

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Mittausolosuhteiden ja mittaustavan vaikutus LARS-mittalaitteen (Large Area Radiation Scanner) herkkyyteen

Influence of Measurement Conditions and Measurement Method on the Sensitivity of LARS (Large Area Radiation Scanner)

Työn tarkastaja: TkT Elina Hujala
Työn ohjaaja: DI Sampo Ylisirniö, TkT Elina Hujala
Lappeenranta 6.1.2021
Aleksanteri Pyykkönen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Aleksanteri Pyykkönen

Mittausolosuhteiden ja mittaustavan vaikutus LARS-mittalaitteen (Large Area Radiation Scanner) herkkyyteen

Kandidaatintyö 2020

Tarkastaja: TkT Elina Hujala

Ohjaaja: DI Sampo Ylisirniö, TkT Elina Hujala

38 sivua, 6 taulukkoa ja 2 liitettä

Hakusanat: kontaminaatio, Loviisan voimalaitos, pintakontaminaatiomittari, gammasäteily

Tässä työssä tarkastellaan saksalaisen S.E.A GmbH:n valmistaman LARS v2 mittalaitteen toimintaa ja soveltuvuutta radioaktiivisen kontaminaation havaitsemiseksi Loviisan ydinvoimalaitoksella. Työ tehtiin Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilysuojeluorganisaatiolle.

Työn tarkoitus on arvioida laitteen soveltuvuutta optimaalisissa ja käytännön olosuhteissa sekä selvittää, millainen ohjeistus mittaajalle tulee antaa laitteen käytöstä. Laitteen soveltuvuutta arvioidaan tarkastelemalla laitteen ominaisuuksia ja suorittamalla laitteella mittauksia eri säteilylähteille eri olosuhteissa. Säteilylähteinä käytetään laitoksilta kerättyjä pyyhkäisy-näytteitä sekä mittalaitteiden kalibrointiin tarkoitettuja testilähteitä.

Lopputuloksena todettiin, että luonnon taustasäteily Loviisan ydinvoimalaitoksella vaikuttaa mittauksiin niin paljon, ettei LARS-mittalaitteen erottelukyky riitä havaitsemaan verrattaen pieniä muutoksia aktiivisuudessa. Laite on kuitenkin hyödyllinen radioaktiivisten partikkelien etsimiseen laitoksen käytäviltä sekä ulkoalueilta. Työn liitteenä on työn ohessa laadittu ohje laitteen käyttäjälle.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	6
1.1	Lähtökohdat ja tavoitteet	6
1.2	Työn rakenne	6
2	KONTAMINAATIO YDINVOIMALAITOKSELLE	7
2.1	Alfasäteily	9
2.2	Beetasäteily	10
2.3	Gammasäteily	11
3	PINTAKONTAMINAATION MITTAAMINEN	11
3.1	Kaasuilmamittarit	12
3.1.1	Ionisaatiokammio	13
3.1.2	Verrannollisuuslaskuri	14
3.1.3	Geiger-Müller-ilmaisimet	14
3.2	Tuokeilmaisimet	15
3.2.1	Muovituokeilmaisimet	17
4	LARS-MITTALAITTEEN TOIMINTA	17
4.1	LARS:n asetusten vaikutus	18
4.1.1	Mittayksikkö ja hälytysraja	18
4.1.2	Taustasäteilyn huomioiminen	20
4.1.3	Mittausnopeus	21
5	SOVELTUVUUSTUTKIMUS	21
5.1	Tutkimuksessa käytetyt säteilylähteet	22
5.2	Mittauspaikkojen kuvaus	23
5.3	Tutkimusmenetelmät	24
6	MITTAUSTULOKSET	25
6.1	Mittausolosuhteiden vaikutus	25
6.1.1	Mittausolosuhteiden vaikutus matalassa taustasäteilyssä	25
6.1.2	Mittausolosuhteiden vaikutus korkeammassa taustasäteilyssä	27
6.1.3	Mittausolosuhteiden vaikutus ulkona laitosten välillä	28
6.2	Sokkotesti	30
6.3	Ilmaisimen korkeuden vaikutus	31
6.4	Kävelynopeuden vaikutus mittauksnopeuteen	31
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	32
7.1	Soveltuvuusarvio	33
7.2	Pohdintaa	35

8 YHTEENVETO	36
LÄHTEET	37

LIITTEET

- | | |
|----------|-------------------------|
| Liite 1. | Käyttöohjeita |
| Liite 2. | Käytetyt säteilylähteet |

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

A	aktiivisuus	Bq, kBq
A_s	aktiivisuuskate	Bq/cm ²
B	sidosenergia	MeV
C	pulssit aikayksikössä	cps
E	säteilyn energia	keV, MeV
E_f	sähkökentän voimakkuus	V/m
U	jännite	V
v	nopeus	m/s, km/h

Kreikkalaiset

α	alfasäteily	mSv/h
β	beetasäteily	mSv/h
γ	gammasäteily	mSv/h
ε_d	ilmaisimen efektiivisyys	%
ε_s	säteilylähteen efektiivisyys	%
σ	keskihajonta	cps

Lyhenteet

cps counts per second, pulsseja sekunnissa

LARS Large Area Radiation Scanner

LO1 Loviisa 1

LO2 Loviisa 2

MDA Minimum Detectable Activity, pienin havaittava aktiivisuus

1 JOHDANTO

1.1 Lähtökohdat ja tavoitteet

Tarve työlle ilmeni kysymyksestä minkä suuruisia aktiivisuuksia Loviisan ydinvoimalaitoksella käytössä olevalla pintakontaminaatiomonitori LARS:lla (Large Area Radiation Scanner) voidaan havaita, ja miten taustasäteilyn vaihtelu vaikuttaa laitteen herkkyyteen. Laitetta on käytetty erityisesti piha-alueiden vuosittaisiin kontaminaatiokartoituksiin. Voimalaitoksella joudutaan siirtämään runsaasti valvonta-alueella käytettäviä tavaroita piha-alueen kautta laitossyksiköltä toiselle, ja erityisesti radioaktiivisuutta sisältävien komponenttien siirroissa on riski siihen, että kontaminaatiota voisi päästä ulos valvonta-alueelta. Erityisen hankala komponentti kontaminaation hallinnan kannalta on ydinpolttoaineen siirroissa käytettävä siirtosäiliö, joka kontaminoituu voimakkaasti käytössä, ja jonka siirroissa ei voida käyttää kuljetussuojaa, sillä pintojen peittäminen heikentäisi säiliön lämmönsiirto-ominaisuuksia (Solja T et al. 2020. 5). Säiliön ja siirtojen kontaminaationhallintaan on kiinnitetty viime vuosina paljon huomiota ja toimintaa on kehitetty (Kontio 2020).

Piha-alueen mittaamiseen sisältyy monia haasteita, kuten alueen iso koko ja suuresti vaihteleva luonnon taustasäteily, joten mittausten jälkeen ei aina voida olla varmoja siitä, että on löydetty kaikki löydettävissä oleva aktiivisuus. Tämän takia aktiivisuutta löydettyä joudutaan aina tutkimaan, onko se peräisin uudesta kontaminaatiotapahtumasta, vai onko kontaminaatio peräisin aiemmasta tapahtumasta.

Työn tavoitteena on parantaa ymmärrystä mittaustavan heikkouksista sekä esittää mahdollisia kehitystoimenpiteitä. Työssä arvioidaan LARS-mittalaitteen soveltuvuutta pintakontaminaatiomittauksiin Loviisan ydinvoimalaitoksella.

1.2 Työn rakenne

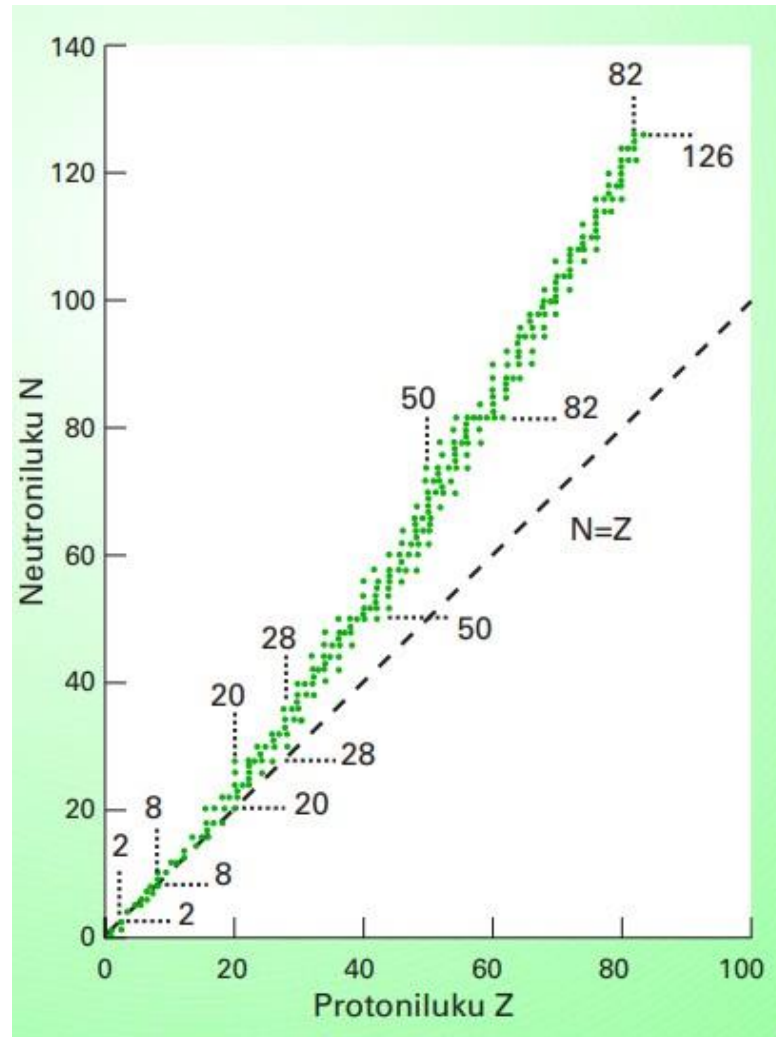
Työn teoriaosuudessa tarkastellaan ydinvoimalaitoksella esiintyviä radioaktiivisen kontaminaation tyyppisiä ja niistä aiheutuvaa säteilyä. Lisäksi tarkastellaan keinoja pintakontaminaation mittaamiseksi, keskittyen kaasutäytteisiin ilmaisimiin ja tuikeilmaisimiin. Teoriaosuudessa käsiteltäviksi aiheiksi valikoituivat työn kannalta olennaisimmat säteilyn ja sen

ilmaisimien tyypit. Tutkimusosuudessa tarkastellaan laitteen käyttöä ja käyttöön vaikuttavia tekijöitä ja asetuksia.

2 KONTAMINAATIO YDINVOIMALAITOKSELLA

Ydinvoima-alalla kontaminaatiolla tarkoitetaan radioaktiivisia aineita pinnoilla, nesteissä, ilmassa, tai kehossa, missä niiden ei toivota olevan (IAEA 2018. 46). Kontaminaatioksi päätyviä radioaktiivisia aineita syntyy ydinvoimalaitoksen käytön aikana reaktorissa polttoainesauvojen sisällä uraanin ja plutoniumin fissionuotteen, sekä aineiden aktivoitumisen seurauksena. Molemmista tapauksista aineen ytimen neutronien ja protonien suhdeluku muuttuu, ja aine jää epästabiiliksi. Kuvassa 1 on nuklidien ylöspäin kaartuva stabiiliuskäyrä. Yleensä mitä kauempana nuklidi on käyrästä, sen epästabiilimpi se on, kuvaan numeroilla merkattuja poikkeuksia lukuun ottamatta. Useat fissionuotteet sijoittuvat stabiiliuskäyrän yläpuolelle (Ikäheimonen 2002. 22).

Normaalisti polttoaineen fission- ja aktivoitumistuotteet pysyvät polttoainesauvojen sisällä, mutta polttoainevuotojen yhteydessä näitä voi päästä prosessikiertoon. Loviisan voimalaitoksella polttoainevuodot ovat olleet erittäin harvinaisia. Primääripiirin kontaminaatio koostuu pääasiassa erilaisista veden ja primääripiirin korroosio- ja aktivoitumistuotteista. Voimalaitoksen tehoajon aikana merkittävin primääripiirin säteilylähde, jos itse reaktoria ja reaktorin polttoainetta ei huomioida, on vedessä olevan hapen aktivoitumistuote N-16, joka kuitenkin ei lyhyen puoliintumisaikansa vuoksi ole merkittävä kontaminaationuklidi. Prosessijärjestelmiä avattaessa huoltoa varten kontaminaatiota voi vapautua järjestelmien ulkopuolelle. (Kontio 2021)



Kuva 1. Nuklidien stabiiliuskäyrä vihreällä. Nuklidit ovat sitä epästabiilimpia, mitä kauempana ne ovat stabiiliuskäyrästä. (Ikäheimonen 2002. 22)

Pinnalle tarttuneen ja siitä irtoavan kontaminaation aktiivisuutta pinta-alayksikköä kohden sanotaan aktiivisuuskatteeksi A_s . Aktiivisuuskate määritetään keskimääräisestä hajoamisten määrästä sekunnissa 100 cm^2 :n kokoisella alueella (STUK 2018. 3 §). Säteilyturvakeskuksen ydinturvallisuusohjeet määrittävät pinnoilla olevan kontaminaation rajaksi 4 Bq/cm^2 gamma- ja beetasäteilylle, ja $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ alfasäteilylle (STUK 2019. Liite A). Tätä suurempi aktiivisuuskate pinnoilla tarkoittaa, että kappale tulee puhdistaa ennen kuin sen voi poistaa valvonta-alueelta. Jos aluetta, työvälinettä tai vaatteita ei voida puhdistaa alle rajojen, on radioaktiivisten aineiden päätyminen kehoon tai ympäristöön estettävä muilla tavoin (STUK 2018. 4 §). Tätä pienempi aktiivisuuskate tarkoittaa, että kappaletta voidaan käsitellä puhtaana ja vapauttaa valvonnasta.

Loviisan ydinvoimalaitoksella kontaminaatio koostuu pääosin koboltin, hopean, mangaanin sekä antimonin isotoopeista. Näistä suurimman osan aktiivisuudesta aiheuttavat Co-58 ja 60, Ag-110m, Mn-54 sekä Sb-124. (Kvarnström 2019. 2; Arola 2019. liite 2)

Radioaktiivisten aineiden hajoaminen järjestelmissä ja niiden ulkopuolella aiheuttaa nukliidin hajoamisreaktion mukaan erityyppistä säteilyä. Tässä kappaleessa käydään läpi näistä ydinvoimalaitoksella yleisimmät, alfa-, beeta- ja gammasäteily.

2.1 Alfasäteily

Alfahajoaminen on prosessi, jossa kaksi neutronia ja protonia yhdistyvät epävakaa atomin ytimessä, ja emittoituvat yksittäisenä hiukkasena, jota kutsutaan alfahiukkaseksi. (Tait 1980. 47) Alfahajoamista kuvaa reaktioyhtälö



jossa A on aineen massaluku, Z aineen järjestysluku, X alfa-aktiivinen aine, esimerkiksi U-238, ja Y aineen X tytärudin, esimerkiksi Th-234. Alfahajoaminen on mahdollista vain raskailla nuklideilla, sillä alfahiukkasen sidosenergian B_α on oltava positiivisen hiukkasen poistamiseksi ytimestä yhtälön (2) mukaisesti.

$$B_\alpha = ({}^{A-4}_{Z-2}m + {}^4_2m - {}^A_Zm) \cdot c^2 \geq 0 \quad (2)$$

jossa B_α on alfahiukkasen sidosenergia, m ovat yhtälössä (1) olevien hiukkasten massat, ja c on valonnopeus. Yleisesti tämä ehto täyttyy vain lyijyä raskaammilla nuklideilla. (Tait 1980. 48)

Alfa-epästabiileilla ytimillä on usein pitkä puoliintumisaika, sillä päästäkseen vapaaksi ytimestä alfahiukkasen on myös voitettava hylkivä sähkömagneettinen voima, eli Coulombin voima, eikä sen energia riitä tähän. Alfahajoaminen tapahtuu vain kvanttimekaanisen tunneli-ilmiön seurauksena, jolloin hiukkanen löytyy Coulombin vallin ulkopuolelta pienellä todennäköisyydellä. (Ikäheimonen 2002. 20)

Alfasäteily on vaarallisinta, jos sitä pääsee kehon sisään. Alfahiukkanen on massaltaan ja varaukseltaan verrattain suuri, joten kudokseen päästyään se ionisoi atomeja hyvin tiheästi ja aiheuttaa soluihin vaikeasti korjattavia vaurioita. (Paile 2002. 29) Alfahiukkanen

kuitenkin menettää varauksensa nopeasti törmäyksissä väliaineen elektroneihin, joten sen kantama on lyhyt. Alfasäteilyn kantama ilmassa vain muutamia senttimetrejä ja kudoksessa kymmeniä mikrometrejä. (Ikäheimonen 2002. 39)

2.2 Beetasäteily

Beetasäteilyä voi syntyä kahdella eri tavalla. Näitä prosesseja ovat β^- -hajoaminen ja β^+ -hajoaminen. Näillä prosesseilla yhteistä on neutronin muuttuminen protoniksi ytimessä, tai toisinpäin. Näistä prosesseista ydinvoimalaitoksella yleisin on β^- -hajoaminen, jossa ytimen yksi neutroni hajoaa protoniksi, elektroniksi β^- sekä neutriinoksi ν . Näistä protoni jää ytimeen, jolloin aineen järjestysluku Z kasvaa yhdellä, mutta massaluku A säilyy samana. Elektroni ja neutriino poistuvat ytimeistä välittömästi β^- -säteilynä, eli beetasäteilynä. (Tait 1980. 50) Neutriinot eivät juuri vuorovaikuta aineen kanssa, joten β^- -säteilyn katsotaan koostuvan elektroneista. Sana neutriino tarkoittaa pientä neutronia, sillä se on massaton ja neutronin tapaan varaukseton hiukkanen. (Ikäheimonen 2002. 23) β^- -hajoamista kuvaa reaktioyhtälö



jossa X on emonuklidi, esimerkiksi ${}^{60}\text{Co}$ ja Y sen tytärnuklidi ${}^{60}\text{Ni}$. Co-60 hajoamisessa elektronin energia on noin 0,31 MeV (Soti et al. 2018).

β^+ -hajoamisessa ytimessä yksi protoni muuttuu neutroniksi, β^+ -hiukkaseksi eli positroniksi ja neutriinoksi. Näistä neutroni jää ytimeen, jolloin atomin järjestysluku pienenee yhdellä. Positroni ja neutriino poistuvat ytimeistä β^+ -säteilynä. Positroni on elektronin antihukkanen, jolla on elektronin kanssa sama massa, mutta vastakkainen positiivinen varaus. (Tait 1980. 51) β^+ -hajoamista kuvaa reaktioyhtälö



jossa X on emonuklidi, esimerkiksi ${}^{11}\text{C}$, ja Y sen tytärnuklidi ${}^{11}\text{B}$.

2.3 Gammasäteily

Sekä alfa- että beetahajoamisen seurauksena atomin ydin jää usein virittyneeseen tilaa. Tämä viritystila purkautuu gammasäteilynä ytimen emittoidessa yhden tai useamman gammakvantin γ . Gammahajoamista kuvaa reaktioyhtälö



jossa X^* on nuklidin X virittynyt isomeeri. Esimerkiksi ydinvoimalaitoksella esiintyvä Co-60 hajoaa käytännössä kokonaan β^- -hajoamisella virittyneeksi Ni-60:ksi, jonka viritystila purkautuu emittoimalla kaksi gammakvanttia, joiden energiat ovat $E_\gamma = 1,17$ MeV, 1,33 MeV (Chu et al. 1999.). Gammasäteilyn energia beetahajoamisen seurauksena on yleensä alle 2,8 MeV (Knoll 1979. 16).

Gammahajoaminen tapahtuu käytännössä välittömästi alfa- tai beetahajoamisen seurauksena, lukuun ottamatta atomien metastabiileja isotooppeja. Jotkin nuklidit jäävät virittyneeseen tilaan tarpeeksi pitkäksi aikaa, että voidaan puhua itsenäisestä nuklidista, joka on metastabiilissa tilassa. Tällöin nuklidia merkitään kirjaimella m . Esimerkiksi Tc-99m on metastabiili tila, joka purkautuu Tc-99:si emittoimalla gammasäteilyä puoliintumisajalla 6,02 päivää. (Tait 1980. 55) Isomeerisen tilan purkautumista gammasäteilynä sanotaan isomeeriseksi transitioksi, IT. Loviisan ydinvoimalaitoksella esiintyy radioaktiivinen Ag-110 sen metastabiilissa tilassa Ag-110m, jonka puoliintumisaika on 249,79 päivää.

3 PINTAKONTAMINAATION MITTAAMINEN

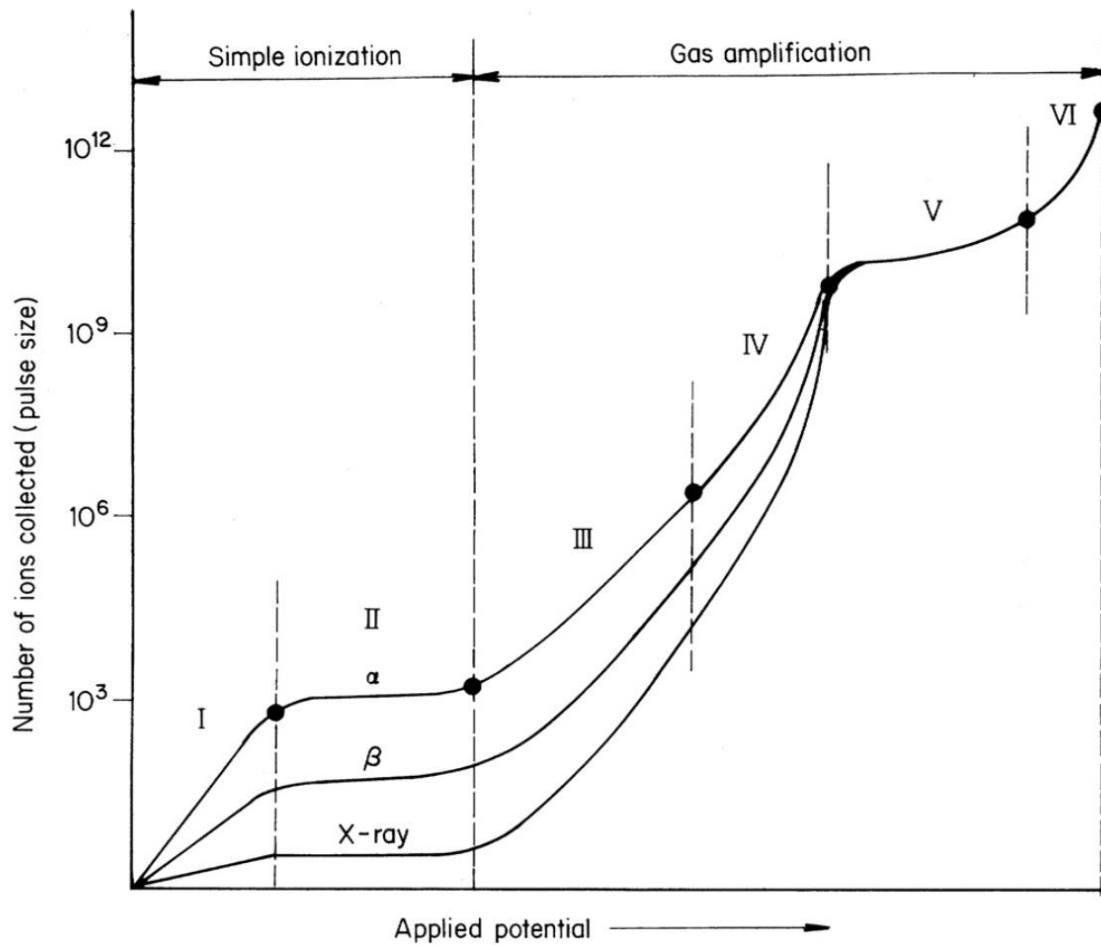
Pintakontaminaatiota mitataan eri säteilyn ilmaisimilla. Kaikkien säteilyilmaisimien toiminta perustuu havaittavan säteilyn vuorovaikutukseen ilmaisimen kanssa. Säteily aiheuttaa ilmaisimen väliaineeseen muutoksia luovuttamalla energiaa ja siten ionisoimalla ja virittämällä sen atomeja. Nämä muutokset voidaan havaita, ja havainnot voidaan muuttaa signaalinkäsittelyjärjestelmällä haluttuun muotoon. (Ikäheimonen 2002. 116) Mikäli vuorovaikutusta ilmaisimessa ei tapahdu, varaukseton säteily, kuten gammakvantti tai neutroni voi kulkea kokonaan ilmaisimen läpi ilman että se tulee havaituksi. (Knoll 1979. 40) Tästä syystä säteilymittarien valmistajat ilmoittavat ilmaisimen efektiivisyyden, eli kuinka iso osuus säteilystä havaitaan säteilyn tietyille energioille.

Säteilyn aiheuttamat muutokset ilmaisimessa ilmenevät sähkövarauksena, joka havaitaan muodostamalla ilmaisimeen sähkökenttä, jossa säteilyn aikaansaamat positiiviset ja negatiiviset varaukset kulkevat eri suuntiin. Varauksen keräämiseen kuluva aika vaihtelee ilmaisintyyppin mukaan ionisaatiokammioilla millisekunneista puolijohdeilmaisimien nanosekun-teihin. (Knoll 1979. 80)

Ilmaisimia käytetään joko virta-, tai pulssitilassa. Virtatilassa laite laskee kohteen annosnopeuden tai aktiivisuuden keskimääräisen ionisaatiosta aiheutuneen virran perusteella. Säteilyannosmittauksessa sekä ydinreaktorin tehoa seuratessa käytetyt säteilymittarit toimivat usein virtatilassa. Pintakontaminaatiota mitatessa käytetyt mittarit toimivat taas usein pulssitilassa, jolloin aktiivisuus lasketaan jokaisen säteilykvantin vuorovaikutuksesta syntyneen virran perusteella. (Knoll 1979. 81)

3.1 Kaasuilmaisimet

Ilmaisimen väliaine voi olla kaasua, nestettä tai kiinteää ainetta, mutta vanhimmat ja käytetyimmät säteilymittarit perustuvat säteilyn vuorovaikutukseen kaasun kanssa. Yksinkertaisin ilmaisimien on kaasutäyteinen tila sähkökentässä, joka muodostetaan kahdella elektrodilla. Sähkökentän voimakkuuden mukaan kaasutäyteinen ilmaisimien on joko ionisaatiokammio, verrannollisuuslaskuri tai geigerputki. (Knoll 1979. 151) Kuvassa 2 on esitetty kaasuilmaisintyyppien toiminta-alueet eri säteilyn tyypeillä. Kuvasta nähdään, miten keräysjännitteen kasvattaminen kasvattaa havaittujen pulssien määrää eksponentiaalisesti tietyn kaasusta riippuvan rajan jälkeen. Mitä suurempaa annosnopeutta mitataan, sen suurempi jännite tarvitaan varausten keräämiseksi, ennen kuin ne neutralisoituvat eli rekombinoituvat. (Ikäheimonen 2002. 116)



Kuva 2. Kaasuilmaintyyppien toiminta-alueet. Alue I on rekombinaatioalue, alue II ionisaatiokammio, alue III ja IV verrannollisuuslaskuri, alue V Geiger-Müller-ilmaisim ja alue VI jatkuvan purkauksen alue (L'Annunziata 2012. 193)

3.1.1 Ionisaatiokammio

Kaasuilmaisin toimii ionisaatiokammiona jännitteen ollessa tarpeeksi suuri, etteivät säteilyn synnyttämät ionit ehdi rekombinoitua ennen niiden saapumista elektrodeille. Ionisaatiokammion toiminta perustuu syntyneen keskimääräisen virran mittaamiseen, joka on suoraan verrannollinen syntyneiden ioniparien lukumäärään ja täten absorboituneeseen säteilyannokseen. Tämä näkyy käyrän vaakasuorana osana kuvassa 2. Kaasuna käytetään yleensä ilmaa normaalipaineessa. (Ikäheimonen 2002. 117)

3.1.2 Verrannollisuuslaskuri

Kaasuilmaisin toimii verrannollisuuslaskurina, kun keräysjännitettä kasvatetaan kuvan 2 alueelle III. Tällöin alkaa tapahtua kaasumonistumista, jolloin säteilyn muodostamat ionit saavat tarpeeksi energiaa muodostamaan lisää ioneja törmätessään kaasumolekyyleihin. Syntynyt elektronivyöry, jolloin elektrodeille kertyvä varaus on useita tuhansia suurempi, kuin säteilyn ionisoima varaus. Elektrodeille kertyvä varaus on kuitenkin verrannollinen säteilyn aikaansaamien ioniparien lukumäärään. (Knoll 1979. 183)

Verrannollisuuslaskuria, toisin kuin ionisaatiokammiota käytetään usein pulssitilassa, eli laite mittaa hetkellistä virransuuruutta. Koska virtapulssit ovat kaasumonistumisen seurauksena merkittävästi suurempia kuin ionisaatiokammiossa, voidaan verrannollisuuslaskurilla havaita huomattavasti pienempiä annosnopeuksia. (Knoll 1979. 182) Verrannollisuuslaskureita käytetäänkin ydinvoimalaitoksella pintakontaminaation, lähinnä alfa- ja beetasäteilyn mittaamiseen. Kaasuna verrannollisuuslaskureissa käytetään usein ilman sijaan jonkin jalokaasun ja hiilivedyn seosta. (Ikäheimonen 2002. 119-120)

3.1.3 Geiger-Müller-ilmaisim

Geiger-Müller-ilmaisim eli Geigerputki tai GM-putki on yksi vanhimpia ja tunnetuimpia säteilyilmaisimia. Sen kehittivät Hans Geiger ja Walther Müller vuonna 1928, mutta yksinkertaisen rakenteen, helppokäyttöisyyden ja pienten valmistuskustannusten vuoksi se on edelleen laajalti käytössä. (Knoll 1979. 218)

Verrannollisuuslaskurin tavoin Geigerputken keräysjännite on tarpeeksi suuri, että jokainen säteilyn aiheuttama ionisaatio saa aikaan elektronivyöryn kaasussa. Geigerputken jännite on kuitenkin niin suuri, että jokainen syntynyt elektronivyöry saa aikaan uuden elektronivyöryn. (Knoll 1979. 218) Elektronipurkaus lakkaa, kun positiivisten varausten määrä kasvaa niin suureksi, että sähkökenttä pienenee alle kaasumonistumisen kynnyksarvon. (Ikäheimonen 2002. 120)

Geigerputken elektrodeille saapuvien ioniparien suuren lukumäärän vuoksi mitattu jännite on muita kaasutäytteisiä ilmaisimia suurempi, luokkaa useita voltteja. Tämä mahdollistaa Geigerputken yksinkertaisen rakenteen, sillä jännitettä ei tarvitse vahvistaa. Kuitenkin koska elektronipurkaus lakkaa aina kun tietty määrä positiivisia varauksia on syntynyt, tieto

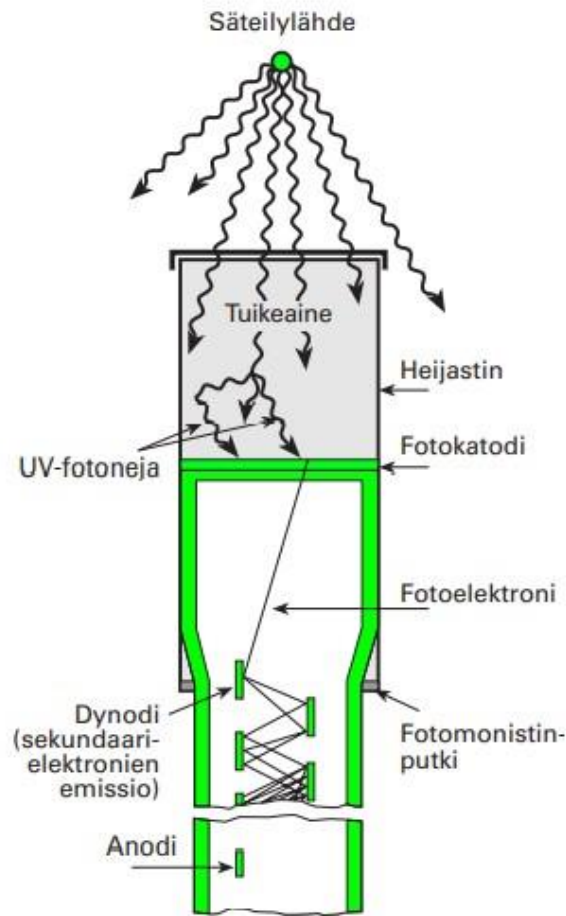
säteilyn tyypistä tai energiasta katoaa, koska jokainen ilmaisimessa tapahtuva ionisaatio aiheuttaa samansuuruisen pulssin. Kaikkien varausten keräämiseen ja sähkökentän palautumiseen kuluu myös huomattavan pitkä aika, noin 50-100 μ s. Tätä kutsutaan lama-ajaksi, ja se rajoittaa Geigerputkella mitattavien pulssien määrää merkittävästi, jolloin korkeampien pulssinopeuksien mittaaminen vaatii lama-ajan korjausta. (Knoll 1979. 219, 225)

3.2 Tuikeilmaisimet

Yksi vanhimpia säteilymittaamiseen käytettyjä keinoja on säteilyn tietyissä aineissa aikaansaaman tuikevalon havaitseminen. Tuikeilmaisimen toiminta perustuu atomien virittämiseen säteilyssä. Missä tahansa materiaalissa ionisoiva säteily virittää atomeja korkeammalle energiatilalle, joka purkautuu emittoimalla fotoneja joko ultravioletti tai näkyvänä valona ilmiönä, jota kutsutaan luminesenssiksi. (Tait 1980. 237)

On kuitenkin ehtoja, joiden on täyttyttävä, jotta aine voi toimia säteilyn ilmaisimena. Energiatilan purkautumisen on tapahduttava välittömästi virittymisen seurauksena fluoresenssina, ja purkauduttava valona lämmön sijaan. Tuikeaineen on myös oltava läpinäkyvä omalle tuikkeelleen, eli emittoidun valon on kuljettava aineen läpi (Tait 1980. 237). Yleisimmin käytettyjä tuikeaineita ovat epäorgaaniset alkalihalidikiteet, kuten natriumjodidi, ja orgaanisperäiset nesteet ja muovit (Knoll 1979. 239-240). Käyttämällä eri tuikeaineita samassa ilmaisimessa kerroksittain voidaan mitata erikseen eri säteilylajeja yhtä aikaa (Ikäheimonen 2002. 123).

Tuikeilmaisimien tarvitsee toimiakseen myös valomonistinputken. Tuikeaineen emittoima valo on liian heikkoa, että se voitaisiin suoraan muuttaa sähköiseksi signaaliksi. Tuikeaineen emittoimat fotonit ohjataan heijastimilla optisesti kytkettyyn valomonistinputkeen, jossa ne irrottavat fotokatodista matalaenergisiiä elektroneja. Elektronien määrä monistetaan sarjalla dynodeja monimiljoonakertaiseksi. (Knoll 1979. 272-273) Dynodi on elektrodi, jota muuttaa sähkökentän energiaa elektroneiksi emittoimalla useita uusia elektroneja jokaisen elektronien osuessa siihen. Anodille johdetusta signaalista saadaan suuruusluokaltaan volttien jännitepulssi jokaista tapahtumaa kohden tuikeaineessa, joten signaalia ei tarvitse vahvistaa enempää. (Tait 1980. 241-242) Tuikeilmaisimen rakenne on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Tuikeilmaisimen rakenne ulkoiselle säteilylähteelle. (Ikäheimonen 2002. 123)

Tuikeilmaisimien on suojattava ulkoiselta valolta, sillä pienikin valonsäde ylikuormittaa ilmaisimen välittömästi. Säteilyikkunana voidaan käyttää gammasäteilyä mitattaessa ohutta muovia ja beeta- ja alfasäteilyä mitattaessa nanometrien paksuista kalvoa.

Tuikeilmaisimien etuna on niiden monipuolisuus. Tuikeilmaisimen voi valmistaa useista eri materiaaleista ja muokata sopivaan muotoon ja kokoon. Ainoana rajoittavana tekijänä toimii usein tuikevalon keräys fotokatodille. Useimmissa tuikeaineissa, etenkin muoveissa ja nesteissä viritystilat purkautuvat hyvin nopeasti, joten tämä ei rajoita mittaamista. Rajoittavana tekijänä toimii elektronien kulku valomonistinputken läpi, mikä kestää vain nanosekunteja. (Tait 1980. 245) Tuikeilmaisimien lyhyt lama-aika mahdollistaa korkeiden pulssinopeuksien mittaamisen tuikeilmaisimella verrattuna kaasutäytteisiin ilmaisimiin.

3.2.1 Muovituikeilmaisimet

Muovituikeilmaisimien valmistetaan liuottamalla tuikeaine kestopuoviin kuten polystyreeniin, jolloin saadaan kiinteä muovinen ilmaisimien. Muovituikeilmaisimien on hyvä vaihtoehto, kun valmistetaan kooltaan suuria säteilyilmaisimia suhteellisen halvan materiaalin ja helpon muotoilun vuoksi. (Knoll 1979. 244) Pienen efektiivisen järjestysluvun ja tilavuuden takia muovit eivät ole yleensä tehokkaita gammasäteilyn havaitsemiseen, etenkin pienillä energioilla. (Tait 1980. 254)

4 LARS-MITTALAITTEEN TOIMINTA

Tässä kappaleessa käsitellään, miten LARS mittaa säteilyä, miten eri asetusten säätäminen voi vaikuttaa mittaustuloksiin, sekä miten laite täyttää yleiset käyttövaatimukset kontaminaatiomittareille Loviisan ydinvoimalaitoksella.

LARS käyttää kahta $250 \times 500 \times 50 \text{ mm}^3$ muovituikeilmaisinta. Asetuksista voidaan valita summaako laite ilmaisimien tulokset yhdeksi mittausravoksi. Ilmaisimilla on herkkyuden lisäämiseksi kaksi eri kanavaa, joilla molemmilla on oma hälytysraja. Toinen kanava mittaa kokonaisenergiaa alueella 100 keV - 2 MeV, ja toinen korkeaa energiaa alueella 500 keV – 2 MeV. Energia-alueiden selkeä erottelu ei ole mahdollista muovituikeilmaisimella (S.E.A GmbH 2008. 26). Kokonaisuudessaan laite on 90 cm pitkä, 78 cm leveä ja 35 cm korkea lukuun ottamatta työntökahvaa. Laite näkyy kuvassa 4.



Kuva 4. LARS Loviisa 1 edessä. Kuvassa näkyy myös kiskot, joilla materiaalia kuljetetaan laitok-
selta toiselle.

4.1 LARS:n asetusten vaikutus

Mittalaitteen asetuksia säättäessä on tehtävä kompromisseja mittaustarkkuuden ja laitteen käytettävyyden välillä. Mitä pienempiä aktiivisuuksia haluttaan havaita, sitä helpommin aiheutuu vääriä hälytyksiä ja mittaaminen on hitaampaa. LARS:n asetuksissa tähän vaikuttavia tekijöitä ovat hälytysraja, havaitsemistarkkuus, mittayksikkö, taustasäteilyn vaikutuksen huomioiminen, sekä mittausnopeus.

4.1.1 Mittayksikkö ja hälytysraja

Mittayksiköksi voidaan valita cps, Bq tai Bq/cm². Selkeyden vuoksi on hyvä käyttää yksikönä cps. Vaikka Bq tai Bq/cm² ovat konkreettisempia, eivät ne ilmaisimista riippuvaisia yksiköitä, taustanvähennyksen vuoksi hälytysraja ei pysy vakiona, esimerkiksi 400 Bq tai 4 Bq/cm², vaan raja vaihtuu laitteen havaitseman taustasäteilyn suuruuden perusteella.

Teoreettinen hälytysraja voidaan määrittää eri nuklideille yhtälöllä

$$C = A \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_s , \quad (5)$$

missä A on lähteen aktiivisuus (Bq)

ε_d on mittalaitteen efektiivisyys, eli havaitsemisherkkyys nuklidille

ε_s on lähteen efektiivisyys, eli kuinka suuri osuus säteilylähteen lähettämästä säteilystä osuu ilmaisimelle.

Manuaali antaa laitteen efektiivisyydeksi Co-60:lle 38 % ja Cs-137:lle 17 %. (S.E.A GmbH 2008. 42) Efektiivisyys Ag-110m:lle ei ole tiedossa, mutta Ag-110m:n hajoamisessa syntyy useampi kvantti eri energistä gammasäteilyä taulukon 1 mukaisesti. Tämä tarkoittaa, että laitteen efektiivisyys Ag-110m:lle on korkeampi kuin Cs-137:lle ja mahdollisesti korkeampi kuin Co-60:lle. Myöskään beetasäteilyn vaikutusta efektiivisyyteen ei ole mittalaitteen dokumentaatiossa kuvattu.

Taulukko 1. Cs-137:n, Ag-110m:n ja Co-60:n todennäköisyys lähettää eri energistä gammasäteilyä. (Chu et al. 1999)

Isotooppi	E_γ (keV)	I_γ (%)
Cs-137	661,7	85,1
Ag-110m	657,8	94
	884,7	72,2
	937,5	34,1
	1384,3	24,1
	673,9	22,1
	706,7	16,3
	1505	13
Co-60	1137,2	100
	1333,3	100

Ilmaisimen suuren koon takia lähteen efektiivisyydeksi oletetaan 50 %, eli ilmaisimen alla olevan säteilylähteen emittoimasta gammasäteilystä oletetaan puolet osuvan ilmaisimeen. Tämä oletus toimii tasaisilla pinnoilla ilmaisimen suuren koon vuoksi, mutta säteilylähteen ollessa esimerkiksi asfaltin raossa lähteen efektiivisyys, ja siten myös tarvittava hälytysraja pienenevät.

Jotta mitattava pinta voidaan todeta laitteella kontaminaation osalta puhtaaksi, laitteen hälytysraja tulee asettaa siten että kappaleessa 1 mainittu Säteilyturvakeskuksen määrittämä 400 Bq aktiivisuus tulee havaittua ilmaisimen ja lähteen efektiivisyydet huomioiden. Halutun havaittavan aktiivisuuden ollessa 400 Bq saadaan halutuksi hälytysrajaksi Co-60:lle $C = 400 \text{ Bq} \times 0,38 \times 0,50 = 76 \text{ cps}$. Tästä syystä laitteella tulisi havaita 76 pulssin poikkeama taustaan nähden, mikäli halutaan havaita 400 Bq nuklidia Co-60.

4.1.2 Taustasäteilyn huomioiminen

Taustasäteilyn huomioimiseen vaikuttaa nuklidiasetuksista asetus ”hälytysraja taustasäteilyn vaikutuksen signaali”. Tämä asetus laskee hälytysrajan automaattisesti taustasäteilyn keskihajonnan, eli signaalin kertoimena 1-10. Laite laskee taustasäteilyn keskihajonnalle arvon taustan vaihtelun perusteella. Jos hälytysrajaksi asetetaan esimerkiksi 8σ kokonaisenergialle, on hälytysraja 8 kertaa laskettu keskihajonta yli taustan. Esimerkiksi jos laite määrittää ilmaisimen alta lasketuksi taustasäteilyn vaikutukseksi 10 000 cps ja keskihajonnaksi 100 cps, hälytysrajalla 8σ laite hälyttää pulssinopeuden ylittäessä 10 800 cps. Työnnettäessä laitetta tämä arvo muuttuu.

Käytännössä tämän asetuksen tulee olla valittuna, sillä muuten pienikin taustan vaihtelu aiheuttaa turhan hälytyksen, kun hälytysrajalle on määritetty absoluuttinen arvo. Keskihajonnan kertoimet määrittävät, kuinka helposti taustasäteilyn muutos aiheuttaa hälytyksen. Ongelmana on laitteen kyky tunnistaa, milloin on kyse taustasäteilyn muutoksesta, ja milloin kontaminaatiosta. Valmistaja antaa suosituskertoimiksi kokonaisenergian signaali 8-9, korkean energian signaali 5-6 ja matalan energian signaali 8-9. (S.E.A GmbH 2008. 26-28) Tämän asetuksen heikkous on lasketun hälytysrajan epäselvyys, sillä se riippuu laitteen määrittämästä taustasäteilyn vaihtelusta.

Toinen taustasäteilyn huomioimiseen vaikuttava asetus on ilmaisinasetuksissa ”uusi taustan mittaussignaali”. Tämä asetus aloittaa automaattisesti uuden 20 sekuntia kestävästä taustasäteilyn mittauksen, jos mitattu kokonaisenergia on riittävästi alle oletetun taustanvaikutuksen. Tämä hidastaa mittaamista, mutta asetuksen käyttäminen parantaa mittauksen luotettavuutta. Taustan vaihtelun ollessa pientä tämä ominaisuus toimii hyvin, mutta taustan vaihdella enemmän esimerkiksi voimalaitoksen piha-alueella se saa aikaan uuden taustanmittauksen hyvin usein. Mittauspaikoista on kerrottu lisää kappaleessa 5.

Taustasäteilyn vaikutuksen ollessa yli 17 000 cps taustanvähennys ei onnistu, ja laite ilmoittaa ”detector overflow”. Tämä vastaa annosnopeuden yleistasolta noin 1-2 $\mu\text{Sv/h}$. Valmistaja on määrittänyt, että näin suurella taustalla mittaustarkkuus kärsisi liikaa.

4.1.3 Mittausnopeus

Mitatessa näytöstä voi lukea työntövauhdin, sekä suurimman sallitun nopeuden yksikössä m/s. Laite laskee suurimman sallitun nopeuden joko mittausajan, tai havaitsemisrajan ja taustan perusteella. Laskemistapaa muutetaan asetuksista kohdasta nopeusmittaus valitsemalla joko ”mittausaika”, tai ”havaitsemisraja”. Tähän asetukseen vaikuttaa nuklidiasetukset kohdasta lisäasetuksista valittu havaitsemisraja. Mikäli valitaan mittausnopeus havaitsemisen perusteella, havaitsemisrajan ollessa 76 cps laite laskee taustasta riippuen mittausnopeuden hyvin pieneksi. Esimerkiksi taustan ollessa noin 10 000 cps mittausnopeus havaitsemisrajan perusteella on noin 0,10 m/s, eli 0,36 km/h. Käytännössä laitteen työntäminen näin hitaasti on kuitenkin vaikeaa.

Valmistajan mukaan kahta ilmaisinta käytettäessä havaitakseen 400 Bq aktiivisuus Co-60:tä tulee kävelyvauhdin olla enintään 3,6 km/h, eli 1 m/s. (S.E.A GmbH 2008. 42) Tämä on kuitenkin ilmoitettu ainoastaan taustanvaikutuksen ollessa 900 cps, eli viidesosa – viides-toistaosa verrattuna arvoihin Loviisan ydinvoimalaitoksella. Tätä on tutkittu kappaleessa 6.4.

5 SOVELTUVUUSTUTKIMUS

Tässä kappaleessa käydään läpi työtä varten tehtyä tutkimusta LARS:n soveltuvuudesta käyttöön Loviisan ydinvoimalaitoksella. Tutkimusta varten kerättiin kuivapyyhkäisynäytteitä eri puolilta Loviisa 1:n reaktorihallia. Tutkimuksessa käytettiin myös Loviisa 2 vuosi-huollon aikana otettuja pyyhkäisynäytteitä reaktorikuilusta. Lisäksi tutkimukseen lainattiin Co-60 lähteitä Loviisan lähdevarastolta. Yhteensä näytteitä oli 29, joista 19 oli kuivapyyhkäisynäytteitä, 6 märkäpyyhkäisynäytteitä, sekä 4 koboltilähteitä. Tutkimukset suoritettiin paikoissa, joissa laitetta todellisuudessa käytetään, eli kuljetusovelle vievällä materiaalikäytävällä ja laitosten välisellä piha-alueella, missä tavaraa kuljetetaan laitokselta toiselle. Lisäksi voimalaitokselta etsittiin vertailututkimuksen suorittamiseksi alueita, joissa taustasäteily on mahdollisimman matala ja vähän vaihteleva. Näitä olivat voimalaitosyksiköiden

välinen metallirakenteinen yhdyskäytävä, joka kulkee noin 9 metrin korkeudessa maan pinnasta, sekä tarkkailualueeksi luokiteltu alue Loviisa 1:n laboratoriorakennuksessa.

5.1 Tutkimuksessa käytetyt säteilylähteet

Tutkimuksessa käytettiin 29 näytettä eri aktiivisuuksilla ja nuklidijakaumilla. Kaikki tutkimuksessa käytetyt pyyhkäisynäytteet analysoitiin gammaspektrometrisesti radiokemian laboratoriossa kokonaisgamma-aktiivisuuden ja nuklidijakauman selvittämiseksi. Näytteet pyrittiin valitsemaan sen mukaan, mitä isotooppeja Loviisan ydinvoimalaitoksella tavallisesti esiintyy eniten, eli Co-58 ja 60, Ag-110m, sekä Sb-124. (Kvarnström 2019. 2; Arola 2019. Liite 2) Tätä työtä varten kerätyissä pyyhkäisynäytteissä antimonin isotooppien osuus jäi kuitenkin pieneksi verrattaen lyhyen puoliintumisajan (Soti Z et al. 2018) sekä vuoden 2020 revisiossa esiintyneen runsaan hopean määrän vuoksi. Lisäksi käytettiin neljää puhdasta Co-60 lähdettä. Lähteiden gamma-aktiivisuudet pyyhkäisynäytteille, ja kokonaisaktiivisuudet koboltilähteille vaihtelivat noin 200 - 25 000 Bq välillä. Taulukossa 2 on esitettyinä tutkimuksessa käytetyt säteilylähteet. Säteilylähteen on numeroitu siten, että 111-123 ovat Loviisa 1:ltä kerätyjä pyyhkäisynäytteitä, 001-012 ovat Loviisa 2:n reaktorikuilusta vuoden 2020 revisiossa otettuja pyyhkäisynäytteitä, ja neljä alinta ovat Co-60 lähteitä. Kuvat säteilylähteistä löytyvät liitteestä II. Aktiivisuuden oletetaan jakautuneen tasaisesti pyyhkäisynäytteisiin.

Taulukko 2. Tutkimuksessa käytettyjen säteilylähteiden aktiivisuus, sekä laitoksella yleisimmin esiintyvien nuklidien osuus aktiivisuudesta. Muita isotooppeja on paljon, mutta niiden osuudet yksinään ovat pieniä. Neljä alinta ovat eri muotoisia Co-60 lähteitä.

Säteilylähde	Aktiivisuus [Bq]	Ag-110m [%]	Co-60 [%]
111	371	85,9	3,4
112	713	32,6	4,7
113	408	52,7	21,5
114	820	60,9	11,2
115	788	35,7	23,2
116	410	65,0	4,6
117	214	47,3	5,6
118	3 319	32,4	14,1
119	19 100	98,8	0,5
120	9 900	99,7	0,0
121	934	100,0	0,0
122	2 020	99,6	0,0
123	2 917	99,8	0,0
001	6 075	95,6	0,0
002	3 039	86,6	1,0
003	7 400	89,3	0,0
004	1 751	85,7	0,8
005	11 210	87,4	0,8
006	3 705	78,3	1,4
007	25 160	91,9	0,4
008	14 600	89,5	0,6
009	1 572	77,1	1,2
010	214	75,6	0,0
011	697	78,4	0,9
012	201	88,8	0,0
TP 815	940	0,0	100
EBSC30, 30071	1 430	0,0	100
1794-100-2	5 320	0,0	100
GK 147	21 320	0,0	100

5.2 Mittauspaikkojen kuvaus

Tehdyt mittaukset suoritettiin kuudessa paikassa. Taulukossa 3 on esitettyä mittapaikat ja -olosuhteet.

Taulukko 3. Mittapaikat ja mittaolosuhteet. Cps-arvot on mitattu LARS:lla ja annosnopeudet FH40G-mittarilla.

Mittauspaikka	Tausta [nSv/h]	Tausta [cps]	Taustan vaihtelu [+/- cps]	Pinta
Yhdyskäytävä	120	4400	100	metalli
Apurakennus	220	11000	800	epoksimaali
Materiaalikäytävä	380	15300	1000	epoksimaali
Tarkkailualue	405	10600	200	linoleumi
Ulkoalue asfaltti	200-450	9500	800	asfaltti
Ulkoalue betoni	300	6500	500	betoni

Taulukossa 3 esitetty taustan vaihtelu ulkona on vielä voimakkaampaa, useita tuhansia pulsseja sekunnissa, kun asfaltin tyyppi vaihtuu. Taustasäteily on peräisin luonnossa esiintyvistä isotoopeista, K-40:stä sekä radonin tytärtymistä radiumin ja toriumin isotoopeista. (Virtanen et al. 2020. 2)

5.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimukset suoritettiin mittaamalla säteilylähteitä asettamalla ne keskelle ilmaisimia, sekä laitteen molempiin reunoihin pienimmän havaittavan aktiivisuuden selvittämiseksi käyttämällä hälytysrajana taustanvaihtelun keskihajonnan kertoimia valmistajan ohjeiden mukaisesti (kts. kappale 4.2.2). Ylös kirjattiin näytön näyttämä kokonaisenergia-alueen bruttopulssimäärä yksikössä cps, sekä mikäli näyte aiheutti hälytyksen. Lisäksi kohteissa suoritettiin sokkotesti, jossa eri näytteitä asetettiin mittausradalle muovin alle ja selvitettiin, kykeneekö koehenkilö löytämään ja paikantamaan niitä. Mittarata näkyy kuvassa 5. Muovin ei oleteta merkittävästi vaimentavan lähteiden gammasäteilyä.

Ilmaisimen korkeuden vaikutusta selvitettiin neljällä eri gammalähteellä kirjaamalla ylös näytön lukema ilmaisimen ollessa 10 mm, 25 mm ja 35 mm etäisyydellä maasta lähteen yläpuolella. Tämän lisäksi selvitettiin laitteen työntönopeuden vaikutusta herkkyyteen mittaamalla säteilylähteitä eri nopeuksilla.



Kuva 5. Sokkotesti mittaradalla laitostenvälisellä yhdyskäytävällä. Näyte on piilotettu muovin alle.

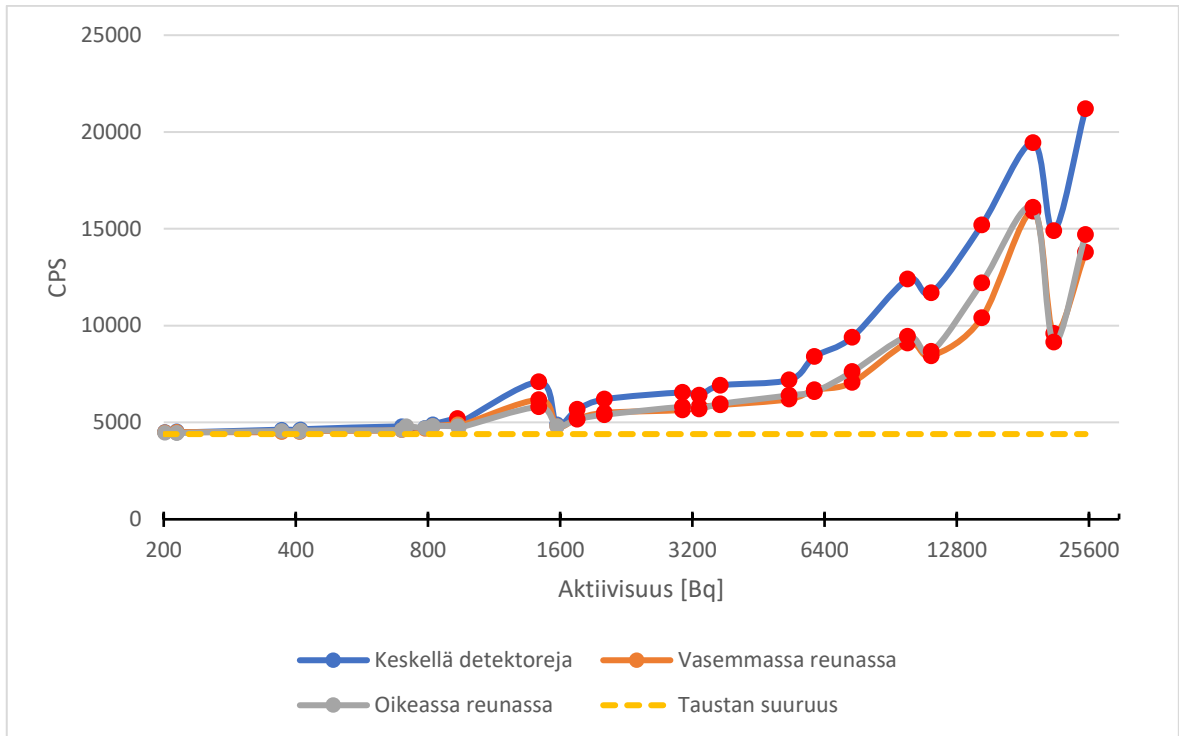
6 MITTAUSTULOKSET

6.1 Mittausolosuhteiden vaikutus

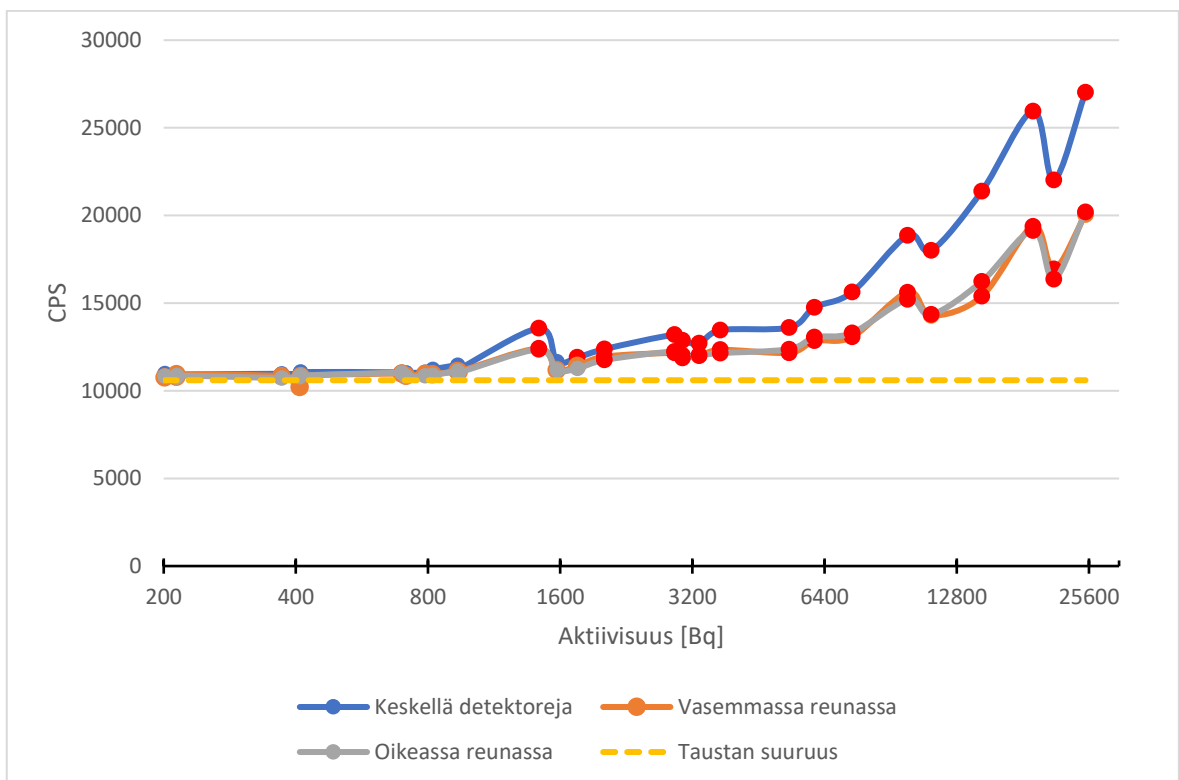
Kuvaajissa 6-11 on esitettyä LARS:n havaitsemien pulssien määrä sekunnissa näytteen ollessa keskellä laitetta sekä molemmissa reunoissa. Kuvaajiin on merkattuna taustasäteilyn vaikutus keltaisella sekä pisteet, joissa laite hälytti punaisella. Mittaukset tehtiin ilmaisimen ollessa 25 mm korkeudella maasta ja säteilylähteestä, sillä ulkona ilmaisin raapii helposti maata ollessaan tätä alempana.

6.1.1 Mittausolosuhteiden vaikutus matalassa taustasäteilyssä

Parhaat olosuhteet mittaamiselle löytyivät laitokselta yhdyskäytävältä, sekä henkilömonitoirien väliseltä tarkkailualueelta. Näissäkään paikoissa olosuhteet eivät ole täysin ideaalit, sillä tausta ja sen vaihtelu ovat huomattavasti suurempia, kuin olosuhteissa, joissa valmistaja on testannut laitetta. (S.E.A GmbH 2008. 9)



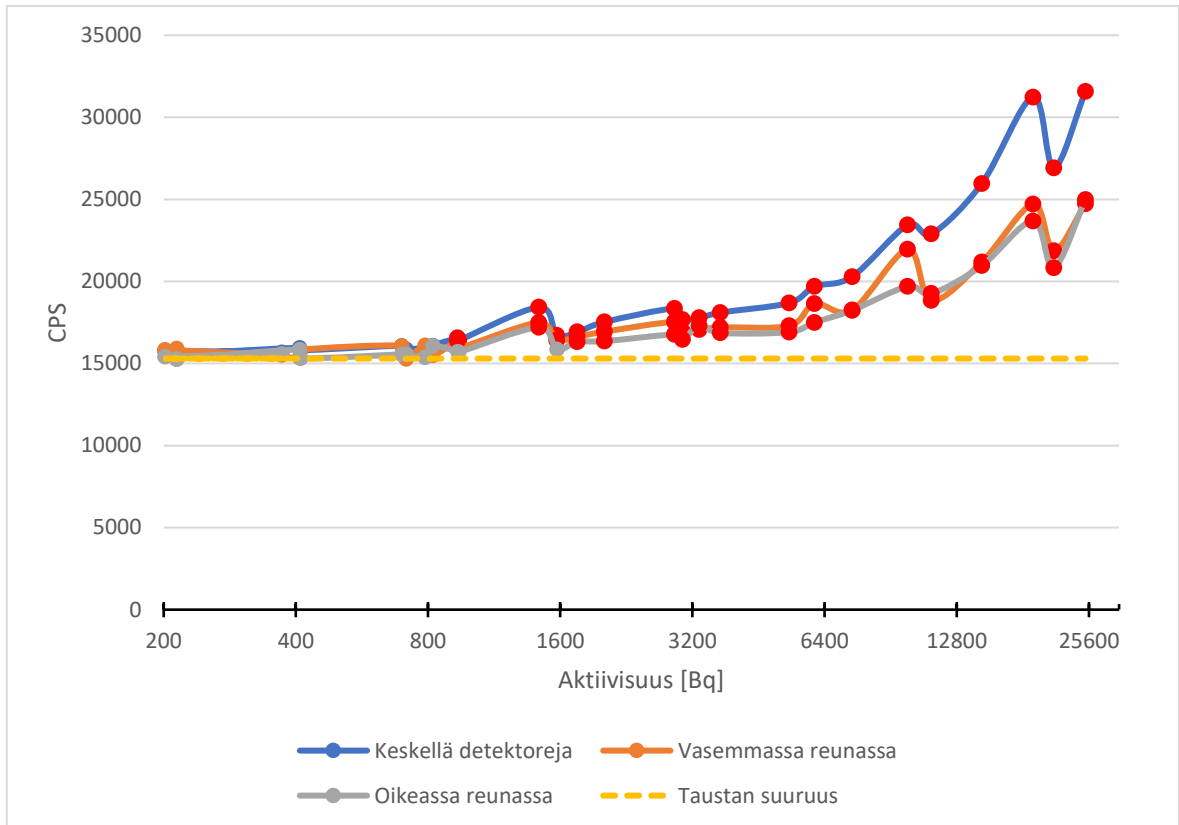
Kuva 6. Näytön lukema näytteen aktiivisuuden funktiona eri kohdissa ilmaisinta laitosten välisellä yhdyskäytävällä.



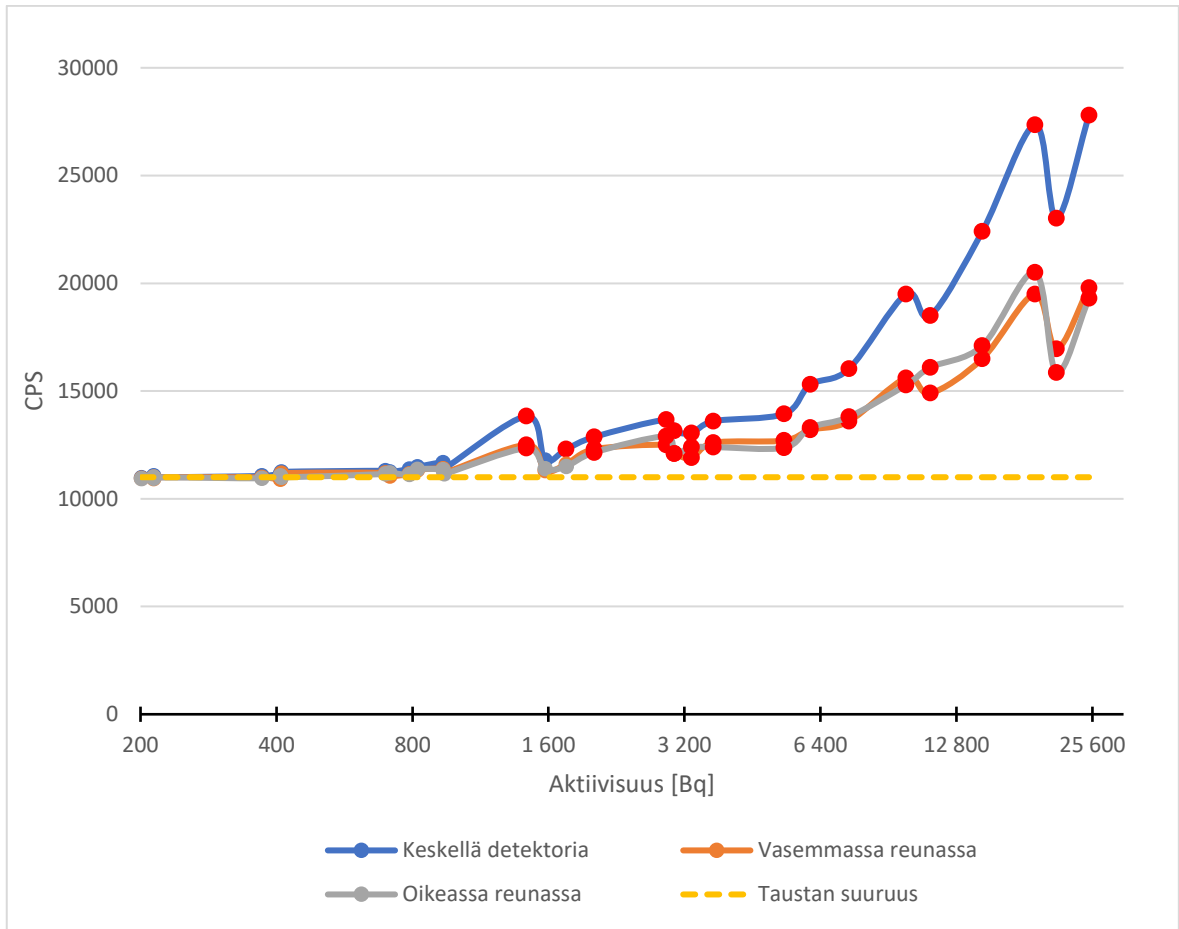
Kuva 7. Näytön lukema näytteen aktiivisuuden funktiona eri kohdissa ilmaisinta LO1 tarkkailualueella.

6.1.2 Mittausolosuhteiden vaikutus korkeammassa taustasäteilyssä

Kuvaajissa 8 ja 9 on esitetty mittaustulokset korkeammassa taustasäteilyssä LO2 materiaalinkuljetuskäytävällä ja apurakennuksen käytävällä. Korkeamman taustan vuoksi nämä alueet valittiin vertailututkimusta varten. Lisäksi valmistaja mainitsee kuljetusovien edustat esimerkkinä siitä, missä LARS on suunniteltu käytettäväksi (S.E.A GmbH 2008. 4).



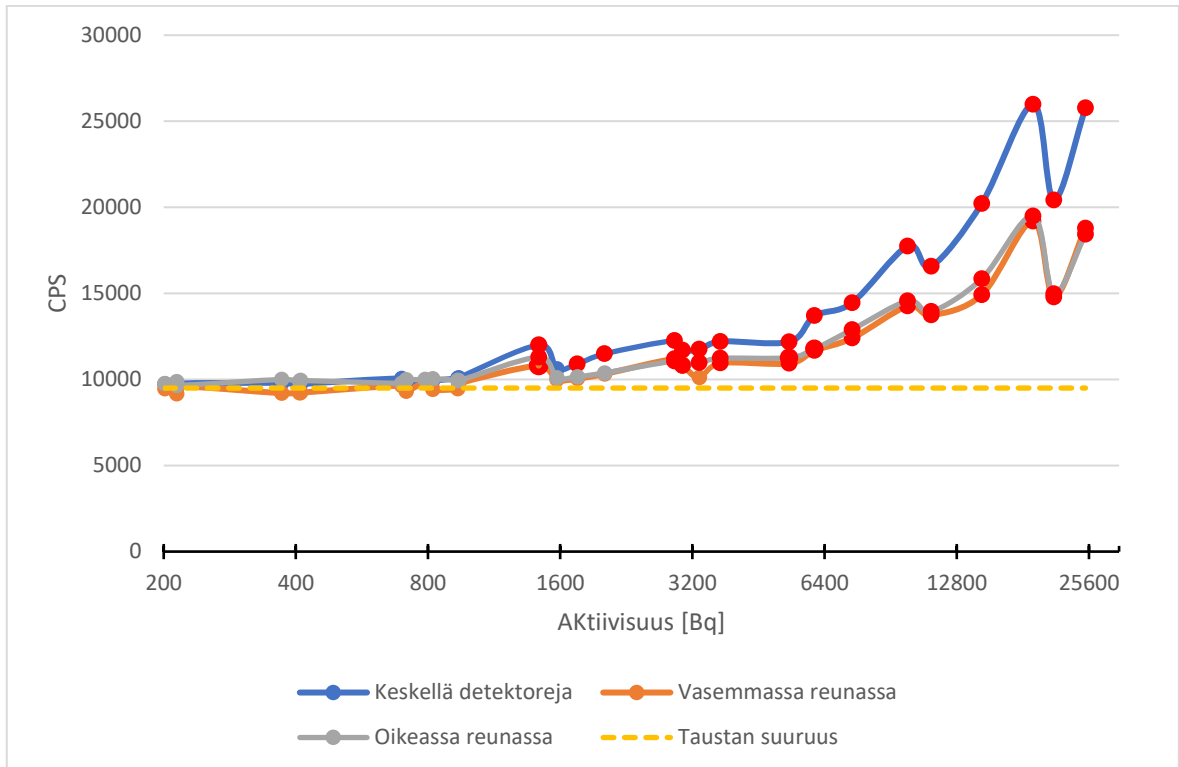
Kuva 8. Näytön lukema näytteen aktiivisuuden funktiona eri kohdissa ilmaisinta LO2 materiaalikäytävällä.



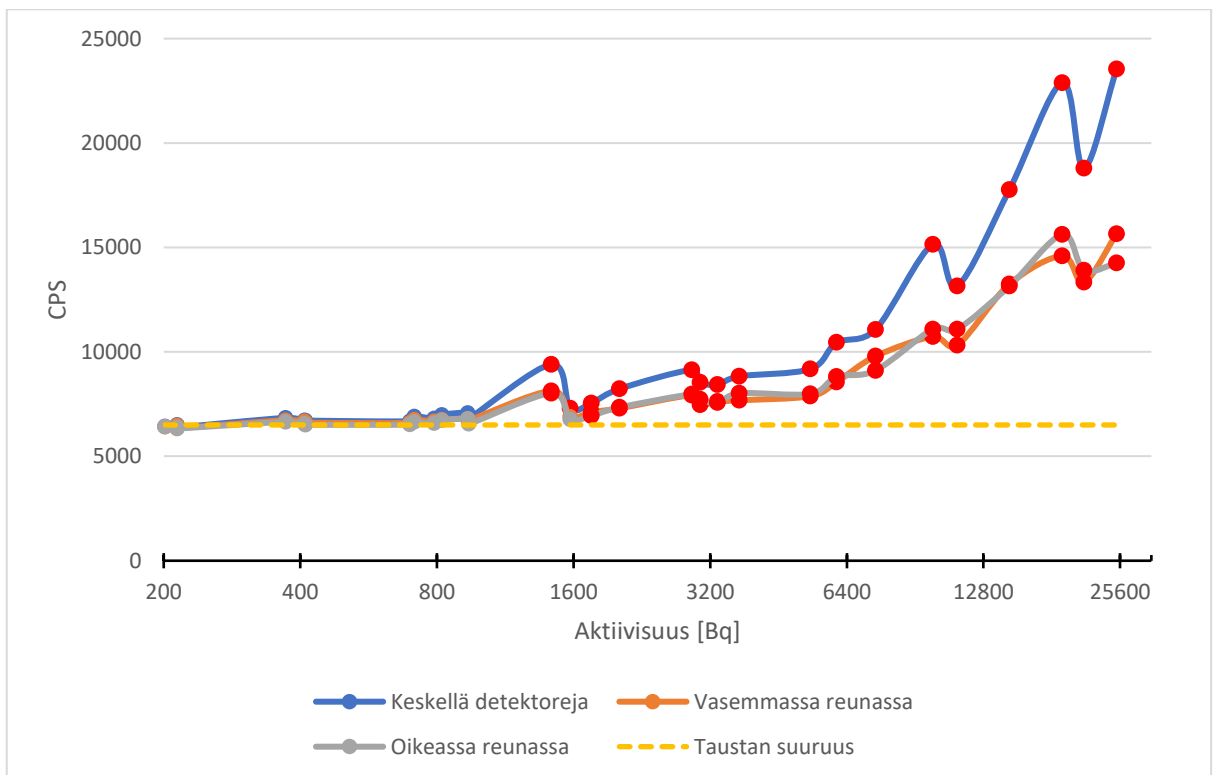
Kuva 9. Näytön lukema näytteen aktiivisuuden funktiona eri kohdissa ilmaisinta LO2 apurakennuksen käytävällä 2A1207.

6.1.3 Mittausolosuhteiden vaikutus ulkona laitosten välillä

Ulkona taustasäteily vaihtelee huomattavasti. Suurimman vaihtelun aiheuttaa maanpinnan materiaalin vaihtuminen asfaltin ja betonin välillä näistä löytyvien eri luonnon radioaktiivisten isotooppien takia. Myös asfaltin tyyppin vaihtelu aiheuttaa suuria muutoksia taustassa. Lisäksi maan alla kulkevat putket, sekä laitoksen seinän takana sijaitseva dekontaminointikeskus vaikuttavat taustasäteilyyn. (Virtanen et al. 2019. 1) Tässä työssä tehtävät mittaukset tehtiin ulkona asfaltin ja betonin päällä Loviisa 2 päädyssä, missä taustan vaihtelu on pienempää. Kuvaajassa 10 on esitetty tulokset asfaltilla ja kuvaajassa 11 betonilla.



Kuva 10. Näytön lukema näytteen aktiivisuuden funktiona eri kohdissa ilmaisinta ulkona asfaltilla.



Kuva 11. Näytön lukema näytteen aktiivisuuden funktiona eri kohdissa ilmaisinta ulkona betonilla, Lo2 kuljetusoven edessä.

6.2 Sokkotesti

Taulukossa 4 on esitettyä sokkotestin tulokset eri sijainneissa. Löydetyt lähteet on merkattu vihreällä värillä, sekä kirjaimella y.

Taulukko 4. Sokkotestin tulokset mittauspaikoissa. Sulkuihin on merkitty taustasäteilyn vaikutus.

Säteily- lähde	Aktiivisuus [Bq]	Peltikäytävä (4400 cps)	Ulkoa-alue (9500 cps)	Lo2 apurakennus (11000 cps)	Lo1 tarkkailu- alue (10600 cps)	Lo2 materi- aalikäytävä (15300 cps)
012	201	n	n	n	n	n
117	214	n	n	n	n	n
010	214	n	n	n	n	n
111	371	n	n	n	n	n
113	408	n	n	n	n	n
116	410	n	n	n	n	n
011	697	n	n	n	n	n
112	713	n	n	n	n	n
115	788	y	n	n	n	n
114	820	y	n	y	n	n
121	934	y	y	n	n	n
TP 815 EBSC30,	940	y	y	n	n	n
30071	1 430	y	y	y	y	y
009	1 572	y	n	n	y	y
004	1 751	y	n	y	y	n
122	2 020	y	n	y	y	n
123	2 917	y	y	y	y	y
002	3 039	y	y	y	y	y
118	3 319	y	y	y	y	n
006	3 705	y	y	y	y	n
1794-						
100-2	5 320	y	y	y	y	y
001	6 075	y	y	y	y	y
003	7 400	y	y	y	y	y
120	9 900	y	y	y	y	y
005	11 210	y	y	y	y	y
008	14 600	y	y	y	y	y
119	19 100	y	y	y	y	y
GK 147	21 320	y	y	y	y	y
007	25 160	y	y	y	y	y

6.3 Ilmaisimen korkeuden vaikutus

Taulukossa 5 on esitettyä käytettyjen Co-60 lähteiden muodon ja ilmaisimen etäisyyden vaikutus. Mittaus tehtiin taustan vaikutuksen ollessa 10100 cps.

Taulukko 5. Ilmaisimen etäisyyden vaikutus pinta-alaltaan eri kokoisten lähteiden havaitsemiseen.

Lähde	Aktiivisuus [Bq]	Muoto	CPS etäisyydellä [mm]		
			10	25	35
TP815	940	10×10 cm neliö	10390	10340	10280
ESBC30,30071	1430	d (∅) = 5 cm	13080	12690	12540
1794-100-2	5320	d (∅) = 2,5 cm	13090	12790	12610
GK147	21320	Pistelähde	23570	22050	21080

6.4 Kävelynopeuden vaikutus mittaustarkkuuteen

Taulukossa 6 on esitettyä kävelynopeuden vaikutus LARS:n havaitsemaan aktiivisuuteen. Mittaus on tehty taustanvaikutuksen ollessa 9300 cps, hälytysrajojen ollessa korkeaenergi-alle 6σ ja kokonaisenergialle 8σ . Havaitsemisrajaksi asetettiin luvun 4.2.1 mukaisesti 76 cps. LARS:n näillä parametreilla laskema suurin sallittu kävelynopeus on 0,10 m/s. Tätä verrataan valmistajan ilmoittamaan kävelynopeuteen 1 m/s (kts. luku 4.2.3).

Taulukko 6. Kävelynopeuden vaikutus LARS:n havaitsemaan aktiivisuuteen.

Säteilylähde	Aktiivisuus [Bq]	Kävelynopeus	
		1 m/s	0,10 m/s
012	201	n	n
117	214	n	n
010	214	n	n
111	371	n	n
113	408	n	n
116	410	n	n
011	697	n	n
112	713	n	n
115	788	n	n
114	820	n	n
121	934	n	n
TP 815	940	n	n
EBSC30, 30071	1 430	y	y
009	1 572	y	y
004	1 751	y	y
122	2 020	y	y
123	2 917	y	y
118	3 319	y	y
006	3 705	y	y
1794-100-2	5 320	y	y

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaustulosten ja laitteen käyttökokemusten perusteella arvioidaan laitteen soveltuvuutta pintakontaminaation mittaamiseen. Säteilyturvakeskuksen ydinturvallisuusohjeiden mukaan millään 100 cm² alueella ei saa olla yli 400 Bq aktiivisuutta, jotta sitä voidaan pitää kontaminaation osalta puhtaana. Vaikka LARS:n ilmaisin on huomattavasti suurempi, kuin 100 cm², täytyy laitteen hälyttää yli 400 Bq aktiivisuuksista, jotta voidaan varmistua aktiivisuuden jokaisella 100 cm²:llä olevan alle rajan.

Kuvaajista 5-10 voidaan havaita, että missään olosuhteissa laitteella ei havaittu alle 900 Bq aktiivisuuksia Ag-110m:ää. Taustasäteilyn kasvaessa yli 9000 cps myös yli 1000 Bq aktiivisuuksien havaitseminen vaikeutui, mikä näkyy erityisesti sokkotestin tuloksissa taulukossa 2. Taustasäteilyn suuruutta merkittävämpi tekijä on kuitenkin sen vaihtelu laitetta

työnnettäessä, minkä vuoksi materiaalikäytävällä ja ulkona ei taustanvaihtelun ollessa yli 1000 cps havaittu testiradalla edes kaikkia yli 2000 Bq näytteitä.

Kuvaajista havaitaan myös, ettei ilmaisimen havaitsemien pulssien määrä riipu täysin lineaarisesti aktiivisuudesta, vaan tähän vaikuttaa myös näytteen nuklidijakauma, ja nuklideista lähtevän gammasäteilyn energia. Voimalaitosperäisen kontaminaation nuklidijakauma vaihtelee kontaminaation iän ja alkuperän mukaan ja esimerkiksi LO2:n vuoden 2020 vuosihuollossa Ag-110m:n osuus oli huomattavan korkea. Vaihtelun seurauksena muutama näyte poikkeaa trendistä kuvaajissa. Efektiiivisyyden laitosperäiselle kontaminaatiolle havaitaan olevan samaa luokkaa Co-60:n kanssa, sillä Co-60:stä havaittujen pulssien määrä vaihteli näytteen koosta riippuen aktiivisuudeltaan samansuuruisien pyyhkäisyntytteiden molemmin puolin. Laite myös alkoi hälyttää näytteistä niiden isotooppikoostumuksesta riippumatta aktiivisuuden ylittäessä 1000 – 1500.

Näytteen paikalla ilmaisimeen nähden havaittiin olevan pieni vaikutus. Kaikissa mittauksissa oli muutamia, 900 - 2000 Bq näytteitä, joista aiheutui hälytys keskellä ilmaisinta, muttei reunoissa. Tämä tulee huomioida mitatessa työntämällä laitetta osittain edellisen mittauslinjan päältä. Ilmaisimen korkeuden havaittiin vaikuttavan sitä enemmän, mitä pistemäisempi säteilylähde on. Mitä korkeammalla ilmaisimella on, sitä pienempi osa säteilystä osuu ilmaisimeen ja sitä pienempi pistemäisen lähteen efektiiivisyys on yhtälön (5) mukaisesti.

Kävelynopeudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta laitteen herkkyyteen. Taulukon 4 mukaisesti samat näytteet havaittiin sekä työntönopeudella 1 m/s, että 0,10 m/s. Ainoana erona havaittiin nopeammalla työntönopeudella laitteen reagoivan suuremmalla viiveellä, jolloin etsittävä aktiivisuus voi olla taaempana, kuin mittaaja ajattelisi.

7.1 Soveltuvuusarvio

LARS-mittalaite on erittäin kätevä isojen lattia- ja piha-alueiden mittaamiseen. Suuremmat, yli 1000 Bq aktiivisuudet löytyvät laitteella ideaaliolosuhteissa melko helposti. Tämä tarkoittaa, että tasaisesti jakautuneena havaittavissa oleva aktiivisuuskate on reilusti YVL C.2 rajan alapuolella. Epäsuotuisimmista tilanteista, joissa aktiivisuus on pienellä alalla voi 4 Bq/cm² 100 cm² alalla ylittyä.

Kuitenkaan edes mahdollisimman ideaalisissa laitokselta löytyvissä olosuhteissa, kun taustasäteilyn paikoittainen vaihtelu on mahdollisimman vähäistä ja osuus mahdollisimman pieni, LARS-mittalaitetta ei voida täysin luotettavasti käyttää alueen puhtaaksi toteamiseen pintakontaminaation osalta. Mittaukset piha-alueella ja materiaalikäytävällä osoittavat, että taustasäteilyn suuruuden ja vaihtelun kasvaessa alueen mittaaminen luotettavasti hankaloituu entisestään. Taustanvähennyksen ollessa käytössä laitteella ei kyetty havaitsemaan alle 900 Bq aktiivisuuksia. Ilman taustanvähennystä näin pienien aktiivisuuksien mittaaminen on käytännössä mahdotonta, kun pienikin taustan vaihtelu aiheuttaa väärän hälytyksen. Taustasäteilyn ollessa yli 17 000 cps laite ei enää mittaa taustaa, sillä mittaustarkkuus kärsisi liikaa. Näin korkeita taustasäteilytasoja ei kuitenkaan esiinny kohteissa, joissa LARS-mittalaitetta on suunniteltu käytettävän.

Taustasäteilyn vähennyksen vaikutusta voidaan yrittää pienentää laskemalla laitteen asetuksesta sigmojen kertoimia alle valmistajan suositusten. Tämä kuitenkin vaatisi jatkotutkimusta etsiä sopivat parametrit jokaiselle mittauspaikalle, jotta voidaan löytää sopiva kompromissi väärin hälytysten ja mittausluotettavuuden välillä. Piha-alueella taustan vaihtelu on niin suurta, että tällaisen tasapainon löytyminen on epätodennäköistä. Pienemmillä keskihajonnan kertoimilla laite hälyttäisi muutaman metrin välein taustan noustessa vähänkin, ja aloitaisi 20 sekuntia kestävän taustanmittauksen taustan laskiessa vähänkin.

Mittauksen luotettavuutta voidaan parantaa käyttämällä apuna kannettavia pintakontaminaatiomittareita. Väärät hälytykset voidaan eristää mittaamalla hälytyksen aiheuttanut alue esimerkiksi ThermoFisherin RadEye SX BP19DD:llä, tai Canberra MCB2:lla. On kuitenkin mahdollista, että siirryttäessä suuremmasta taustasäteilystä pienempään laite ei hälytä kontaminaatiosta, kun sen laskema nettopulssimäärä säilyy alle hälytysrajan. Tämä efekti on sitä suurempi, mitä enemmän taustasäteily vaihtelee paikoittain.

Laite on hyödyllinen, kun etsitään radioaktiivisia partikkeleja, joiden aktiivisuus ylittää 1000 Bq. Laite havaitsee usean kBq aktiivisuudet hyvin helposti ja näytön lukema kasvaa voimakkaasti. Lisäksi laitetta voi työntää normaalia kävelynopeutta. Hidastavana tekijänä toimivat väärät hälytykset, jotka on kuitenkin syytä tarkastaa. Jos käyttäjä ei välitä hälytyksestä vaan seuraa vain näytön lukemaa, havaittava aktiivisuus riippuu hyvin paljon käyttäjän tarkkaavaisuuden lisäksi onnesta. Koko piha-alueen saisi LARS:lla mitattua hälytykset

tarkastamalla arviolta kahdessa päivässä, ja tällöin voitaisiin olettaa kaikkien löydettävissä olevien yli 1000 Bq aktiivisuuksien löytyneen.

7.2 Pohdintaa

LARS-mittalaite ei Loviisan taustaolosuhteissa kykene täysin varmasti havaitsemaan pinnoilta YVL C.2:ssa esitettyä $400 \text{ Bq} / 100 \text{ cm}^2$, eli konservatiivisesti 400 Bq jaettuna koko ilmaisimen pinta-alalla. Tarkkuus riittää kuitenkin täyttämään YVL D.4:ssä esitetyt vaatimukset valvonnasta vapautuksen raja-arvoille (STUK 2019b. 9).

Loviisan voimalaitoksella taustasäteilyn vaikutuksen vähentämiseksi olisi hyvä selvittää soveltuisiko mittauksiin paremmin beetasäteilyä mittaava laite. Tällainen on esimerkiksi VF Nuclearin FloorScan-lattiamonitori, joka mittaa gammasäteilyn sijasta alfa- ja beetasäteilyä, jolloin taustasäteilyn vaikutus on huomattavasti pienempi, ja kontaminaation havaitseminen helpompaa. Ilmoitettu pienin havaittava aktiivisuus on myös hyvin pieni (VF Nuclear 2020).

VF:n laitteessa on myös pienempi ilmaisinkoko, joka voi pienentää taustasäteilyn vaikutusta. Tällöin ilmaisimen alla olevasta kontaminaatiosta lähtevien pulssien suhde taustapulseihin on suurempi, ja kontaminaatio on helpompi havaita. Myös S.E.A:lla on LARS-mittalaitteesta versio, jossa on neljä pienempää ilmaisinta kahden sijasta.

FloorScan-lattiamonitoria on käyttökokemusten perusteella huomattavasti helpompi käyttää, kuin LARSia. TVO:n kokemusten mukaan laite ei ole hyvä havaitsemaan pieniä aktiivisuuksia, joten käyttöönotto vaatisi tätä työtä vastaavaa tutkimusta (Hyypiä 2019. 1-2). Lisäksi laitteen soveltaminen ulkotiloihin voisi olla haastavaa, sillä laitteen ilmaisimen kalvo rikkoutuu epätasaisilla pinnoilla helposti. LARS:n etuna on myös, että gammasäteilyä mittaava laite todennäköisesti havaitsee aktiivisuuden paremmin esimerkiksi asfaltin raossa tai kiskojen urassa ulkona.

Tälle työlle jatkotutkimuksena olisi hyvä selvittää VF:n lattiamonitorin soveltuvuuden lisäksi LARS:n gammaherkkyys valmistajalta muillekin nuklideille, kuin manuaalissa ilmoitetuille Cs-137:lle ja Co-60:lle. Lisäksi kokeellisesti voisi selvittää beetasäteilyn vaikutusta, joka oletettiin työssä mitättömäksi laitteen ilmaisimen suojaumuovin vuoksi.

8 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin S.E.A. GmbH:n valmistaman LARS-mittalaitteen käyttöä kontaminaation mittaamiseen Loviisan ydinvoimalaitoksella. Aluksi käytiin läpi lähtökohdat, joista tarve työlle ilmeni sekä mihin laitetta Loviisassa käytetään.

Teoriaosuudessa käsiteltiin kontaminaatiota ydinvoimalaitoksella, sen syntyä ja eri tyyppisiä, sekä niiden aiheuttamaa säteilyä. Lisäksi käsiteltiin säteilyn ilmaisimia, joilla pintakontaminaatiota mitataan LARS:n toiminnan ymmärtämiseksi. Tämän jälkeen tarkasteltiin mittalaitteen asetusten vaikutusta mittaamiseen, sekä määritettiin mitä laitteella tulisi kyetä havaitsemaan.

Kokeellisessa osuudessa selvitettiin, miten LARS soveltuu käytettäväksi mittalaitteena Loviisan ydinvoimalaitoksella. Tässä osiossa tutkittiin, miten mittausolosuhteet ja mittaustapa vaikuttavat laitteella havaittavaan aktiivisuuteen. Tutkimusta varten kerättiin pyyhkäisynäytteitä molemmilta laitoksilta edustamaan laitosperäistä kontaminaatiota. Lisäksi tutkimuksessa käytettiin Co-60 testilähteitä.

Tutkimuksessa havaittiin luonnon taustasäteilyn aiheuttavan suuria vaikeuksia pienten aktiivisuuksien havaitsemisessa. Tämän seurauksena pohdittiin, mihin laitetta voi ja ei voi käyttää, sekä miten laitteella tehtävät mittaukset tulisi suorittaa. Lisäksi tulosten perusteella kirjoitettiin muutamia ohjeita laitteen käyttäjälle. Ohje löytyy liitteestä I.

LÄHTEET

Arola Atte. 2019. Epäsuorien kontaminaatiomittausmenetelmien vertailu Loviisan ydinvoimalaitoksella. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Lappeenranta. 40s.

Chu S.Y.F., Ekström L.P, Firestone R.B. 1999 Lund/LBNL Nuclear Data Search. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.11.2020] Saatavilla: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/index.asp>

Hyypiä Jaakko. 2019. VF:n lattiamonitoritestit. 2s. [Doris dokumentti]. [Viitattu 23.10.2020]. Käyttö rajoitettu: Doris LO1-T383-00082.

IEC 60846-1. 2009. Radiation protection instrumentation – Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation – Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors. International Electrotechnical Commission IEC.

International Atomic Energy Agency. 2018. IAEA Safety Glossary - Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition. Vienna: IAEA. 278s. ISBN 978-92-0-104718-2.

Ikäheimonen Tarja K. 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 197 s. ISBN 951-712-496-1.

Knoll Glenn. 1979. Radiation Detection and Measurement. USA: Wiley. 816s. ISBN 0-471-49545-X.

Kontio Timo. 2020. Ryhmäpäällikkö, säteilyturvallisuus. Fortum Power and Heat Oy. Loviisa. Henkilökohtainen kirjallinen tiedonanto. 24.10.2020

Kontio Timo. 2021. Ryhmäpäällikkö, säteilyturvallisuus. Fortum Power and Heat Oy. Loviisa. Henkilökohtainen kirjallinen tiedonanto. 5.1.2021

Kvarnström Roger. 2019. LO1, LO2 Primääripiirin kontaminaatiotasot 2019. 7s. [Doris-dokumentti]. [viitattu 17.10.2020]. Käyttö rajoitettu: Doris LO1-T521-00076.

- L'Annunziata Michael. 2012. Handbook of radioactivity analysis, 3. painos. San Diego: Elsevier Science. 1303s.
- Paile Wendla. 2002. Säteilyn terveystvaikutukset. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 184s. ISBN 951-712-499-6.
- Rautio Satu. 2020. Jaospäällikkö, radiokemia. Fortum Power and Heat Oy. Loviisa. Henkilökohtainen kirjallinen tiedonanto. 23.10.2020.
- Solja T, Kanerva J, Kontio T. 2020. 10/2020 Ulkoalueelta löytyneet aktiiviset partikkelit. 15s. [Doris dokumentti]. [Viitattu 22.10.2020]. Käyttö rajoitettu: Doris LO1-K851-00254
- S.E.A GmbH. 2008. LARS V2 Operating Manual. 44s.
- Soti Zsolt, Magill Joseph, Dreher Raymond. 2018. Karlsruhe Nuclide Chart – New 10th edition.
- Säteilyturvakeskus. 2018. Säteilyturvakeskuksen määräys työperäisen altistuksen selvittämisestä, arvioinnista ja seurannasta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.10.2020]. Saatavilla stuklex.fi/fi/maarays/stuk-s-1-2018#P3
- Säteilyturvakeskus. 2019. Ydinturvallisuusohje C.2 (YVL C.2). Ydinlaitoksen työntekijöiden säteilysuojelu ja säteilyaltistuksen seuranta. Helsinki.
- Säteilyturvakeskus. 2019b. Ydinturvallisuusohje D.4 (YVL D.4). Matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden käsittely ja ydinlaitoksen käytöstäpoisto. Helsinki.
- Tait W. H. 1980. Radiation detection. Lontoo: Butterworths. 406s. ISBN 0-408-10645-X.
- Virtanen Matti, Hirvelä Miska. 2019. TBU piha-alueen asfaltin aktiivisuuskartoitus. 2s [Sisäinen dokumentti]. [Viitattu 27.10.2020]. Käyttö rajoitettu.
- VF Nuclear. 2020. FloorScan Floor Contamination Monitor. [verkkoaineisto]. [Viitattu 23.10.2020]. Saatavilla <https://www.vfnuclear.com/en/products/floor-contamination-monitor-floorscan-series>

Käyttöohjeita

Ennen mittauksia LARS:n asetukset tulee tarkastaa. Tunnusluku asetusten muuttamiselle on 0000. Valikosta kohdasta "nuclide selection" valitaan esiasetus "Lo1 cps". Tällä esiasetuksella, taustanvähennys on käytössä, ja taustanvaikutuksen sigman kertoimet (katso kappale 4.2) ovat kokonaisenergialle 8, korkealle energialle 6, ja matalalle energialle 8 valmistajan ohjeiden mukaisesti. Kohdasta "nuclide settings" voi tarkastaa, ettei asetuksia ole muutettu. Kohdasta "detector settings" voi valita yhdistää molemmat ilmaisimet yhdeksi. Tämän kohdan ei tule olla valittuna, jotta laite voi vertailla ilmaisimien tuloksia.

Käynnistäessä LARS suorittaa 20 sekuntia kestävä taustan mittauksen. Uuden taustanmittauksen voi myös aloittaa manuaalisesti painamalla keskinäppäintä tangossa. Tämä on hyödyllistä, jos LARS:n hälytys on kannettavilla mittareilla todettu turhaksi. Tämän jälkeen tulee kuitenkin kiinnittää huomiota näytön lukemiin kokonaisenergian ja taustan suuruudesta. Jos laitteen ilmoittama tausta on näytöllä suurempi, kuin kokonaisenergia, tulee taustanmittaus tehdä uudestaan. Valitsemalla "new bkgr measurement on σ " asetuksista kohdasta "detector settings" laite tekee tämä automaattisesti. Tämä asetus kasvattaa mittauksen luotettavuutta esimerkiksi tarkkailualueella, mutta taustan vaihdellessa enemmän tämä tekee mitaamisesta vaikeaa, sillä uusi taustanmittaus alkaa muutaman metrin välein.

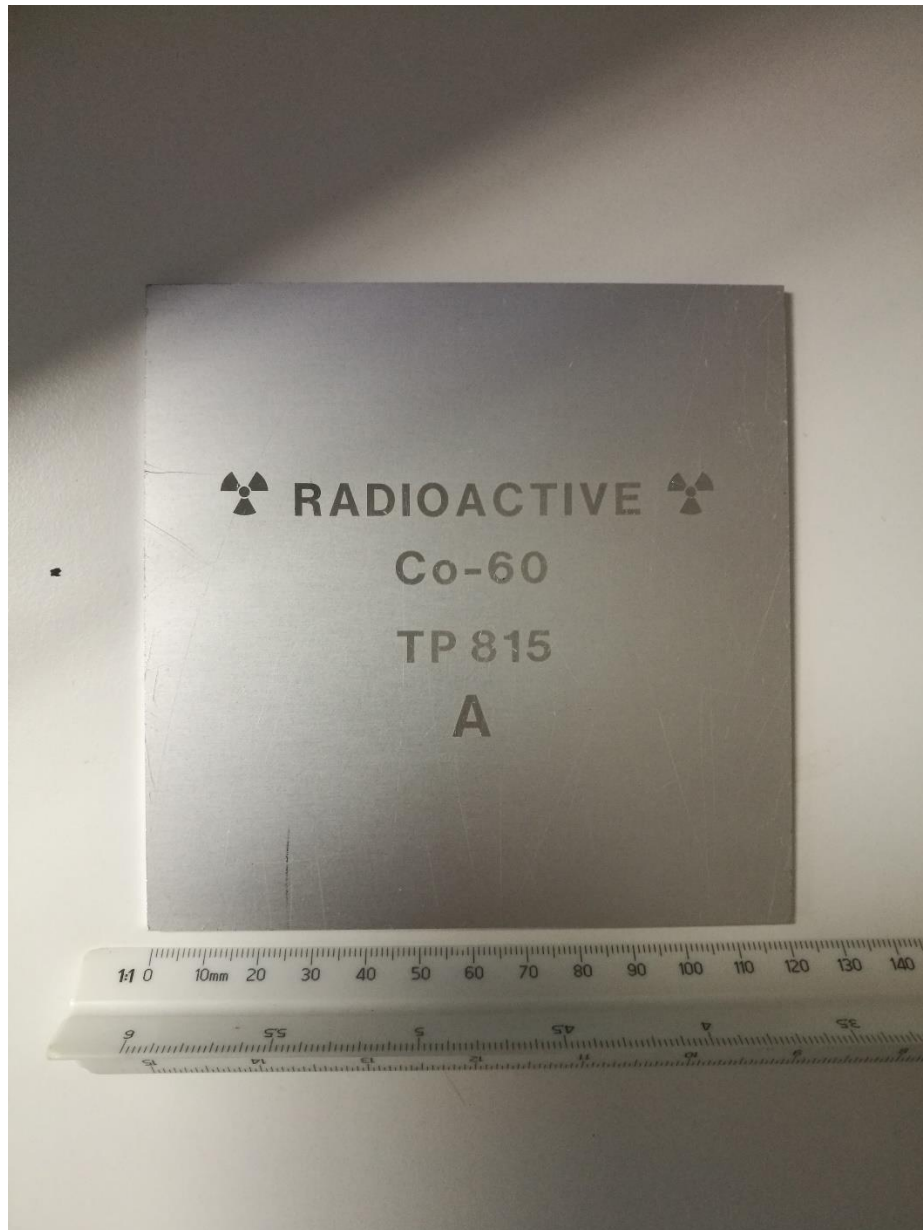
Taustanvaihtelun vaikutuksen minimoimiseksi tulee ulkoalueita mitata alue kerrallaan maaperän mukaan. Laitosten välillä ulkona on useaa eri asfalttia ja betonia, joissa esiintyy eri määriä luonnon radioaktiivisuutta. Mittaukset on paras suorittaa mitaamalla yhden ensin tyyppinne pinta, ja pinnan sävyn vaihtuessa tehdä uusi taustanmittaus.

Valmistajan mukaan kahta ilmaisinta käytettäessä havaitakseen 400 Bq aktiivisuuden, tulee kävelyvauhdin olla enintään 1 m/s. Laitteen valikosta valitsemalla "speed measurement" voi myös antaa laitteen itse laskea suurin sallittu kävelynopeus taustan perusteella. Tällä ei kuitenkaan tässä työssä tehdyissä testeissä havaittu olevan vaikutusta siihen, mitä näytteitä laite havaitsi. Kävelynopeus on luettavissa näytön oikeassa reunassa. Laitetta työntäessä tulee näyttöä seurata tarkasti. Laitosalueella tausta vaihtelee huomattavasti suhteessa hälytysrajaan. Taustan vaihtelu on yleensä kuitenkin tasaisempaa, kun taas aktiiviset partikkelit aiheuttavat ns. piikkejä näytön lukemassa.

Hälytystä tarkastaessa tule muistaa, että laite voi reagoida pienellä viiveellä, joten kontaminaatio voi olla hieman taaempaa, kuin mittaaja ajattelisi. Kaikki hälytykset on syytä tarkastaa kannettavilla mittareilla. Pelkän näytön lukeman seuraaminen ja hälytyksen jättäminen huomiotta on nopeampaa, mutta tämä heikentää mittaustarkkuutta huomattavasti, ja vain suurimmat, kymmenien kBq aktiivisuudet tulevat havaituksi.

Ilmaisimen korkeuden tulee olla mahdollisimman lähellä maata, ilman että ilmaisimien osuu maahan. Sisätiloissa tasaisella lattialla korkeutena voi käyttää 10 mm, mutta ulkona korkeuden on oltava ainakin 20 mm.

Käytetyt säteilylähteet



Kuva 12. TP 815. Co-60. Aktiivisuus mittauksia tehdessä 940 Bq.



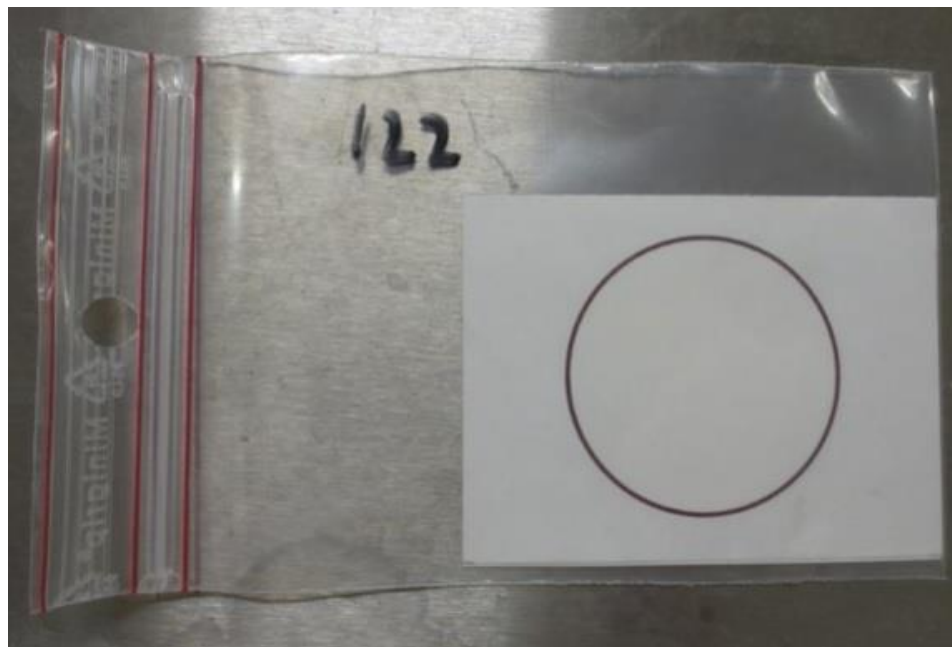
Kuva 13. 1794-100-2. Co-60. Aktiivisuus mittauksia tehdessä 5 320 Bq.



Kuva 14. EBSC30,30071. Co-60. Aktiivisuus mittauksia tehdessä 1 430 Bq.



Kuva 15. GK 147. Co-60. Aktiivisuus mittauksia tehdessä 21 320 Bq.



Kuva 16. Kuivapyyhkäisynäyte. Aktiivisuudet 210 - 25 160 Bq.