

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

DOSIMETRIA YDINVOIMALAITOKSISSA
DOSIMETRY IN NUCLEAR POWER PLANTS

Työn ohjaaja: Juhani Vihavainen

Lappeenranta 28.10.2013

Jani Luukkonen

TIIVISTELMÄ

Jani Luukkonen

Dosimetria ydinvoimalaitoksissa

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2013

59 sivua, 22 kuvaa, 10 taulukkoa

Hakusanat: dosimetria, säteily, ydinvoima, säteilyannos

Ydinvoimalaitoksessa säteilyn voimakkuus voi nousta työtehtävästä riippuen suureksi. Säteilyn myöhäisvaikutusten todennäköisyyden pienentämiseksi on tärkeää voida luotettavasti määrittää henkilön säteilyannos ja ehkäistä työntekijöiden suuria säteilyannoksia. Tässä työssä käydään läpi säteilyn synty, säteilyn ilmaisumenetelmät ja säteilyannoksen mittaus Suomen ydinvoimalaitoksissa.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
Sisällysluettelo	3
Symboli – ja lyhenneluettelo	4
1 JOHDANTO	9
2 IONISOIVA SÄTEILY	10
2.1 Hiukkassäteily	10
2.1.1 Alfa– ja beetahajoaminen.....	10
2.1.2 Neutronisäteily	13
2.2 Fotonisäteily	16
2.2.1 Gamma– ja röntgensäteily	16
2.2.2 Fotonin vuorovaikutukset	18
2.3 Säteilyn ja aineen vuorovaikutus.....	22
2.4 Säteilyn terveysvaikutukset.....	29
3 SÄTEILYN ILMAISUMENETELMÄT	32
3.1 Ionisaatiokammio	33
3.2 Verrannollisuuslaskuri.....	34
3.3 Geiger–Müllerputki	35
3.4 Termoloisteilmaisain.....	36
3.5 Puolijohdeilmaisain.....	38
3.6 Tuikeilmaisain.....	39
3.7 Neutronisäteilyn ilmaisimet	40
4 HENKILÖDOSIMETRIA	43
4.1 Säteilytyö.....	43
4.1.1 Valvonta–alue	44
4.1.2 Säteilyaltistuksen seuranta	47
4.2 Termoloistedosimetri.....	49
4.3 Mittausepävarmuus	52
5 YHTEENVETO	56
Lähdeluettelo	57

SYMBOLI – JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	pinta-ala	[m ²]
A	massaluku	[-]
A_r	suhteellinen atomimassa	[g]
B	boori	[-]
C	cema	[Gy, J/kg]
\dot{C}	cemanopeus	[Gy/s, J/kgs]
C	hiili	[-]
Co	coboltti	[-]
d	syvyys	[m]
D	absorboitunut annos	[Gy]
E	fotonin tai neutronin energia	[J]
E_γ	kvantin energia ydintransitioissa	[J]
E_c	sekundaarielektronien energia	[J]
E_{tr}	sekundaarihiukkasten liike-energia	[J]
$E(\tau)$	henkilön efektiivisen annoksen kertymä	[Sv]
e	Neperin luku	[-]
F	fluori	[-]
H	ekvivalenttiannos	[Sv, J/kg]
\dot{H}	ekvivalenttiannosnopeus	[Sv/s, J/kgs]
H_E	efektiivinen annos	[Sv, J/kg]
H_m	annosmittarilla määritetty annos	[Sv, J/kg]
H_p	henkilöannosekvivalentti	[Sv, J/kg]

H_s	pinta-annos	[Sv, J/kg]
H_T	elimen tai kudoksen ekvivalenttiannos	[Sv, J/kg]
H_t	annoksen oikea arvo	[Sv, J/kg]
H_0	kirjauskynnys	[Sv, J/kg]
He	helium	[-]
$h(g)_j$	kehoon joutuneen radioaktiivisen nuklidin j annosmuuntokerroin	[Sv/Bq]
I	suhteellinen virhe	[-]
J	radioaktiivisen nuklidin aktiivisuus	[Bq]
K	kerma	[Gy, J/kg]
\dot{K}	kermanopeus	[Gy/s, J/kg]
Li	litium	[-]
LiB	litiumboraatti	[-]
LiF	litiumfluoridi	[-]
M_i	mittaustulos	[-]
M_t	mitattavan suureen oikea arvo	[-]
m	massa	[g]
N	typpi	[-]
N	hiukkasten lukumäärä	[-]
Q	efektiivinen laatutekijä	[-]
Q_e	hajoamisessa vapautuva energian arvo	[J]
Q_i	fotonisäteilyn ionisaation määrä	[C]
R	annosmittarin vaste	[-]
Ra	radium	[-]
Rn	radon	[-]

T	lämpötila	[K]
t	aika	[s]
w_R	absorboituvan säteilyn painokerroin	[-]
w_T	elimen ja kudoksen painokerroin	[-]
X	säteilytys	[C/kg]
Z	järjestysluku	[-]

Kreikkalaiset aakkoset

ε	keskimääräisen energian määrä	[J]
μ	fotonien matkavaimennuskerroin	[1/m]
μ/ρ	massavaimennuskerroin	[m ² /kg]
μ_{ctr}	Comptonin ilmiön energia-absorbtiokerroin	[1/m]
μ_{tr}	energian luovutuskerroin	[1/m]
μ_{tr}/ρ	energianluovutuksen massakerroin	[m ² /kg]
μ_{en}	energia-absorbtiokerroin	[1/m]
μ_{en}/ρ	energia-absorbtiion massakerroin	[m ² /kg]
ν	neutriino	[-]
$\bar{\nu}$	antineutriino	[-]
ρ	väliaineen tiheys	[g/m ³]
σ_{cs}	sirontavaikutusalala	[m ²]
σ_{ca}	absorbtiavaikutusalala	[m ²]
Φ	hiukkaskertymä	[1/m ²]
φ	hiukkaskertymänopeus	[1/m ² s]
Ψ	energiakertymä	[J/m ²]

ψ energiakertymänopeus [J/m²s]

Alaindeksit

f valosähköinen ilmiö

c Comptonin ilmiö

h hengitys

p parinmuodostus

p person, henkilö

R radiation, säteily

s surface, pinta

s suu

T Tissue, kudokset/elin

Lyhenteet

ALARA As Low As Reasonably Achievable

ALI Annual Limit on Intake

DAC Derived Air Concentration

DIS Direct Ion Storage

DNA Deoksiribonukleiinihappo

DIS Direct Ion Storage

GM Geiger–Müller

IAEA International Atomic Energy Association

ICRP International Commission on Radiological Protection
Kansainvälinen säteilysuojelutoimikunta

LET Linear Energy Transfer

LNT	Linear No–threshold Model
ST	Säteilyturvallisuus
STUK	Säteilyturvakeskus
TVO	Teollisuuden Voima Oyj
TL	Termoloiste
TLD	Termoloistedosimetri
YVL	Ydinvoimalaitos

1 JOHDANTO

Dosimetria on fysiikan piiriin kuuluva tieteenala, joka käsittelee säteilyn ja säteilyannoksen mittausta sekä suureita. Henkilön säteilyaltistuksen arvioimiseksi on tärkeää, että dosimetrinen menetelmä fyysikaalisen annoksen määrittämiseksi on riittävän luotettava. Tässä työssä tavoitteena on luoda yleiskuva Suomen ydinvoimalaitosten dosimetriasta.

Ydinreaktorissa syntyy sen käytön aikana radioaktiivisia aineita, joiden säteily voi vaikuttaa ihmisen terveyteen. Radioaktiiviset aineet ovat pääasiassa reaktorin ydinpolttoaineessa. Pieni osa aineista on kuitenkin myös reaktorin jäähdytysjärjestelmässä sekä siihen liittyvissä puhdistus- ja jätejärjestelmissä. Työntekijöiden säteilyannokset syntyvät pääasiassa ydinvoimalaitosten vuosihuoltojen aikana, jolloin työntekijät tekevät töitä aktiivisten komponenttien ja avattujen järjestelmien läheisyydessä. Vuosihuoltojen pituus ja säteilysuojelullisesti merkittävät työt vaikuttavat henkilöiden yhteenlasketun annoksen suuruuteen. (STUK 2013)

Säteilylain (27.3.1991/592) 12. §:n mukaan säteilytyöllä tarkoitetaan säteilyn tai ydinenergian käyttöön liittyvää työtä tai tehtävää, jossa työntekijä voi altistua siinä määrin säteilylle, että työpaikalla on järjestettävä säteilyaltistuksen seuranta. Säteilyasetuksen (20.12.1991/1512) 11. §:n mukaan säteilytyöluokkaan A kuuluville työntekijöille on järjestettävä annostarkkailu työstä aiheutuvien säteilyannosten seuraamiseksi. Tarkkailun tulee perustua henkilökohtaiseen annosmittaukseen tai muuhun henkilökohtaiseen annosmääritykseen. Jos toiminnan laatu edellyttää, on henkilökohtaisen annosmittauksen rinnalla tai sen sijasta käytettävä säteilyturvakeskuksen hyväksymiä muita annostarkkailumenetelmiä siten, että jokaisen säteilytyöluokkaan A kuuluvan työntekijän säteilyaltistus voidaan määrittää. Suomessa säteilyturvakeskus valvoo työntekijöiden säteilyannoksia.

Tässä työssä käsitellään dosimetrian keskeiset suureet ja yksiköt, säteilyn laskennallisesta mittauksesta aina efektiivisen annoksen määrittämiseen. Lisäksi käydään läpi säteilyn ilmaisumenetelmät ydinvoimalaitoksen dosimetriassa sekä annosseurantajärjestelmä.

2 IONISOIVA SÄTEILY

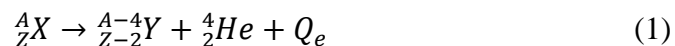
Atomeista ja niiden ytimistä peräisin olevaa hiukkasten virtaa kutsutaan ionisoivaksi säteilyksi, jos säteilyenergia riittää ionisoimaan tai virittämään väliaineen atomeja tai molekyyliä. Ionisoimatonta säteilyä on sen sijaan esimerkiksi valo, lämpö ja ultraviolettisäteily. Väliaineen ionisoinnissa säteilyn vaikutuksesta sähköisesti neutraaleista atomeista irtoaa elektroneja ja niistä tulee positiivisesti varautuneita, eli ionisoituneita atomeja. Ionisoiva säteily jaetaan hiukkassäteilyyn ja fotonisäteilyyn. (Luukko 2009, 5)

2.1 Hiukkassäteily

Hiukkassäteily koostuu pienistä ionisoivista hiukkasista. Ydinvoimalaitoksessa hiukkassäteilylajit ovat alfa-, beeta- ja neutronisäteily. Näistä alfa- ja beetasäteily ovat suoraan ionisoivia säteilylajeja ja neutronisäteily välillisesti ionisoivaa. (TVO 2013, 23)

2.1.1 Alfa- ja beetahajoaminen

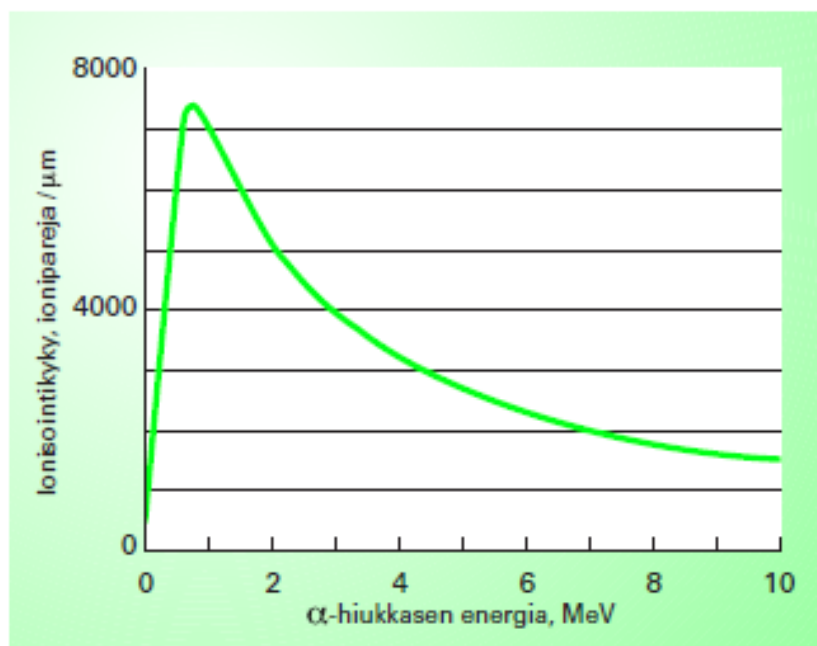
Alfahajoamisessa ytimeistä irtoaa kahden protonin ja kahden neutronin muodostama alfahiukkanen α , eli helium-ydin ${}^4\text{He}$. Raskailla nuklideilla alfahajoaminen on yleistä. Alfahiukkasella on suuri sidosenergia nukleonia kohti, ja se on syynä miksi ydin hajoaa lähettämällä alfahiukkasen yksittäisten nukleonien sijaan. (Toivonen et al. 1988, 55) Alfahajoamisen hajoamisyhtälö on:



missä Q_e on hajoamisessa vapautuva energian arvo. Esimerkkinä alfahajoamisesta on Radium-226:n hajoaminen Radon-222:ksi (Stabin 2007, 21):



Koska alfahiukkasella on suuri massa ja varaus, väliaineen jarrutuskyky on alfahiukkasille paljon suurempi kuin muille hiukkasille. Tästä johtuen alfahiukkasella on lyhyt kantama, vain muutama senttimetri ilmassa ja pysäyttämiseen riittää paperiarkki. Alfasäteily on kuitenkin vaarallista elimistöön joutuessaan korkean ionisointikyvyn vuoksi. (TVO 2013, 18)



Kuva 2.1: Alfahiukkasen ionisointikyky kudoksessa energian funktiona (Ikäheimo 2002, 40)

Beetahajoamisessa ydin siirtyy alempaan energiatilaan ytimen varauksen muuttuessa, mutta massaluvun pysyessä samana. β^- -hajoamisessa ytimen neutroni hajoaa protoniksi ja elektroniksi. Protoni jää ytimeen elektronin sinkoutuessa ulos β^- -säteilyn muodossa. Esimerkkinä β^- -hajoamisesta (Toivonen et al. 1988, 55–56):



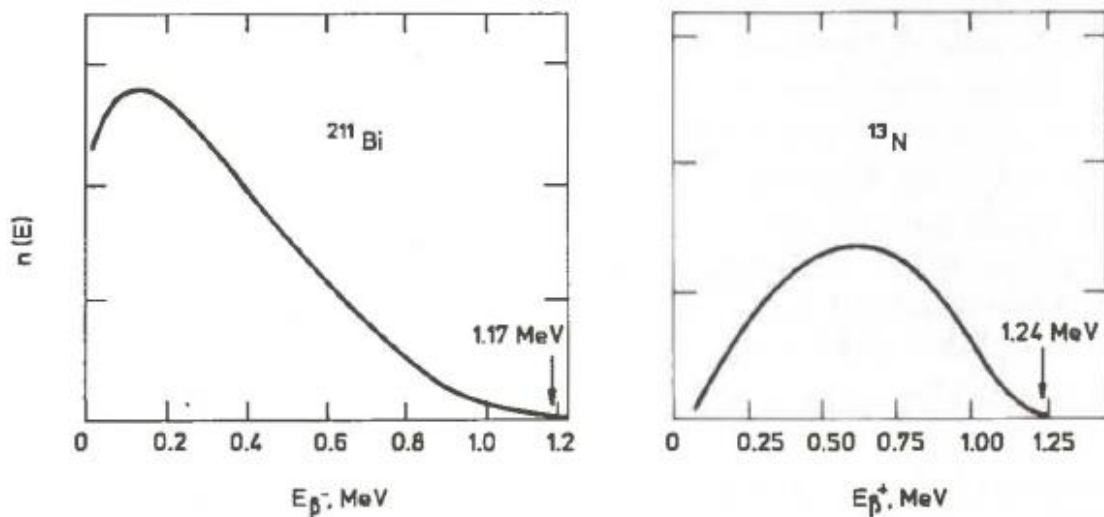
β^+ -hajoaminen tuottaa protonin hajotessa neutronin ja positronin eli β^+ -hiukkasen. Positronit voivat törmätä elektroneihin jolloin syntyy sähkömagneettista

annihilaatiosäteilyä. β^+ -hajoamisen sijaan saattaa tapahtua elektronikaappaus ytimen siepatessa yhden elektronin atomin elektroniverholta. Esimerkkinä β^+ -hajoamisesta (Toivonen et al. 1988, 55–56):



β^- - ja β^+ -säteilyn energiaspektrit on esitetty kuvassa 2.2. Hajoavan ytimen alku- ja lopputilan energioiden erotus vastaa beetasäteilyn maksimienergiaa. Useimmiten kuitenkin β -hiukkasen liike-energia jää maksimienergiaa pienemmäksi. Erotuksen vie β^+ -hajoamisessa ja elektronikaappauksessa syntyvä massaton ja varaukseton hiukkanen, neutriino (ν), tai β^- -hajoamisessa sen vastahiukkanen antineutriino ($\bar{\nu}$). (Toivonen et al. 1988, 56)

Beetasäteilyllä on pitempi kantama kuin alfasäteilyllä, sillä alfahiukkasen massa ja varaus ovat suuremmat kuin beetahiukkasella. Tämän vuoksi beetasäteily on harvemmin ionisoivaa kuin alfasäteily, eli beetasäteilyn kantama väliaineessa on myös parempi. Beetasäteilyn kantama ilmassa on muutamia kymmeniä senttimetrejä, ja noin 0,3 mm:n paksuinen alumiinilevy absorboi kaikki beetahiukkaset. (TVO 2013, 19)



Kuva 2.2: Beetahiukkasten energiaspektri (Toivonen et al. 1988, 56)

2.1.2 Neutronisäteily

Neutronisäteily koostuu neutroneista, varauksettomista hiukkasista jotka tunkeutuvat hyvin väliaineeseen. Varauksettomina hiukkasina ne eivät aiheuta atomien ionisaatiota, vaan vuorovaikuttavat suoraan väliaineen ytimien kanssa, eli neutronisäteily on välillisesti ionisoivaa säteilyä. Vuorovaikutuksessa ytimistä voi emittoitua gammasäteilyä, protoneja, neutroneja ja alfahiukkasia. Ydin saattaa fissioitua tai absorboida neutronin, jolloin syntyy väliydin virittyneessä tilassa. Viritys useimmiten purkautuu gammasäteilyinä. Neutroni saattaa myös sirota ytimestä elastisesti tai epäelastisesti. (Toivonen et al. 1988, 82)

Neutronien ja ytimien väliset vuorovaikutukset ovat voimakkaasti riippuvaisia neutronien energiasta. Neutronit luokitellaan liike-energian perusteella taulukon 2.1 mukaisesti. Ydinvoimalaitoksessa neutronisäteilyä syntyy vain ydinreaktorissa. Fissioreaktioissa syntyvien neutronien energia on noin 0,5–15 MeV. Käytetyn polttoaineen siirroissa täytyy myös huomioida neutronisäteilyn mahdollisuus. (Ikäheimo 2002, 50–51)

Taulukko 2.1: Neutronien luokittelu liike-energian perusteella (Ikäheimo 2002, 50)

Erittäin nopeat neutronit	yli 10 MeV
Nopeat neutronit	0,2 MeV – 10 MeV
Keskinopeat neutronit	0,1 keV – 200 keV
Hitaat neutronit	0,4 – 100 eV
Termiset neutronit	0,003 eV – 0,4 eV
Kylmät neutronit	alle 0,003 eV

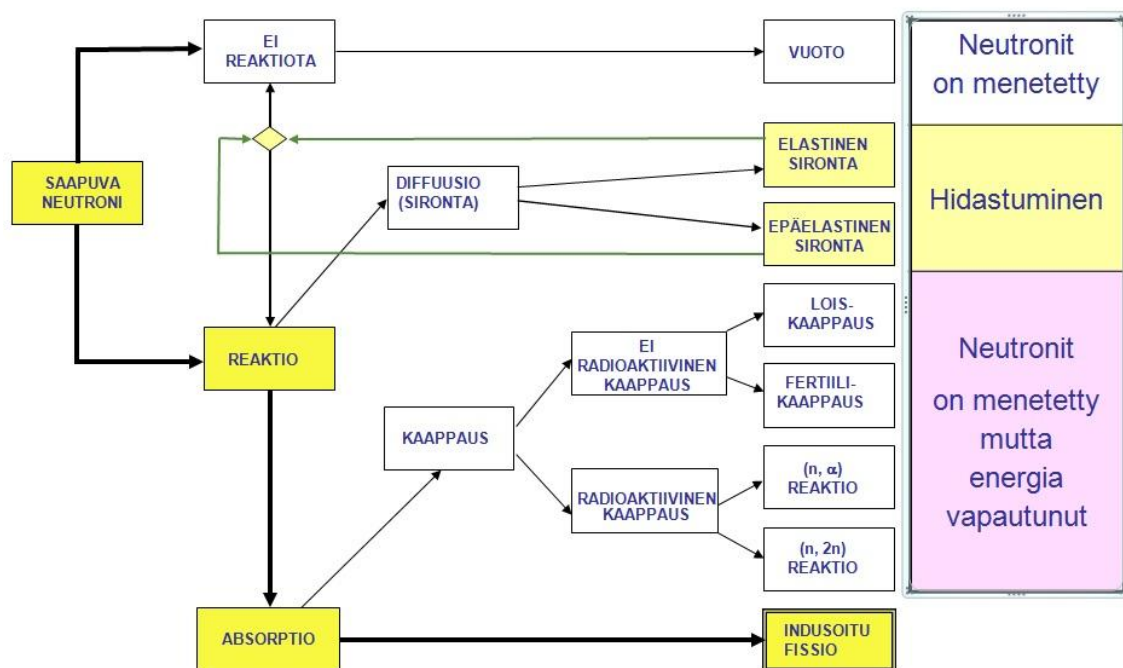
Liikkuessaan väliaineessa neutronit menettävät energiaansa, eli ne hidastuvat. Hidastuminen perustuu neutronien sirontaan väliaineen ytimistä. Elastisessa sironnassa osa neutronin liike-energiasta voi siirtyä ytimen liike-energiaksi kokonaisliike-energian muuttumatta. Neutronin energianmenetys on suurempi suunnanmuutoksen kasvaessa. Epäelastinen sironta on törmäys jossa kohdeydin siirtyy virittyneeseen tilaan. Törmäyksessä kuluu osa neutronin liike-energiasta. Muodostunut virittynyt väliydin hajoaa lähettämällä neutronin. Tulevan ja lähtevän neutronin energioiden erotus jää ytimen viritysenenergiaksi. Viritystila laukeaa kun ydin lähettää gammakvantin. Neutronin liike-energian täytyy olla suurempi kuin kohdeytimen alin viritysenenergia jotta epäelastinen sironta olisi mahdollista. (Toivonen et al. 1988, 84–86)

Keveistä alkuaineista koostuvassa väliaineessa, kuten kudoksessa elastinen sironta on todennäköisin neutronien hidastumisen muoto, raskaissa väliaineissa sen sijaan epäelastinen sironta. Epäelastinen sironta voi synnyttää pitkäaikaisia isomeerisia tiloja, jotka ilmenevät materiaalin aktivoitumisena. Hidastuminen jatkuu kunnes neutroni absorboituu väliaineeseen, karkaa kohteesta tai joutuu termiseen tasapainoon. Termisessä tasapainossa neutronien ja väliaineen atomien energia noudattaa samaa Maxwellin jakaumaa. (Toivonen et al. 1988, 85–86)

Neutronisäteily johtaa väliaineen ominaisuuksien muuttumiseen, kuten metallien ja muovien haurastumiseen. Tämä johtuu sironnoissa kohdeytimiin luovutetun liike-energian kykyyn aiheuttaa sekundaaritapahtumia väliaineessa. Tällaisia sekundaaritapahtumia ovat esimerkiksi hilavirheiden muodostuminen metalleissa ja kemiallisten sidosten katkeaminen orgaanisessa aineessa. (Toivonen et al. 1988, 86)

Neutronin ja ytimen vuorovaikutus saattaa johtaa neutronin absorptioon. Absorptioreaktioissa väliytimen viritys saattaa laueta muullakin tavoin kuin emittoimalla neutronin. Absorptioreaktioita ovat fissio ja säteilevät kaappaukset (n,γ) , (n,p) , (n,α) , $(n,2n)$. Reaktiotuotteet ovat hyvin usein radioaktiivisia. (Toivonen et al. 1988, 86)

Raskaissa nuklideissa neutroni voi aiheuttaa fission. Fissiossa ydin halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi samalla vapauttaen muutamia neutroneja. Samalla vapautuu energiaa koska keskiraskailla ytimillä on enemmän sidosenergiaa nukleonia kohti kuin raskailla ytimillä. Fissio on mahdollinen jos neutronikaappauksessa syntyvän väliytimen viritysendergia on ainakin 4–6 MeV. Terminen neutroni saattaa myös aiheuttaa fission, jos fission kynnysendergia on pienempi kuin absorboituvan neutronin sidosenergia nuklidissa. Nuklidia kutsutaan fissiiliksi jos terminen neutroni voi aiheuttaa fission. Tietyillä nuklideilla fission aiheuttaa vain nopea neutroni. Tällöin tarvitaan neutronin sidosenergian lisäksi energiaa, jotta väliytimen viritysendergia ylittäisi fission kynnysendergian. (Toivonen et al. 1988, 88)



Kuva 2.3: Neutronien pääreaktiot (Laukka 2006, 24)

Neutronisäteilysojus on nelikerroksinen. Lähimmäksi lähdettä sijoitetaan raskasytimistä ainetta, kuten rautaa sillä siinä kimmottoman sironnan todennäköisyys on suuri. Yksikin epäelastinen törmäys riittää vähentämään neutronin liike-energian alle

sironnan kynnyksarvon. Toinen kerros sisältää ainetta jossa on runsaasti vetyä kuten vettä, parafiiniä tai hiilivetyypohjaista muovia, esimerkiksi polyeteeniä. Tarkoituksena on hidastaa nopeat neutronit termisiksi. Kolmannen kerroksen tarkoitus on absorboida tehokkaasti termisiä neutroneja. Aineeksi tähän valitaan yleensä booria, kadmiumia tai litiumia. Ohutkin kerros vähentää merkittävästi lävitseen pääseviä neutroneja. Nopeiden neutronien sirotessa epäelastisesti raskaista ytimistä, tai termisten neutronien absorboituessa vetyyn ja neutroneja absorboivaan kerrokseen, syntyy gammakvantteja. Siten saattaa olla tarpeellista lisätä fotoneja absorboiva neljäs suojuskerros. (Marttila 1989, 179)

2.2 Fotonisäteily

Fotonisäteily eli ionisoiva sähkömagneettinen säteily on epäsuorasti, eli välillisesti ionisoivaa säteilyä. Fotonisäteilyn vuorovaikutus aineen kanssa tuottaa ionisoivia sekundaarihiukkasia. (Toivonen et al. 1988, 77) Fotonisäteilyllä on laaja aallonpituuden ja energia-alueen spektri, jolloin säteilyn vuorovaikutukset ovat vahvasti riippuvaisia energiasta. (Luukko 2009, 14)

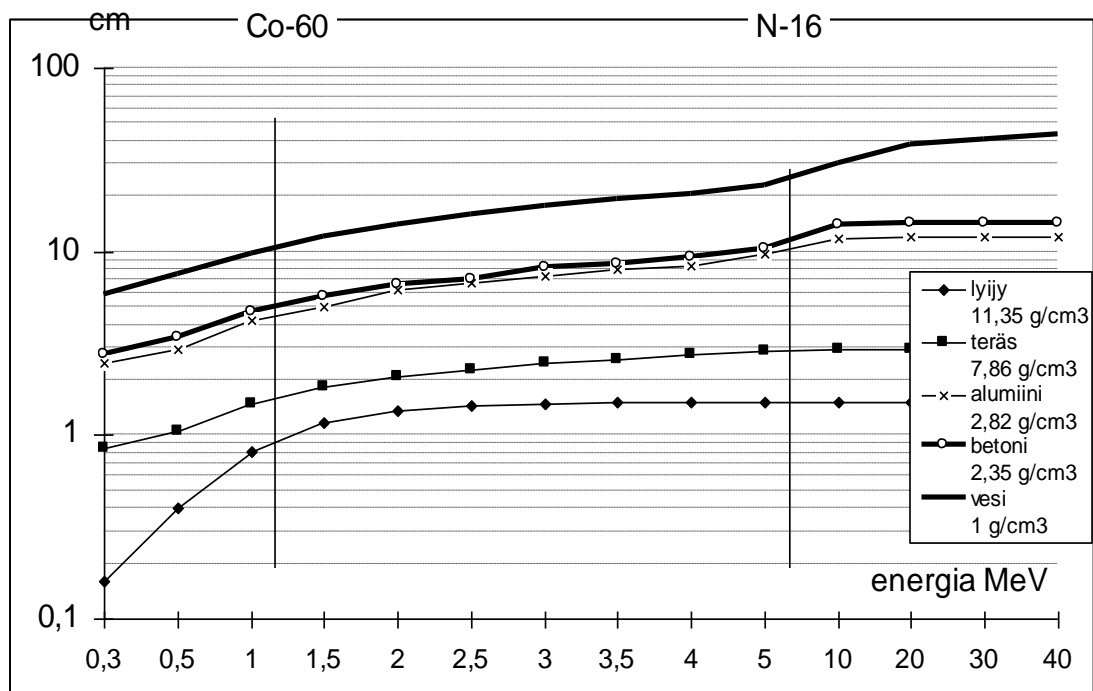
Fotonisäteilyllä on eri nimityksiä riippuen säteilyn syntytavasta. Varatun hiukkasen ollessa kiihtyvässä tai hidastuvassa liikkeessä muuttuu osa sen liike-energiaa jarrutussäteilyksi. (Ikäheimo 2002, 16) Jarrutussäteilyä syntyy sitä enemmän, mitä suurempi energia elektronilla on ja mitä suurempi väliaineen järjestysluku on. (Ikäheimo 2002, 41) Ydinten energiatilojen välisissä siirtymissä syntyy gammasäteilyä. Atomien sisäelektronien siirroksissa syntyy karakteristista röntgensäteilyä. (Luukko 2009, 14) Annihilaatiosäteilyä syntyy positronin ja elektronin yhtyessä, jolloin niiden lepomassa muuttuu kahdeksi annihilaatiosäteilyn kvantiksi. (Ikäheimo 2002, 21)

2.2.1 Gamma- ja röntgensäteily

Ytimen sanotaan olevan virittyneessä tilassa kun sillä on ylimääräistä energiaa. Ydin vapautuu ylimääräisestä energiasta lähettämällä γ -kvantin eli gammasäteilyä.

(Hämäläinen 2007, 14) Gammasäteily on siis virittyneestä ytimestä emittoivaa korkeaenergistä sähkömagneettista säteilyä. Gammasäteily aiheuttaa ionisaatiota ainetta läpäistessään vuorovaikuttamalla elektronien kanssa, ja on siten hyvin läpäisevää. Suuren tiheyden omaava materiaali kuten teräs tai lyijy muodostaa hyvän säteilysuojan gammasäteilyä vastaan. (Wrixon et al. 2004, 8)

Gammasäteilyllä on hyvin lyhyt aallonpituus. Varauksettomana ja aineettomana se tunkeutuu erittäin hyvin väliaineeseen. Gammasäteilylle ei siten voida määrittellä maksimikantamaa, kuten alfa- ja beetasäteilylle, vaan sen absorboitumista väliaineeseen kuvataan puoliintumiskerroksella. Yhdensuuntaisesta Co-60:n gammasädekimpusta absorboituu vedessä puolet noin 10 cm:n matkalla. Betonissa puoliintumiskerros on noin 5 cm ja lyijyssä 1 cm. (TVO 2013, 21)



Kuva 2.4: Säteilyn energia ja puoliintumiskerros väliaineissa (TVO 2013, 21)

Röntgensäteily on atomin elektroniverhosta tai vapaan elektronin liiketilan muutoksista lähtöisin olevaa lyhytaaltoista ja suurienergistä sähkömagneettista säteilyä. Röntgensäteily koostuu jarrutussäteilystä ja karakteristisesta röntgensäteilystä.

Molempia voidaan tuottaa röntgenputkella, joka koostuu katodista ja anodista. Negatiivisesta elektrodista, katodista irtoaa kuumennettaessa elektroneja. Positiivinen elektrodi, anodi, on kytketty suurjännitelähteeseen jolloin anodin ja katodin välillä on voimakas sähkökenttä. Sähkökenttä vetää elektroneja, ja saa ne törmäämään anodille suurella nopeudella. Anodiin osuva elektroni saattaa irrottaa anodin atomeista sisäkuoren elektronin. Tällöin sisäkuorelle jää tyhjä energiatila. Kun sisäkuorelle siirtyy ulomman kuoren elektroni, vapautuu elektronin sidosenergia sähkömagneettisena säteilyä, karakteristisena röntgensäteilyä. Energia saattaa myös siirtyä ulomman kuoren elektronille, joka sinkoutuu ulos atomista augerelektronina (Ikäheimo 2002, 15)

Varatun hiukkasen ollessa kiihtyvässä tai hidastuvassa liikkeessä muuttuu osa sen liikeenergiasta jarrutussäteilyksi. Suurin osa jarrutussäteilystä syntyy elektronien suunnan muuttuessa ytimen sähkökentässä. Röntgenputken säteilystä suurin osa on jarrutussäteilyä, ja vain muutama prosentti karakteristista röntgensäteilyä. Jarrutussäteilyn maksimienergia riippuu hidastuvan hiukkasen energiasta, sillä hidastuva varattu hiukkanen voi luovuttaa energiansa yhdelle tai useammalle fotonille. (Ikäheimo 2002, s. 16) Positroni hidastuu lähes samalla tavalla kuin elektroni. Positroni yhdistyy elektroniin hidastumisen loppuvaiheessa. Tällöin hiukkaset häviävät ja niiden massaa vastaava energia vapautuu annihilaatiosäteilyä. (Ikäheimo 2002, 42)

2.2.2 Fotonin vuorovaikutukset

Fotonisäteilyn vuorovaikutus aineen kanssa tuottaa ionisoivia sekundaarihiukkasia. Fotonisäteily voi olla vuorovaikutuksessa ydintä tai elektroneja ympäröivän sähkömagneettisen kentän tai ydinvoimien aiheuttaman kentän kanssa. Vuorovaikutus voi olla absorptio, elastinen tai epäelastinen sironta. Säteilysuojelun kannalta merkittävät fotonivuorovaikutukset on esitetty kuvassa 2.5 (Ikäheimo 2002, 44)



Kuva. 2.5: Säteilysuojelun kannalta merkittävät fotonivuorovaikutukset (Ikäheimo 2002, 44)

Elastisessa sironnassa (Rayleighin sironta) fotoni siroaa elektroniverhosta. Fotonin energia ei muutu merkittävästi sironnassa, suunnanmuutokset ovat merkittäviä ainoastaan pienillä fotonin energioilla ja raskaissa aineissa. Sironnan vaikutusala on verrannollinen järjestysluvun neliöön. (Ikäheimo 2002, 44)

Valosähköinen ilmiössä fotonin energia siirtyy kokonaan elektronikuorelta poistuvalla elektronille. Osa fotonin energiasta kuluu elektronin irrottamiseen, loppuosa energiasta muuttuu vapautuneen fotoelektronin liike-energiaksi. Ylemmältä kuorelta siirtyvä elektroni täyttää fotoelektronin jättämän aukon, jolloin syntyy karakteristista röntgensäteilyä ja kevyillä aineilla augerelektroneja. Valosähköinen ilmiö on tärkein gammasäteilyn ja aineen vuorovaikutusilmiö pienillä säteilyenergioilla. Vaimennuskerroin on verrannollinen tekijään $Z^4 E^{-3,5}/A_r$, missä Z on ytimen protonien lukumäärä, E on fotonin energia ja A_r on suhteellinen atomimassa. Makrovaikutusala on voimakkaasti riippuvainen järjestysluvusta, mikä tekee raskaista materiaaleista hyviä fotonisäteilyn absorbaattoreita. (Ikäheimo 2002, 44–46)

Comptonin ilmiössä fotoni siroaa löyhästi sitoutuneesta elektronista. Fotoni menettää energiaa elektronin liike-energiaksi. Energianmenetyks on riippuvainen fotonin

energiasta ja sirontakulmasta. Makrovaikutusala pienenee energian funktiona, ja on suoraan verrannollinen aineen elektronitiheyteen. Comptonin ilmiössä syntyy aina sironnut fotonit ja elektroni, jonka energia absorboituu nopeasti väliaineessa. Sironneen säteilyn ja absorboituneen säteilyn suhteellista merkitystä voidaan kuvata sirontavaikutusalalla σ_{cs} ja absorptiovaikutusalalla σ_{ca} . Lyijyssä Comptonin ilmiö on merkittävin vuorovaikutus energia-alueella 0,8–5 MeV. Kudoksessa tämä energia-alue on 0,06–20 MeV. (Ikäheimo 2002, 47)

Jos fotonin energia on kaksi kertaa suurempi kuin elektronin lepomassaenergia 1022 keV, voi säteilyn ja atomiytimen voimakentän vuorovaikutuksesta syntyä elektroni ja positroni. Menetettyään tarpeeksi liike-energiaa, positroni yhdistyy elektroniin jolloin syntyy annihilaatiosäteilyä. Tämän parinmuodostuksen makrovaikutusala on verrannollinen tekijään Z^2/A ja karkeasti fotonin energian logaritmiin $\log E$. Parinmuodostuksen seurauksena positronin ja elektronin liike-energia absorboituu väliaineeseen, ja syntyy kaksi vastakkaisiin suuntiin lähtevää fotonia, joiden energia on 511 keV. Suurilla energioilla parinmuodostus on tärkein vaikutusmuoto, lyijyssä yli 5 MeV:n energialla ja kudoksessa yli 20 MeV:n energialla. (Ikäheimo 2002, 47)

Fotoydinreaktio tapahtuu tarpeeksi suurilla energioilla. Tällöin fotonit absorboituu atomin ytimeen ja ydin emittoi nukleonin. Näillä fotoydinreaktioilla on nukleonien sidosenergiasta aiheutuva kynnyenergia, joka useimmilla teknisesti tärkeillä aineilla on 10–15 MeV. Reaktiossa saattaa irrota myös protoni, mutta kynnyenergiat ovat paljon suuremmat verrattuna (γ, n) -reaktioon. Verrattuna muihin vuorovaikutuksiin fotoydinreaktioiden vaikutusalat ovat hyvin pieniä. (Ikäheimo 2002, 48)

Fotonien matkavaimennuskerroin μ on verrannollinen vuorovaikutusten todennäköisyyteen. Kokonaisvaimennuskerroin on eri tapahtumien makrovaikutusalojen summa (Ikäheimo 2002, 48):

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p \quad (5)$$

missä f = valosähköinen ilmiö
 c = Comptonin ilmiö
 p = parinmuodostus

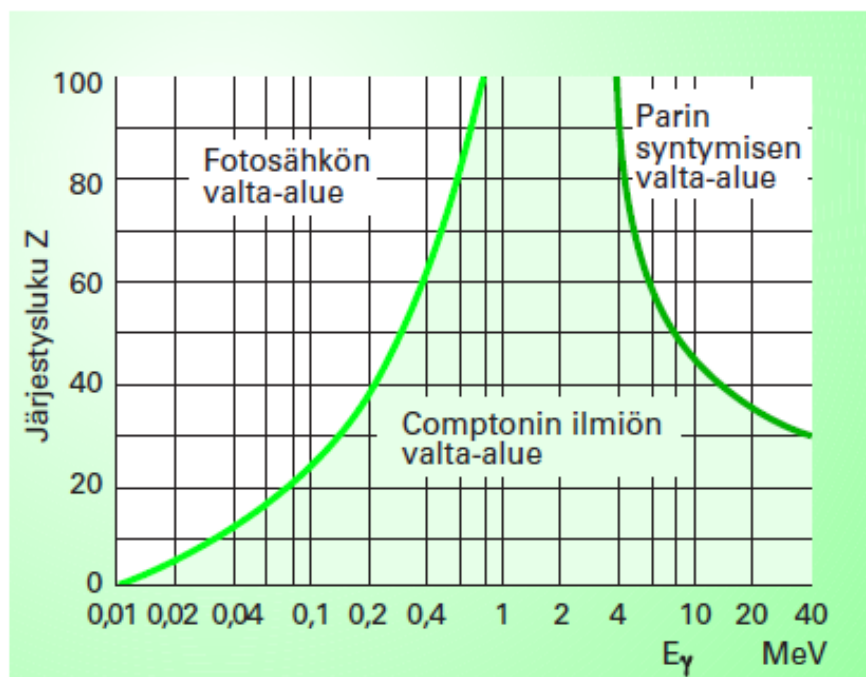
Jos väliainekerroksen paksuus halutaan ilmaista massana pinta-ala-yksikköä kohti, käytetään vastaavaa massavaimennuskerrointa μ/ρ , joka on kokonaisvaimennuskerroin jaettuna väliaineen tiheydellä. Määritellään energian luovutuskerroin:

$$\mu_{tr} = \mu_f + \mu_{ctr} + \mu_p \frac{E_\gamma - 1,022}{E_\gamma} \quad (6)$$

missä μ_{ctr} = Comptonin ilmiön energia-absorptiokerroin
 E_γ = kvantin energia ydintransitioissa

Energianluovutuksen massakerroin on energian luovutuskerroin jaettuna väliaineen tiheydellä μ_{tr}/ρ . Vähentämällä energian luovutuskertoimesta ja energianluovutuksen massakerroimesta varattujen sekundaarihiukkasten energiasta jarrutussäteilyksi menevä osuus, saadaan energia-absorptiokerroin μ_{en} ja energia-absorptioiden massakerroin μ_{en}/ρ . (Ikäheimo 2002, 48)

Tärkeimpien vuorovaikutusten vaikutusalat kasvavat järjestysluvun Z kasvaessa. Raskaimmat alkuaineet absorboivat siis tehokkaimmin fotonisäteilyä. Fotosähköilmiön vaikutusala on verrannollinen järjestysluvun neljänteen potenssiin ja parinmuodostuksen vaikutusala järjestysluvun toiseen potenssiin, mutta Comptonin ilmiö on verrannollinen vain aineen elektronitiheyteen. Näin ollen Comptonin ilmiön merkitys vähenee, kun järjestysluku kasvaa. (Ikäheimo 2002, 48–49)



Kuva 2.6: Vallitseva vuorovaikutus fotonin energian ja väliaineen järjestysluvun funktiona (Ikäheimo 2002, 46)

2.3 Säteilyn ja aineen vuorovaikutus

Säteilykenttään ja vuorovaikutusilmiöihin liittyvät ominaisuudet tulee määritellä, jotta voidaan kuvailla säteilyn ja aineen vuorovaikutusta. Säteilykenttää kuvaavat hiukkaskertymä Φ ja energiakertymä Ψ . Hiukkaskertymä on säteilykentässä pienen pallon muotoiseen alueeseen päässeiden hiukkasten lukumäärä dN jaettuna kyseessä olevan pallon isoympyrän pinta-alalla dA (Marttila 1989, 11):

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (7)$$

Hiukkaskertymää voidaan tarkentaa käyttämällä termejä neutronikertymä tai fotonikertymä, kun hiukkaslaji tunnetaan. Energiakertymä Ψ kertoo kuinka paljon hiukkaset tuovat energiaa tarkasteltavaan pallon muotoiseen alueeseen (Luukko 2009, 7):

$$\psi = \frac{dR}{dA} \quad (8)$$

Lisäksi määritellään hiukkas- ja energiakertymän ajasta riippuvat suuret hiukkaskertymänopeus φ ja energiakertymänopeus ψ (Marttila 1989, 11–12):

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} \quad (9)$$

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} \quad (10)$$

Ionisoivan säteilyn vaikutus väliaineessa riippuu absorboituneesta energiamäärästä. Primaarisäteilyn ja aineen vuorovaikutuksissa syntyy välittömästi ionisoivia hiukkasia. Ionisoivasta primäärisäteilystä energia siirtyy sekundaarihiukkasille, jolloin puhutaan energian muuntumisesta. Varauksettomien hiukkasten tuottamien varattujen sekundaarihiukkasten liike-energiaa niiden syntyhetkellä mittaa kerma K . Sekundaarihiukkasten irrottamiseen tarvittavaa energiaa ei lasketa mukaan. Kerma on tarkastelupisteen sekundaarihiukkasten liike-energia jaettuna alkion massalla (Luukko 2009, 19):

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (11)$$

Kerman yksikkö on gray (lyhenne Gy, J/kg). Kerman muutosta ajan suhteen kuvaa kermanopeus (Luukko 2009, 20):

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (12)$$

Kermaa vastaava varattujen hiukkasten energianluovutusta mittaava suure on cema C . Cema mittaa varattujen primaarihiukkasten energianmenetystä kun ne törmäävät väliaineen atomien elektroneihin. Cemaan luetaan mukaan sekundaarielektronien irrottamiseen tarvittava energia ja niiden liike-energia, mutta ei energiaa, jonka sekundaarielektronit luovuttavat väliaineeseen. (Luukko 2009, 20)

$$C = \frac{dE_c}{dm} \quad (13)$$

Myös ceman yksikkö on gray. Ceman muutosta ajan suhteen kuvaa cemanopeus (Luukko 2009, 20):

$$\dot{C} = \frac{dC}{dt} \quad (14)$$

Säteilytys X on fotonisäteilyn ionisaation määrä ilmassa massa-alkiota kohti (Marttila 1989, 14):

$$X = \frac{dQ_i}{dm} \quad (15)$$

Tärkein säteilyn vaikutusta aineeseen mittaava suure on absorboitunut annos D . Absorboitunut annos on ionisoivasta säteilystä aineeseen absorboituneen keskimääräisen energian määrä $d\varepsilon$ massa-alkiota kohti (Luukko 2009, 20):

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (16)$$

Absorboituneen annoksen yksikkö on gray. Absorboitunut annos ei sellaisenaan kuvaa terveyshaittojen todennäköisyyttä. Absorboituneen energian määrän lisäksi on huomioitava muun muassa säteilyn laji ja energiajakauma, annoksen jakautuminen kudoksessa, kudoksen vaurioitumisalttius, kudoksen merkitys henkilön terveydelle sekä annoksen kertymänopeus ja kertymänopeuden vaihtelu. Erityisesti säteilyn biologinen teho riippuu energiansiirrosta matkaysikköä kohti. Tähän perustuu efektiivinen laatutekijä Q , jolla pyritään huomioimaan eri säteilylajien aiheuttamia terveyshaittoja, erityisesti stokastisia vaikutuksia. Laatutekijän arvoon ei vaikuta kudoksen säteily kohdistuu. Ekvivalenttiannos H on efektiivisen laatutekijän ja absorboituneen annoksen tulo. (Luukko 2009, 21)

$$H = Q \cdot D \quad (17)$$

Ekvivalenttiannoksen yksikkö on sievert (Sv, J/kg). Gray ja sievert omaavat saman yksikön J/kg. Gray on kuitenkin absorboituneen säteilyenergian tunnus ja sievert säteilyn aiheuttaman biologisen vaikutuksen tunnus. Taulukossa 2.2 on esitetty eri säteilylajien laatutekijät.

Taulukko 2.2: Efektiiviset laatutekijät (Marttila 1989, 18)

Säteilylaji	Efektiivinen laatutekijä Q
Fotonisäteily ja elektronit	1
Termiset neutronit	2,3
Nopeat neutronit	20
Alfasäteily, fissiotuotteet, raskaat ytimet	20

Ekvivalenttiannosnopeus \dot{H} on annosekvivalentin muutos dH ajan suhteen (Toivonen et al. 1988, 40):

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (18)$$

Eri elimillä on erilainen herkkyys ionisoivalle säteilylle. Jos säteily kohdistuu tasaisesti koko elimistöön, voidaan haittojen todennäköisyys arvioida koko elimistön annosekvivalentista. Jos säteily kohdistuu epätasaisesti eri elimiin, tarvitaan suure luonnehtimaan kokonaisriskiä. Elimen tai kudoksen ekvivalenttiannos H_T on absorboituneiden annosten $D_{T,R}$ painotettu summa kerrottuna elimeen tai kudokseen absorboituvan säteilyn painokertoimella w_R (ST 7–2 s. 8):

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (19)$$

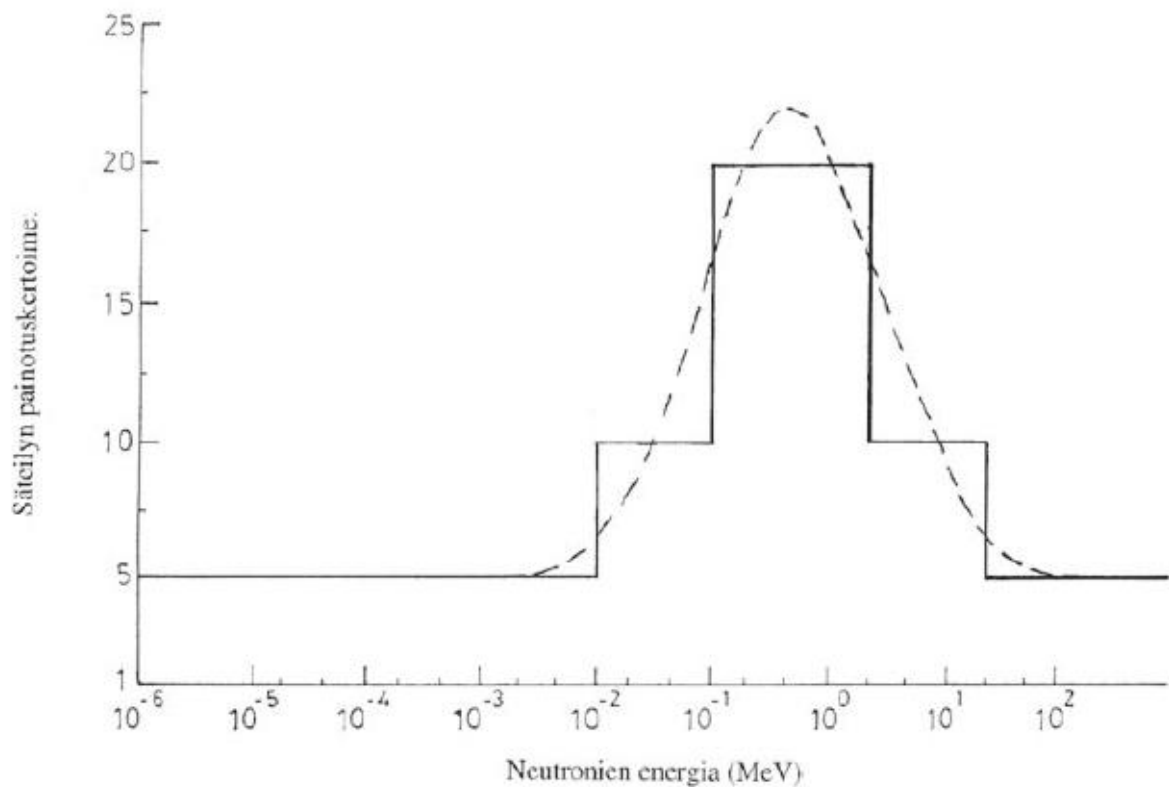
Taulukko 2.3: Säteilylajien painotuskertoimet w_R (ST 7.2 2007, 12)

Säteilylaji	w_R
Röntgen- ja gammasäteily, beetasäteily, elektronit	1
neutronit <10 keV	5
neutronit 10–100 keV	10
neutronit 100 keV–2 MeV	20
neutronit 2–20 MeV	10
neutronit >20 MeV	5
Protonit >2 MeV	5
Alfahiukkaset	20

Neutronisäteilyn ekvivalenttiannosta laskettaessa taulukko 2.3 ei välttämättä ole aina riittävän tarkka. Tällöin on parempi käyttää jatkuvaa funktiota (ST 7.2 2007, 10):

$$w_R = 5 + 17e^{-(\ln(2E))^2/6} \quad (20)$$

missä E = neutronienergia (MeV)



Kuva 2.7: Neutronisäteilyn painotuskertoimet neutronien energian funktiona (ST 7.2 2007, 11)

Efektivistä annosta H_E laskettaessa on määritettävä kaikkiin kudoksiin ja elimiin kohdistuneet ekvivalenttiannokset. Kokonaisannokset kerrotaan painotuskertoimilla ja lopuksi elinten ja kudosten painotetut annokset lasketaan yhteen.

$$H_E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (21)$$

missä w_T on elimen tai kudoksen T osuutta stokastisen säteilyvaurion kokonaistodennäköisyydestä, kun koko keho on altistunut tasaisesti säteilylle. Efektiviannoksen yksikkö on sievert. Painokertoimet on esitetty taulukossa 2.4. (ST 7.2 2007, 8)

Taulukko 2.4. Elinten ja kudosten painokertoimet w_T (ST 7.2 2007, 12)

Kudos tai elin	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	0,05

Ekvivalenttiannosta syvyydellä d olevassa pisteessä kehon pehmytkudoksessa $H_p(d)$ kutsutaan henkilöannosekvivalentiksi. Syväannokseksi $H_p(10)$ nimitetään 10 mm syvyydellä kehon pinnasta mitattavaa ekvivalenttiannosta. Syväannos on hyvä efektiivisen annoksen likiarvo. Pinta-annos $H_s(0,07)$ mitataan 70 μm syvyydeltä. Pinta-annos on ihon paikallisen ekvivalenttiannoksen likiarvo. (ST 1.9 2008, 16)

Henkilön säteilyannoksen seurannassa tulee määritellä sekä ulkoinen että sisäinen säteilystä aiheutuva annos. Sisäinen annos lasketaan käyttäen kehoon joutuneiden radioaktiivisten aineiden aktiivisuuksia. Henkilön efektiivisen annoksen kertymä $E(\tau)$ lasketaan yhtälöstä 22:

$$E(\tau) = \sum_j h(g)_{j,s} \cdot J_{j,s} + \sum_j h(g)_{j,h} \cdot J_{j,h} \quad (22)$$

missä $h(g)_{j,s}$ on suun ja $h(g)_{j,h}$ hengityksen kautta kehoon joutuneen radioaktiivisen nuklidin j annosmuuntokertoimet ($\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$) ikäryhmään g kuuluvalla henkilöllä. $J_{j,s}$ ja $J_{j,h}$ ovat suun ja hengityksen kautta kehoon joutuneen radioaktiivisen nuklidin j aktiivisuudet. Annosmuuntokerroin tarkoittaa efektiivisen annoksen kertymää aktiivisuuden yksikköä kohti. Annosmuuntokertoimet riippuvat saantotavasta ja altistuneen henkilön iästä. Radioaktiivisen aineen aktiivisuus kehosta mitataan säteilyturvakeskuksen kokokehomittauksessa, joka mittaa tarkan nuklidijakauman ja aktiivisuuden. Ikäryhmät ovat alle 1, 1–2, 2–7, 7–12, 12–17 ja yli 17 vuotta. Aineen jouduttua kehoon hengityksen kautta on huomioitava aineen partikkelikoko ja keuhkoista poistumisen nopeus. (ST 7.3 2007, 3–4)

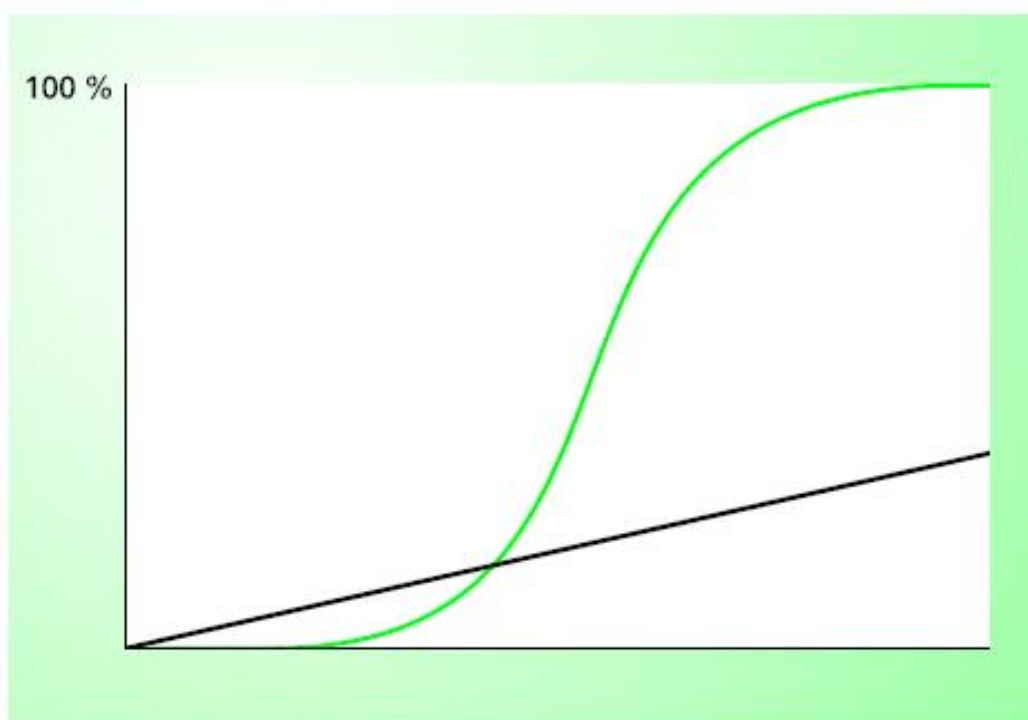
2.4 Säteilyn terveysvaikutukset

Säteilyn vaikutukset jaetaan deterministisiin ja stokastisiin haittavaikutuksiin. Deterministiset vaikutukset ovat välittömiä ja varmoja johtuen laajasta solutuhosta. Stokastiset eli satunnaiset haitat ovat tilastollisia haittavaikutuksia, jotka johtuvat yhden satunnaisen solun geneettisestä muutoksesta. (Paile 2002, 44)

Stokastisilla vaikutuksilla ei ole kynnyсарvoa. Saatu säteilyannos ei lisää haitta-astetta, vain haitan todennäköisyys kasvaa annoksen kasvaessa. Kokonaisriski määräytyy elinaikana saadun kumulatiivisen annoksen mukaan. Yksilön riski on suhteellisen pieni suurenkin annoksen jälkeen. Väestötasolla kokonaishaitta voi muodostua merkittäväksi suuren joukon altistuessa säteilylle, vaikka yksilöannokset jäisivät pieneksi. Stokastisia vaikutuksia tarkasteltaessa tuleekin huomioida väestöryhmän kollektiivinen annos. (Paile 2002, 45)

Deterministiset vaikutukset johtuvat hyvin suurista kerta-annoksista. Suuria kerta-annoksia voi esiintyä lääketieteellistä sädehoitoa saadessa tai vakavissa säteilyonnettomuuksissa. Suuren kerta-annoksen deterministisiä vaikutuksia kuten

luuydin- ja suolistovauriot on koottu taulukkoon 2.5. Säteilyannoksen ollessa tarpeeksi suuri on haittavaikutus varma, mutta säteilyannoksen jäädessä kynnsarvon alapuolelle deterministisiä haittavaikutuksia ei synny. Haittavaikutuksen vakavuus kasvaa jyrkästi annoksen kasvaessa. Haitan kehitys riippuu annosnopeudesta. Kynnsarvo haitan kehittymiselle on korkeampi jos säteilyannos saadaan pitkän ajan kuluessa. Tällöin myös haitta jää pienemmäksi. (Paile 2002, 44)



Kuva 2.8: Deterministinen haitta (vihreä) ja stokastinen haitta (musta) säteilyannoksen funktiona (Paile 2002, 44)

Taulukko 2.5: Suuren kerta-annoksen vaikutus (TVO 2013, 39–40)

Kokokehoannos	Terveysvaikutus
yli 1 Gray	Pahoinvointi, ruokahaluttomuus, väsymys ja lämmön nousu. Veren solujen määrä laskee.
yli 2 Gray	Luuydin vaurioituu vakavasti, veren solujen määrä laskee. Pahoinvointia, oksentelua. Herkkyys infektiosairauksille kasvaa, punasolujen määrän väheneminen johtaa anemiaan
yli 3 Gray	Suoliston limakalvo vaurioituu pahoin, valkosolujen määrä vähenee, suuri riski verenmyrkytykseen ja sisäisiin verenvuotoihin.
yli 6–7 Gray	Luuydin tuhoutuu täydellisesti, suoliston limakalvon tuhoutuu laajalti. Potilas menehtyy muutamassa kuukaudessa. Ei toipumismahdollisuutta.
yli 12 Gray	Suoliston limakalvo tuhoutuu täydellisesti. Potilas menehtyy parissa viikossa
yli 50 Gray	Pian altistuksen jälkeen seuraavat oireet ovat huimaus, sekavuus, pahoinvointi, oksentelu ja kouristukset. Aivojen verisuonisto tuhoutuu. Potilas menettää muutamassa tunnissa tajuntansa ja menehtyy parissa vuorokaudessa.

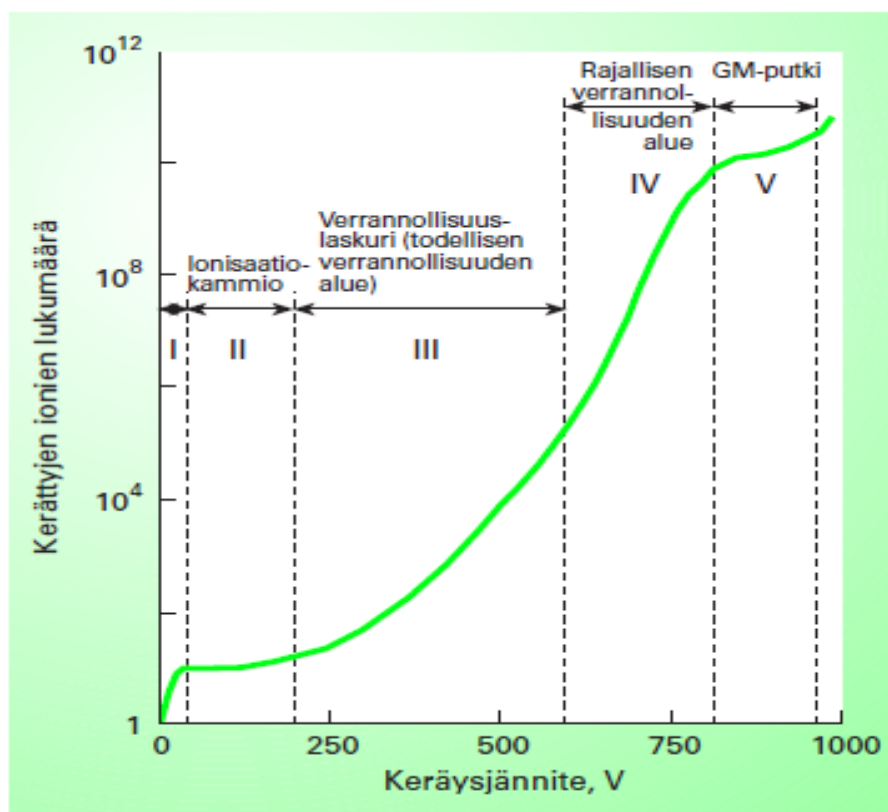
Alle kahden grayn annos johtaa lievään säteily sairauteen josta potilas toipuu ilman hoitoa. 2–6 grayn annoksen tapauksessa korkeatasoinen hoito parantaa potilaan ennustetta. Hoito tulee suorittaa hematologisella osastolla, potilas eristää ulkopuolisesta infektiotaarasta ja huolehtia nestetasapainosta. Ennuste on paljon parempi jos potilas onnistutaan pitämään hengissä ensimmäiset kuusi viikkoa. Suoliston limakalvo on toipunut ja luuydin alkaa elpyä. Anemia voi jatkua puoli vuotta ja lopulta luuydin toipuu täydellisesti. (Paile et al. 1996, 33)

3 SÄTEILYN ILMAISUMENETELMÄT

Ionisoivaa säteilyä ei voi aistein havaita, ei edes korkeita tasoja. Tällöin säteilyn mittaamiseen tarvitaan elektronisia laitteita, jotka on suunniteltu havaitsemaan ja mittaamaan säteilyn vuorovaikutus aineen kanssa. Tällaisia vuorovaikutuksia ovat muun muassa termiset reaktiot, kemiallisen reaktion synty, ionisaatioparien synty ja valontuotto. (Stabin 2007, 132) Säteilyannoksen mittauksessa termiseen tai säteilykemialliseen reaktioon perustuvat dosimetrit eivät sovellu henkilödosiometriksi liiallisen epäherkkyyden vuoksi, sillä nämä reaktiot vaativat suuria säteilyannoksia. (Marttila 1989, 38)

Ionisaatioon perustuvien kaasutäytteisten ilmaisimien toimintaperiaatteena on kerätä talteen sähkökentän avulla ionisoivan säteilyn aiheuttama varaus kahden elektrodin välisessä kaasutilassa. Suljetun astian sisällä oleva kaasu ionisoituu gammasäteilyn läpäistessä astian. Usein astia sylinterin muotoinen, ja siksi sitä kutsutaan putkeksi. Jännitteen voimakkuuden mukaan ilmaisimien toimii ionisaatiokammiona, verrannollisuuslaskurina tai Geiger–Müllerputkena. (Stabin 2007, 134–136)

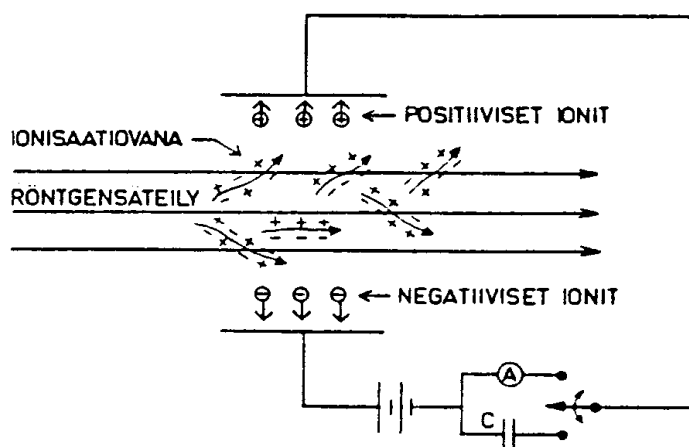
Henkilöannoksen mittauksessa käytetään nykyisin säteilykenttää ajan yli integroivia Geiger–Müllerputkia, puolijohdeilmaisimia ja termoloisteilmaisimia. Puolijohdeilmaisimen vuorovaikutus ionisoivien hiukkasten kanssa ei tuota ionipareja, kuten kaasutäytteisissä ilmaisimissa, vaan elektroniaukkopareja. Elektronit kerätään jännitteen avulla ja näin saadaan mitattua säteilyn voimakkuus. Termoloisteilmaisimien perustuu säteilyenergiaa absorboiviin termoloisteaineisiin. Termoloisteaine varastoi energiaa metastabiileihin energiatiloihin jotka vapautuvat lämmittäessä. Tällöin emittoituu valoa verrannollisesti absorboituneeseen annokseen. (Stabin 2007, 154–158)



Kuva 3.1: Kaasutäytteisten ilmaisimien toiminta-alueet (Ikäheimo 2002, 118)

3.1 Ionisaatiokammio

Jos kammion ionisaation aiheuttamaa varausta mittaava jännite on pieni, ehtivät ionit yhtyä neutraaleiksi atomiksi, eli rekombinoitua ennen kuin ne saavuttavat elektrodin. Kun jännitettä nostetaan, saadaan kerättyä yhä enemmän kunnes käytännössä kaikki on kerätty. Kun jännite on riittävä keräämään 100 % syntyneistä ioneista, on saavutettu ionisaatiokammion toiminta-alue. Jännitteen suuruus riippuu ilmaisimen koosta ja muodosta, käytettävästä kaasusta ja kaasun paineesta. (Stabin 2007, s. 136) Ionisaatiokammion toiminta-alueella saadaan ilmaisimesta signaali jonka amplitudi on suoraan verrannollinen säteilyn luovuttamaan energiaan. Yleensä mitataan ionisaatiosta aiheutuvaa keskimääräistä virtaa. (Ikäheimo 2002, 117)



Kuva 3.2: Ionisaatiokammio toimintaperiaate (Luukko 2009, 25)

3.2 Verrannollisuuslaskuri

Jännitettä nostattaessa ionisaatiossa syntyneet elektronit saavat kiihtyessään niin suuren energian, että elektroneista itsestään tulee ionisoivia hiukkasia. Nämä elektronit kiihtyvät edelleen ja aiheuttavat uutta ionisaatiota. Tämä ionisaatioiden vyöry sammuu, kun kaikki vapaana olevat elektronit ovat kulkeutuneet anodille. Tätä kutsutaan kaasumonistukseksi. Elektrodille kertyvä varaus on verrannollinen alkuperäiseen ioniparien lukumäärään. Tästä tulee nimi verrannollisuuslaskuri. (Toivonen et al. 1988, 117)

Verrannollisuuslaskurilla on kaksi toiminta-alueita: todellisen verrannollisuuden alue ja rajallisen verrannollisuuden alue. Todellisen verrannollisuuden alueella ionisaation monistus on lineaarista, eli säteilyn tuottamien alkuperäisten ioniparien lukumäärä on suoraan verrannollinen kerättyyn varaukseen. Rajallisen verrannollisuuden alueella keräysjännitteen nosto on aiheuttanut epälinearisuuden. Tärkein syy on sähkökentän pieneminen positiivisen varauksen vuoksi, kun hitaammin liikkuvien positiivisten varausten pilvi tukahduttaa jatkuvan elektronimonistuksen. (Toivonen et al. 1988, 117)

Verrannollisuuslaskuriin valittavassa täytekaasussa negatiivisten ionien muodostuminen tulee olla vähäistä, sillä negatiiviset ionit liikkuvat paljon hitaammin kuin vapaat

elektronit, jotka pääasiassa vastaavat kaasumonistuksesta. Sopivia täytekaasuja ovat esimerkiksi metaani, butaani, argon ja ksenon. Kaasu joko suljetaan ilmatiiviisti ilmaisimen sisälle tai kierrätetään hitaasti ilmaisimen lävitse. (Toivonen et al. 1988, 117)

3.3 Geiger–Müllerputki

Geiger–Müllerputki (GM–putki) muodostuu sylinterimäisestä putkesta, jonka ulkokuori toimii katodina ja keskilanka anodina. GM–putken toiminta–alueella positiivisten varausten pilvi on niin suuri, että sähkökenttä pienenee alle kaasumonistuksen kynnysarvon ja elektronipurkaus lakkaa aina tietyllä positiivisten ionien lukumäärällä. Elektronivyöryssä syntyy ionien lisäksi paljon virittyneitä molekyyliä. Viritykset purkautuvat synnyttäen fotoneita, jotka absorboituvat kaasuun tai katodiin. Absorbtiossa syntyy fotoelektroneja, jotka vaeltavat anodia kohti ja saavat aikaan uusia elektronivyöryjä. GM–putken pulssin amplitudi on koko purkauksen aikana syntyneiden vyöryjen yhteisvaraus. (Toivonen et al. 1988, 117–118)

Positiiviset ionit liikkuvat sähkökentässä paljon elektroneja hitaammin ja sammuttavat purkauksen. Katodille kerääntyminen vie huomattavan paljon aikaa, ja tällöin uutta purkausta ei voi syntyä. Ionien liikkeessa ulospäin niiden varaustiheys pienenee, ja kaasumonistusalueen sähkökenttä alkaa palautua alkuperäiseen arvoonsa. Uusi purkaus on mahdollista ennen täydellistä palautumista, mutta silloin pulssin amplitudi jää normaalia pienemmäksi, kun purkauksen sammuttaminen vaatii vähemmän positiivisia ioneja. (Toivonen et al. 1988, 118–119)

GM–putken lama–ajaksi kutsutaan aikaa, joka kuluu täydellisen pulssin synnystä uuteen purkaukseen. Tyypillisesti lama–aika on noin 50–100 μ s. Käytännössä laskentapiiri havaitsee pulssin vasta, kun sen amplitudi ylittää tietyn rajan. Erotusajaksi kutsutaan aikaa jonka kuluttua pulssin amplitudi on noussut yli hylkäysrajan. Normaalin arvon amplitudi saavutetaan toipumisajan kuluttua. Täytekaasuna käytetään yleensä argonia tai heliumia joissa elektronit eivät kiinnity atomeihin. (Toivonen et al. 1988, 119)

Jotta syntynyt purkaus ei synnyttäisi jatkuvasti uusia purkauksia, täytyy GM-putkessa olla ylimääräisten pulssien sammutusmekanismi. Täytekaasuun voidaan lisätä erityistä sammutuskomponenttia yleensä 5–10 % täytekaasusta. Sammutuskomponentti on yleensä moniatomista orgaanista kaasua tai halogeenia. Ylimääräisiä purkauksia ei synny, koska positiivisen ionin neutraloituessa vapautuva energia ennemmin hajottaa sammutuskomponentin molekyylin kuin irrottaa elektronin katodilta. Toinen vaihtoehto on putken jännitteen pienentäminen jokaisen pulssin jälkeen väliaikaisesti. Pienentynyt jännite ei riitä ylläpitämään kaasumonistusta, eikä ylimääräisiä purkauksia synny. Tällöin tosin putken lama-aika kasvaa. (Toivonen et al. 1988, 119–120)

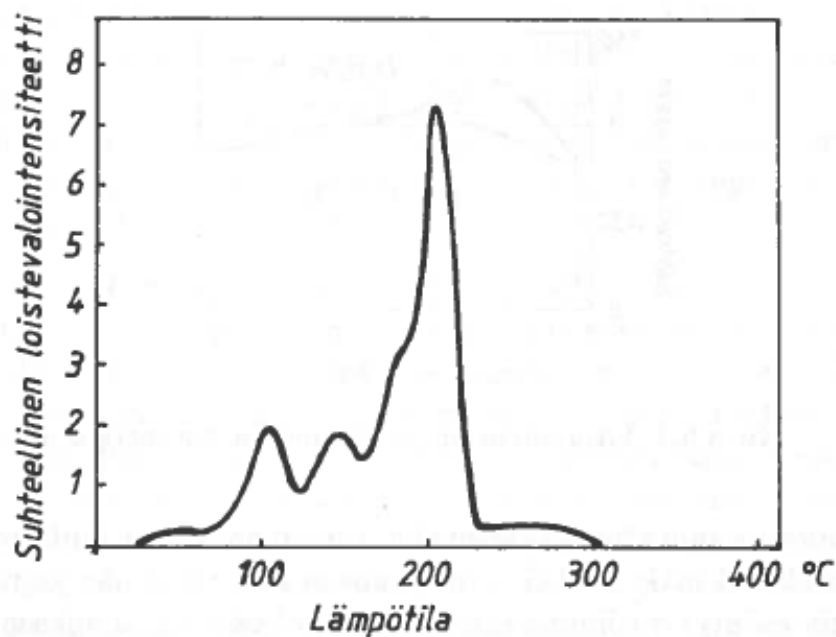
3.4 Termoloisteilmaisoin

Termoloiste on ilmiö jossa säteilytettävä aine varastoi osan absorboituvasta energiasta metastabiileihin energiatiloihin, jotka voidaan vapauttaa lämmittämällä kyseistä ainetta. Lämmittäessä ainetta emittoituu valoa, jonka intensiteetti on verrannollinen aineeseen absorboituneeseen annokseen. Termoloisteeseen perustuvat ilmaisimet ovat passiivisia ilmaisimia, annos saadaan tietää vasta kun ilmaisinta lämmitetään lukulaitteessa. (Toivonen et al. 1988, 122)

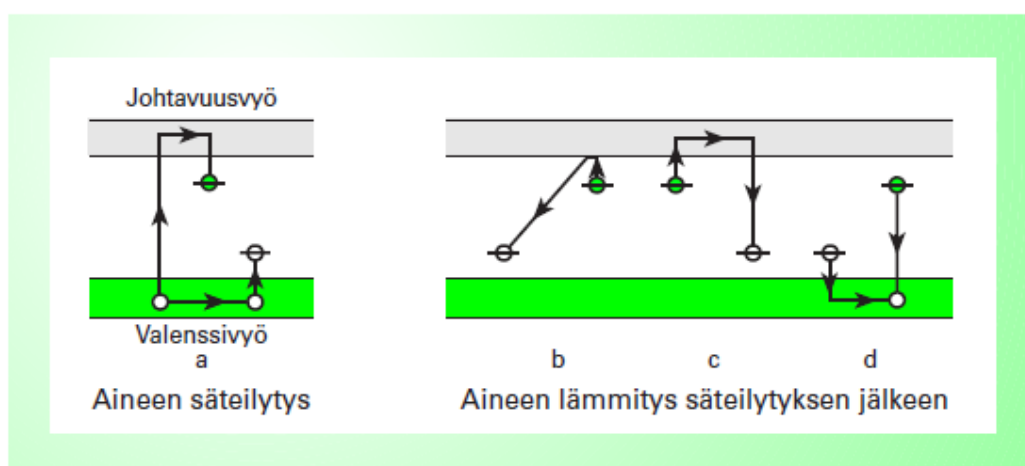
Termoloisteilmiön voi selittää tarkastelemalla elektronien energiatiloja epäorgaanisessa kidehilassa. Elektroni voi nousta valenssivyöltä johtavuusvyöhön saadessaan tarpeeksi energiaa ilmaisimeen osuvilta hiukkasilta. Tällöin valenssivyöhön jää aukko, joka voi liikkua vapaan varauksen tavoin. Lisäämällä kemiallisia epäpuhtauksia kiteisiin eli aiheuttamalla hilavirheitä, saadaan vöiden väliin jäävälle energiavälille syntymään paikallisia energiatasoja. Nämä energiatasot ovat loukkuja joihin elektronit tai aukot voivat siirtyä. (Ikäheimo 2002, 132)

Termoloisteaineen lämpötilaa nostettaessa elektronit ja aukot vapautuvat loukuista ja palaavat valenssivyöhön. Tällöin osa viritysen energiasta muuttuu valoksi. Piirtämällä emittoituneen valon intensiteetti ajan tai lämpötilan funktiona saadaan loistekäyrä. Syntyneiden valokvanttien määrä on suoraan verrannollinen termoloisteaineeseen

absorboituneeseen annokseen. Loukuista vapautumista tapahtuu yleensä jo huoneen lämpötilassa, ja osa annostiedosta katoaa ennen luentaa. Tätä kutsutaan näyttämän häilymiseksi. (Ikäheimo 2002, 132–133)



Kuva 3.3: Litiumfluoridin loistevalontuotto lämpötilan funktiona/loistekäyrä (Marttila 1989, 122)



Kuva 3.4: Termoluminesenssin toimintaperiaate (Ikäheimo 2002, 132)

3.5 Puolijohdeilmaisim

Puolijohdeilmaisim vastaa ionisaatiokammiota toimintaperiaatteeltaan, mutta puolijohdeilmaisimessa säteily tuottaa elektroniaukkopareja ionien sijaan. Elektroniaukkoparin muodostamiseen tarvitaan vain kymmenesosa energiasta, mitä tarvitaan ioniparin muodostumiseen kaasuilmaisimissa Tämän ja suuremman tiheyden vuoksi puolijohdeilmaisim on 10 000 kertaa samankokoista ionisaatiokammiota herkempi. Puolijohdeilmaisimella on hyvä energian erotuskyky pienemmän syntyvien varausten määrän hajonnan vuoksi. (Ikäheimo 2002, 126)

Elektronien energiatilat on esitetty kuvassa 3.5. Valenssivyön ja johtavuusvyön välinen vyöhyke on tavallisesti 1–5 V. Elektronin saadessa riittävästi energiaa joko lämpöliikkeestä tai säteilystä, siirtyy se valenssivyöltä johtavuusvyölle. Tällöin valenssivyölle jää aukko, joka voi valenssielektronien vaihdon avulla liikkua kiteissä kuten elektroni. Elektronien osuutta kiteen johtavuudessa sanotaan n-johtavuudeksi ja aukkojen p-johtavuudeksi. Lisäämällä pieniä määriä epäpuhtausatomeja voidaan puolijohdein sähkönjohtavuutta säädellä. (Ikäheimo 2002, 126–127)



Kuva 3.5: Termolisteilmaisimen toimintaperiaate (Ikäheimo 2002, 132)

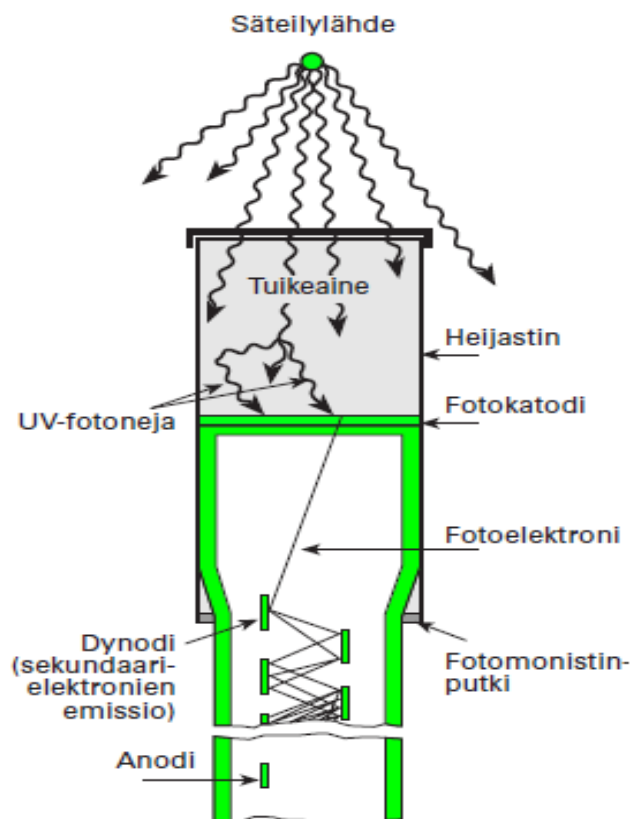
Kun p- ja n-tyyppin puolijohteet kytketään yhteen, saadaan syntymään raja-alue, jossa on hyvin vähän vapaita varauksenkantajia. Kun puolijohteen liitosalueen yli kytketään estosuuntainen jännite, vaeltavat elektronit ja aukot liitosalueelta ja katoalue laajenee. Katoalue on ilmaisimen aktiivinen alue, jossa syntyneet elektroniaukkoparit kerätään jännitteen avulla signaaliksi. Signaali on suoraan verrannollinen absorboituneeseen energiaan edellyttäen, että varauksen keräyksen tehokkuus on vakio. (Ikäheimo 2002, 126–127)

3.6 Tuikeilmaisin

Tuikeilmaisin muuttaa ionisoivan hiukkasen kineettisen energian näkyväksi valoksi, joka kerätään ja muutetaan sähköisiksi pulseiksi fotokatodilla. Säteilyenergia absorboituu tuikeaineessa virittäen atomeja. Virityksen purkautuessa emittoituu näkyvää valoa ja ultraviolettifotoneja. Tuikeilmaisimen rakenne ja toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.6. (Toivonen et al. 1988, 120)

Emittoituneet fotonit ohjataan heijastimien avulla valomonistinputken fotokatodille, josta irtoaa elektroneja. Elektronit kiihdytään sarjalla dynodeja. Elektronin osuttua dynodiin emittoituu lisää uusia elektroneja. Anodille saapuu elektronipulssi joka on verrannollinen tuikeaineeseen osuneen fotonin energiaan. Monistuserroin on vahvasti riippuvainen jännitteestä, joten jännitelähteeltä vaaditaan stabiilisuutta. (Toivonen et al. 1988, 120–121)

Tuikeaine voi olla kaasua, nestettä tai kiinteää ainetta. Myös jalokaasut ja kiteet voivat toimia tuikeaineena. Yhdistelemällä aineita kerroksittain voidaan erotella säteilylajeja. Tuikeaineen absorptiodennäköisyyden tulee olla riittävän suuri, absorptiota tulee seurata riittävän voimakas luminenssi ja tuikeaineen tulee olla valolle läpinäkyvä. Tuikeilmaisin vaatii stabiilia lämpötilaa, sillä elektronien emissiontaajuus fotokatodilla on verrannollinen tekijään $T^{1.5}$, missä T on lämpötila. (Ikäheimo 2002, 123–125)



Kuva 3.6: Tuikeilmaisimen toimintaperiaate (Ikäheimo 2002, 123)

3.7 Neutronisäteilyn ilmaisimet

Neutronit ovat välillisesti ionisoivia, ne reagoivat väliaineen kanssa tuottaen ionisoivia hiukkasia. Neutronisäteilyn ilmaisimet rakennetaan havaitsemaan näitä reaktioita. Tarvittavilla materiaaleilla on joko suuri vaikutusala tai suuri todennäköisyys synnyttää toivottua reaktiota neutronien kanssa. Kun haluttu reaktio on tuotettu, voidaan syntynyt sekundaarihiukkanen havaita useilla erilaisilla säteilyn ilmaisuperiaatteilla. (Stabin 2007, 159–160)

Booritrifluoridi-ilmaisimien (BF_3) on kaasutäytteinen verrannollisuuslaskuri, joka käyttää hyödyksi $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ -reaktiota. Reaktio tuottaa kahdenlaisia ionisoivia hiukkasia; alfahiukkasia ja ^7Li -rekyylihiukkasia. Molemmat ovat tiheään ionisoivia ja helppo erottaa ympäristön fotonisäteilystä. BF_3 -ilmaisimien havaitsee ainoastaan termiset

neutronit. Päälystämällä ilmaisin parafiinillä neutronit hidastuvat termisiksi. Käyttämällä eripaksuisia kerroksia voidaan matala-, keski- ja korkeaenergiset neutronit hidastaa, havaita BF_3 -ilmaisimessa ja päätellä neutronivuon voimakkuus erilaisilla energioilla. Alfahiukkaset voidaan havaita myös Litium-jodituikeilmaisimella. Litium-6:lla on suuri vaikutusala (n,α) -reaktiolle, mikä tekee siitä hyvän termisten neutronien ilmaisimen. (Stabin 2007, 160)

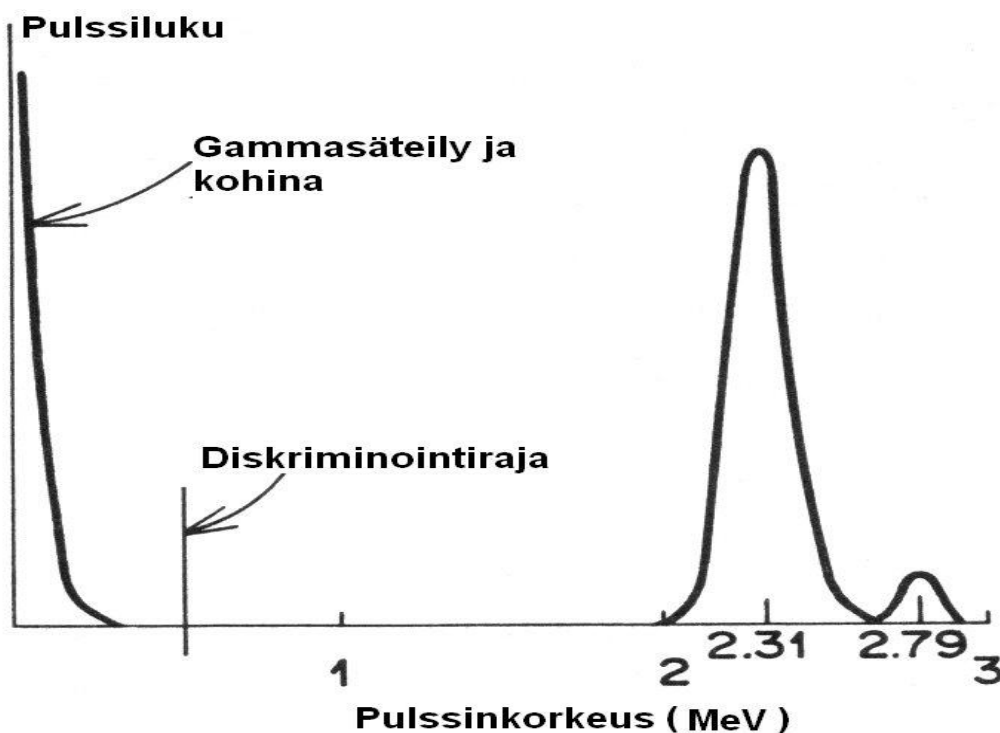
Kuvassa 3.7 on esitelty Suomen ydinvoimalaitoksissa käytössä oleva Wedholm Medicalin neutronisäteilyn annosnopeusilmaisim. Ilmaisinyksikkö koostuu BF_3 -verrannollisuuslaskurista. Mittausputki on ympäröity polyeteenillä ja boorimuovilla. Ilmaisim havaitsee neutronit energiaväliltä 0,025 eV – 17 MeV. (Wedholm Medical 2004, 13)



Kuva 3.7: Wedholm Medicalin Neutron Monitor 2222A

Suurin osa ihmisten saamasta neutronisäteilyn annoksista johtuvat vetynuklideista sironneista protoneista. Neutronin aiheuttama ionisaatiotapahtuman, tiheään ionisoiva protoni luovuttaa energiaansa vuorovaikutuksessa kiertoradan elektronien kanssa kunnes se hidastuu. Protonilla on samankaltainen vuorovaikutus aineen kanssa kuin alfahiukkasilla; ne ionisoivat tiheään, niillä on korkea LET-arvo ja ne kulkevat suorissa reiteissä. Rekyyliprotoni-ilmaisimet hyödyntävät tätä havaitakseen neutroneja. Ilmaisimet voidaan täyttää vedyllä, metaanilla tai vety-argonsekoituksella. (Stabin 2007, 161)

Neutronisäteilyn ilmaisimet ovat herkkiä muillekin säteilylajeille, ja niiden aiheuttamat signaalit voidaan erottaa neutronisignaaleista pulssinkorkeuden perusteella. (Luukko 2009, 28) Kuvassa 3.8 on esitetty reaktiotuotteiden aiheuttama pulssinkorkeusjakauma tapauksessa, jossa koko energia absorboituu täytekaasuun. Koska gammasäteily ionisoi kaasua huomattavasti vähemmän, voidaan gammapulssit erotella pois. (Luukko 2006, 84)



Kuva 3.8: Reaktiotuotteiden pulssinkorkeusjakauma (Luukko 2006, 84)

4 HENKILÖDOSIMETRIA

Säteilyn käyttöä ohjaa kolme periaatetta: optimointiperiaate, oikeutusperiaate ja yksilönsuojaperiaate. Optimointiperiaatteen mukaan säteilyaltistus on aina pidettävä niin pienenä kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Tätä kutsutaan myös ALARA-periaatteeksi. Oikeutusperiaatteen mukaan säteilylle altistavan toiminnan on oikeutettua vain silloin, kun siitä on enemmän hyötyä kuin haittaa. Yksilönsuojaperiaatteen mukaan yksilön säteilyaltistus ei saa ylittää säädettyjä enimmäisarvoja. (ST 1.1 2013, 3)

4.1 Säteilytyö

Suomen on kaksi ydinvoimalaitosta, Loviisan voimalaitos ja Eurajoella sijaitseva Olkiluodon voimalaitos. Loviisan reaktorit ovat painevesireaktoreita, joissa jäähdytveden kiehuminen estetään pitämällä paine korkeana, vesi johdetaan höyrystimille joissa se kiehuttaa sekundaaripiirin veden höyryksi. Syntynyt höyry johdetaan turbiinille. Olkiluodon reaktorit ovat puolestaan kiehutusvesireaktoreita. Kiehutusvesireaktoreissa jäähdyte kiehuu kulkiessaan reaktorisydämen läpi, ja syntynyt höyry johdetaan suoraan turbiinille. (Toivonen et al. 1988, 508–509)

Säteilytyöt Olkiluodon ja Loviisan voimalaitoksilla ovat osittain erilaisia johtuen erilaisista reaktortyypeistä. Olkiluodossa turbiini kuuluu valvonta-alueeseen, ja valvonta-alue onkin sen takia Loviisaa suurempi. Tuorehöyryn virtauksesta johtuen säteilyolosuhteet eivät salli pitkää oleskelua turbiinialissa tehoajon aikana. Loviisassa sen sijaan on painevesilaitoksen höyrystintila, jossa sijaitsevat höyrystimet, kuumat ja kylmät luupit sekä runsaasti säteilevät lämmönvaihtimet.

Säteilytyötä on työtä jossa työntekijällä on mahdollista saada jonkin säteilyasetuksen 6 §:ään säädetyn väestön annosrajan ylitys. (ST 1.6 2009, 17) Säteilytyötä tekevät siis henkilöt joiden efektiivinen annos voi olla vuoden aikana yli 1 mSv, silmän mykiön ekvivalenttiannos yli 15 mSv tai minkä tahansa ihon kohdan yli 50 mSv. (Säteilyasetus, § 6)

Taulukko 4.1: Annosrajat työntekijöille ja väestölle (ST 7.2 2007, 4)

Rajoituksen kohde	Annosraja, mSv vuodessa	
	Säteilytyöntekijät	Väestö
keskiarvo viiden vuoden aikana	20	–
yhden vuoden aikana	50	1
Ekvivalenttiannos		
Silmän mykiö	150	15
Iho	500	50
Kädet ja jalat	500	–

Säteilytyöntekijät luokitellaan säteilytyöluokkiin A ja B työntekijän työnkuvan mukaan. Säteilytyöluokkaan A kuuluvat työntekijät joille työstä aiheutuva efektiivinen annos voi olla suurempi kuin 6 mSv vuodessa. Säteilytyöluokkaan kuuluvat ne säteilytyötä tekevät työntekijät, jotka eivät kuulu säteilytyöluokkaan A. (ST 1.6 2009, 9)

4.1.1 Valvonta-alue

Ydinvoimalaitoksen työskentelypaikat on jaettu valvonta-alueisiin, tarkkailualueisiin ja luokittelemattomiin. Säteilyturvakeskuksen mukaan valvonta-alueeksi on määriteltävä alueet, joissa säännöllisesti tai tilapäisesti oleskeltaessa työntekijälle työstä aiheutuva efektiivinen annos voi olla suurempi kuin 6 mSv vuodessa tai silmän mykiön ekvivalenttiannos suurempi kuin 45 mSv vuodessa ja ihon, käsien ja jalkojen ekvivalenttiannos suurempi kuin 150 mSv vuodessa, kun otetaan huomioon työhön liittyvä poikkeavaan säteilyaltistukseen johtavan tapahtuman mahdollisuus. Valvonta-alue on myös perustettava jos työskentely vaatii säteily- ja kontaminaatoriskin vuoksi erityisiä turvaohjeita ja turvatoimia. (ST 1.6 2009, 6–7)

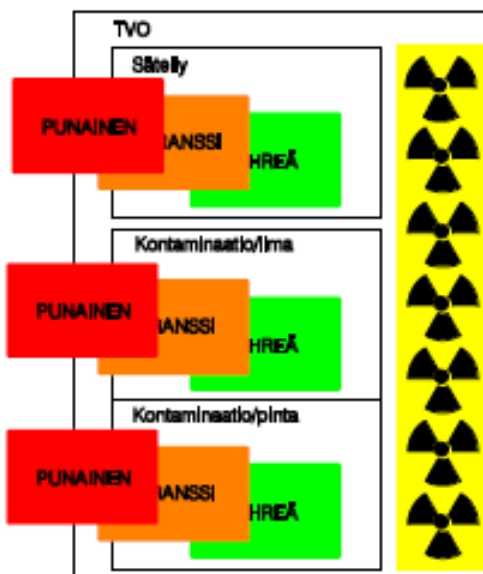
Valvomaton alue luokitellaan tarkkailualueeksi jos alueella työskentelevän työntekijän efektiivinen annos voi ylittää vuodessa arvon 1 mSv, silmän mykiön ekvivalenttiannos

arvon 15 mSv tai käsien, jalkojen tai ihon ekvivalenttiannos arvon 50 mSv. Muut alueet ovat luokittelemattomia. (ST 1.6 2009, 7)

Valvotun alueen huonetilat on jaettu säteilyn ja kontaminaation perusteella kolmeen vyöhykkeeseen: vihreisiin, oransseihin ja punaisiin. Jakoperusteet on listattu taulukkoon 4.2. Huonetiila kuuluu ylempään vyöhykkeeseen jos jokin ylemmän vyöhykkeen luokitusehto täyttyy. Huonetilan luokitus merkitään erityisellä kyltillä. Ilmakontaminaation mitta DAC ilmoittaa aktiivisuuspitoisuuden ilmassa, jota työvuoden (2000 tuntia) ajan hengittämällä kehoon kertyy ALI-arvon, eli vuotuisen saantorajan suuruinen annos. Nuklideille on määritetty annosmuuntokerroin jolla lasketaan ALI-arvo. Saanto pitää olla alle 20 mSv seuraavan 50 vuoden ajalle laskettuna. Laskennallinen ilmamäärä 2000 tunnilla on 2400 m³. (TVO 2013, 26)

Taulukko 4.2: Valvonta-alueen huonetilaluokittelu (YVL 7.9 2002, 6)

	Vihreä	Oranssi	Punainen
Annosnopeus	$\leq 25 \mu\text{Sv/h}$	$25 \mu\text{Sv/h} - 1 \text{ mSv/h}$	$\geq 1 \text{ mSv/h}$
Pintakontaminaatio Beetasäteilijät	$\leq 4 \text{ Bq/cm}^2$	$4 - 40 \text{ Bq/cm}^2$	$\geq 40 \text{ Bq/cm}^2$
Pintakontaminaatio Alfasäteilijät	$\leq 0,4 \text{ Bq/cm}^2$	$0,4 - 4 \text{ Bq/cm}^2$	$\geq 4 \text{ Bq/cm}^2$
Ilmakontaminaatio	$\leq 0,3 \text{ DAC}$	$0,3 - 30 \text{ DAC}$	$\geq 30 \text{ DAC}$



Kuva 4.1: Valvonta-alueen huoneluokituskytlin pohja Olkiluodossa (TVO 2013, 87)

Valvonta-alueelta poistutaan kahden henkilömonitorin kautta. Ensimmäinen mittaus suoritetaan laitoshaalari päällä, hälytysraja on 4 Bq/cm^2 muualle kehon alueelle paitsi käsille, joille hälytysraja on 2 Bq/cm^2 . Toinen mittaus suoritetaan alusvaatteissa yhdellä hälytysrajalla 2 Bq/cm^2 . Toinen henkilömonitori myös mittaa gammasäteilyä mahdollisen sisäisen kontaminaation havaitsemiseksi. Kontaminaation esiintyessä tulee suorittaa henkilödekontaminointi säteilyvalvonnan ohjeiden mukaan. (TVO 2013, 84)

Valvonta-alueella työskentelevälle tulee suojavarusteiden lisäksi olla poikkeavien säteilyaltistusten vuoksi käytössä henkilökohtainen säteilyhälytin, eli elektroninen dosimetri. (ST 1.6 2009, 8) Elektronisen dosimetrin toimintaperiaatteena on useimmiten Geiger–Müllerputki. (Toivonen et al. 1988, 133) Kuvassa 4.2 näkyvät elektroniset dosimetrit ovat käytössä Olkiluodossa. Rad 101:n ilmaisimena on Geiger–Müllerputki ja Rad 51:ssä puolijohdeilmaisimena. (TVO 2013, 139–141)

Elektronista dosimetria pidetään haalarin oikeassa rintataskussa. Elektroninen dosimetri ohjelmoidaan valvonta-alueelle tultaessa henkilökohtaiseen käyttöön lukijalaitteessa, ja luetaan pois käytöstä poistuttaessa valvonta-alueelta. Elektroninen dosimetri myös

ohjelmoidaan tietyn työn työkoodille. Tiedot henkilön ja työkoodin annoksesta päivittyvät ulosluennan yhteydessä annosvalvontajärjestelmään. (TVO 2013, 123–124)



Kuva 4.2: Elektroniset dosimetrit Rad 101 ja Rad 51 (TVO 2013, 123)

4.1.2 Säteilyaltistuksen seuranta

Henkilökohtaiset säteilyannokset työntekijöille määritetään annostarkkailulla, johon kuuluvat kaikki ydinvoimalaitoksen säteilytyötä tekevät työntekijät. (ST 7.1 2007, 3–4) Annosvalvonnan suurena käytetään henkilöannosekvivalenttia $H_p(d)$. Syväannoksen ja neutronisäteilyn henkilöannosekvivalenttina käytetään $H_p(10)$ eli kymmenen senttimetrin syvyyttä erotellen ftoni- ja neutronisäteilyn, pinta-annokselle $H_p(0,07)$ eli 70 μm syvyyttä. Silmien annos määritetään henkilöannosekvivalentilla $H_p(3)$, joka voidaan arvioida syväannoksesta ja pinta-annoksesta. Käytännössä kuitenkin pinta-annos on riittävän tarkka likiarvo silmäannoksesta. Myös sormille käytetään pinta-annosta. Mitatut annokset ilmoitetaan yksikössä mSv. Laskennallisella menetelmällä määritetty annos on ilmoitettava käyttäen suuretta efektiivinen annos. (ST 7.4 2008, 4) Säteilyturvakeskus pitää yllä arkistoa työntekijöiden säteilyaltistuksesta. Toiminnan harjoittaja vastaa annostarkkailun tulosten toimittamisesta Säteilyturvakeskuksen annosrekisteriin. (ST 7.3 2007, 3)

Sisäisestä säteilystä aiheutunut annos ilmoitetaan suurella efektiivisen annoksen kertymä käyttäen yksikköä mSv. Kirjauskynnys on 0,1 mSv, jota pienemmät annokset kirjataan annosrekisteriin annoksena 0 mSv. (ST 7.4 2008, 4) Elimistössä olevan radionuklidin aktiivisuus määritetään Säteilyturvakeskuksen kokokehmittauslaitteistolla ja mittauksen perusteella arvioidaan annos. (ST 7.1 2007, 8)

Taulukko 4.3: Ulkoisen säteilyn kirjauskynnykset (ST 7.4 2008, 4)

Suure	Kirjauskynnys (mSv)	
	Mittausjakso 1 kk	Mittausjakso 3 kk
Syväännos (fotonisäteily)	0,1	0,3
Syväännos (neutronisäteily)	0,2	0,6
Pinta-annos	2	6
Sormiannos	2	6
Silmäännos	0,6	1,8

Pvm	ID	L	Nimi	S	Org	mSv	Aika / h	Max uSv / h	ka.	Min	Max	A / mSv	Ryhmä	Amk	Amm. nimi
31.05.13	12265	E	LUUKKONEN JANI ANTERO	B	KTS	0.416	08:35	4240	0.416	0.416	0.416	0.416	01	X0	Säteilyvalvoja
30.05.13	12265	E	LUUKKONEN JANI ANTERO	B	KTS	0.788	10:34	8600	0.394	0.102	0.686	0.788	01	X0	Säteilyvalvoja
29.05.13	12265	E	LUUKKONEN JANI ANTERO	B	KTS	0.238	12:36	1240	0.238	0.238	0.238	0.238	01	X0	Säteilyvalvoja
27.05.13	12265	E	LUUKKONEN JANI ANTERO	B	KTS	0.404	08:42	1860	0.404	0.404	0.404	0.404	01	X0	Säteilyvalvoja

Kuva 4.3: Teollisuuden Voiman annosseurantajärjestelmä ELDOS

4.2 Termoloistedosimetri

Ulkoisen säteilyannoksen tarkkailuun käytetään termoloistedosimetriä (TLD) joka sisältää pieniä litiumboraatti- ja litiumfluoridikiteitä, jotka rekisteröivät gamma-, beeta- ja neutronisäteilyn. LiF- ja LiB-kiteiden valoemissio on suoraan verrannollinen absorboituneeseen annokseen alueella 0,1 mGy – 10 Gy. Erilaisten säteilylajien osuus kokonaisannoksesta saadaan selville kun termoloistekiteiden eteen asennetaan säteilyn absorbaattoreita. Termoloistedosimetri on Säteilyturvakeskuksen viralliseen henkilöannosten valvontaan hyväksymä mittari. Säteilytyötä tehdessä tulee termoloistedosimetriä kantaa haalarin rintataskussa ja muulloin säilyttää dosimetritelineessä. (Luukko 2009, 26)



Kuva 4.4: Radoksen TLD

Termoloistedosimetri koostuu yleensä TLD-600 ja TLD-700 dosimetriparista sijoitettuna neutroneja absorboivasta materiaalista valmistettuun kassettiin. Yhden kiteen edessä säteilyn tulopuolella on beetasäteilyn läpäisevä avoikkuna pinta-annoksen mittaukseen. Muut kiteet ovat booratun muovin suojaamia lukuun ottamatta kollimoivaa ikkunaa TLD-600-dosimetriparin ja kehon välissä. Neutronisäteilylle neutraalien TLD-

700–dosimetriparin rekisteröimästä annoksesta voidaan johtaa beeta– ja gammasäteilyn iho– ja kokokehon annos. (Marttila 1989, 125–126)

Termoloistedosimetrin neutronisäteilyn mittaus perustuu albedoperiaatteeseen. Kun nopeat neutronit siroavat ja menettävät energiaa törmätessään kehoon, voidaan ne havaita termisten neutronien ilmaisimella. Termoloistekiteenä toimii litiumfluoridi jonka käyttö termisten neutronien ilmaisimena perustuu ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ –reaktioon. Tämän reaktion vaikutusala on termisellä energia–alueella hyvin suuri. Dosimetrin herkkyyttä voidaan kasvattaa lisäämällä rikastettua Litium–6:ta ja ympäröimällä dosimetri neutroneja hidastavalla muovikuorella. Litium–6 reagoi myös gammasäteilyyn joten neutroni– ja gammasäteilyannokset voidaan erotella käyttämällä dosimetrissä Litium–7:llä väkevöityä termoloistekidettä. ${}^7\text{Li}$ ei absorboi neutroneja, mutta fotonivaste on suunnilleen sama kuin ${}^6\text{Li}$:lla. Neutronisäteilyannos johdetaan lukemien erotuksesta. (Marttila 1989, 125–126)

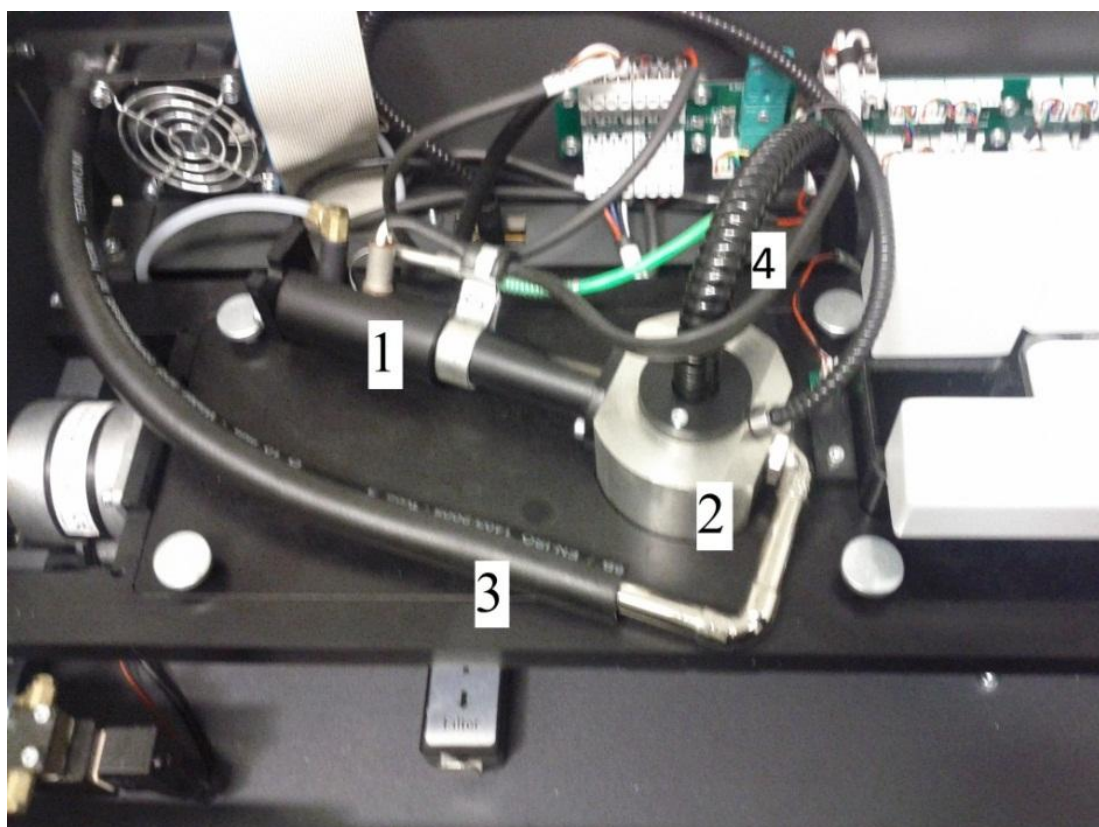
Dosimetrin mittaustulos muunnetaan syvyysannokseksi määrittämällä muuntokerroin säteilyttämällä dosimetriä tunnetulla annoksella tarkoituksenmukaisessa fantomissa ja sen pinnalla. Tyypillinen fantomi on vedellä täytetty pallo tai sylinteri, jonka halkaisija on 30 cm. Neutronivastetta määritettäessä tehdään mittaus neutronikentässä, jonka energajakautuma on sama kuin kentän, jossa työntekijä työskentelee. (Marttila 1989, 125–126)

Taulukko 4.4: Radoksen TLD:n säteilyn energiariippuvuudet (Mirion, 37)

Säteilyn tyypit ja energiariippuvuudet	
Fotoni	> 20 keV
Neutroni	Termiset – 6 MeV
Beeta	> 70 leV

Radoksen termoloistedosimetrin luenta suoritetaan automatisoidulla lukijalaitteella. Termoloistekidekortit sisältävät kotelot kootaan kasettiin johon mahtuu 20 TLD–

kotelo. Kelkka syöttää lukijalaitteeseen yhden kortin kerrallaan, imuneula nostaa TL-kiteen mittauskammioon jossa se kuumennetaan noin 320 celsiusasteeseen kuumalla typpikaasulla. Huoneenlämpöinen typpi syötetään lukijan takaseinässä olevan venttiilin kautta lukijaan, jossa se kuumennetaan lämmitysvastuksen avulla oikeaan lämpötilaan. Termolosteaineen emittoima valo mitataan valomonistinputkella, joka muuntaa valosignaalin virtasignaaliksi. Se on suoraan verrannollinen energiaan, jonka säteily on luovuttanut dosimetriin. Mittauksen jälkeen imuneula laskee TL-kiteen mittauskammioista ja antaa sen jäähtyä hetken ennen palauttamista omalle paikalleen kortissa. Tämän jälkeen korttia siirretään yhden paikan verran eteenpäin ja seuraava kide nostetaan mittauskammioon. Kun kaikki kiteet on luettu, lukija palauttaa kortin takaisin omaan koteloonsa kasetissa. Kasetti lasketaan yhden paikan verran alaspäin ja seuraavan kotelon kortti siirretään luetaan. (Mirion, 3)



Kuva 4.5: TLD-lukijalaitteen sisus jossa 1. Valomonistinputki, 2. Mittauskammio, 3. Kaasujen poisto, 4. Typen syöttö

4.3 Mittausepävarmuus

Säteilyannosten mittauksen tarkkuutta huomioitaessa tulee huomioida muun muassa mitattavan säteilyn laji ja energia, annosnopeuden ja annoksen vaihteluväli, sekä säteilyn mahdollinen pulssimuotoisuus. Ympäristön olosuhteet eivät saa aiheuttaa merkittävää virhettä mittauksiin. Tämänlaisia olosuhteita ovat lämpötila, kosteus, sähkömagneettiset kentät ja muu säteily, jota ei ole tarkoitus mitata. (ST 1.9 2008, 4) Säteilylain 23. § määrää että tarpeelliset mittaukset on tehtävä luotettavaksi todetulla menetelmällä ja mittalaitteiden on oltava asianmukaisesti kalibroitu.

Mittauksessa lopullinen mittaustulos voidaan esittää mittarin näyttämän, kalibroitukertoimen ja korjauskertoimien tulona. Silloin mittausepävarmuus saadaan laskemalla kaikkien arvioitujen mittausten menetelmiin liittyvien virhelähteiden vaikutukset eli keskihajonnat yhteen neliöllisesti, ja kerrotaan saatu yhdistetty epävarmuus kattavuuskertoimella. Kattavuuskertoimelle käytetään arvoa 2, mikä vastaa 95 %:n luotettavuustasoa. 95 %:n luotettavuustaso tarkoittaa, että mittaustulos poikkeaa mitattavan suureen oikeasta arvosta enintään arvioidun mittausepävarmuuden verran 95 %:n todennäköisyydellä. Mittausepävarmuus tarkoittaa tässä suhteellista mittausepävarmuutta. Annosmittausjärjestelmän laskennallisesti arvioitu mittausepävarmuus ei saa olla suurempi kuin 42 %. (ST 1.9 2008, 3–4)

Mittauksen virhe on mittaustuloksen (M_i) ja mitattavan suureen oikean arvon (M_t) erotus, kun mittaustulokseen on ensin tehty kaikki korjaukset. Virheellä tarkoitetaan suhteellisesta virhettä I :

$$I = \frac{M_i - M_t}{M_t} \cdot 100\% \quad (23)$$

Säteilymittarin suorituskykyä tarkastellessa ilmoitetaan yleensä mittarin virheen itseisarvolle yläraja standardissa ilmoitetulla säteilyenergialla ja ilmoitetuissa ympäristöolosuhteissa eli perusoloissa. Perusoloissa määritettyä virhettä kutsutaan perusvirheeksi. Erikseen annetaan ylärajat mittarin virheelle mittaustulokseen

vaikuttavien muiden suureiden kuten säteilyn energian, säteilyn tulosuunnan ja ympäristön lämpötilan määritellyillä arvoilla. (ST 1.9 2008, 3–4)

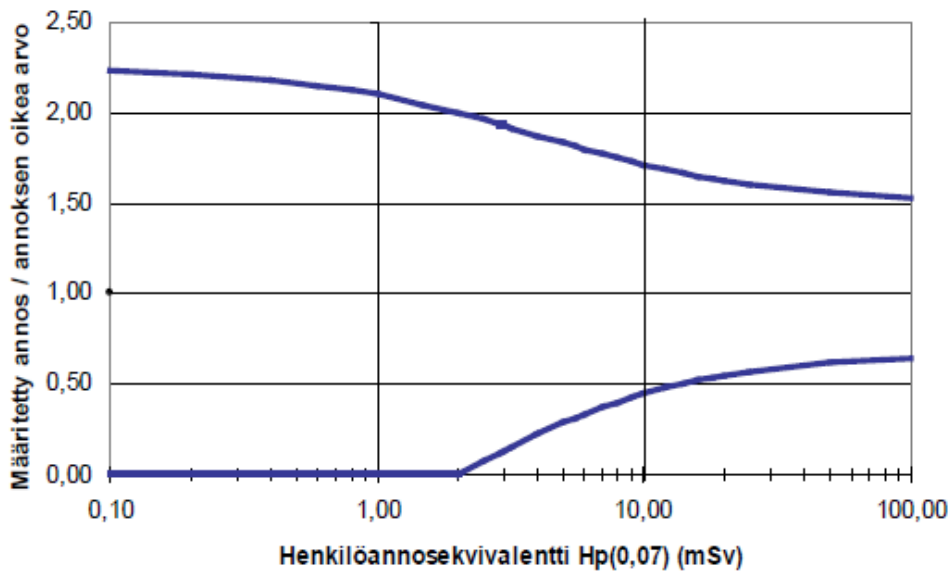
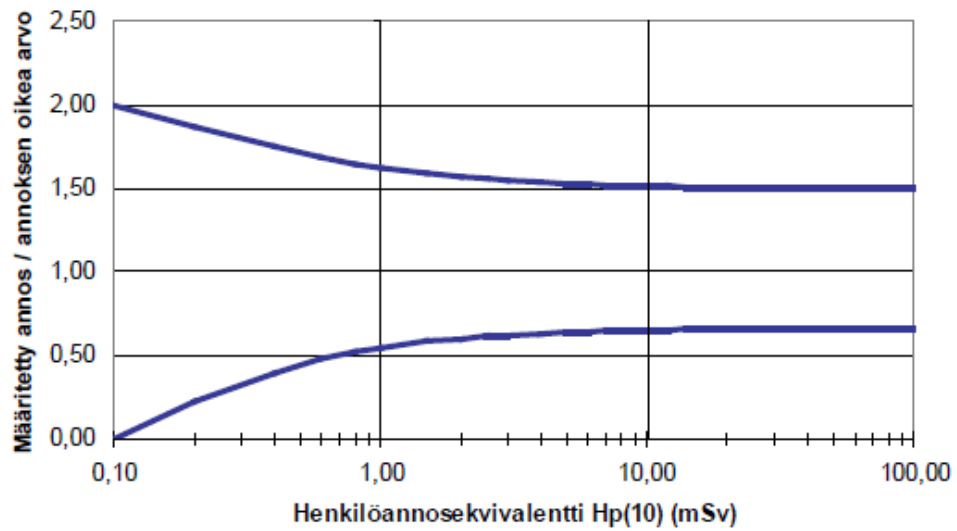
Työntekijöiden annosmittausjärjestelmän mittaustulos ei saa fotonisäteilyllä poiketa oikeasta arvosta 95 % luotettavuudelta enempää kuin 33 % alaspäin tai 50 % ylöspäin mittaustuloksen vastatessa suuruudeltaan vuosiannosrajaa lähellä olevia annoksia. Annoksella tarkoitetaan henkilöannosekvivalenttia. Mittaustuloksen suurin sallittu poikkeama eri annoksilla voidaan ilmaista ehtona:

$$\frac{2}{3} \cdot \left(1 - \frac{2H_0}{H_0 + H_t}\right) \leq R \leq \frac{3}{2} \cdot \left(1 + \frac{H_0}{2H_0 + H_t}\right) \quad (24)$$

missä R = annosmittarin vaste eli annosmittarilla määritetyn annoksen H_m ja annoksen oikean arvon H_t suhde

H_0 = kirjauskynnys.

Yhtälön (24) mukaiset niinkutsutut trumpettikäyrät on esitetty kuvassa 4.6. Mittaustuloksen tarkkuuden on oltava sellainen, että annosmittarilla määritetyn annoksen ja annoksen oikean arvon suhde jää trumpettikäyrien sisäpuolelle. (ST 1.9 2008, 4)



Kuva 4.6: Annosmittarilla määritetyn annoksen ja annoksen oikean arvon suhdetta annoksen funktiona kuvaavat trumpettikäyrät. (ST 1.9 2008, 5)

Taulukko 4.5: Säteilymittausten tarkkuusvaatimukset (ST 1.9 2008, 21)

Mittauksen tarkoitus tai kohde	Mitattava suure	Tarkkuusvaatimukset	
		Mittausepävarmuus enintään	Muut vaatimukset
Työolojen tarkkailu ja väestön säteilyturvallisuus	Vapaa annosekvivalentti	60 %	20 % (perusvirhe, annos- ja annosnopeusmittari) 30 % (perusvirhe, hälyttävä annosnopeusmittari) 40 % (virhe, annos- ja annosnopeusmittari, energia välillä 20–150 keV tai 80 keV–1,5 MeV)
	Suunnattu annosekvivalentti	60 %	20 % perusvirhe
Työntekijöiden annostarkkailu	Henkilöannosekvivalentti	42 %	–33 % tai 50 % (poikkeama oikeasta arvosta, annos lähellä vuosiannosrajaa)

5 YHTEENVETO

Koska ionisoivan säteilyn haittavaikutukset ovat suuria, on tärkeää voida luotettavasti ja tarkasti mitata säteilyn annosnopeus sekä henkilön saama säteilyaltistus. Ydinvoimalaitoksen toiminta ei ole oikeutusperiaatteen mukaista jos ylläpidosta aiheutuvasta säteilyaltistuksesta muodostuu haittavaikutuksia työntekijöille. Periaatteen täyttämiseksi on tunnettava myös säteilyn syntyvät ja esiintymismuodot ydinvoimalaitoksen eri osissa.

Samalla kun tieto säteilyn vaikutuksista henkilön terveydelle tarkentuu ja selventyy, jatkuu säteilyn ilmaisimien kehitystyö. Kehitystyön tavoitteena on luoda tarkempia, luotettavampia ja kestävämpiä dosimetreja. Haluttu dosimetri olisi immuuni ympäristön olosuhteille, kuten ilman lämpötilalle ja kosteudelle eikä olisi myöskään altis teknisten laitteiden aiheuttamalle häiriölle. Positiivisia ominaisuuksia ovat näiden lisäksi mahdollisuus seurata säteilyannosta reaaliaikaisesti, ja nähdä sekä fotonit, että neutronisäteilyn aiheuttamat annokset erikseen.

Uutta kehitystä henkilödosimetriassa edustaa muun muassa direct ion storage eli DIS-dosimetri. DIS-dosimetri perustuu pieneen ilmatilaan suljettuun sähkövarattuun puolijohdehilaan. Ionisoiva säteily irrottaa rakennemateriaalista elektroneja jotka muodostavat ioneja happimolekyylien kanssa. Kulkeutuessaan hilalle ne muuttavat sen sähkövarausta. Varauksen muutoksesta saadaan suoraan säteilyannos. Lukija vertaa aina varausta alkuperäiseen sähkövaraukseen joten säteilyannoksen voi dosimetrista lukea milloin vain.

Myös tietotekniikan kehitys edesauttaa säteilysojelua. Tehokkaampien tietokoneiden ja laskentaohjelmien kehitys mahdollistaa säteilykenttien suuruuden ja laadun tarkemman määrittämisen. Näin voidaan altistustilanteisiin varautua paremmin, ja tehdä tarkemmat toimintaohjeet säteilytöihin. Tällä tavoin myös varmistetaan optimointi-, oikeutus- ja yksilönsuojaperiaatteiden täsmällinen noudatus.

LÄHDELUETTELO

Ikäheimo Tarja K. 2002. *Säteily ja sen havaitseminen*. Helsinki. Säteilyturvakeskus. 197. ISBN 951-712-496-1 (sid.), 951-712-503-8 (pdf)

Hämäläinen Tiina. 2007. *Säteily, Fysiikan perusteet*. TVO:n koulutusmateriaali, sähköinen dokumentti.

Laukka Mikko. 2006. *OL3 johdatus laitostuntemukseen, johdatus neutronifysiikkaan*. TVO:n koulutusmateriaali, sähköinen dokumentti.

Luukko Antti. 2006 *Säteilynsuojelu, peruseräatteen*. TVO:n koulutusmateriaali, sähköinen dokumentti.

Luukko Antti. 2009. *Säteilynsuojelu*. TVO:n koulutusmateriaali, sähköinen dokumentti.

Marttila Olli J. 1989. *Säteilynsuojelun käytäntö*. Helsinki. Limes ry:n graafiset laitokset. 261. ISBN 951-745-118-0

Mirion Technologies (RADOS) Oy, *Rados RE2000 TLD-lukijan käyttöopas*

Paile, Mustonen, Salomaa ja Voutilainen. 1996. *Säteily & terveys*. Helsinki. Säteilyturvakeskus. 80. ISBN 951-37-1883-2

Paile Wendla. 2002. *Säteilyn terveysvaikutukset*. Helsinki. Säteilyturvakeskus. 186. ISBN 951-712-499-6

Stabin Michael G. 2007. *Radiation Protection and Dosimetry, An Introduction to Health Physics*. Nashville, TN: Vanderbilt University, Department of Radiology and Radiological Sciences. 378. e-ISBN 978-0-387-49983 3

Säteilyasetus (20.12.1991/1512)

Säteilylaki (27.3.1991/592)

Säteilyturvakeskus. 2013. *Säteilyturvallisuusohje 1.1: Säteilytoiminnan turvallisuus*. Helsinki. ISBN 978-952-478-785-7

Säteilyturvakeskus. 2009. *Säteilyturvallisuusohje 1.6: Säteilyturvallisuus työpaikalla*. Helsinki. ISBN 978-952-478-494-8

Säteilyturvakeskus. 2008. *Säteilyturvallisuusohje 1.9: Säteilytoiminta ja säteilymittaukset*. Helsinki. ISBN 978-952-478-334-7

Säteilyturvakeskus. 2007. *Säteilyturvallisuusohje 7.1: Säteilyaltistuksen torjunta*. Helsinki. ISBN 978-952-478-238-8

Säteilyturvakeskus. 2007. *Säteilyturvallisuusohje 7.2: Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperusteet*. Helsinki. ISBN 978-952-478-230-2

Säteilyturvakeskus. 2007. *Säteilyturvallisuusohje 7.3: Sisäisestä säteilystä aiheutuvan annoksen laskeminen*. Helsinki. ISBN 978-952-478-254-8

Säteilyturvakeskus. 2008. *Säteilyturvallisuusohje 7.4: Säteilytoiminnan turvallisuus*. Helsinki. ISBN 978-952-478-387-3

Säteilyturvakeskus. 2002. *Ydinvoimalaitosohje 7.9: Ydinlaitoksen työntekijöiden säteilysuojelu*. Helsinki. ISBN 951-712-520-8

Säteilyturvakeskus. *Suomen ydinvoimalaitosten säteilyturvallisuus* [viitattu 4.10.2013]
Saatavissa: http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitosten-toiminta/sateilyturvallisuus/fi_FI/laitosten_sateilyturvallisuus/

Toivonen, Rytömaa, Vuorinen. 1988. *Säteily ja turvallisuus*. Helsinki. Säteilyturvakeskus. 640. ISBN 951-860-933-0

TVO. 2013. *Oranssiavainkurssi-kirja*

Wedholm Medical. 2004. *Neutron Monitor 2222A User's Manual*

Wrixon, Barraclough, Clark. 2004. *Radiation, people and the environment*. Austria.

IAEA,

Saatavissa:

http://www.iaea.org/Publications/Booklets/RadPeopleEnv/pdf/radiation_low.pdf