköä verkkoon, vastaten siten noin kymmentä prosenttia Suomen sähkön tuotannosta. (Fortum 2021)

1.2 Säteily ydinvoimalaitoksella

Ydinvoimalaitoksen reaktorissa saadaan aikaan lämpöä fissio- eli halkeamisreaktion avulla. Polttoaineessa, joka on useimmiten uraanioksidia UO_2 , tapahtuvien fissioiden seurauksena syntyy radioaktiivisia fissiotuotteita sekä neutroni- ja gammasäteilyä. Radioaktiivinen aine on atomirakenteeltaan epävakaa ja pyrkii stabiiliin muotoon hajoamalla vapauttaen reaktiossa ionisoivaa säteilyä. Aktivoitumistuotteilla tarkoitetaan aineita, jotka aktivoituvat reaktorissa tai sen läheisyydessä reaktorisydämen aiheuttamassa voimakkaassa neutronivuossa. Ydinvoimalaitoksessa merkittävimmän säteilyannoksen aiheuttavat jäähdytysveden seassa olevat aktivoituneet korroosiotuotteet. (Alm-Lytz et al 2004. 146-149)

Ydinvoimalaitoksella radioaktiivisesta säteilystä aiheutuvaa säteilyannosta seurataan henkilökohtaisilla säteilymittareilla. Tässä työssä perehdytään yleisellä tasolla säteilyn lähteisiin ydinvoimalassa sekä siihen, miten ja miksi säteilyannosta seurataan. Pääasia on kuitenkin neutronisäteily, sillä tarkoituksena on tutkia kokeellisesti korjauskertoimen tarvetta jo aktiiviselle neutronisäteilymittarille.

1.3 Lähtökohdat

Loviisan voimalaitoksella säteilyannoksen seurantaan varten kaikilla työntekijöillä on käytössä termoloistedosimetri (TLD) sekä elektroninen dosimetri, joka mittaa saatua gamma- ja röntgensäteilyä eli fotonisäteilyä. Elektroniseen dosimetriin on olemassa lisäosana neutronimoduuli, jonka ansiosta elektroninen dosimetri saadaan mittaamaan fotonisäteilyn lisäksi myös neutronisäteilyä. Vuonna 2017 neutronimoduulilla toteutettiin testimittaukset, joiden tarkoituksena oli selvittää moduulin toimivuutta laitoksella. Testimittauksissa huomattiin, että elektronisen dosimetrin neutroniannosvastaavuus oli huono virallisen annosmittarin, termoloistedosimetrin (TLD), näyttämään verrattuna. Annosten erot olivat suuret erityisesti pääkiertopumppujen kuoppien reunalla ja boorianalyysaattorilla, joissa annosnopeus oli pieni. Pumppukuopan pohjalla, jossa annosnopeus on suurempi, TL-dosimetrin ja elektronisen dosimetrin annokset vastasivat paremmin toisiaan.

Saatujen tulosten perusteella todettiin, että on tarpeellista määrittää DMC 3000 -neutronimoduulille korjauskertoimen, jotta sen näyttämä annos vastaisi paremmin todellista annosta. Korjauskertoimelle on erityisesti tarvetta siksi, koska elektroninen dosimetri mittaa systemaattisesti liian pieniä annoksia viralliseen annosmittariin, TL-dosimetriin, verrattuna. Tällöin elektronisen dosimetrin tärkeimmät toiminnot eli annosnopeushälytys ja lyhyen aikavälin annosseuranta eivät toimi oikein. Työssä siis jatketaan jo alkanutta selvitystä neutronidosimetrin mittaaman säteilyannoksen luotettavuudesta.

2 SÄTEILYANNOS

2.1 Säteily

Säteilyä syntyy radioaktiivisessa hajoamisessa, kun rakenteeltaan epävakaata atomiydintä hajoaa spontaanisti. Nuklidin hajoamisessa syntyy tytärynuklideiksi kutsuttuja kevyempiä atomiytimiä, jokin hiukkanen sekä energiaa, jolloin aine säteilee. Luonnossa esiintyvä alkuaine voi olla valmiiksi epävakaata, mutta keinotekoisesti radioaktiivinen aine syntyy, kun atomiytimeen osuu ylimääräinen neutroni, esimerkiksi ydinreaktorissa. Radioaktiivisen aineen aktiivisuus kertoo, kuinka monta hajoamista tietyssä ainemäärässä tapahtuu yhden sekunnin aikana. Aktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq). Kun ydinmuutoksia tapahtuu paljon, myös säteilyä syntyy enemmän. (Ikäheimonen 2002. 19)

Säteily voidaan jakaa ionisoivaan ja ionisoimattomaan, josta ionisoiva säteily edelleen kahdella hiukkassäteilyksi ja sähkömagneettiseksi säteilyksi. Kaikki hiukkassäteily, kuten alfa-, beeta- ja neutronisäteily, on ionisoivaa. Ionisaatiossa atomin elektroni irtoaa ja normaalisti varaukseton atomi saa varauksen. Ionisoivaa sähkömagneettista säteilyä ovat gamma- ja röntgensäteily, joita voidaan kutsua myös fotonisäteilyksi. Fotonisäteily on välillisesti ionisoivaa sähkömagneettista säteilyä. Neutronisäteily eroaa muista hiukkassäteilyn lajeista, sillä varauksettomina hiukkasina neutronit eivät suoraan ionisoi atomeja, vaan puhutaan välillisestä ionisoinnista. Välillisessä ionisoinnissa varauksettomat hiukkaset tai lyhytaaltainen sähkömagneettinen säteily saavat aikaan sekundaarisäteilyä, joka aiheuttaa ionisaatiot. (Ikäheimonen 2002. 12)

Ydinvoimalassa suurin osa radioaktiivisista aineista pysyy polttoainesauvojen suoja-kuoren sisällä eikä siten aiheuta säteilyannosta. Reaktorissa vallitseva voimakas neutronivuo kuitenkin aktivoi myös reaktorin rakenteiden materiaaleja sekä reaktorin läpi virtaavaa jäähdytettä ja jäähdytteessä olevia korroosiotuotteita. Beeta- ja alfahiukkaset läpäisevät materiaalia huonosti, joten suurin osa ydinvoimalassa kirjatusta säteilyannoksista aiheutuu gammasäteilystä. (Alm-Lytz et al 2004. 146)

2.2 Ulkoisen säteilyaltistuksen seuranta

Ionisoiva säteily on terveydelle haitallista, koska elävään kudokseen kohdistunut säteily käynnistää fysikaalisia ja kemiallisia reaktioita, jotka aiheuttavat biologisia muutoksia. Säteily voi hajottaa solujen perimän eli DNA:n ketjuja, ja DNA-molekyylin muutokset lisäävät syöpäriskiä. Kaikkein vahingollisinta on lyhyen ajan kuluessa saatu suuri säteilyannos. (Mustonen & Salo 2002. 28-30) Säteilyn haitallisuuden vuoksi säteilyannoksen seuranta ja säätelyä varten on olemassa säteilylaki.

Ydinvoimalassa työskennellessä on otettava huomioon säteilyn aiheuttamat haitalliset terveysvaikutukset. Säteilytyötä tekevien työntekijöiden säteilyannoksen seuraaminen ja raportointi on määrätty säteilylaissa (859/2018). Säteilylain oikeutusperiaatteen mukaisesti säteilytoiminnassa ja suojelutoiminnassa saavutettavan hyödyn on oltava suurempi kuin siitä aiheutuvat haitat. (Säteilylaki 5 §) Optimointi- eli ALARA-periaatteen (As Low As Reasonably Achievable) mukaisesti altistus ionisoivalle säteilylle on pidettävä mahdollisimman alhaisena. (Säteilylaki 6 §) Yksilönsuojaperiaate puolestaan määrää, että yksittäisen työntekijän säteilyannos ei saa ylittää viranomaisten määrittämiä annosrajoja, jotka on määritetty eri säteilytyön luokkiin kuuluville erikseen. (Säteilylaki 7§) Säteilytyöntekijät luokitellaan mahdollisten säteilyaltistuksen mukaan siten, että A-luokan säteilytyöntekijöille on järjestettävä henkilökohtainen annostarkkailu. (Säteilylaki 92 §)

Säteilylaissa määritellään säteilytyötä tekevät mahdollisen säteilyaltistuksen mukaan eri luokkiin: ”Säteilytyöntekijä kuuluu luokkaan A, jos säteilytyöstä aiheutuva efektiivinen annos voi olla suurempi kuin 6 millisievertiä vuodessa tai silmän mykiön ekvivalenttiannos suurempi kuin 15 millisievertiä vuodessa taikka ihon, käsivarsien, jalkaterien tai nilkkojen ekvivalenttiannos suurempi kuin 150 millisievertiä vuodessa. Muu säteilytyöntekijä kuuluu luokkaan B.” (34 §) (1034/2018) Loviisan ydinvoimalassa kaikki säteilytyötä tekevät luokitellaan luokkaan A, jolloin heille on järjestettävä henkilökohtainen annostarkkailu.

2.3 Säteilyn suureet

Dosimetria tarkoittaa fysiikan piiriin kuuluvaa tieteenalaa, joka tutkii säteilyannoksen mitausta ja mittausten menetelmiä sekä säteilyannoksen suureita. Säteilyn aiheuttamaa terveydellistä kokonaisuutta kuvataan efektiivisen annoksen avulla. Ydinvoimalaitoksessa dosimetrioiden eli henkilökohtaisten säteilymittarien avulla tarkkaillaan työntekijöihin mahdollisesti kohdistuvaa säteilyannosta. Dosimetriaan liittyy lukuisia käsitteitä, jotka selittävät dosimetrioiden toimintaperiaatetta sekä säteilyn ja aineen vuorovaikutusta. Tässä kappaleessa käsitellään niitä säteilyn käsitteitä, jotka ovat olennaisia säteilyannoksen määrittämisen kannalta.

2.3.1 Absorboitunut annos ja ekvivalenttiannos

Absorboitunut annos on säteilyannoksen perussuure, joka on käytössä säteilysuojelun lisäksi myös terveydenhuollon radiologisissa tutkimuksissa ja säteilybiologiassa. Absorboitunut annos pätee kaikenlaiselle ionisoivalle säteilylle, ja se kuvaa keskimääräistä ionisoivasta säteilystä tarkastelukohteeseen siirtyvää energiaa $d\varepsilon$ massayksikköä dm kohden. (Marttila 2002. 73-74)

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (1)$$

Absorboituneen annoksen yksikkö on J kg^{-1} tai dosimetriassa yleisemmin käytetty gray (Gy). Ekvivalenttiannos $H_{T,R}$ on säteilyn laatukertoimella w_R kerrottu elimen tai kudoksen keskimääräinen absorboitunut annos $D_{T,R}$. (Marttila 2002. 82) Eri säteilylajien laatukertoimet ovat taulukoituna liitteessä 2.

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (2)$$

Ekvivalenttiannoksen yksikkö on sievert (Sv).

2.3.2 Henkilöannosekvivalentti

Henkilöannosekvivalentti $H_p(d)$ tarkoittaa annosekvivalenttia syvyydellä d olevassa pisteessä kehon pehmytkudoksessa. Henkilöannosekvivalentti pohjautuu ekvivalenttiannokseen H . Henkilöannosekvivalentin yksikkö on sievert (Sv). Henkilöannosekvivalenttia 10mm syvyydellä nimitetään syväannokseksi $H_p(10)$ ja 0,07 mm syvyydellä pinta-annokseksi $H_p(0,07)$. Yleisesti pinta-annos tarkoittaa kuitenkin mitä tahansa säteilyannosta kehon pinnalla ja syväannos säteilyannosta tietyllä syvyydellä kudoksessa tai muussa aineessa. Viralliset säteilyannokset säteilytyötä tekevillä kirjataan syväannoksena, pinta-annoksena ja neutroniannoksena. (STUK S/1/2018)

2.3.3 Efektiivinen annos

Efektiivinen annos tarkoittaa kudosten ja elinten painotuskertoimilla muodostettujen ekvivalenttiannoksen summaa. Ekvivalenttiannoksen laskemisessa on otettu huomioon eri säteilylajien kyky aiheuttaa ionisaatiota kudoksissa, mutta ekvivalenttiannokset ovat vain laskennallisia suureita. Efektiivinen annos kuvaa säteilyn aiheuttamaa terveydellistä kokonaishaittaa ihmiselle, olettaen että säteilyannos on jakautunut tasaisesti koko kehon alueelle. (Pöllänen 2003. 249-250)

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (3)$$

Efektiivisen annoksen yksikkö on sievert (Sv). Kaavassa 3 H_T tarkoittaa kudosten keskimääräistä ekvivalenttiannosta ja w_T on painotuskerroin, jonka avulla eri elimiin ja kudoksiin absorboituneesta säteilystä saadaan muodostettua kokokehoannos, efektiivinen annos. Painotuskertoimet eri kudoksille on esitetty liitteessä 1.

3 NEUTRONISÄTEILY

Neutronit ovat varauksettomia hiukkasia, jotka ovat hyvin läpikäyviä. Neutronisäteily on hiukkassäteilyä, joka ionisoi välillisesti. Neutronien ja aineen vuorovaikutus riippuu voimakkaasti neutronin energiasta. Neutronien ja atomin ytimien välisiä reaktioita voivat olla sironta, ydinreaktiot ja fissio. Sironta voi tapahtua joko elastisesti tai epäelastisesti, ja ydinreaktioita on neljää tyyppiä: (n, γ) , (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$. (Ikäheimonen 2002. 49-59)

Neutronisäteilyn lähteitä luonnossa ovat avaruudesta tuleva kosminen säteily sekä spontaanit fissiot. Keinotekoisia lähteitä ovat ydinreaktorit, säteilyherätteiset neutronilähteet sekä hiukkaskiihdyttimet. (Pöllänen 2002. 12-14) Tässä työssä keskitytään ydinreaktorista peräisin olevaan neutronisäteilyyn.

3.1 Neutronisäteilyn lähteet ydinvoimalaitoksella

Käynnissä oleva reaktori aiheuttaa voimakkaan gammasäteilyn lisäksi myös neutronisäteilyä. Neutronisäteilyä aiheutuu fissioreaktioista sekä reaktorissa syntyvästä ^{17}N -isotoopista, joka lähettää beeta- ja neutronisäteilyä. ^{17}N -isotoopin puoliintumisaika on lyhyt, noin 4,2 sekuntia, joten siitä aiheutuva säteily loppuu hyvin nopeasti reaktorin sammutuksen jälkeen. Neutronisäteilylle voi Loviisan voimalaitoksella käytön aikana altistua lähinnä pääkiertopumppujen pumppukuopissa tai niiden välittömässä läheisyydessä tehtävissä töissä. Pumpukuoppiin tulee suoraan reaktorin suunnasta neutronisäteilyä, ja jäähdytteen mukana kulkeva ^{17}N aiheuttaa myös pienen määrän neutronisäteilyä. (Kalinainen 2014. 13)

Myös säätösauvakoneiston tarkastuksissa, boorianalysointilaikalla sekä polttoaineen siirroissa esiintyy neutronisäteilyä, mutta koska käytettävä työaika on hyvin lyhyt, niistä aiheutuu vain pieniä määriä neutroniannosta. Edellä mainituissa työkohteissa neutronispektrit todennäköisesti poikkeavat verrattuna pääkiertopumppujen läheisyydessä esiintyvään neutronisäteilyyn. Suhteellisen matalasta neutroniannosnopeudesta johtuen TL-dosimetreissa on kuitenkin käytetty neutroniannoksen määrittämiseksi samaa korjauskerrointa kuin pääkiertopumppujen ympäristössä tehdyissä töissä. (Hirvelä 2020)

3.2 Neutronisäteilyn mittaaminen

Neutronisäteilyn mittaaminen on haastavaa, sillä neutronit eivät vuorovaikuta aineen elektronien kanssa samalla tavalla kuin fotonit. Neutronien aiheuttama sekundaarisäteily kohdeaineessa aiheuttaa säteilyannoksen. Neutronien mittaamisessa käytetään apuna materiaaleja, joilla on mahdollisimman suuret vuorovaikutustodennäköisyydet. Neutronien ja aineen vuorovaikutuksessa tapahtuu reaktio, jossa syntyy varautuneita hiukkasia, jotka voidaan havaita mittaamalla. Neutronit itsessään eivät siis aiheuta suoraan säteilyannosta kuten fotonit, vaan neutronien aiheuttamista reaktioista syntyvä säteily. Neutronien vuorovaikutustodennäköisyydet riippuvat myös voimakkaasti neutronin energiasta, sillä neutronin energia vaikuttaa sen nopeuteen, toisin kuin fotoneilla. Mittareiden ilmaisimet eivät pysty mittaamaan nopeita neutroneja, sillä nopeat neutronit eivät aiheuta reaktiota ilmaisimen materiaalin kanssa. Erittäin haastavaa neutroniannoksen mittaamisesta tekee se, että neutronien vuorovaikutustodennäköisyydet laskevat energian kasvaessa ja korkeaenergiset neutronit aiheuttavat suuremman annosvasteen. Tämän vuoksi mitattu neutroniannos saattaa olla hyvinkin epätarkka. Jotta neutroniannoksen mittaaminen tarkasti olisi mahdollista, pitäisi siis saada selville neutronien energiat mittauspaikalla. (Delgado, 10)

Dosimetrit toimivatkin hyvin termisille ja nopeille yli 1 MeV neutroneille. Ongelmana on alue 10 keV–1 MeV, jossa vaste neutroneille on heikko. Tämä johtuu siitä, että tällä alueella rekyyliprotonien energiat ovat heikkoja ja niiden on vaikea kulkeutua dosimetrin puolijohdekiteen aktiiviselle alueelle. Lisäksi matalaenergisten protonien aiheuttamat pulssit muistuttavat fotonien aiheuttamia pulsseja, jotka suodatetaan pois. Ratkaisuna tähän olisi joko kompensoida neutroniannosta yliarvioimalla termisiä neutroneita tai lisäämällä neutroni-ilmaisimien määrää dosimetrissa. (Delgado, 22–23)

3.2.1 Korjauskerroin neutronidosimetriassa

Peruskalibroinnin lisäksi TL-dosimetreille määritellään käyttöpaikkakohtaiset korjauskerroimet, joilla huomioidaan työkohteen ja kalibroinnissa käytetyn säteilylähteen erilaiset energiajakaumat. Loviisan voimalaitoksella TL-dosimetreille on kokeellisesti määritelty yhteinen korjauskerroin molemmille laitoksille LO1 ja LO2. Elektronisen dosimetrin neutronimoduulissa on valmiina tehdasasetuksena korjauskerroin, jonka lisäksi on määritettävissä käyttöpaikkakohtainen kerroin testimittausten avulla. Operatiivisessa säteilysuojelussa

hälyttävän dosimetrin rooli on suuri, koska se varoittaa esimerkiksi liian suuresta neutroniannosnopeudesta. Korjauskertoimen määrittäminen on tärkeää, jotta määritetyt hälytysrajat toimivat oikein.

Loviisan voimalaitoksella TL-dosimetrien annoslaskennassa on neutroniannokselle käytössä korjauskerroin 0,657. Tämä korjauskerroin on määritetty kokeellisesti vuonna 2008 ja otettu käyttöön vuonna 2009. Erityisesti neutroniannoksen mittaamisessa korjauskertoimen merkitys on suuri, johtuen neutroneiden energian vaikutuksesta annosvasteeseen.

3.2.2 Termoloistedosimetri

Termoloistedosimetri eli TLD on henkilökohtainen annosmittari, jota on käytettävä aina ydinvoimalan valvonta-alueella. TLD:tä pidetään haalarissa vasemmanpuoleisessa rintatasussa nimipuoli eteenpäin suunnattuna. TLD:stä luettava säteilyannos on virallinen säteilyannos, joka raportoidaan kuukausittain STUK:n annosrekisteriin. TLD on passiivinen säteilyilmaisim, sillä tulos sen keräämästä annoksesta saadaan vasta mittauksen jälkeen erillisellä lukijalaitteella.

Säteilyannoksen määrittäminen termoloistedosimetrillä perustuu dosimetrissä käytettävien kiteiden termoluminesenssiin. Kiteissä käytettävät materiaalit reagoivat säteilyaltistukseen siten, että elektronit materiaalissa virittyvät korkeammille energiatasoille valenssi- ja johtavuusvyön välille. Nämä elektronit pysyvät virittyneessä tilassa, kunnes dosimetrin luennassa termoloisteaineen kuumentamisen seurauksena viritystilat purkautuvat (Knoll 2000, 731-733). Kiteisiin aiheutetaan tarkoituksellisesti hilavirheitä lisäämällä tiettyjen epäorgaanisten kide- materiaalien joukkoon epäpuhtauksia, kuten mangaania tai magnesiumia, jotka toimivat aktivaattoreina. Epäpuhtauksien vuoksi valenssi- ja johtavuusvyön välille syntyy paikallisia energiatasoja, joille elektronit tai aukot voivat siirtyä. Kuumennuksessa elektronien siirtyessä takaisin alemmalle energiatasolle, osa vapautuvasta energiasta emittoituu fotoneina jotka voidaan havaita valomonistinputkella. Fotonien energia on verrannollinen absorboituneeseen annokseen, jolloin dosimetriin kerääntynyt säteilyannos saadaan selville (Klemola 2002. 132-133)



Kuva 1. Termoloistedosimetri suojakotelossaan.

Taulukko 1. Termoloistedosimetrin kiteet (Hirvelä 2020, muokattu)

Kidenumero	Kidemateriaali	Merkitys
1	LiB	varakide, ei lueta normaalissa luennassa
2	LiF	mittaa gammasäteilyä, syvä-annos
3	LiB	mittaa gamma- ja neutronisäteilyä, syväannos
4	LiB	mittaa beeta-, gamma-, ja neutronisäteilyä, pinta-annos

Termoloistedosimetrin mittaama neutroniannos määritetään kolmannen ja toisen kiteen keräämän raaka-annoksen erotuksena. Jos kolmannen LiB-kiteen ja LiF-kiteen erotus

annosmäärässä on tarpeeksi suuri, annoksen laskentaohjelmisto tulkitsee ”ylimääräisen” annoksen neutroniannokseksi.

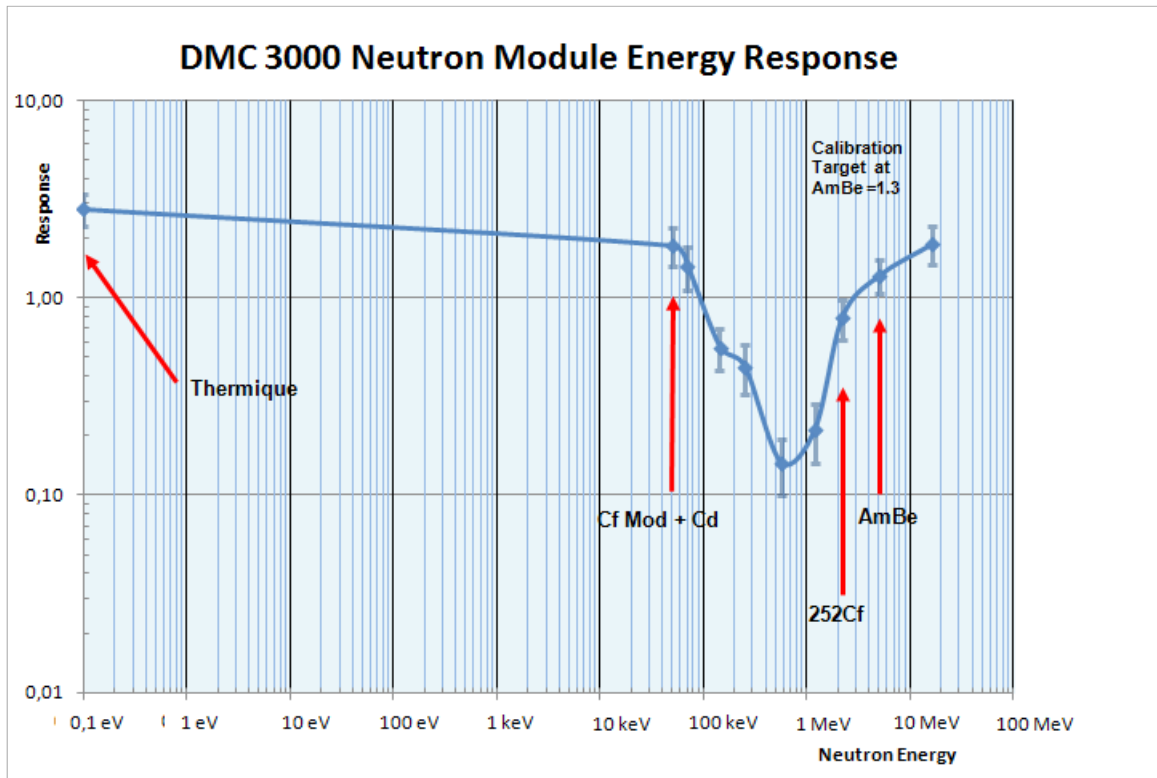
3.2.3 Elektroninen dosimetri DMC 3000 N

DMC 3000 N on muokattu versio pelkkää fotonisäteilyä mittaavasta elektronisesta dosimetristä, sillä siihen on lisätty neutronimoduuli, jossa on oma ilmaisain neutronisäteilyn mittauksista varten. Kuvassa 2 on yksi testidosimetreina käytetyistä elektronisista dosimetreista, jossa neutronimoduuli on kokonaisuuden alempi osa. Elektronista dosimetriä pidetään haalarin oikealla puolella rintataskussa, ja se luetaan lukijalaitteessa sisään ja ulos aina työpäivän alkaessa ja päättyessä. Neutronimoduulilla varustettua elektronista dosimetriä käytetään silloin, kun työskennellään työssä, jossa todennäköisesti altistutaan neutronisäteilylle. Loviisan voimalaitoksella neutronidosimetrit ovat käytössä ainakin PCP-tilan pitkäkestoisissa töissä, reaktorin paineastian kannen vuototarkastuskierroksella laitoksen ollessa tehoajolla, käytetyn polttoaineen siirrossa sekä boorianalysointitarkastuksissa. Elektronisen dosimetrin etuna ovat säädettävät annos- ja annosnopeushälytykset, joita TLD:ssä ei ole. Elektronisen dosimetrin avulla on siis mahdollista seurata reaaliaikaisesti annoksen kertymistä sekä dosimetrin näytöltä että päivittäisellä tasolla DosiServ-järjestelmästä, mihin annostiedot päivittyvät kun dosimetri on luettu lukijalaitteessa.



Kuva 1. Elektroninen dosimetri neutronimoduulilla

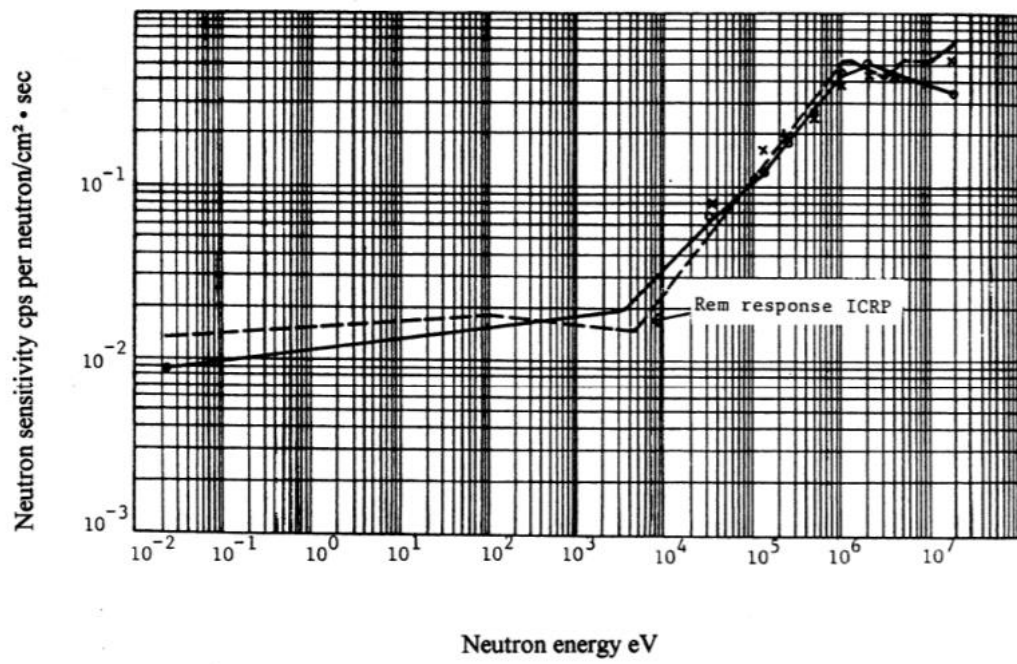
Elektronisissa neutronidosimetreissa käytetään yhtä tai useampaa puolijohdeilmaisinta, jotka peitetään ^{10}B :lla tai ^6Li :lla varattujen hiukkasten tuottamiseksi. Yleensä ilmaisin peitetään myös vetypitoisella aineella kuten polyeteenillä, jotta ilmaisimen vastetta nopeille neutroneille saataisiin paremmaksi. DMC 3000 -neutronimoduulin energiavaste on esitetty kuvassa 3. Dosimetrit toimivatkin hyvin termisille ja nopeille yli 1 MeV neutroneille. Ongelmana on alue 10 keV–1 MeV, jossa kuvassa 3 on nähtävillä vasteen raju pudotus. Ydinreaktorin fissioreaktiossa syntyvät neutronit ovat energialtaan noin 0,5-15 MeV. (Ikäheimo 2002, 50). Voi siis todeta että elektronisen dosimetrin vaste on näiden lukujen mukaan huono suurimmalle osalle fissioreaktiossa syntyvistä neutroneista.



Kuva 3. Neutronimuodulin energiavaste (Mirion technologies 2019. 17)

3.2.4 Digipig/ 2222A neutroni-ilmaisin

Digipig on neutroni-ilmaisin, joka mittaa vapaata neutroniannosnopeutta ja -annosta, ja joka havaitsee neutronit energioilla 0,025 eV-17 MeV. Digipig mittaa vapaata annosekvivalenttia $H(10)$, joka pitää muuntaa kertoimen avulla vastaamaan henkilöannosekvivalenttia $H_p(10)$. Mittaus perustuu booritrifluoridi BF_3 -täytteiseen verrannollisuuslaskuriin, joka on päällystetty kaksinkertaisella polyeteenistä valmistetulla hidastimella. Hidastinkerrosten välissä on rei'itetty boorimuovista tehty sylinteri, jonka reikien osuus koko sylinterin pinta-alasta on 11,3 %. (Marttila O. 1989, 93) Kuvaajassa (kuva 4) näkyy monitorin vaste eri energiaisille neutroneille, joka on lähes ideaali.



Kuva 4. Digipig-neutronimonitorin neutronivaste energian suhteen (Wedholm Medical AB 2009, 16)

4 MENETELMÄT NEUTRONIANNOSMITTAUKSIIN

4.1 Koejärjestelyt

Juuri ennen jokaisen mittauksen alkua TL-dosimetrit nollattiin, jotta niihin kerääntynyt taustasäteily ei vaikuttaisi tulokseen. Elektroniset dosimetrit ja TLD:t kiinnitettiin fantomiin jo ennakkoon, ja mittausvalmis fantomi kannettiin kohteeseen, jossa vasta paikan päällä elektroniset dosimetrit käynnistettiin. Elektronisten dosimetricien tulos luettiin suoraan dosimetrin näytöltä mittauksen lopussa, ja TLD:t kuljetettiin välittömästi mittauksen jälkeen luentaan. Dosimetricien asettelu fantomiin on havainnollistettu kuvassa 6.

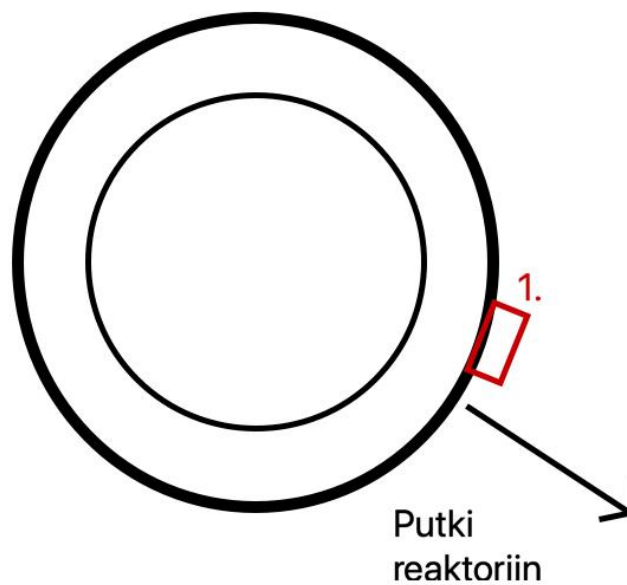
Korjauskertoimen määrittämistä varten elektronisen dosimetrin käyttöoppaan mukaan dosimetri täytyy altistaa neutronisäteilylähteelle siten, että annosta kertyy vähintään 2mSv. Jotta tämä toteutuisi, tehtiin Digipig-neutroniannosnopeusmittarilla alkumittaukset, joiden perusteella laskettiin, kuinka kauan vähintään dosimetricia pitäisi säteilyttää halutun annosmäärän saavuttamiseksi.

4.1.1 Mittausvälineet

Koejärjestelyissä päädyttiin käyttämään dosimetricien alustana vesifantomia, joka simuloi riittävällä tarkkuudella ihmisen torsoa. Fantomi on annosmittauksissa käytettävä säteilytettävä kohde, jonka mitat sekä säteilyn absorptio- ja sirontaominaisuudet muistuttavat mahdollisimman paljon ihmiskehoa. (Marttila,71) Vesifantomia on käytetty myös aiemmissa Loviisan voimalaitoksella tehdyissä mittauksissa, joten saman fantomin käyttö tuo myös vertailukelpoisuutta tuloksiin. Mittauksissa käytetty 20l muovikanisterista tehty fantomi oli ollut käytössä mm. selvittäessä neutronikorjauskertoimen sopivuutta boorianalysointorin neutronisäteilylle (Turpeinen & Petrasuo. 2) sekä tehtäessä neutroniannosmittauksia DMC 3000:n neutronimoduulilla (Salminen & Tanska & Viljanmaa 2020. 2) Gamma-annosnopeuden mittaamiseen käytettiin kannettavaa Automess 6150 AD 6/H -mittaria. Digipig-neutroniannosmonitoria käytettiin alkumittauksissa neutroniannosnopeuksien kartoittamiseksi mittauspaikoilla. Fantomiin kiinnitettynä olivat elektroniset dosimetrit sekä verrokkimittarina käytetyt termoloistedosimetrit.

4.1.2 Mittauspaikkojen valinta ja alkumittaukset

Suurin osa töistä, joissa neutronisäteilylle altistutaan, tapahtuvat pumppukuopan reunan läheisyydessä. Siksi mittauksien tekeminen kuopan reunalla vastaa hyvin todellista työskentelytilannetta. Mittaukset tehdään erikseen molemmilla laitoksilla, sillä niiden neutronispektrit poikkeavat toisistaan, kuten aiemmissa neutronimittauksissa on selvinnyt.



Kuva 5. Mittausfantomin sijainti pumppukuopan reunalla

Tehtyjen alkumittausten perusteella etsittiin molemmilta laitoksilla pumppukuoppien reunoilta kohdat, joissa neutroniannosnopeus olisi mahdollisimman suuri. Alkumittaukset tehtiin Digipig-neutroniannosnopeusmittarilla. Samalla mitattiin myös gamma-annosnopeus. Digipig-annosnopeusmittari mittaa vapaata annosnopeusekvivalenttia $H(10)$, joten sen näyttämä tulos muunnetaan henkilöannosekvivalentiksi $H_p(10)$ muunnoskertoimella 1.05. (Matilainen, 2016. 14) Muuntamisen jälkeen tulokset ovat verrattavissa dosimetrien lukemaan. Digipig -annosnopeusmittari mittaa jatkuvasti annosnopeutta, jolloin sen näytöllä vaihtuu jatkuvasti sen näyttämä neutroniannosnopeus. Yhtenä ominaisuutena on myös neutroniannoksen kerääminen muistiin, jolloin neutroniannosnopeuden saa laskettua jakamalla kerätyn neutroniannoksen mittaukseen käytetyllä ajalla. Digipig- mittaukset tehtiin keräämällä kymmenen minuutin ajan neutroniannosta ja laskemalla keskimääräinen annosnopeus.

Taulukko 2. Neutroniannosnopeudet mitattuna Digipig-annosnopeusmittarilla

Mittauspaikka	$H(10)$ $\mu\text{Sv/h}$	$H_p(10)$ kertoimella 1.05 ($\mu\text{Sv/h}$)
Boorianalysaattori	124	130
LO2 pumppukuopan reuna	308	323
LO1 pumppukuopan reuna	221	232

Digipig- mittausten tuloksista on nähtävissä, että boorianalysaattorilla on pienin neutroniannosnopeus kaikista mittauspaikoista. Myös Loviisa 2:n ja Loviisa 1:n pumppukuopissa ero annosnopeuksissa on huomattava. Näiden tulosten perusteella laskennallinen aika fantomimittauksille 2 mSv annoksen saavuttamiseksi pumppukuopalla oli kuusi tuntia (LO2) ja kahdeksan tuntia (LO1). Ensimmäisten neutronimoduuleilla tehtyjen mittausten jälkeen huomattiin, että ne keräävät annosta nopeammin kuin Digipig-mittausten perusteella olisi voinut päätellä, jolloin kahdeksaa tuntia ei tarvittaisi tarvittavan annoksen saamiseksi. Mittausajaksi valittiin lopulta molemmille laitoksille kuusi tuntia, jotta tulosten vertailu olisi helpompaa.

Molemmilla laitoksilla valittiin mittauspaikaksi samalla paikalla oleva pumppu ja sama sijainti reaktorin suuntaan. Mittauspaikan sijainti pumppukuopalla on havainnollistettu kuvassa 5. Kuvassa 6 näkyvät mittausjärjestelyt LO1:n pumppukuopan reunalla ja kuvassa 7 vastaavat järjestelyt LO2:n pumppukuopalla.

Boorianalysaattorilla neutroniannosnopeus on pienempi kuin pumppukuopan reunalla, joten siellä tehtävät mittaukset kestivät kauemmin. Boorianalysaattorilla mittausvälineiden saaminen riittävän lähelle $^{241}\text{AmBe}$ -lähdettä oli haastavaa, ja liian pitkä etäisyys vaikutti mittaus-tuloksiin. Boorianalysaattorit ovat molemmilla laitoksilla identtiset. Loviisa 2 valittiin mittauspaikaksi, koska mittauspaikka on tilavampi, jolloin koejärjestelyt on helpompi toteuttaa.



Kuva 6. Neutronimittaukset LO1:n pumppukuopalla.



Kuva 7. Neutronimittaukset LO2:n pumppukuopalla, merkittynä dosimetrien paikkanumerot 1-6

Kuvassa 6 on hyvin nähtävissä dosimetrien asettelu mittausfantomiin. Dosimetrien paikkanumerot on myös merkitty kuvaan 7, ja mittau tulokset on taulukoitu näiden paikkanumeroiden mukaisesti.

Boorianalyssaattorilla neutronisäteilyn lähde on kuvassa 8 näkyvä $^{241}\text{AmBe}$ -lähde, joka on merkitty radioaktiivisuudesta varoittavalla tarralla. Kuvassa 9 on näkyvissä mittausfantomin etäisyys säteilylähteestä. Fantomi asetettiin korokkeelle siten, että dosimetrit olivat kohtisuoraan säteilylähteen kohdalla. Fantomi on aseteltu hieman enemmän säteilylähteen alareunaan, koska gamma-annosnopeus oli suurempi boorianalyssaattorin yläreunassa, ja gamma-annosnopeus haluttiin minimoida mittausten onnistumiseksi.



Kuva 8. Mittausjärjestelyt boorianalyssaattorilla



Kuva 9. Mittausfantomin etäisyys boorianalyssaattorista

4.2 Laskenta

Kappaleessa 4.2 käydään läpi, miten mittaustulosten perusteella voidaan määrittää korjauskertoimen elektronisen dosimetrin neutronimoduulille. Korjauskertoimet lasketaan paikkakohtaisesti, ja lopuksi katsotaan, voiko tulosten perusteella määrittää koko laitokselle sopivaa korjauskorjainta eli ovatko tulokset samankaltaisia eri laitoksilla. TL-dosimetrille korjauskorjainta määritettäessä todettiin, että LO1:n ja LO2:n neutronimittaustulokset poikkeavat toisistaan, joten oletettavasti saman voi todeta myös elektronisella dosimetrillä tehdyistä mittauksista.

4.2.1 Korjauskertoimen määrittäminen

Elektronisen dosimetrin neutroniannos määrittyy dosimetrissa seuraavan kaavan mukaisesti:

$$N(\text{annos}) = \frac{f(\text{counts})}{Kn \cdot KnMul \cdot KnTask} \quad (4)$$

Jossa $f(\text{counts})$ määrittyy dosimetrin ilmaisimeen osuvien neutronien määrästä. Kn on tehdasasetus, jota ei voi muuttaa, ja $KnMul$ sekä $KnTask$ ovat paikkakohtaisia korjauskertoimia, jotka voi määrittää mittausten perusteella. Tehdasasetuksissa nämä kaksi korjainta on asetettu arvoon 1. Dosimetrin käyttöoppaan mukaan korjauskertoimen määrittäminen tapahtuu seuraavalla tavalla:

$$KnMul = \frac{KnMul_{vanha} \cdot \text{luettu annos}}{\text{vertailuannos}} \quad (5)$$

(muokattu, Mirion 2019. 15) Luettu annos tarkoittaa kaavassa mittauksen lopuksi elektronisen dosimetrin näytöltä luettavaa neutroniannosta. Vertailuannos puolestaan tarkoittaa elektroniseen dosimetriin verrattavan mittausvälineen annosta eli ”oikeaa” annosta. Näissä mittauksissa verrokkina käytetään TL-dosimetrin keräämää neutroniannosta, sillä elektronisen dosimetrin annos olisi tarkoitus saada näyttämään samaa annosta kuin TLD. Kaavaan sijoitettava TLD:n vertailuannos on luennan jälkeen muunnettu Loviisan laitokselle määritetyllä korjauskertoimella, ja laskennassa käytetään annoksia, jotka sellaisenaan raportoitaisiin myös STUK:n annosrekisteriin. Korjauskertoimen avulla elektronisen dosimetrin näyttämää annosta voidaan myös arvioida konservatiivisesti siten, että elektroninen dosimetri hälyttää

jo ennen annosrajojen ylitystä. Tämän kompensoinnin voi tehdä sen jälkeen, kun varsinainen korjauskerroin on jo määritetty.

5 TULOKSET

Mittaustuloksissa näkyy vertailuna jokaisen mittaustaikojen kertyneet annokset. Verrokkeina ovat TLD ja elektroninen dosimetri DMC 3000N sekä lisäksi Digipig-annosnopeusmittaukset. Digipig-annosnopeusmittausten tulokset on esitetty taulukossa 2. Jokaisella mittaustaikojalla tehtiin mittaukset ensin yhtä aikaa elektronisella dosimetrillä ja TL-dosimetrillä. Myöhemmin tehtiin vielä lisämittaukset pelkästään elektronisilla dosimetreilla, jotta tuloksiin saataisiin luotettavuutta. Dosimetrien paikkanumero kuvaa dosimetrin paikkaa fantomin kyljessä. Tulosten taulukoinnissa päädyttiin käyttämään paikkanumeroa dosimetrinumeron sijaan, koska elektronisten dosimetrien paikkoja vaihdeltiin mittausten välillä. Paikkanumerot on lisätty kuvaan 7. Neutroniannokset on pyöristetty kolmeen desimaaliin selkeyden vuoksi, mutta laskennassa käytettiin tarkkoja arvoja.

5.1.1 LO1 mittaustulokset

Taulukko 3. LO1 pumppukuoppa: DMC 3000N neutroniannokset ja kahden mittauksen keskiarvo

Paikkanumero	Neutroniannos (mSv) 1. mittaus	Neutroniannos (mSv) 2. mittaus	Neutroniannos kes- kiarvo (mSv)
1	0,195	0,205	0,200
2	0,190	0,174	0,182
3	0,147	0,176	0,162
4	1,591	1,667	1,629
5	1,961	1,929	1,945
6	1,503	1,537	1,520

Taulukko 4. DMC 3000N ja TLD neutroniannosvertailu sekä suhdeluvut paikkakohtaisesti

Paikkanumero	DMC 3000 N kahden mittauksen keskiarvo (mSv)	TLD neutroniannos korjauskertoimella 0,657 (mSv)	Tulosten suhdeluku, DMC 3000N/TLD
1	0,200	0,417	0,480
2	0,182	0,391	0,466
3	0,162	0,414	0,390
4	1,629	2,383	0,684
5	1,945	2,560	0,760
6	1,520	2,128	0,714
Suhdelukujen keskiarvo			0,582

Ensimmäisessä taulukossa (taulukko 3) näkyy elektronisen dosimetrin keräämät neutronianokset kahdessa eri mittauksessa. Toisessa taulukossa (taulukko 4) vertaillaan elektronisten dosimetricien keskimääräistä neutroniannosta TL-dosimetricien keräämiin annoksiin samassa mittauspisteessä. Vertailu tehdään korjauskertoimen määrittämisen yhtälön mukaan (5). Tällöin suhdeluvuista saadaan suoraan laskettua tuloksista määräytyvä korjauskerroin.

5.1.2 LO2 mittaustulokset

Taulukko 5. LO2 pumppukuoppa: DMC 3000N neutroniannokset ja kahden mittauksen keskiarvo

Paikkanumero	Neutroniannos (mSv) 1. mittaus	Neutroniannos (mSv) 2. mittaus	Neutroniannos kes- kiarvo (mSv)
1	0,294	0,285	0,290
2	0,288	0,26	0,270
3	0,218	0,209	0,214
4	3,372	2,947	3,160
5	3,708	3,468	3,588
6	2,886	2,634	2,760

Taulukko 6. DMC 3000N ja TLD neutroniannosvertailu sekä suhdeluvut paikkakohtaisesti

Paikkanu- mero	DMC 3000N kahden mittauksen keskiarvo (mSv)	TLD neutroniannos kor- jauskertoimella 0,657 (mSv)	Tulosten suhdeluku, DMC 3000N/TLD
1	0,290	0,768	0,377
2	0,270	0,731	0,3670
3	0,214	0,749	0,285
4	3,160	5,193	0,608
5	3,588	5,015	0,715
6	2,760	4,606	0,599
Suhdelukujen keskiarvo			0,492

LO2:n tulokset käsiteltiin samalla periaatteella kuin LO1:n. Taulukossa 5 on laskettu jokaiselle mittauspäikälle keskiarvot elektronisen dosimetrin neutroniannoksille, ja taulukossa 6 näitä paikkakohtaisia arvoja verrataan TL-dosimetrin keräämiin annoksiin.

6 POHDINTA

6.1 Mittaustulosten analysointi

Tuloksista nähdään, että paikoilla 1-3 olleet dosimetrit keräsivät vähemmän neutroniannosta verrattuna etupuolella, paikoilla 4-6 olleisiin dosimetreihin. Tämä johtuu siitä, että paikat 1-3 sijaitsevat fantomin takapuolella, jolloin fantomi vaimentaa tulevaa neutronisäteilyä. Toisena vaikuttavana tekijänä on etäisyys: mittaustulosten takapuolella olevat dosimetrit ovat noin 20 cm päässä pumppukuopan reunasta, missä neutroniannosnopeus on jo huomattavasti pienempi, koska säteily vaimentuu etäisyyden kasvaessa. Fantomin etupuolella sijaitsevat dosimetrit olivat aivan pumppukuopan reunalla, ja niihin kertyi enemmän neutroniannosta. Digipig-annosnopeusmittarilla tehdyistä mittauksista pumppukuopan reunalta ja 20 cm päästä reunasta nähdään, että neutroniannosnopeus pienenee moninkertaisesti. Fantomimittausten tuloksista voidaan todeta, että mittaustulosten valinta mahdollisimman suuren annosnopeuden kohdalle on onnistunut, sillä keskimmäisiin dosimetreihin on tullut kaikkein eniten annosta.

Boorianalysointilla oli jo alkumittausten perusteella tiedossa, että edustavien tulosten saaminen TL-dosimetreilla tulisi olemaan haastavaa. Alkumittauksia Digipig-annosnopeusmittauksista on esitetty taulukossa 2. TL-dosimetrin toimintaperiaatteen vuoksi onnistunut neutroniannoksen mittaaminen edellyttää, että neutroniannosnopeus on suurempi kuin gamma-annosnopeus. Boorianalysointilla prosessivedestä on kertynyt kontaminaatiota letkujen ja putkien sisäpintaan niin, että niistä lähtevä gamma-annosnopeus ylittää neutroniannosnopeuden. Tämä ongelma olisi saattanut olla vältettävissä, jos mittaustulosten olisi pystynyt asettamaan vieläkin lähemmäs säteilylähdettä. Boorianalysointirakenteen vuoksi

fantomia ei kuitenkaan olisi saanut yhtään lähemmäksi. Boorianalysoijan tuloksia ei käsitellä taulukoituna johtuen siitä, että onnistuneita mittaustuloksia ei saatu. TL-dosimetrit eivät saaneet kerättyä neutroniannosta ollenkaan, jolloin vertailu elektronisiin dosimetreihin ei toisi lisäinformaatiota.

Korjauskertoimen määrittämiseen tarvitaan keskiarvot elektronisen dosimetrin keräämistä neutroniannoksista jokaisesta kuudesta mittauspaikasta. Keskiarvon avulla saadaan lisää tarkkuutta tuloksiin, vaikka mittaukset voisi suorittaa myös vain yhdellä kerralla. Näitä kahden mittauksen keskiarvoja verrataan samaan paikkaan sijoitetun TLD:n annokseen. Verrattava TLD:n annos on muokattu dosimetriassa korjauskertoimella samalla tavalla kuin STUK:n rekisteriin lähetettävät viralliset säteilyannokset. Kaavan 5 mukaan uusi korjauskerroin $KnMul$ saadaan suoraan elektronisen dosimetrin annoksen ja TLD:n suhteesta, sillä vanha korjauskerroin $KnMul_{vanha}$ on tässä tapauksessa 1. Taulukoissa 4 ja 6 verrataan molempien laitosten tuloksia niin, että ensin jokaiselle fantomin mittauskohdalle on oma suhdelukunsa. Näistä lasketaan keskiarvo, jonka tarkoituksena on vastata mahdollisesti eri asennoissa työskentelyä työkohteella. Suhdelukujen keskiarvo kertoo keskimääräisen eron elektronisen dosimetrin ja TL-dosimetrin näyttämien neutroniannosten välillä.

Loviisa 1:n pumppukuopalla suhdeluvuista saadaan keskiarvoksi 0,582. Tällöin LO1:n korjauskertoimeksi saadaan arviolta 0,6. Vastaavasti Loviisa 2:n suhdeluvuista saadaan keskiarvoksi 0,492, josta LO2:n korjauskertoimeksi saadaan noin 0,5. Ero korjauskertoimissa on melko suuri, ja LO2:n pumppukuopalla annosvastaavuus TL-dosimetriin verrattuna on parempi. LO2:n mittauspaikalla neutroniannosnopeus oli suurempi kuin LO1:n, ja kuten on todettu, suurempi neutroniannosnopeus yleensä johtaa parempaan neutroniannosvasteeseen. Jos korjauskertoimen määrittää yhteiseksi molemmille laitoksille, pitäisi valita käytettäväksi joko kerroin, joka aiheuttaa suuremman annoskertymän, eli LO1:n korjauskerroin. Muussa tapauksessa näiden mittausten perusteella LO1:lla neutronimoduuli näyttäisi liian pientä neutroniannosta. Molempien laitosten keskimääräinen korjauskerroin olisi 0,537. Loviisan voimalaitoksella TL-dosimetreille on valittu käytettäväksi keskimääräinen korjauskerroin, jonka on todettu olevan riittävällä tarkkuudella sopiva käytettäväksi molemmilla laitoksilla. Neutronimoduuleille olisi mahdollista määrittää omat korjauskertoimet eri laitoksille, mutta silloin pitäisi ohjelmoida erikseen elektroniset neutronidosimetrit LO1:lle ja LO2:lle. Lisäksi

laitosta vaihdettaessa dosimetrikin pitäisi käydä vaihtamassa. Käytön sujuvuuden kannalta olisi siis järkevintä ottaa käyttöön keskimääräinen korjauskerroin, kuten TL-dosimetrin kohdalla on tehty. Keskimääräistä korjauskerrointa käytettäessä kertoimeen voisi lisätä vielä varmuuskertoimen, joka herkistäisi neutronimoduulin reagoimaan suuriin neutroniannoksiin ajoissa. Varmuuskerroin toisi keskimääräistä korjauskerrointa myös lähemmäs LO1:n suurempaa korjauskerrointa.

6.2 Mittausvirheen arviointi

Sekä TL-dosimetrit että elektroniset dosimetrit kalibroidaan testilähteiden avulla säännöllisin väliajoin, mutta kalibroinnista huolimatta dosimetricien mittaama annos ei ole absoluuttisen tarkka. Kalibrointi tehdään testilähteen avulla, minkä vuoksi mittausvaste on erilainen todellisessa käyttöympäristössä. Mittausvirheelle on kuitenkin määritelty rajat, joiden mukaan virheen prosentuaalinen määrä on rajoitettu.

6.2.1 Dosimetricien mittausepävarmuus

TL-dosimetrillä kokonaisvirhearvio pinta- ja syväannoksille on 0,40 kun varmuustekijä on $k=2$. Elektronisen dosimetrin neutronimoduuli on kalibroitu tehtaalla $^{241}\text{AmBe}$ -lähteen avulla, ja moduulin neutroniannosmittauksen epätarkkuus on $\leq \pm 10\%$. Korkeaenergisien gammasäteilyn ei pitäisi vaikuttaa neutronimoduulin toimintaan juurikaan, sillä 2 Sv/h annosnopeudella ^{60}Co -lähteellä vaikutus neutroniannokseen on alle viisi prosenttia gammaannosnopeudesta (Mirion 2019. 17)

6.2.2 Mittausjärjestelyistä aiheutuva virhe

Elektronisten dosimetricien sijoittelua fantomissa vaihdeltiin, jotta dosimetricista itsestään johtuvat mittausepävarmuudet saataisiin suljettua pois. Ajanpuutteen vuoksi mittauksia ehditettiin tekemään vain kahdet jokaista mittauspaikkaa kohden, jolloin jokainen dosimetri ehti olla vain kahdessa paikassa kolmen sijaan.

TLD:t sijaitsivat normaalilla paikalla elektronisen dosimetrin vieressä, yläosassa, miten ne haalarinkin taskussa olisivat. Neutronimoduulissa neutroni-ilmaisimien sijaitsee kuitenkin

dosimetrin alaosassa, joten TLD:n neutroneja mittaavien kiteiden ja elektronisen dosimetrin neutroni-ilmaisimen välinen etäisyys oli mittauksissa noin 10 cm. Tämä ero ei välttämättä kuitenkaan ole epävarmuutta lisäävä tekijä, koska haalarin taskussa ilmaisimien korkeusero on sama. Mittausjaksojen pituus myös vaihteli noin puolella minuutilla. Tämän puolen minuutin aikana dosimetreihin kerääntyi mittauspaikesta riippuen noin muutama μSv annosta, joka aiheuttaa pientä virhettä mittauksiin. TLD:t vietiin suoraan mittauksista luetaan, mutta niihin todennäköisesti kertyi joitakin mikrosievertejä annosta matkalla dosimetrialaboratorioon, johtuen ydinvoimalaitoksen taustasäteilystä.

Sijoitteluun liittyvää mittausvirhettä esiintyi kaikilla mittauspaikeilla: pääkiertopumppujen mittauspaike oli suoraan kuopan reunalla, mutta reunaa kiersi metallikaide, joka oli osittain dosimetrien ja kuopan välissä. Tämä kaide on voinut aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin, jos se asettui epätasaisesti eri dosimetrien kohdalle. Osa neutroneista on voinut hidastua ennen dosimetrien saavuttamista, jolloin annosvaste muuttuu, tai sirota kokonaan toiseen suuntaan. Kaide on siis voinut olla lisäämässä eroa eri korkeuksilla sijaitsevien neutroni- ja TL-dosimetrien neutroniannosten välillä.

Boorianalyssaattorilla puolestaan sijoittelu oli pakko tehdä siten, että mittaustomi sijaitsi noin 20 cm päässä säteilylähteestä johtuen mittaustomien rakenteesta. Tämän vuoksi neutroniannosnopeus oli liian pieni mittauksia varten. Boorianalyssaattorilla sijoittelu oli ongelmallinen myös liian suuren gamma-annosnopeuden vuoksi. TL-dosimetrien luennassa neutroniannoksen rekisteröimiseksi neutronisäteilyä pitäisi olla enemmän kuin gammasäteilyä. Boorianalyssaattorin osien sisäpinnoille kertyneiden epäpuhtauksien vuoksi gamma-annosnopeus oli kuitenkin neutroniannosnopeutta suurempi kaikissa kokeilluissa mittaustomikoissa. Merkittävintä virhettä mittaustomien olosuhteista aiheutui boorianalyssaattorilla, mistä ei lopulta saatu korjauskertoimen laskentaan soveltuvia mittaustuloksia.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä jatkettiin selvitystä korjauskertoimen tarpeesta neutronimoduulille. Tehtyjen mittausten perusteella myös laskettiin mahdollinen korjauskerroin käytettäväksi Loviisan voimalaitoksella elektronisten dosimetriene neutronimoduuleissa. Neutronimoduulin ja TL-dosimetrin tulokset olivat hyvin vaihtelevia jokaisessa mittauspaiassa. Kaikissa mittauksissa neutronimoduuli näytti liian pieniä neutroniannoksia verrattuna TLD:n annokseen, mistä voidaan päätellä, että korjauskertoimelle olisi tarvetta. Neutroniannosten ero vaihteli dosimetrin sijainnista riippuen niin, että mittaustantomin etupuolen keskimääsiin dosimetreihin tuli eniten annosta. Takana ja sivuilla sijainneissa dosimetreissa oli vähiten kertynyttä neutroniannosta.

Mittauksia tehtiin molempien laitosten pumppukuopilla sekä boorianalyssaattorilla, joista pumppukoppien mittaustulokset olivat käyttökelpoisia. Boorianalyssaattorilla suuri γ -annosnopeus verrattuna neutroniannosnopeuteen esti neutroniannosten mittaamisen TL-dosimetreilla. Tällöin myöskään annosten vertailua tässä työkohteessa ei pystytty tekemään. LO2-laitoksen pumppukuopalla neutroniannosnopeus oli suurempi kuin LO1 laitoksella samassa paikassa, ja siksi LO2:lla tehdyissä mittauksissa dosimetreihin kertyi enemmän neutroniannosta. Korjauskertoimet laskettiin ensin molemmille laitoksille erikseen, minkä jälkeen niistä muodostettiin yhteinen, keskimääräinen korjauskerroin. LO2:n korjauskerroin oli pienempi kuin LO1:n, jossa dosimetriene neutroniannosvastaavuus oli huonompi toisen laitoksen tuloksiin verrattuna. Keskimääräisen korjauskertoimen käyttö on kuitenkin perusteltavissa, koska se vastaa riittäväällä tarkkuudella molempien laitosten olosuhteita. Käytön kannalta on myös sujuvampaa, että samalla dosimetrilla pystyy työskentelemään molemmilla laitoksilla, sen sijaan että dosimetri pitäisi vaihtaa välissä.

Dosimetreilla mitattaessa virhettä aiheuttavia tekijöitä oli useita. Mittausvälineiden kalibrointi on tehty erilaisissa olosuhteissa verrattuna tässä työssä käytettyihin mittauspaiakoihin, ja myös mittausjärjestelyistä aiheutui epävarmuustekijöitä. Mittauksia olisi voinut tehdä määrällisesti enemmän, koska TL-dosimetreilla tehtiin vain yhdet mittaukset jokaisella mittauspaiakalla ja elektronisilla dosimetreilla kahdet. Tulokset ovat kuitenkin hyvin linjassa keskenään, jolloin niiden käyttäminen korjauskertoimen määrittäksessä oli mahdollista. Voidaan päätellä, että lasketulla korjauskertoimella saisi melko hyvällä tarkkuudella

neutronimoduulit näyttämään TL-dosimetrin kanssa samaa neutroniannosta ja näin ollen varoittamaan aiemmin liian suurista neutroniannoksista ja -annosnopeuksista.

8 YHTEENVETO

Tämä kandidaatintyö tehtiin Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilysojeluorganisaatiolle. Työn tarkoituksena oli laskea laitoksella tehtävien neutroniannosmittausten avulla korjauskerroin neutronimoduulille. Tarkoituksena oli saada neutronimoduulin annos näyttämään samaa lukemaa kuin termoloistedosimetri, johon tuloksia laskennassa verrataan.

Aluksi käsiteltiin työn lähtökohdat sekä selitettiin, miksi korjauskertoimen määrittäminen oli tarpeellista. Teoriaosuudessa perehdyttiin säteilyn perusteisiin ja siihen, mikä aiheuttaa säteilyä ydinvoimalaitoksella. Lisäksi käytiin läpi dosimetrian perussuureita ja säteilyannoksen määrittämisestä säteilyöntekijöillä. Tarkimmin keskityttiin työn kannalta olennaisimpaan säteilylajeihin, neutronisäteilyyn, ja sen haastaviin piirteisiin säteilymittauksissa.

Korjauskertoimen määrittämistä varten tehtiin mittauksia molempien Loviisan laitosten pumpukäyttöyksiköillä sekä toisen laitoksen boorianalyysiyksiköllä. Alkumittausten perusteella määriteltiin tarvittava säteilytusaika dosimetreille, jotta tavoiteltu neutroniannos tulisi täyteen. Alkumittauksilla myös selvitettiin ne kohdat, joissa neutroniannosnopeus oli kaikkein suurin, ja valittiin ne mittauspisteiksi. Mittausvälineenä toimi vesifantomi, jonka kylkiin oli kiinnitetty kahdelle puolelle dosimetreja yhteensä kuuteen mittapisteseen. Mittauksia tehtiin neutronimoduuleilla kahdet jokaista mittauspistettä kohden ja yhden TL-dosimetrien kanssa.

Molemmilta pumpukäyttöyksiköiltä saatiin onnistuneet mittaustulokset, joiden perusteella korjauskertoimen määrittäminen olisi tarpeellista. Huomattiin, että neutronimoduuli näytti huomattavan paljon pienempiä neutroniannoksia TL-dosimetriin verrattuna. Boorianalyysiyksiköltä puolestaan ei saatu käyttökelpoisia mittaustuloksia johtuen korkeasta gamma-annosnopeudesta.

Työssä jatkettiin jo aloitettua tutkimusta DMC 3000 -neutronimoduulin ja TL-dosimetrien eriävistä mittaustuloksista. Lopputuloksena saatiin määritettyä korjauskerroin, joka sopisi käytettäväksi molemmilla laitoksilla. Korjauskertoimeen pitäisi vielä mahdollisesti lisätä jonkinlainen varmuuskerroin, jotta elektroninen dosimetri toimisi ennakoivasti varoittaen liian suurista neutroniannosnopeuksista ja -annoksista.

LÄHTEET

Alm-Lytz Kirsi, Riihiluoma Veli & Vilkamo Olli. 2004. Ydinturvallisuus. Helsinki. Säteilyturvakeskus. 418s. 951-712-500-3

Delgado A. Mixed Field Dosimetry. 10th International Congress of The International Radiation Protection Association

Fortum 2021. Loviisan ydinvoimalaitos. [verkkosivu, saatavilla <https://www.fortum.fi/tieto-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/loviisan-ydinvoimalaitos>] [viitattu 20.11.2020]

Hirvelä Miska. 2020. Annostarkkailulaitteiston määräaikaistarkastukset. 17s. [Doris-dokumentti S-03-00025]. [viitattu 28.10.2020]. Käyttö rajoitettu.

Ikäheimonen Tarja K (toim.). 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Helsinki. Säteilyturvakeskus STUK. 197s. 951-712-496-1.

Kalinainen Timo. 2014. Espoo. Diplomityö. Suomalaisilla ydinvoimaloilla saadut säteilyannokset ja niihin vaikuttavat tekijät. saatavilla https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/13894/master_Kalinainen_Timo_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Klemola Seppo. 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Helsinki. Säteilyturvakeskus. 197s. 951-712-496-1.

Knoll, Glenn F. 2000. Radiation Detection And Measurement. 3. painos. USA John Wiley & Sons, Inc.

Mirion. $H_p(10)$ Neutronimoduulin käyttöopas. 24s. [Doris-dokumentti LO1-T381-00009]. [viitattu 30.10.2020]

Mustonen Riitta & Salo Aki. 2002. Säteilyn terveysvaikutukset. Helsinki. Säteilyturvakeskus STUK. 184s. 951-712-506-2

Pöllänen Roi (toim.). 2003. Säteily ympäristössä. Helsinki. Säteilyturvakeskus. 394s. 951-712-497-X.

Ritala M. 2008. Loviisa 1 & 2 Neutroniannoksen määrittämisen korjauskerroin TLD- mittauksiin Loviisan voimalaitoksella. 7s. [Doris-dokumentti LO1-T314-00016]. [viitattu 30.10.2020] Käyttö rajoitettu.

Salminen T & Tanska A & Viljanmaa J. 2020. Neutronimittaustetit neutronimoduulilla varustetulla elektronisella dosimetrillä (DMC 3000 N). 4s. [Doris-dokumentti LO1-K940-00133]. [viitattu 29.10.2020]. Käyttö rajoitettu.

STUK S/2018. Säteilyturvakeskuksen määräys työperäisen altistuksen selvittämisestä, arvioinnista ja seurannasta. [verkkosivu]. [viitattu 3.3.2021] saatavissa <https://www.stuklex.fi/fi/maarays/stuk-s-1-2018>

Säteilylaki 9.11.2018/859. 5 § Oikeutusperiaate, 6 § Optimointiperiaate, 7 § Yksilönsuoja-
periaate, 92 § Altistusolosuhteiden tarkkailu ja henkilökohtainen annostarkkailu. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.10.2020]. saatavissa (<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2018/20180859#L5P32>)

Turpeinen & Petrasuo. 2013. Neutronikorjauskertoimen sopivuus boorianalysointilaitteille. 4s. [Doris -dokumentti LO1-T314-00025]. [Viitattu 29.10.2020]. Käyttö rajoitettu.

Valtioneuvoston asetus ionisoivasta säteilystä 1034/2018. 34 § Säteilytyöntekijöiden luokitus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 28.10.2020]. saatavilla (<https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20181034#Pidp446425856>)

Wedholm Medical AB. 2009. Neutron Monitor 2222A, Service Manual. Ruotsi. Nyköping. Saatavilla <http://www.kwdnuclearinstruments.se>

Liite 1 Kudosten ja elinten painotuskertoimet

Kudos tai elin¹	Painotuskerroin w_T
Sukurauhaset	0,20
Punainen luuydin	0,12
Paksusuoli*	0,12
Keuhkot	0,12
Mahalaukku	0,12
Virtsarakko	0,05
Rintarauhaset	0,05
Maksa	0,05
Ruokatorvi	0,05
Kilpirauhanen	0,05
Iho	0,01
Luun pinta	0,01
Muut kudokset ja elimet, yhteensä **2	0,05

Liite 2 Eri säteilylaatuojen painotuskertoimet

Säteilyn laatu	Painotuskerroin w_R
Fotonit, kaikki energiat	1
Elektronit* ja myonit, kaikki energiat	1
Neutronit, joiden energia on	
- alle 10 keV	5
- vähintään 10 keV ja enintään 100 keV	10
- yli 100 keV ja enintään 2 MeV	20
- yli 2 MeV ja enintään 20 MeV	10
- yli 20 MeV	5
Protonit **, energia yli 2 MeV	5
Alfahiukkaset, fissionfragmentit, raskaat ytimet	20
* lukuun ottamatta DNA-molekyylin sitoutuneiden ydinten lähettämiä Augerin elektroneja, joiden vaikutusta on käsiteltävä mikrodosimetrisin keinoin	
** lukuun ottamatta rekyyliprotoneita (jotka on otettu huomioon neutronien painotuskertoimissa)	