



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

HENRI STÅHL

Toimintatapojen kehittäminen lineaarisella kalibrointiradalla

TEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA
2021

| | | |
|---|--|--|
| Tekijä(t) Sukunimi, Etunimi Ståhl, Henri | Julkaisun laji Opinnäytetyö, ylempi AMK | Päivämäärä Kuukausi Vuosi Kesäkuu 2021 |
| | Sivumäärä 71 | Julkaisun kieli Suomi |
| Julkaisun nimi Toimintatapojen kehittäminen lineaarisella kalibrointiradalla | | |
| Tutkinto-ohjelma Tekniikan YAMK | | |
| <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää kalibrointikäytäntöjä lineaarisella säteilytysmittaradalla sekä löytää keinoja, joilla voidaan varmistaa laitteiston toimintakuntoisuus. Kokeiltiin erilaisia kalibrointitapoja, joiden avulla voidaan mittaustapahtuma toistaa johdonmukaisemmin.</p> <p>Teoriaosuudessa kerrotaan mikä lineaarinen säteilytysmittarata on ja mihin sitä käytetään. Selvennetään, miten lineaarisen kalibrointiradan muuttuvat kalibrointipisteet voidaan laskea. Osuudessa on kerrottu minkälaisia vaatimuksia, annosnopeusmittarien kalibrointiin käytettävän laitteiston tulee täyttää.</p> <p>Työssä tehtiin lukuisia mittauksia lineaarisella kalibrointiradalla, joiden avulla pystyttiin arvioimaan kunkin menettelytavan toimivuutta. Ideoita mittausten toteuttamistavalle tuli KU2 organisaation sisältä sekä Stukin laboratorioinsinööreiltä.</p> <p>Lopputuloksena tuli useita kehitysehdotuksia. Toimintaa muuttamalla voidaan yhtenäistää kalibrointikäytäntöjä. Ehdotuksia liittyen siihen miten lineaariseen kalibrointirataan liittyvää laitteistoa voitaisiin päivittää tulevaisuudessa.</p> | | |
| Asiasanat Annosmittari, Kalibrointi, Säteily, Kunnossapito | | |

| | | |
|---|--|-------------------------------------|
| Author(s) Last name, First name Ståhl, Henri | Type of Publication Master's thesis | Date Month Year June 2021 |
| | Number of pages 71 | Language of publication: Finnish |
| Title of publication Improving working methods at a linear calibration track | | |
| Degree program Master's Degree | | |
| <p>The purpose of this thesis was to improve calibration methods at a linear calibration track and to find ways to ensure the usability of the facility. Different ways to perform calibrations were tested to improve how the calibration procedure could be performed consistently.</p> <p>Theory part includes a description about what linear calibration track is and how it is operated. Clarification of how the movement of calibration points can be calculated. What kind of demands affect the requirements for a dose rate meter calibration facility?</p> <p>Several measurements were conducted at the linear calibration track to assess the usability of each different way to perform calibrations. Ideas for methods of implementation came from inside the organization KU2 and from laboratory engineers at Stuk.</p> <p>The results were several development proposals on how to change procedures in such manner that the measurement results can be repeated in the future. Some proposals how the equipment connected to the linear calibration track could be updated.</p> | | |
| <u>Key words</u> Dose rate meter, Calibration, Radiation, Maintenance | | |

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| 1 JOHDANTO | 7 |
| 1.1 Opinnäytetyön idea | 7 |
| 1.2 Teollisuuden Voima Oyj (TVO) | 7 |
| 2 AIHEEN MÄÄRITTELY | 8 |
| 2.1 Aiheen rajaaminen | 8 |
| 2.2 Mittaradan epävarmuustekijöiden tarkastelun tärkeys | 8 |
| 2.3 Aiheen merkittävyys | 9 |
| 3 TEORIAA SÄTEILYMITTAUKSISTA | 10 |
| 3.1 TVO:n ohjeet | 10 |
| 3.2 Säteilymittaradan tarkastukset muualla | 11 |
| 3.3 Säteilymittarien kalibrointiin liittyvät vaatimukset | 12 |
| 3.4 Teoriaa säteilymittalaitteista | 14 |
| 3.5 Annosnopeusmittarien kalibrointi | 17 |
| 4 LINEAARINEN KALIBROINTIRATA | 18 |
| 4.1 Lineaarisen kalibroitiradan teknistä tietoa | 18 |
| 4.2 Lineaarisen kalibroitiradan käyttötarkoitus | 22 |
| 4.3 Lineaarisen kalibroitiradan etäisyyksien laskenta | 27 |
| 5 TAVOITTEET | 32 |
| 5.1 Toimintatapojen kehittäminen | 32 |
| 5.2 Vikatilanteiden havaitseminen | 33 |
| 5.3 Vertailumittarin käyttö | 34 |
| 5.4 Vaatimusten täyttäminen | 34 |
| 5.5 Mittausvirheiden hallinta | 34 |
| 5.6 Datan keruu | 35 |
| 6 TOIMINTATUTKIMUS JA TUTKIMUSMENETELMÄT | 35 |
| 6.1 Toimintatutkimus | 35 |
| 6.2 Tutkimusmenetelmät | 36 |
| 6.3 Six Sigma | 36 |
| 6.4 Benchmarking | 36 |
| 6.5 Havainnointi | 37 |
| 6.6 Mittaukset kalibroitiradalla | 38 |
| 7 TUTKIMUKSET KALIBROINTIMITTAUKSISTA | 38 |
| 7.1 Mittarin asettelu | 41 |
| 7.2 Annosnopeuden mittaaminen kertyneellä annoksella | 44 |
| 7.2.1 DGM-Turva tulokset | 45 |

| | |
|--|----|
| 7.2.2 Automess 6150AD mittausten tulokset | 47 |
| 7.2.3 Ultraradiac mittaustulokset | 49 |
| 7.2.4 Yhteenveto tuloksista..... | 51 |
| 7.3 Annosnopeus 10 pisteen keskiarvolla | 53 |
| 7.3.1 Yhteenveto tuloksista..... | 55 |
| 7.4 Kalibrointipisteet ja lähteen puoliintuminen | 56 |
| 7.4.1 Yhteenveto tuloksista..... | 59 |
| 8 VERTAILUMITTARIN KÄYTTÖ | 59 |
| 8.1 Vertailumittari kalibrointityökaluna..... | 59 |
| 8.2 Vertailumittarilla kalibrointipisteiden etsiminen ”tuntemattomasta Cs-137 lähteestä” | 62 |
| 9 KEHITYSEHDOTUKSET TULOXSISTA..... | 66 |
| 9.1 Annosnopeuden mittaamisen kehittäminen | 66 |
| 9.1.1 Kehitysehdotuksia annosnopeusmittarien kalibrointiin..... | 68 |
| 9.2 Lineaarisen kalibrointiradan toiminnan kehittäminen | 69 |
| 9.2.1 Kehitysehdotus kunnossapidon helpottamiseksi | 69 |
| 9.2.2 Kehitysehdotukset lineaarisen kalibrointiradan uusintaan liittyen | 69 |
| 9.3 Säteilyn vertailumittarin käyttö..... | 70 |
| 9.3.1 Kehitysehdotukset vertailumittarin käyttöön..... | 70 |
| 10 YHTEENVETO | 70 |
| LÄHTEET | |

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

STUK = Säteilyturvakeskus

TVO = Teollisuuden Voima

IAEA = International Atomic Energy Association

GM-putki = Geiger-Müller putki/ilmaisim

OL1/2 = Olkiluodon voimalaitos

KU2 = Automaatiokunnosapito OL1/OL2

Cs-137 = Cesium 137 radioaktiivinen nuklidi

Co-60 = Koboltti 60 radioaktiivinen nuklidi

AD = Automess 6150AD tuoteperheen annosnopeusmittari

DGM = DGM-Turva annosnopeusmittari

Inventointinumero = TVO:n yksilötunnus laitteelle

Rtg = Röntgen

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön idea

Ajatus lineaarisella kalibroitiradalla tapahtuvien annosnopeusmittarien kalibroinnin kehittamisestä syntyi yhteistyössä KU2:n (Automaatiokunnossapito OL1/2) ja Säteilyturvakeskuksen annosvalvonta ja dosimetria yksikössä saatujen kokemusten perusteella. Erilaisia kalibroitikäytäntöjä on pohdittu, mutta ei ole käytännössä kokeiltu.

Lineaarilla kalibroitiradalla tehtävien testien vaikutuksia haluttiin mallintaa siten, miten ne käytännössä vaikuttaisivat mittaustulokseen, matemaattisen mallintamisen sijaan.

Säteilyn vertailumittari on hankittu lineaarisen kalibroitiradan toiminnan tarkastusta varten, mutta laitteelle ei ole luotu ohjeistusta, jonka pohjalta sitä voitaisiin käyttää.

1.2 Teollisuuden Voima Oyj

TVO tuottaa Olkiluodon ydinvoimalaitoksella noin kuudesosan kaikesta Suomessa käytettävästä sähköstä. Ydinsähkön tuotanto on ilmastoystävällistä – siitä ei synny ilmastonmuutosta vahvistavia päästöjä, joten TVO osallistuu yhteisiin ilmastotalkoisiin merkittävällä tavalla. (TVO, Yhtiö, 2020)

TVO on vuonna 1969 perustettu osakeyhtiö, jolla on Eurajoen Olkiluodossa ydinvoimalaitos, jonka 40 vuoden sähköntuotantoa juhlittiin syksyllä 2018. Olkiluoto 1 ja 2 -laitosyksiköt rakennettiin aikanaan tyydyttämään Suomen energiavaltaisen teollisuuden kasvavaa sähköntarvetta. (TVO, Yhtiö, 2020)

Tällä hetkellä TVO:n palveluksessa on noin 1000 henkilöä, jotka toimivat mm. kunnossapidon, talouden ja suunnittelun tehtävissä.

Monista yrityksistä poiketen TVO toimii mankala-periaatteella eli sähköä pyritään tuottamaan mahdollisimman edullisesti TVO:n omistajille, joihin lukeutuu esimerkiksi suuria metsäteollisuuden yhtiöitä.

2 AIHEEN MÄÄRITTELY

2.1 Aiheen rajaaminen

TVO:lla suoritetaan useiden eri säteilymittalaitteiden määräaikaikalibrointia, oman työni kannalta merkittävin on lineaarinen säteilytysmittarata, jota käytetään annosnopeusmittareiden kalibrointiin.

Muissa kalibroitimittauksissa käytetään yleensä kannettavaa umpilähdettä, jonka käyttötapa riippuu suuresti käytettävästä säteilymittalaitteesta. Näiden kaikkien työohjeet ja suoritustavat vaihtelevat. Lineaarisella kalibroitiradalla taas säteilyolosuhteiden tulisi olla vakiot mittarista riippumatta, joten radan toimivuus tulee olla kunnossa ja itse mittaustapahtuman noudattaa yleisiä kalibroitikäytäntöjä.

2.2 Mittaradan epävarmuustekijöiden tarkastelun tärkeys

2019 havaittiin mittatuloksissa pientä poikkeamaa. Useiden mittarien kalibroinnin jälkeen huomattiin, että kaikkien mittarien tulokset olivat alkaneet ryömiä ylöspäin muutamia prosentteja. Tämän takia alettiin radan toimintakuntoa epäillä. Rataan vaihdettiin kelkan vetohihna, koska sen epäiltiin venyneen, mutta sillä ei ollut vaikutusta tuloksiin.

Stukin laboratoriohenkilöstö pyydettiin paikalle mittamaan radalle haluttujen annosnopeuksien etäisyydet. Saatujen uusien etäisyyksien avulla ongelma poistui ja mittarien näyttämät palasivat vastamaan aikaisempia tuloksia. Uutta kalibroitodistusta verrattaessa vanhaan havaittiin, että vanhan todistuksen mukaan kalibroitietäisyydet siirtyivät nopeammin lähemmäs lähdettä. Todennäköisesti vanhan todistuksen sovitusp parametri aiheutti pienen poikkeaman mittaustuloksissa. Kyseinen vanha todistus oli voimassa 2015–2020, joten käytössä olivat kyseisen todistuksen toisiksi viimeiset arvot.

Kyseinen tapahtuma opetti, että mikäli lineaarisen kalibroitiradan mittaustuloksissa havaitaan poikkeamaa, on syytä tarkistaa lineaarisen kalibroitiradan toiminta tarkemmin mittauksin. Lineaarisen kalibroitiradan Stukin tarkastusväliä ei tule myöskään venyttää liian pitkäksi.

2.3 Aiheen merkittävyys

Lineaarista kalibroitirataa käyttää tällä hetkellä vain neljä automaatiokunnossapidon säteilymittalaitehuollon henkilöä, sekä yksi alihankkijan henkilö. Kalibroitiradan toimivuus on siis vain muutamien henkilöiden vastuulla, mutta mikäli kalibroitirata olisi käyttökelvoton, suuri osa säteilysuojelun käytössä olevasta mittarikalustosta saattaisi olla epäkunnossa, jolla olisi merkittäviä vaikutuksia säteilytöihin. Esimerkiksi ei pystyttäisi luotettavasti mittamaan säteilytyön mahdollisia annoksia, jonka takia työt jouduttaisiin keskeyttämään tai työt ainakin viivästyisivät.

Kaikki TVO:lla käytettävät säteilymittarit tarkastetaan kalibroitiradalla mukaan lukien useat alihankkijoiden mittarit, joita käytetään esimerkiksi röntgenkuvauksissa.

Tuen saaminen kestää, Stukin laboratoriohenkilöstö ei pääse paikalla aivan heti. Tästä syystä lineaarisen kalibroitiradan tulee olla aina käyttökunnossa.

3 TEORIAA SÄTEILYMITTAUKSISTA

Tässä kappaleessa on koottuna teoriaa säteilymittauksista ja säteilyllä kalibroinnista,

3.1 TVO:n ohjeet

Koko työn pohjana on TVO:n kunnossapitokäsikirjan ohje (Kalibroitiradan ja karusellin laadunvarmistusohje) sekä Stukin valvomat sisäasianministeriön vaatimukset säteilymittauksiin liittyen

Vähintään kerran vuodessa tehtävät tarkastukset

Alla olevien testien tulokset kirjataan liitteenä olevaan testipöytäkirjaan.

- Turvallisuusjärjestelmien toimivuus
- Vuototesti (Pyyhkynäytteet)
- Säteilylähteen asento. Rtg-filmin avulla tarkastetaan säteilykentän korkeus, leveys ja paikka.
- Säteilytysaikojen määrittäminen elektronisille dosimetreille
- Ohjauslaitteiston toimintojen tarkastus

(Ala-Jokimäki, 2020, s. 1.)

Vuosittaisissa tarkastuksissa ei oteta kantaa lineaarisen kalibroitiradan luotettavuuteen. Tarkastukset koskevat lähinnä samassa tilassa olevaa karusellia, jolla tarkistetaan elektroniset dosimetrit. Testit liittyvät lähinnä viranomaisvaatimuksiin, joiden perusteella rataa on turvallista käyttää eikä siihen, miten itse mittaustapahtuma voidaan suorittaa luotettavasti.

5 Vuoden välein tehtävät tarkastukset

- Akkreditoidun tarkastuslaitoksen tekemä mittaus (esim. Stuk). Tässä tarkastuksessa mitataan annosnopeudet eri etäisyyksillä. Tulosten perusteella Stuk laskee seuraavan 5 vuoden aikana haluttuja annosnopeuksia vastaavat etäisyydet.

- Laitevastaava arkistoi omaan arkistoon tarkastuslaitokselta saatavan kalibrointitodistuksen. (Ala-Jokimäki, 2020, s. 2).

Tämä on koko lineaarisen kalibroitiradan toiminnan perusta ja edellytys. Tarkastuksen ideana on antaa uudet etäisyydet määritellyille annosnopeuksille seuraavaksi viideksi vuodeksi.

3.2 Säteilymittaradan tarkastukset muualla

Lineaarisia kalibroitiratoja sijaitsee myös muualla maailmassa, tietoa niiden tarkastuksista on saatavilla niukasti. Taulukossa 1 on esitettyä toimenpiderajat Sudanissa käytössä olevalle säteilymittaradalle

Taulukko 1. Kalibroitiradan laadunvarmistus (*I.I. Suliman, 2010*)

| Parameter | Method of control | Frequency | Action level |
|------------------------------|--|--|---|
| 1 Reference standard chamber | 1.1 Calibration at IAEA Laboratory | Every 5 years | Compare with previous calibration factor; recalibration when the difference is too high |
| | 1.2 stability check by check source measurements | Before every calibration of the working standard and quarterly | 1.0% deviation |
| 2 Working standard chamber | 2.1 Recalibration against reference standard | Once every year and always after test 1.1 | 1.0% deviation should be investigated |
| | 2.2 stability check by check source measurements | Before every beam calibration and quarterly | 1.0% deviation should be investigated |
| 3 Beam output calibrations | Measurements at different calibration points | Before every calibration of the working standard and semi-annually | 5.0% deviation should be investigated |
| 4 External audit | Participation in IAEA intercomparison | Annually | 7.0% deviation should be investigated |

Taulukossa 1. on sudanilaisen säteilymittaradan laadunvarmistukseen liittyviä toimenpiteitä ja tarkastusvälejä. Toimenpiteitä on hyvä verrata käytössä oleviin käytäntöihin. Esimerkiksi IAEA:n suorittama tarkastusväli on sama kuin meillä Stukin tarkastusväli.

Oheisessa materiaalissa on annettu selkeät toimenpiderajat, jolloin kalibrointiradan toimivuutta on syytä alkaa tutkimaan.

3.3 Säteilymittarien kalibrointiin liittyvät vaatimukset

Ohjeessa annetaan tämänhetkiset käytännön toimintaohjeet pelastustoiminnassa ja väestönsuojelussa käytettävien kannettavien ulkoisen säteilyn annosnopeusmittarien tarkastuksesta.

Ensimmäiseksi tarkastetaan mittarin yleiskunto: mittarin kuori ei saa olla vaurioitunut ja kaikkien toimintojen on käynnistytävä siten kuin laitteen käyttöohjeessa on mainittu. Mittarin yleisen kunnan tarkastuksen jälkeen on tehtävä kolme säteilymittausta, jotka on kuvattu liitteessä D.

Tarkastajan tulee varmistaa, että mittarin käyttöohje on tallessa ja helposti saatavilla. Mikäli tarkastus tapahtuu jossain muualla kuin mittarin käyttöpaikalla, tarkastajalle on mittarin lisäksi toimitettava nähtäväksi kyseisen mittarin käyttöohje.

Säteilymittarin tarkastaja laatii tarkastuksesta pöytäkirjan (liite E), joka toimii tarkastustodistuksena. Tarkastuksen jälkeen tarkastajan on kiinnitettävä säteilymittariin tarra, josta käy ilmi tarkastuksen lopputulos (Hyväksytty/Hylätty), tarkastuksen suorittaja ja tarkastuspäivämäärä.

(Sisäasiainministeriö, 2008, s. 6.)

Kyseinen ohje antaa vähimmäisvaatimukset väestönsuojelussa käytettävän säteilymittarin kalibroinnille. Säteilymittarataa tarvitaan, jotta saadaan mittarille ohjeen vaatimat kolme säteilymittausta.

Ohessa vaatimukset suoritettaville säteilymittauksille Sisäasiainministeriön ohjeen liitteen D mukaan.

1) Taustasäteilyn annosnopeuden mittaaminen

Mittarin lukemaa (5 minuutin mittausjaksolla) verrataan toisen säteilymittarin¹ lukemaan olosuhteissa, joissa taustasäteilyn vertailuannosnopeus on suurempi tai yhtä suuri kuin 0,1 mikroSv/h. Suurin sallittu poikkeama vertailumittarin lukemaan on $\pm 50 \%$.

¹ Vertailumittarin suhteellisen mittauserävarmuuden kattavuuskertoimella 1 tulee olla pienempi kuin $\pm 10 \%$. Vertailulaitteen kalibrointi on tarkastutettava kerran kahdessa vuodessa. Kalibroinnin on oltava metrologisesti jäljitettävissä.

2) Mittaukset Cs-137-gammasäteilylähteellä

Kahdessa erisuuruudessa annosnopeuskentässä tehdyillä mittauksilla varmistetaan, että mittari toimii oikein koko mittausalueellaan². Mittari asetetaan tunnetun ¹³⁷Cs-lähteen säteilykenttään ensin sellaiselle etäisyydelle, että vallitseva todellinen – joko laskennallisesti arvioitu tai toisella, oikein toimivalla säteilymittarilla varmistettu – vertailuannosnopeus mittarin kohdalla on 10 mikroSv/h ... 2 milliSv/h. Toisessa mittauksessa etäisyys lähteestä valitaan sellaiseksi, että vertailuannosnopeus mittarin kohdalla on suurempi kuin 20 milliSv/h; etäisyyden muuttamisen sijasta voidaan käyttää myös toista, voimakkaampaa säteilylähdettä. Näissä mittauksissa suurin sallittu poikkeama on $\pm 30 \%$.

² Useissa mittareissa on kaksi eri herkkyysistä GM-anturia, joista toinen toimii pienillä annosnopeuksilla ja toinen suurilla annosnopeuksilla.

(Sisäasiainministeriö, 2008, s. 15.)

Säteilymittarata kuvaa toista mittausvaihtoehtoa eli mittausta ¹³⁷Cs-gammasäteilylähteellä. Mittarin annosnopeusalueen riippuen on suoritettu kolme erillistä mittausta annosnopeus välillä 40 μ Sv/h – 20 mSv/h.

Yleisimmät annosnopeudet TVO:n säteilymittaradalla ovat 100 μ Sv/h, 1 mSv/h ja 10 mSv/h. Laitteet, joiden mittausalue on huomattavasti korkeampi kuin mitä TVO:n lineaarisella kalibroitiradalla pystytään tuottamaan, testataan erikseen Stukin laboratoriossa. TVO:lla käytetään ± 20 - 30% sallittua poikkeamaa mittarityypistä riippuen.

Liitteessä on myös annettu vähimmäisvaatimukset hälytysrajan testaukselle kalibroinnin yhteydessä.

3) Hälytysrajojen tarkastus

Mikäli tarkastettavassa säteilymittarissa on annosnopeuden hälytystoiminto, hälytysrajaksi asetetaan ennen tarkastusta arvo 0,4 mikroSv/h, joka on sama kuin valvontaverkon automaattiasemien ensimmäinen ns. ilmoitusraja. Tämä arvo myös jätetään tarkastuksen jälkeen mittarin hälytysrajaksi.

Hälytystoiminto tarkastetaan ¹³⁷Cs-lähteen säteilykentässä seuraavasti: mittari asetetaan sille etäisyydelle lähteestä, jossa annosnopeus on enintään kaksi kertaa suurempi kuin asetettu hälytysraja. Hälytyksen tulee laueta viimeistään 60 sekunnin kuluttua mittarin asettamisesta.

Lähes kaikilla ulkoisen säteilyn annosnopeutta mittaavilla säteilymittareilla on myös mahdollista mitata kertynyttä annosta. Tarkastuksessa varmistetaan, että mittarin annosmittaus toimii oikein. Annosrekisteri nollataan ennen ja jälkeen tarkastuksen. (Sisäasiainministeriö, 2008, s. 15.)

Kalibroinnin yhteydessä hälytyksen toimivuus testataan samalla, kun mittaria säteilytetään. Huomioitavaa on se, että TVO:n käyttämissä säteilymittareissa hälytysrajat vaihtelevat suuresti. Tarkastuksen yhteydessä tulee tarkastaa, onko mittarin hälytysraja juuri se mikä on mittarille ohjeistukseen määritelty.

Edellä mainittuja vaatimuksia käyttäessä tulee ottaa huomioon minkä vaatimuksen alaisuuteen säteilymittari kuuluu. Kaksi samanlaista laitetta voivat palvella eritarkoitusta toinen mittari voi olla väestönsuojelukäytössä ja toista voidaan käyttää henkilökohtaisena säteilymittarina.

3.4 Teoriaa säteilymittalaitteista

Yleisin käytetty ilmainen tyyppi annosnopeusmittareista on GM-ilmainen.

Geigerputki on kannettavien säteilysojelumittareiden yleisin ilmaisim. Putken suosio perustuu suureen herkkyyteen, yksinkertaiseen elektroniikkaan sekä hintaan. Monikertaisia vahvistuspiirejä ei tarvita, koska putken antamat jännitepulsit ovat tarpeeksi suuria (0,1–1 V, vertaa ionisaatiokammio: 0,1 mV). Putkia valmistetaan moneen muotoon ja kokoon: halkaisija voi vaihdella millimetristä useisiin sentteihin ja pituus sentistä lähes metriin. Putkella voi olla ohut päätyikkuna, joka on tavallisesti kiillettä. Orgaanista sammutuskaasua käyttävän putken jännite on yleensä 1200–1500 volttia. 'Halogeeniputket' toimivat alemmilla jännitteillä. (Klemola, 2002, s. 121.)

Suurin osa TVO:n säteilymittareista sisältää GM-ilmaisimen. Mittarien mittausalueet vaihtelevat 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ - 100 Sv/h. Korkeamman annosnopeusalueen mittareissa käytetään puolijohdeilmaisimia. Mitattaessa korkea energisten nuklidien aiheuttamaa säteilyä käytetään ionisaatiokammiota.

Ionisaatiokammio soveltuu hyvin röntgen- ja gammasäteilyn mittaamiseen. Kammion vaste voidaan saada hyvin riippumattomaksi säteilyn energiasta. (Klemola, 2002, s. 4.)

Kuvassa 1. on esitettyä Geiger-Müller putki Ultraradiac annosnopeusmittarin sisällä.



Kuva 1. Ultraradiac annosnopeusmittarin GM-putki

Kuvassa näkyy GM-putken sijainti Ultraradiac annosnopeusmittarin sisällä sekä ”tähtäyspisteen” sijainti. Kuten kuvasta huomataan, on tähtäyspiste asetettu niin, että se on GM-putken keskiosassa.

”Puolijohdeilmaisimien on käytännössä estosuuntaan kytketty diodi” (Klemola, 2002, s. 126). Puolijohdeilmaisimet ovat lähtökohtaisesti hinnaltaan kalliimpia verrattuna GM-ilmaisimiin, joten niitä on käytössä vain muutamia erikoistarkoituksiin erittäin korkeita annosnopeuksia varten.

Reference instruments should be secondary standards calibrated with primary standards by a national primary laboratory or at an acknowledged reference which hold appropriate standards. (IAEA, 2000, s. 3).

Ohessa IAEA:n määritelmä säteilyn vertailumittarista. TVO:n tapauksessa säteilyn vertailumittari on kalibroitu akkreditoituissa Stukin laboratorioissa.

3.5 Annosnopeusmittarien kalibrointi

Annosnopeusmittarien kalibrointiin voidaan käyttää useita eri menetelmiä kuvassa 2. esitettynä vaihtoehdot kalibroinnille.

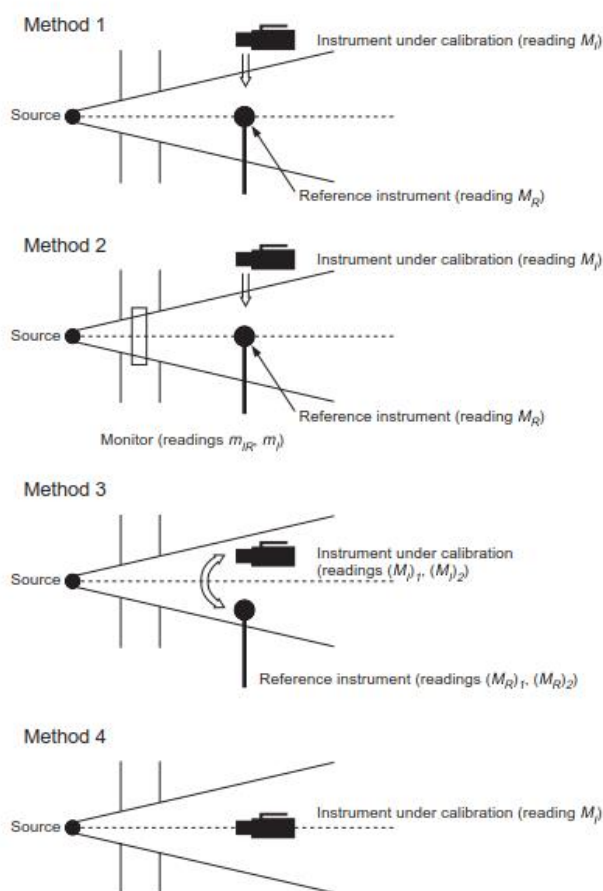


FIG. 5. Four methods of calibration. Method 1: calibration with a reference instrument without any monitor; method 2: calibration with a reference instrument and with a monitor; method 3: calibration by simultaneous irradiation of reference instrument and instrument under calibration; method 4: calibration in a known radiation field.

Kuva 2 Eri kalibrointitekniikat (IAEA, 2000, s. 29)

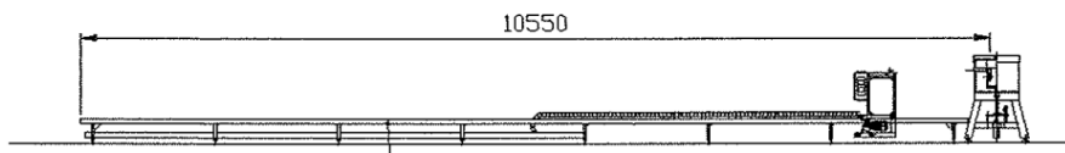
Lineaarinen kalibroitimittarata kuvaa näistä vaihtoehdoista vaihtoehtoa 4 (calibration in a known radiation field). Tietämällä säteilykentän voimakkuudet eri etäisyyksillä voidaan sitä tietoa käyttää annosnopeusmittarien kalibrointiin.

Vertailumittaria käytettäessä kalibrointiin on kyseessä vaihtoehto 1 (calibration with a reference instrument without any monitor). Vertailumittari on annosnopeusmittari, jolle on haettu tulokset esimerkiksi Stukin akkreditoidussa laboratoriossa. Tuloksista on saatu kalibroitikertoimet, joita voidaan käyttää kalibroitaessa toista annosnopeusmittaria.

4 LINEAARINEN KALIBROINTIRATA

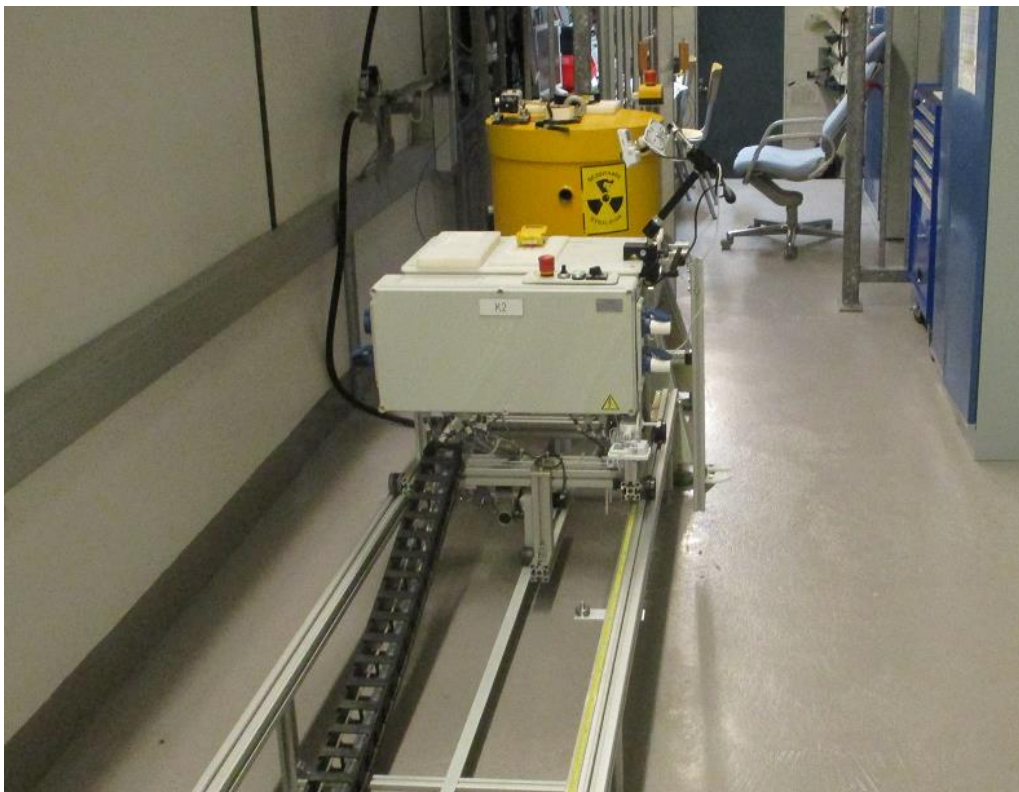
4.1 Lineaarisen kalibroitiradan teknistä tietoa

Lineaarisen kalibroitiradan tekninen havainne piirros on kuvassa 3.



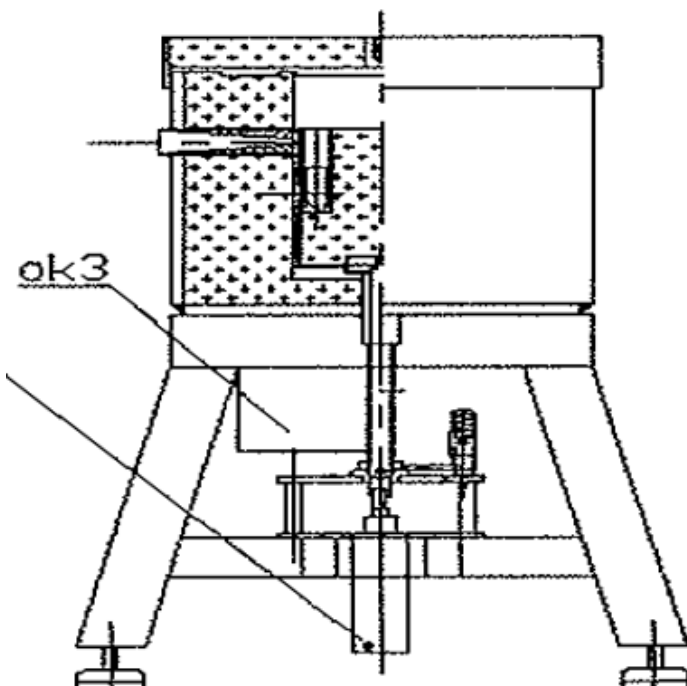
Kuva 3 Lineaarinen kalibroitirata (*Viishanke, 1992*)

Kuvassa on esitetty lineaarinen kalibroitirata sivultapäin kuvattuna. Etäisyys lähteen keskipisteestä radan päähän on 10,55 m. Kuvassa 4 rata on kuvattuna 10 mSv/h säteilypisteessä Ultradiac mittari asetettuna kelkalle.



Kuva 4 Lineaarinen kalibroitirata 10 mSv/h kalibrintipisteessä

Kuvassa 5 on esitettyä tarkemmin lähteen sylinteri.



Kuva 5. Säteilylähteen sylinteri (Viishanke, 1992)

Säteilylähteet sijaitsevat kuvassa 3. olevan sylinterin sisällä. Sylinterissä on kolme lähdepaikkaa, joista 2 on tällä hetkellä käytössä.

Ohessa on IAEA:n esimerkki säteilytyslaitteesta.

A collimated beam system with low scatter geometry using a conical ring collimator as recommended in ISO 4037-1 [23] should be used. It may consist of an underground storage container with six gamma ray sources, e.g. ^{60}Co and ^{137}Cs from 50 MBq to 1 TBq. (IAEA, 2000, s. 78.)

Kuvassa 6 on nähtävillä lineaarisella kalibroitiradalla olevan säteilytyslaitteen kollimaattori.



Kuva 6. TVO:n lineaarisen kalibroitiradan kollimaattori

Kollimaattorin suuaukko on leveä ja se kapenee mentäessä syvemmälle laitetta. Päässä on pieni metallilevyllä peitetty reikä, johon käytettävä säteilylähde nousee paineilmalla.

Lineaarisen kalibroitiradan säteilytyslaite vastaa kyseisen määritelmän säteilytysmittalaitetta. Laitteessa on 2 Cs-137 säteilylähdettä.

Lähteiden valitseminen tapahtuu sylinterin alaosassa olevalla mekaanisella vivulla. Tässä työssä käytetään vain Cs-137 inventointinumero 55 omaavaa lähdettä. Lähteen tiedot ovat kuvassa 7.

| Nuklidi: Cs-137 | | | |
|----------------------------------|----------------|-----------------|-----------|
| Sarjanumero | 056/14 | Inv.nro | 55 |
| Sijainti | 2.F91.35 | Mappi | |
| Tila | K | Kapseli / mitat | Cs7.P17-1 |
| Käyttö-tarkoitus | | | |
| Perus akt.(Bq) | 7,76E+10 | Perus pvm | 3.12.2014 |
| Vuototesti | 22.10.2015 | Vuototesti pvm | 5.12.2014 |
| Pulssitesti/100 | | Pulssitesti pvm | |
| Edustaja: | Sonar Oy | | |
| Valmistaja: | Eckert&Ziegler | | |
| Hankpvm: | 17.12.2014 | | |

Kuva 7 Kalibroitiradan lähde (TVO, Säteilylähdekortisto)

Kyseisestä lähdettä käytetään annosnopeusmittarien kalibroinnissa lineaarisella kalibroitiradalla.

4.2 Lineaarisen kalibroitiradan käyttötarkoitus

Lineaarista kalibroitirataa käytetään annosnopeusmittarien tarkastamiseen. Lineaarisen kalibroitiradan avulla pystytään kalibroimaan annosnopeusmittarit ennalta määritetyissä pisteissä. Useimmin käytettävät annosnopeudet ovat 100 $\mu\text{Sv/h}$, 1 mSv/h sekä 10 mSv/h .

Linearisella kalibroitiradalla pystytään tarkastamaan yksi annosnopeusmittari kerrallaan. Annosnopeusmittari asetetaan kelkkaan siten, että annosnopeusmittarin ilmaisin Geiger-Müller putki tai puolijohdeilmaisin asetetaan siten, että ne osuvat säteilylähteen keilaan halutulla etäisyydellä. Lineaarisen kalibroitiradan kelkkaan on merkitty mihin kohtaan säteilyilmaisin on asettava, jotta etäisyys sekä säteilykeila osuvat siihen. Useimmille laitteille on myös tehty omat jiginsä, joiden avulla asettelu saadaan kohdilleen.

The reference point of a measuring instrument is the point to be used in order to position the instrument at the point of test. The reference point should be marked on the instrument by the manufacturer. If this proves impossible, the reference point should be indicated in the accompanying documentation supplied with the instrument. (IAEA, 2000, s. 6)

Annosnopeusmittareihin on merkitty putken keskikohta, jota käytetään ”tähtäyspisteenä” kuva 8.



Kuva 8. Ultraradiac annosnopeusmittarin ”tähtäyspiste”

Kuvassa 7 näkyy Ultraradiac annosnopeusmittarin Geiger-Müller putken sijainti laitteessa mustalla plus merkillä. Tämän kyseisen pisteen avulla saadaan mittari asetettua säteilykeilaan oikealle etäisyydelle. Kuvassa 9 on asetettu Ultraradiac annosnopeusmittari kalibroitikelkalle



Kuva 9. Ultraradiac annosnopeusmittari asetettuna kelkalle

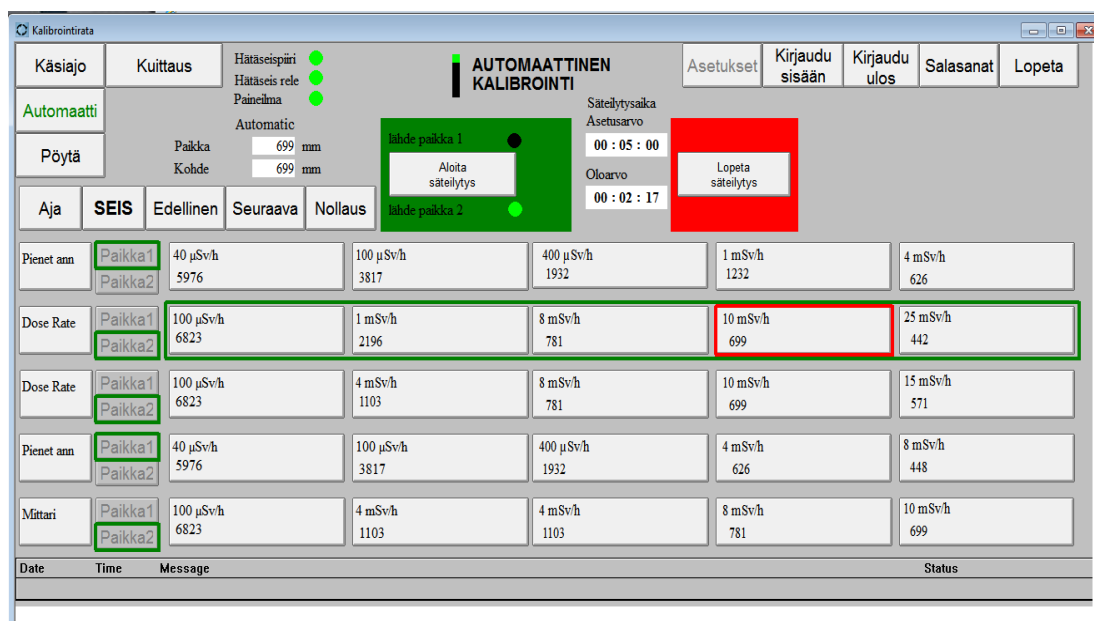
Kuvasta 8 havaitaan, että kyseiselle mittarille ei ole omaa jigiä vaan tässä esimerkissä se on asetettu RDS-110/100 annosnopeusmittarin kalibroitijigiin.

The supports used for the reference and measuring instruments, and the calibration source should introduce as little scattered radiation as possible. The effects of such

scattered radiation on the indication of the instruments should be taken into account. (IAEA, 2000, s. 40.)

Edellä mainitusta syystä kalibroitikelkan päällysosa on tehty muovista, tällä ratkaisulla pyritään estämään säteilyn sirontaa.

Lineaarisen kalibroitiradan ohjausliittymä on kuvassa 10.



Kuva 10. Lineaarisen kalibroitiradan ohjausliittymä

Kuvassa 9 esitellään lineaarisen kalibroitiradan ohjausliittymän automaattitoimintoa, jossa jokaiselle kalibroitipisteelle on oma etäisyyden arvonsa. Painamalla haluttua annosnopeutta radan kelkka menee kyseiseen pisteeseen.

Kuvassa 11 näkyy kulkussa oleva IP-kamera, jonka avulla varmistetaan, että radan ohjausliittymän ilmoittama etäisyys pitää paikkansa.



Kuva 11. Kelkan etäisyys

10 mSv/h pisteessä radan kelkan tulee olla tällä hetkellä 699 mm päässä. Kuten kuvasta 10 näkyy, on kelkka kyseisessä paikassa.

Toisen IP-kameran avulla pystytään seuramaan säteilymittarin näyttämää kuvassa 12.



Kuva 12. IP-kameralla otettu kuva Automess annosnopeusmittarista

Kuvassa 12 mittari on 10 mSv/h säteilytyspisteessä ja näyttää lukemaa 10,5 mSv/h.

Mittarit tulee asettaa lineaarisen kalibroitiradan kelkkaan. Kuvassa 13 on asetettuna Stukissa kalibroitu säteilyn vertailumittari TVO:n lineaarisen kalibroitiradan kelkalle.



Kuva 13 Automess 6150 AD 5/H annosnopeusmittari (Stukissa kalibroitu vertailumittari)

Automess mittareille on oma muovista tehty jiginsä, jonka avulla mittari saadaan asetettua aina oikeaan paikkaan, eikä mittaria tarvitse tähdätä.

Annosnopeusmittarin näyttämää luetaan säteilytyksen aikana Lineaarisen kalibroitiradan ohjaukskoneelta IP-kameran avulla. Saatu tulos kirjataan MITKO-tietokantaan, josta kalibroinnin tuloksia pystytään seuraamaan. Kuvassa 14. näkyy miten kalibrointitulokset näkyvät MITKO-tietokannassa.

| Laittekortti# 2959 - Suorasäteilymittari - Automess 6150 AD5/H - Tila: käytössä | | | | | | | | | |
|---|---------------|-------------------|---------|---|--|-------------|----------------|---------------|------------|
| Perustiedot | | Tapahtumat | | Toimintakokeet | | Dokumentit | | Linkit | |
| Uusia toimintakoe | | Kokeiden ylläpito | | Tulosta | | | | | |
| Toimintakokeet | | | | | | | | | |
| | | | | | | Koe1 | Koe2 | Koe3 | Koe4 |
| Kuvaus: | | | | | | 100uSv/h | 1000 uSv/h | 1 mSv/h | 10 mSv/h |
| Tarkennus: | | | | | | 80-120uSv/h | 800-1200 uSv/h | 0,8-1,2 mSv/h | 8-12 mSv/h |
| Lähdenumero: | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Nukiid: | | | | | | Cs-137 | Cs-137 | Cs-137 | Cs-137 |
| Oletusarvo: | | | | | | 100uSv/h | 1000 uSv/h | 1 mSv/h | 10 mSv/h |
| Yksikkö: | | | | | | uSv/h | uSv/h | mSv/h | mSv/h |
| Laitetarkenne: | | | | | | | | | |
| | Pvm | Sijottus | Kulutus | Kommentti | | Koe1 | Koe2 | Koe3 | Koe4 |
| | 1. 08.02.2021 | käyttöön | | | | 107 uSv/h | | 1,04 mSv/h | 10,2 mSv/h |
| | 2. 26.11.2020 | käyttöön | | STUK Testaus 26.11.2020 Co-60 500 mSv/h Näyttämä: 562 mSv/h 800 mSv/h Näyttämä: 921 mSv/h Cs-137 100 mSv/h Näyttämä: 96,0 mSv/h 50 mSv/h Näyttämä: 48,4 mSv/h 8 mSv/h Näyttämä: 7,7 mSv/h 40 uSv/h Näyttämä: 38 uSv/h Overflow ok | | 97 uSv/h | | 0,98 mSv/h | 9,6 mSv/h |
| | 3. 09.11.2020 | käyttöön | | Vastaanottotarkastus | | 103 uSv/h | | 1,01 mSv/h | 9,8 mSv/h |

Kuva 14. Vertailumittarin kalibrointitulokset

Ylhäällä kuvassa 13 esitettynä vertailumittarina käytettävän Automess 6150 AD5/H:n kalibrointitulokset eri mittapisteissä. Kalibrointitietojen perusteella pystytään seuraamaan ovatko tulokset muuttuneet merkittävästi eri vuosina.

4.3 Lineaarisen kalibroitiradan etäisyyksien laskenta

TVO:n lineaarisen kalibroitiradan etäisyyttä vastaavat annosnopeudet on saatu Stukin ionisaatiokammioimittauksen perusteella. Saadut mittaustulokset ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. 2.10.2019 saadut mittaustulokset (*Säteilyturvakeskus, Kalibroitodistus MN/109c/19, 2019, s. 2*)

| Etäisyys [m] | ¹³⁷ Cs-lähde nro 1 $\dot{H}^*(10)$ [mSv/h] | ¹³⁷ Cs-lähde nro 55 $\dot{H}^*(10)$ [mSv/h] |
|--------------|---|--|
| 0,357 | 12,6 | 35,6 |
| 0,400 | 10,2 | 30,6 |
| 0,500 | 6,60 | 20,1 |
| 0,600 | 4,63 | 14,3 |
| 0,800 | 2,50 | 8,10 |
| 1,000 | 1,59 | 5,07 |
| 1,500 | 0,699 | 2,22 |
| 2,000 | 0,394 | 1,22 |
| 3,000 | 0,160 | 0,544 |
| 4,000 | 0,089 | 0,302 |
| 5,000 | 0,057 | 0,193 |
| 6,000 | 0,041 | 0,132 |
| 7,000 | 0,030 | 0,098 |
| 8,000 | 0,023 | 0,075 |

Taulukon 2 arvot toimivat referenssiarvoina, joista sovitusp parametri on laskettu. Cs-137 lähteen ”voimakkuutta” kuvaavan sovitusp parametrin arvo on 5,05.

Mittaustuloksista saadut annosnopeudet eri etäisyyksille muuttuvat ajan kuluessa sillä Cs-137 säteilylähde puoliintuu.

Another feature of each radionuclide is its half-life. Half-life is the length of time it takes for half of the radioactive atoms of a specific radionuclide to decay. A good rule of thumb is that, after seven half-lives, you will have less than one percent of the original amount of radiation. (CDC, 2015)

Säteilylähteen puoliintumisen takia lineaarisen kalibroitiradan etäisyydet vaihtuvat. Puoliintuminen tulee ottaa huomioon etäisyyksiä laskettaessa, puoliintumiskorjaus lasketaan kaavan 1 avulla.

$$T_k = e^{-\ln 2 * \frac{t}{T}} \quad (1)$$

T_k on Puoliintumiskorjaus

T on Puoliintumisaika

t on Kulunut aika referenssipäivästä (2.10.2019)

Kaavan 1 avulla voidaan esimerkiksi laskea puoliintumiskorjaus päivälle 1.1.2021 seuraavasti, käyttäen vuoden pituutena 365,242 päivää ja Cs-137 nuklidin puoliintumisaikana 30,05 vuotta.

$$e^{-\ln 2 * \frac{607}{30,05 * 365,242}} \quad (1)$$

$$= 0,97155$$

Annosnopeus tulevaisuudessa olevalle päivälle voidaan laskea kaavan 2 avulla.

Tulokset on laskettu seuraavalla kaavalla:

$$y(x) = T_k * r * e^{-a(x+x_0)} * (x + x_0)^{-2} \quad (2)$$

$$= T_k * \frac{r * e^{-a*(x+x_0)}}{(x + x_0)^2}$$

$y(x)$ on Cs-137 etäisyyttä vastaava annosnopeus (mSv/h)

x on etäisyys (m)

r on 5,05 sovitusp parametri

a on 0,007714 ilmanvaimennuskerroin

x_0 on 0,0 lähteen etäisyyden korjausarvo

T_k on Puoliintumiskorjaus

(Säteilyturvakeskus, Kalibrointitodistus MN/109c/19, 2019)

Esimerkiksi mikä on annosnopeus metrin päässä päivänä 1.1.2021, lasketaan seuraavasti:

$$0,97155 * \frac{5,05 * e^{-0,007714*(1 m+0 m)}}{(1 m + 0 m)^2} \quad (2)$$

$$= 4,869 \text{ mSv/h}$$

Kertomalla taulukossa 2 esitetyt mittaustuloksien annosnopeudet puoliintumiskorjauksen arvolla saadaan sama annosnopeus kuin kaavan 2 avulla, tällöin annosnopeus voidaan laskea kaavan 3 avulla.

$$y(x) = T_k * H_{STUK} \quad (3)$$

H_{STUK} on kalibroitodistuksen annosnopeuden arvo (mSv/h)

1.1.2021 metrin etäisyydellä oleva annosnopeus voidaan laskea taulukon 2 mittaustulosten perusteella seuraavasti:

$$0,97155 * 5,01 \frac{\text{mSv}}{\text{h}} = 4,869 \text{ mSv/h} \quad (3)$$

Kaavalla 3 on mahdollista laskea suoraan annosnopeuksia vain, jos käyttää referenssimittauksissa käytettyjä etäisyyden ja annosnopeuden arvoja.

Mittaustulosten perusteella on laskettu haluttujen annosnopeuksien etäisyydet eri vuosille tulokset taulukossa 3.

Taulukko 3. TVO:n säteilymittaradan kalibrointietäisyydet säteilylähteelle inventointinumeroltaan 55 (*Säteilyturvakeskus, Kalibrointitodistus MN/109c/19, 2019, s. 4*)

| Annosnopeus [mSv/h] | Etäisyys, 1. tammikuuta [m] | | | | | |
|---------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| 45,0 | 0,337 | 0,334 | 0,330 | 0,326 | 0,322 | 0,319 |
| 35,0 | 0,383 | 0,378 | 0,374 | 0,370 | 0,365 | 0,361 |
| 25,0 | 0,453 | 0,447 | 0,442 | 0,437 | 0,432 | 0,427 |
| 15,0 | 0,584 | 0,577 | 0,571 | 0,564 | 0,558 | 0,551 |
| 10,0 | 0,715 | 0,707 | 0,699 | 0,691 | 0,683 | 0,675 |
| 8,00 | 0,799 | 0,790 | 0,781 | 0,772 | 0,763 | 0,754 |
| 4,00 | 1,128 | 1,116 | 1,103 | 1,090 | 1,078 | 1,065 |
| 1,00 | 2,247 | 2,222 | 2,196 | 2,171 | 2,147 | 2,122 |
| 0,400 | 3,536 | 3,496 | 3,456 | 3,417 | 3,378 | 3,340 |
| 0,100 | 6,978 | 6,900 | 6,823 | 6,746 | 6,671 | 6,596 |
| 0,080 | 7,777 | 7,691 | 7,605 | 7,520 | 7,436 | 7,354 |

Taulukossa 3 on esitettyä kalibrointiradalla pääsääntöisesti käytettävän Cs-137 lähteen (inventointinumero 55). kalibrointietäisyydet vuosille 2019–2024.

Kalibrointitodistuksen pohjalta on tehty Stukin toimesta tehty Excel-pohjainen laskuri, jonka avulla pystytään laskemaan etäisyydet päiväkohtaisesti kuva 14.

Laskuri etsii GoalSeek funktion avulla annosnopeutta vastaavat etäisyydet mittaustulosten pohjalta halutulle päivämäärälle.

Tällä hetkellä kalibrointiradan kalibrintietäisyydet vaihdetaan, joka vuosi vuoden alussa tammikuussa. Tämän johdosta lähteen puoliintumisesta aiheutuva virhe on suurimmillaan vuoden lopussa. Puoliintumisen aiheuttaman virheen vaikutus on otettu huomioon suorittamalla kaikki määräaikaikalibroinnit tammi-maaliskuussa. Tavoitteena olisi pohtia olisiko jokin parempi toimintatapa, johon ei liity useita kalibrintietäisyyksien vaihtoja järjestelmään. Esimerkiksi minkälainen hyöty on, jos käytetäänkin vuoden puolivälissä olevaa lähteen aktiivisuutta.

Usein jokaisella on omat käytäntönsä, miten he suorittavat kalibroinnin. Nämä käytännöt tulisi saada muutettua ohjeiksi eikä vain ihmisten rutiineiksi esimerkiksi radan nollaus ennen kalibroitusta sekä haastavimpien mittarien asettelu. Tulisi myös olla sellainen kalibrointikäytäntö, joka riippuu mahdollisimman vähän kalibroitusta suorittavasta henkilöstä.

Mittausten pitäisi olla täysin toisen henkilön toistettavissa, tavoitteena on varmistua, että vaikka kalibroija vaihtuisi, ei se vaikuttaisi saatuisiin tuloksiin. Esimerkiksi mittalaitte ei koskaan näytä ns. tarkkaa lukua vaan se heilahtelee jonkin verran. Miten tästä saadaan mahdollisimman tarkka mittaustulos. Vanhemmissa mittareissa on myös viisarimittareita, joista yksikkö luetaan, kuinka paljon vaikuttaa onko kamera aseteltu suoraan yläpuolelle vai sivulle, jolloin mittaustulos saattaa vääristyä.

Kalibrointimittauksille ei ole määriteltyä kalibroituaikaa tavoitteena on tutkia vaikuttaako mittarin kalibroituaika saatuun mittaustulokseen. Annosnopeusmittareilla on mittalaitteen tyypistä riippuen erilaiset vaste-ajat. Voisiko joku käytäntö olla sellainen, jonka avulla voitaisiin kaikki annosnopeusmittarit kalibroida vaste-ajasta riippumatta?

5.2 Vikatilanteiden havaitseminen

Radan toimintakunnottomuus aiheuttaa koko kalibrointitoiminnan pysäyttämisen. Tavoitteena on selvittää, millä keinoin hätätapauksessa voitaisiin kalibrointirataa käyttää eri vikatilanteissa esimerkiksi vertailumittaria käyttämällä.

Vikatilanteiden tunnistamiseksi tarkoituksena on luoda toimintatavat, joiden avulla mahdollinen vika voitaisiin havaita. Luotettavin tapa on arvioida mittarien tulosten historiaa, jos mittarien näyttämät alkavat vaihdella suuresti aikaisemmista on syytä epäillä, että radassa on vikaa.

5.3 Vertailumittarin käyttö

Säteilyn vertailumittari on kalibroitu Stukissa ja sille on saatu kalibroitikertoimet. Tavoitteena on luoda ohjeistus, jonka avulla vertailumittaria käytetään sekä miten vertailumittarin avulla saadaan kalibrointitulokset laskettua muille mittareilla.

5.4 Vaatimusten täyttäminen

Säteilymittalaitteiden kalibroinnille on omat vaatimuksensa. Mahdollisten parannustoimenpiteiden tulee täyttää annetut vaatimukset. Esimerkiksi emme voi itse alkaa laskemaan ns. ”välipisteitä” kesäkuun kalibrointeihin vaan niiden tulee perustua oikeisiin mitattuihin arvoihin.

Tämän ongelman ratkaisemiseksi Stuk on toimittanut kalibrointitodistukseen MN/109c/19 perustuvan laskentatyökalun, jonka avulla pystytään laskemaan etäisyydet tarkasti kullekin päivälle.

5.5 Mittausvirheiden hallinta

Mittausvirheitä syntyy aina mitatessa. Tärkeintä on tunnistaa ne ja arvioida miten ne vaikuttavat mittaustuloksiin. Tarkoituksena on tarkastella keinoja, joilla mittausvirheet jäävät mahdollisimman pieniksi ja mittausten tulokset ovat vuositasolla samanlaisia.

5.6 Datan keruu

Viimeisenä tavoitteena tässä opinnäytetyössä on kerätä dataa mittauksista, jota voidaan hyödyntää myöhemmin. Sekä esitellä keinoja minkälaisin keinoin dataa voidaan kerätä.

6 TOIMINTATUTKIMUS JA TUTKIMUSMENETELMÄT

6.1 Toimintatutkimus

Opinnäytetyö on tyypiltään toimintatutkimus.

Toimintatutkimus on osallistavaa tutkimusta, jolla pyritään yhdessä ratkaisemaan käytännön ongelmia ja saamaan aikaan muutosta. Se sopii siten usein hyvin kehittämistyön lähestymistavaksi. Tutkimuksella etsitään ratkaisuja käytännön ongelmiin, jotka voivat olla esimerkiksi teknisiä, sosiaalisia, eettisiä tai ammatillisia. (Katri Ojasalo, 2015, s. 58)

Kuten edellä mainittiin, on toimintatutkimuksen tarkoituksena yhdessä keksiä ratkaisu käytännön ongelmiin. Kalibrointityötä suorittaa minun lisäksi kolme muuta henkilöä ja myös heidän tarpeensa ja ideansa tulee ottaa huomioon kehittäessä toimintaa.

Tavoitteena ei ole keksiä absoluuttisesti parhaita kalibrointitapoja vaan sellaisia, joita kaikki pystyvät suorittamaan ja niillä saavutetaan sama lopputulos henkilöstä riippumatta.

”Yhdessä kehitetty on usein parempi ratkaisu kehittämisiongelmaan kuin yksinomaan ulkopuolelta tulevat ajatukset” (Katri Ojasalo, 2015, s. 59).

Jos muut samaa työtä tekevät jätetään ikään kuin täysin ulkopuolella tutkimuksesta. On mahdollista, että kehitystyön koetaan negatiiviseksi ja syntyy muutosvastaisuutta.

6.2 Tutkimusmenetelmät

Tässä osiossa käyn läpi tiedonhakuun ja opinnäytetyön tekemiseen liittyviä tukevia menetelmiä, jolla hankitaan tietoa ja keinoja, miten mittausprosessia voisi yhtenäistää ja kehittää eteenpäin.

6.3 Six Sigma

Ohessa tietoa Six Sigmasta, jonka avulla voitaisiin mittaustulosten tarkkuutta ja toistettavuutta tarkastella. Tämä idea on saatu kommenttitehtävään tulleen kommentin perusteella.

Lyhyesti sanottuna Six Sigma on joukko menetelmiä ja käytäntöjä, joilla parannetaan systemaattisesti prosessia. Tavoitteena on pienentää vaihtelua prosessin ulostulossa (=tuotteissa). Vaihtelun pienentäminen tapahtuu tutkimalla prosessin syyseuraussuhteita ja tekemällä onnistuneita muutoksia ulostuloon vaikuttaviin muuttujiin. Six Sigmaman keskeisin vahvuus on sen tieteellinen perusta (The Body of Knowledge). Six Sigma -parannustyökaluja käytetään Lean-toteutuksen apuna ongelmanratkaisussa. (Quality Knowhow Karjalainen Oy, ei pvm).

Tämän menetelmän tarkoituksena on juuri pienentää vaihtelua prosessissa. Tarkoituksenahan olisi saada mahdollisimman pieni vaihtelu säteilymittauksiin.

6.4 Benchmarking

Tarkoituksena olisi saada Stukilta yleisiä hyviä kalibrointikäytäntöjä, joita voitaisiin soveltaa mittaradalla.

Pohdittavat asiat:

1. Säteilytysaika
2. Mittarin luenta
3. Mittarin kohdistus

4. Ongelma tilanteiden hallinta

Säteilyturvakeskus käyttää kalibrointietäisyyksiä määritellään reaaliaikaista tietoa lähteen puoliintumisesta. Verrattuna vuosittaiseen etäisyyksien päivitykseen parantaa tämä tarkkuutta huomattavasti.

Säteilyturvakeskus kohdistaa kalibroitavat annosnopeusmittarit laserien avulla, pöytään merkittyjen viivojen sijasta. Kyseisestä menetelmästä on myös TVO:lla koitettu, mutta metodia ei ole saatu toimivaksi. Säteilyturvakeskuksen kalibrointikelkkaa pystytään myös liikuttamaan sivu- sekä pystysuunnassa, jolloin annosnopeusmittarin muodosta riippumatta pystytään annosnopeusmittari kohdistamaan keskelle säteilykeilaa.

Säteilyturvakeskuksella on käytössään ohjattava kamera, joka pystytään kohdistamaan mittarin näyttöön. TVO:lla on käytössä varrellinen IP-kamera, joka pitää kohdistaa ennen mittausten aloittamista. Etenkin kooltaan isompien ja analogisia viisareita sisältävien mittarien näyttämien lukeminen on haastavaa kyseisellä varrella olevalla IP-kameralla.

Säteilyturvakeskukselta on saatu useita ideoita millä tavoin esimerkiksi mittaustuloksia voidaan lukea esimerkiksi annosnopeuden laskeminen kertyneen annoksen avulla sekä annosnopeuden keskiarvon laskeminen ottamalla 10 s välein 10 mittaustulosta ja laskemalla näiden keskiarvo.

6.5 Havainnointi

Kalibrointitapahtumassa tapahtuu useita asioita, joita kalibrointia suorittava henkilö ei välttämättä itse huomaa. Parhaiten näihin asioihin pääsee kiinni havainnoimalla kalibrointitapahtumaa ja vertaamalla toisen tekemiä asioita omaan tekemiseen. Henkilö voi tiedostamattaan toistaa jotain tiettyä toimenpidettä, joka voi olla hyödyllinen myös muille. Tämä pätee etenkin mittareiden asetteluun ja luentaan, mittaustulokset voivat olla mittaajasta riippumattomia, mutta toisaalta joku voi suorittaa tämän tehokkaammin ja johdonmukaisemmin kuin toinen.

Mittaustuloksia tarkastellessa on tärkeää tietää mitä mittauksessa on mahdollisesti tapahtunut varsinkin, jos tulokset eivät täsmää tai vaihtelevat suuresti.

6.6 Mittaukset kalibroitiradalla

TVO:n lineaarisella kalibroitiradalla suoritettiin useita testejä, joiden avulla kokeiltiin käytännössä, minkälaisia vaikutuksia saadaan aikaan erilaisilla kalibroitimenetelmillä.

7 TUTKIMUKSET KALIBROINTIMITTAUKSISTA

Kalibroitikäytäntöjen muuttamisen aiheuttamat vaikutukset mallinnettiin tekemällä useita testejä lineaarisella kalibroitiradalla. Testeissä käytettiin kolmea erityyppistä annosnopeusmittaria (Automess, Ultradiac sekä DGM-turva). Tämän tarkoituksena oli selvittää vaikuttaako jokin muutos kalibroitikäytännöissä suoraan kaikkiin mittareihin vai vaihtelevatko tulokset riippuen annosnopeusmittarin tyypistä.

Testit tehtiin siten, että vain yhtä asiaa testattiin kerrallaan eli ei esimerkiksi muutettu radan etäisyyksiä samalla, kun mitattiin annosnopeuden määrittystä annoksen kautta.

Laboratoriotesteissä käytettiin seuraavia mittareita, Automess 6150AD, Ultradiac, DGM-Turva. Automess 6150AD:n tekniset tiedot ovat esitettyinä taulukossa 4.

Testeistä saatujen tuloksien taulukoissa esiintyy myös 2021 vuoden kalibroitituloksia annosnopeusmittareista. Näitä tuloksia verrattaessa testeissä saatuihin tuloksiin tulee huomioida se, että kyseiset tulokset ovat otettu vanhalla metodilla, jossa mittarin lukemaa on seurattu silmämääräisesti ja otettu painotettu mediaani mittalaitteen näytelmästä.

Taulukko 4 Automess 6150AD5 tekniset tiedot (*Automation und Messtechnik GmbH, 2008*)

| | 6150AD1 (/H, /E) 6150AD5 (/H, /E) | 6150AD2 (/H, /E) 6150AD6 (/H, /E) |
|--|---|--|
| Detector (energy compensated) | GM tube ZP1310, effective length 16 mm, sensitivity approx. 500 pulses per μSv | GM tube ZP1200, effective length 40 mm, sensitivity approx. 5800 pulses per μSv |
| Measuring quantity | /H, /E models: ambient dose equivalent $H^*(10)$; others: exposure dose J_s | |
| Energy range | /H, /E models: 45 keV - 2.6 MeV others: 45 keV - 3 MeV | 60 keV - 1.3 MeV |
| Angular range | $\pm 45^\circ$ around preferential direction (perpendicular to the front side) | |
| Analog (A) and digital (D) dose rate range | A: 1 $\mu\text{Sv/h}$ to 1000 mSv/h D: 0.0 $\mu\text{Sv/h}$ to 999 mSv/h | A: 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ to 10 mSv/h D: 0.00 $\mu\text{Sv/h}$ to 9.99 mSv/h |
| Useful dose rate range (low fluctuations) | 0.2 mSv/h to 999 mSv/h | 2 $\mu\text{Sv/h}$ to 9.99 mSv/h |
| Time constant | 8 s, 1 to 2 s on sudden significant changes in dose rate | |
| Instrumental background | < 20 nSv/h | |
| Linearity of dose rate measurement | deviation max. $\pm 10\%$, calibration with Cs-137 | |
| Overload resistance | up to 50 times the amount of the full range dose rate | |
| Average dose rate digital range | 0.000 $\mu\text{Sv/h}$ to 9.999 mSv/h value flashes as long as standard deviation is greater than 5% | |
| Digital dose range | 6150AD1 (/H, /E): 0 μSv - 9.99 Sv 6150AD5 (/H, /E): | 6150AD2 (/H, /E): 0 μSv - 99.9 mSv 6150AD6 (/H, /E): |

Teknisistä tiedoista on otettava huomioon etenkin mittarin maksimaallinen virhe $\pm 10\%$ sekä mittarin luvattu vaste-aika 8 s.

Ultraradiac annosnopeusmittarin tekniset tiedot ovat nähtävissä kuvassa 16.

RADIOLOGICAL CHARACTERISTICS

Measurement Range:

- Dose rate: 1.0 $\mu\text{R/h}$ to 200 R/h (0.01 $\mu\text{Sv/h}$ to 2 Sv/h)
- Cumulative Dose: 0.1 μR to 999 R (0.001 μSv to 999 Sv)

Accuracy:

- Within $\pm 30\%$ of 100 $\mu\text{R/h}$ (1 $\mu\text{Sv/h}$) to 200 R/h (2.0 Sv/h)

Detector:

- Energy compensated GM detector

Energy Range:

- $\pm 40\%$ from 60 keV to 1.5 MeV

Response Time:

- Achieves 90% of final reading in one second; subject to step change from 1 mR/hr (10 $\mu\text{Sv/h}$) to 55 mR/h (550 $\mu\text{Sv/h}$); updates display every second

Dose Read Out:

- Non-volatile memory will not be erased when read
- Re-zero by push button

Alarms:

- Alarm threshold configurable for dose and dose rate
- Alarm configurable for audible, visual and vibration
- Audible alarm: >85 dB at 30 cm

Kuva 16 Ultradiac annosnopeusmittarin tekniset tiedot (*Mirion Technologies, 2018*)

Kuvasta huomataan, että Automess 6150AD/5 mittariin verrattuna on Ultradiacin luvattu tarkkuus huonompi $\pm 30\%$.

DGM-Turva mittarin tekniset tiedot ovat nähtävillä kuvassa 17.

11 TEKNIikka

| | |
|--|---|
| Tyyppi | DGM-1500 Turva Automaattinen säteilyn annosnopeus- ja annosmittari. |
| Säteilylaji | Gamma- ja röntgensäteily |
| Energia-alue | 45 keV ... 1.25 MeV |
| SI-yksiköiden mukainen ilmainen | Ambient dose equivalent-energiakompensoitu GM-putki. |
| Mittausalue | Annosnopeus 0.01 ... 100 000 mikroSv/h Annos 0.001 ... 1 000 milliSv |
| Vasteaika | Pikamittaus: 2,5 sekuntia. Automaattimittaus: Taustasäteilytasolla 3 min., kohonneilla säteilytasolla (100 mikroSv/h lähtien) 5 s. |
| Tarkkuus | ±5 % näyttämästä Cs-137 säteilytyksessä, kalibrointipisteessä, 20 °C:ssa. |

Kuva 17 DGM-Turva tekniset tiedot (*Kata Safety Oy, 2021, s. 18*)

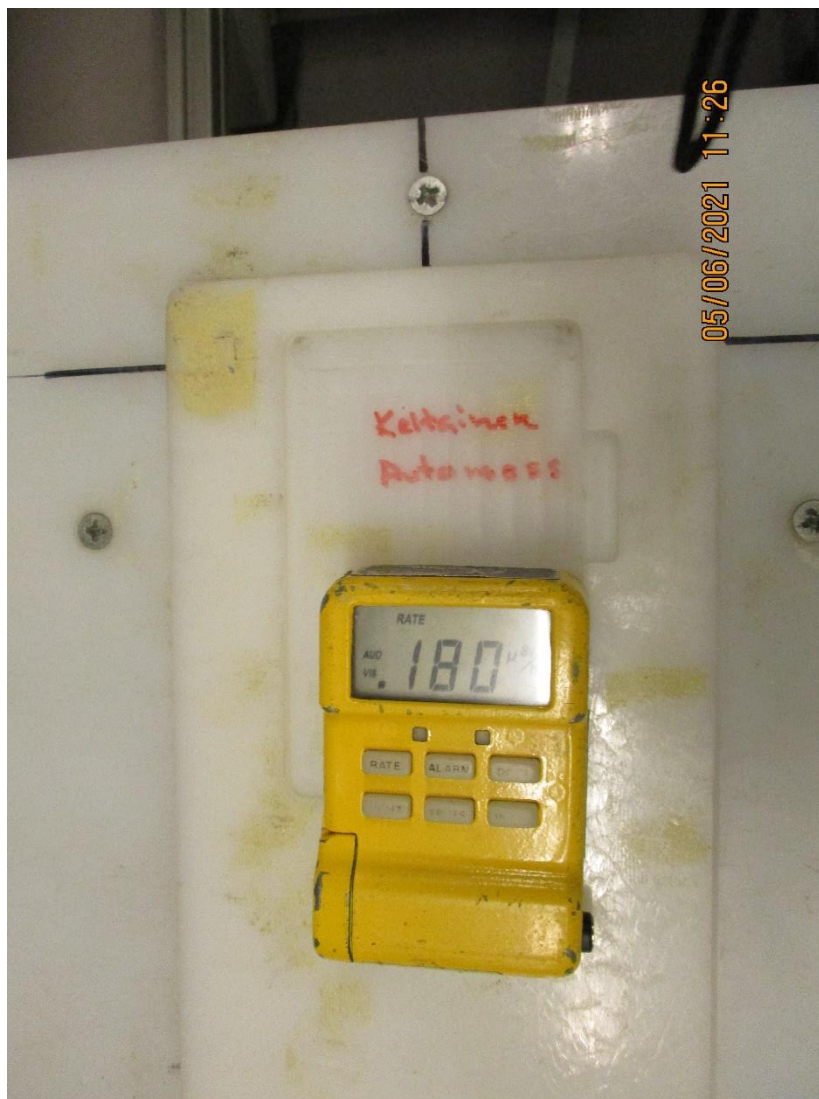
DGM-Turva annosnopeusmittarin tarkkuutta ei voida suoraan verrata aikaisemmin esitelyihin mittareihin, sillä kyseisen mittarin tarkkuus on ilmoitettu vain kalibrointipisteessä (1 mSv/h) koko annosnopeusalueen sijaan.

7.1 Mittarin asettelu

Muissa testeissä käytetyillä Automess sekä DGM-turva mittareilla on jo omat jiginsä, joten niitä ei otettu tässä osuudessa huomioon.

Ultraradiacit ovat lukumäärältään suurin mittarityyppi, jolla ei ole omaa jigään. Kyseisiä annosnopeusmittareita käytetään suojelumittareiden lisäksi myös säteilyvalvojen henkilökohtaisina mittareina, joten niiden kalibrointitulosten tulee olla luotettavia.

Miettiessä kuinka Ultraradiac annosnopeusmittari voitaisiin asettaa kalibrointikelkkaan, löydettiin vanha jigi, joka oli tarkoitettu jo käytöstä poistetuille ”keltaisille automesseille”. Päätettiin hyödyntää kyseistä jigia, sillä siihen Ultraradiacin sai asetettua niin, että mittari pääsee liikkumaan vain sivuttaissuunnassa. Ultraradiac ja jigi kuvassa 18.



Kuva 18. Ultraradiac sekä jigi "keltainen automess"

Kuten kuvasta nähdään, on jigi leveämpi kuin Ultraradiac, jolloin mittari voi liikkua sivuttain. Etäisyys säteilylähteeseen on oikea, kun mittarin asettaa aivan jigin etureunaan. Mittari ei pääse liikkumaan eteenpäin, sillä kynnyksellä pitää sen paikoillaan.

Testattiin mittaamalla mikä vaikutus on, jos mittari pääsee liikkumaan sivuttain jiggissä. Mittarien eri asettelut ovat nähtävissä kuvassa 19.



Kuva 19. Ultraradiac eri kohdassa kalibroitijigiä

Testit suoritettiin 10 mSv/h kalibroitipisteessä sillä siinä säteilykentän keila on ohuin tulokset taulukossa 5.

Taulukko 5. Ultraradiac sijoittelun vaikutus

| Sijainti | Vasen | Keski | Oikea |
|-------------|-------|-------|-------|
| Annosnopeus | mSv/h | mSv/h | mSv/h |
| 10 s | 9,7 | 10,3 | 10,2 |
| 20 s | 9,43 | 10,3 | 10,4 |
| 30 s | 9,5 | 10,3 | 10 |
| 40 s | 9,61 | 10,4 | 10,1 |
| 50 s | 9,46 | 10,5 | 10,3 |
| 60 s | 9,45 | 10,4 | 10,1 |
| 70 s | 9,58 | 10 | 10,1 |
| 80 s | 9,5 | 10,4 | 9,93 |
| 90 s | 9,7 | 10,4 | 10,1 |
| 100 s | 9,59 | 10,5 | 10 |
| KA | 9,55 | 10,35 | 10,12 |

Taulukon 5 tuloksista havaitaan, että mittarin lukema on suurin mittarin ollessa keskellä jigiiä. Eli jos mittari ajautuu jompaankumpaan reunaan, ei säteilykeila osu siihen täydellisesti.

Kyseinen jigi ”keltainen automess” on olemassa olevista jigeistä helpoin, johon Ultraradiacin voi asettaa. Optimaalisessa tilanteessa Ultraradiacille olisi oma jiginsä, mutta edellä mainittua jigiiä voidaan käyttää, kuhan mittari kohdistetaan oikein sivuttaissuunnassa. Kyseistä jigiiä käytettiin Ultraradiacin kanssa muissa tämän opinnäytetyön testeissä.

Hankalimpia tällä hetkellä kalibroitavia mittareita ovat ionisaatiokammion sisältävät annosnopeusmittarit, sillä ne ovat hyvin kookkaita ja niiden ”tähtäyspiste” saattaa sijaita huomattavan ylhäällä laitteessa, johon lineaarisen kalibroitiradan säteilykeilan korkeus ei riitä korkeilla annosnopeuksilla.

Jotta laite pystytään kalibroimaan olemassa olevalla välineistöllä, joudutaan käyttämään esimerkiksi 4 mSv/h kalibroitipistettä, jossa keila on riittävän leveä sekä korkea. Kelkkaa pitäisi pystyä liikuttamaan alaspäin, jotta tähtäyspiste saataisiin kohdistettua.

Mittarin asettelun testaamisen yhteydessä ymmärrettiin, että pienikin liike voi vaikuttaa huomattavasti mittaustulokseen. Etäisyyden on oltava oikea säteilylähteeseen, mutta tulee myös tiedostaa, että säteilylähteen keila pienenee mentäessä lähemmäs säteilylähdettä, jolloin asettelun merkitys korostuu.

7.2 Annosnopeuden mittaaminen kertyneellä annoksella

Testattiin minkälaisia tuloksia saatiin aikaan, kun annosnopeus lasketaan mittarin saaman annoksen avulla.

Useimmissa annosnopeusmittareissa on myös ominaisuus annoksen laskemiselle, tätä hyödynnettiin testattaessa, miten annosnopeuden laskeminen onnistuu kertyneen annoksen kautta, jolloin säteilytysaika pidettiin vakiona. Kyseistä metodologia ei pysty soveltamaan kaikkien annosnopeusmittarien kanssa, sillä annos ominaisuutta ei kaikista löydy.

Testeissä tuli lisäksi ottaa huomioon, että kertyneen annoksen tarkkuus ei ole kovin hyvä etenkin matalilla annosnopeuksilla (100 μ Sv/h). Tällöin tarkan tuloksen saamiseksi säteilytysajan pitäisi olla erittäin pitkä. Pyrittiin tasapainottelemaan tarkkuuden ja mittarin kalibroimiseen käytetyn ajan välillä.

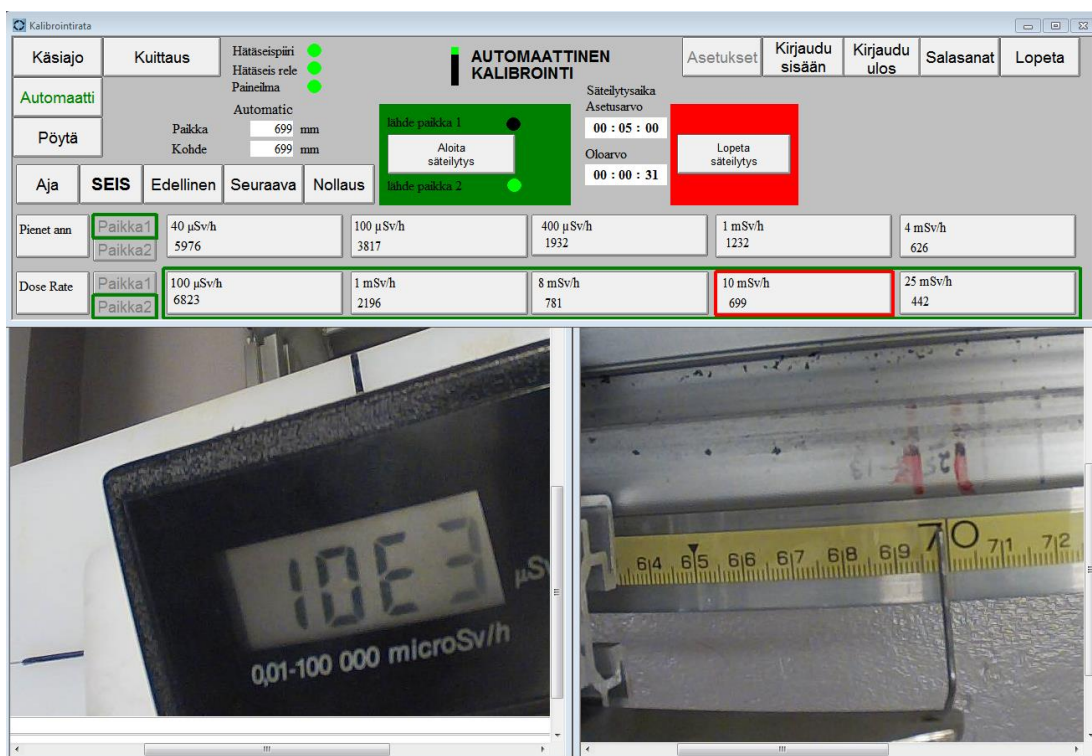
Testeissä käytettiin yhteensä 12 eri annosnopeusmittaria. Mukana testeissä oli 4 kpl DGM-turvia, 4 kpl Ultraradiaceja sekä 4 kpl Automess 6150AD mittareita. Mittarien

iat vaihtelivat 3–30 vuoden välillä, mutta kaikki olivat läpäisseet vuoden 2021 toimintakokeen, jonka yhteydessä kalibrointi oli suoritettu.

Automess 6150 mittareista 2 kpl oli tyyppiä AD5, 1 kpl AD3 ja 1 kpl AD2. AD3 on vanhempi versio AD5 mittarista. AD2 mittari taas on matalille annosnopeuksille suunniteltu mittari (0,01 $\mu\text{Sv/h}$ – 10 mSv/h).

Annosnopeusmittareiden tavoitearvo 10 mSv/h säteilykentässä oli 833 μSv , 1 mSv/h kentässä 83,3 μSv ja 100 $\mu\text{Sv/h}$ kentässä 8,33 μSv .

Kuvassa 20 esitellään DGM-Turva mittarin 5 minuutin säteilytystä 10 mSv/h säteilykentässä.



Kuva 20. DGM-Turva 5 min testissä

7.2.1 DGM-Turva tulokset

Suoritettiin kolme 5 min mittausta jokaiselle annosnopeusmittarille. 10 mSv/h annosnopeudessa tehdyt testit taulukossa 6.

Taulukko 6. DGM-turva 10 mSv/h tulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | DGM Turva | DGM Turva 1500 | DGM Turva 1500 | DGM Turva 1500 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 0,833 mSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 31.5.2021 | 2413 | 390 | 391 | 389 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 1 | 1,055 | 0,828 | 0,841 | 0,821 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 12,66 | 9,936 | 10,092 | 9,852 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 2 | 1,056 | 0,805 | 0,82 | 0,832 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 12,672 | 9,66 | 9,84 | 9,984 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 3 | 1,041 | 0,809 | 0,808 | 0,837 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 12,492 | 9,708 | 9,696 | 10,044 |
| Keskiarvo annoksesta (mSv) | 1,051 | 0,814 | 0,823 | 0,830 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta (mSv/h) | 12,608 | 9,768 | 9,876 | 9,96 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 10,3 | 10 | 10 | 9,6 |

Tuloksista huomataan, että yhden laitteen inventointinumero 2413 annoslaskenta yliarvostaa huomattavasti. Laite poikkeaa muista laitteista, sillä se on vanhempaa sukupolvea kuin muut testatut DGM-Turvat. Muut laitteet ovat 10–15 vuotta vanhoja, kun taas yliarvostava laite on vuodelta 1991. Mittarin annosnopeuslukema ei missään vaiheessa noussut yli 10 mSv/h.

Muiden laitteiden tulos vastasi vuoden 2021 kalibrointitulosta maksimissaan hieman alle 4 %:in erotuksella.

1 mSv/h säteilykentässä tehtyjen mittausten tulokset taulukossa 7.

Taulukko 7. DGM-turva 1 mSv/h tulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | DGM Turva | DGM Turva 1500 | DGM Turva 1500 | DGM Turva 1500 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 83,3 µSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 31.5.2021 | 2413 | 390 | 391 | 389 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 1 | 114 | 85 | 83 | 81 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 1368 | 1020 | 996 | 972 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 2 | 113 | 85 | 84 | 81 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 1356 | 1020 | 1008 | 972 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 3 | 113 | 85 | 83 | 81 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 1356 | 1020 | 996 | 972 |
| Keskiarvo annoksesta (µSv) | 264,667 | 198,333 | 194,667 | 189,000 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta (µSv/h) | 1360 | 1020 | 1000 | 972 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 1030 | 1030 | 1020 | 920 |

Taulukosta 7 huomataan, että laite inventointinumeroltaan 2413 yliarvostaa vieläkin enemmän kuin 10 mSv/h mittauksissa. Inventointinumeron 389 omaavan laitteen mitaustulos poikkeaa noin 5,4 % vuoden 2021 kalibrointituloksesta.

100 µSv/h säteilykentässä tehtyjen mittausten tulokset taulukossa 8.

Taulukko 8. DGM-turva 100 $\mu\text{Sv/h}$ tulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | DGM Turva | DGM Turva 1500 | DGM Turva 1500 | DGM Turva 1500 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 8,33 μSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 1.6.2021 | 2413 | 390 | 391 | 389 |
| Annos (5min) (μSv) Mittaus 1 | 10 | 8 | 8 | 8 |
| Laskettu annosnopeus ($\mu\text{Sv/Hh}$) | 120 | 96 | 96 | 96 |
| Annos (5min) (μSv) Mittaus 2 | 10 | 8 | 8 | 8 |
| Laskettu annosnopeus ($\mu\text{Sv/Hh}$) | 120 | 96 | 96 | 96 |
| Annos (5min) (μSv) Mittaus 3 | 10 | 8 | 8 | 8 |
| Laskettu annosnopeus ($\mu\text{Sv/Hh}$) | 120 | 96 | 96 | 96 |
| Keskiarvo annoksesta (μSv) | 10,000 | 8,000 | 8,000 | 8,000 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta ($\mu\text{Sv/h}$) | 120 | 96 | 96 | 96 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 97 | 98 | 104 | 97 |

Taulukosta 8 havaitaan, että laite inventointinumeroltaan 2413 yliarvosti myös 100 $\mu\text{Sv/h}$ mittauksissa. Todennäköisesti kyseisessä annosnopeusmittarissa on vika, josta reipas yliarvostaminen johtuu.

100 $\mu\text{Sv/h}$ tuloksia käsitellessä tulee ottaa huomioon, että testatut annosnopeusmittarit antoivat annoksen tuloksen 1 μSv tarkkuudella. Joten tulos voi olla käytännössä mitä tahansa väliltä 8–8,99 μSv . Tuloksista huomataan, että pois lukien laite inventointinumero 2413 kaikki ovat antaneet kertyneeksi annokseksi 8 μSv .

Laskemalla annosnopeus kertyneen annoksen kautta matalissa annosnopeuksissa tulisi mittausajan olla huomattavan pitkä, jotta saataisiin tarkka tulos.

7.2.2 Automess 6150AD mittausten tulokset

Suoritettiin kolme 5 min mittausa jokaiselle Automess annosnopeusmittarille. Käytettyjen Automess annosnopeusmittarin mallityypit vaihtelivat. 10 mSv/h annosnopeudessa tehdyt testit Automesseille taulukossa 9.

Taulukko 9. Automess 6150AD 10 mSv/h mittaustulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | Automess 6150 AD3 | Automess 6150 AD2 | Automess 6150 AD5 | Automess 6150 AD5 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 0,833 mSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 1.6.2021 | 2591 | 2421 | 1813 | 2959 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 1 | 0,855 | 0,867 | 0,896 | 0,872 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 10,26 | 10,404 | 10,752 | 10,464 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 2 | 0,837 | 0,867 | 0,895 | 0,876 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 10,044 | 10,404 | 10,74 | 10,512 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 3 | 0,853 | 0,865 | 0,895 | 0,873 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 10,236 | 10,38 | 10,74 | 10,476 |
| Keskiarvo annoksesta (mSv) | 0,848 | 0,866 | 0,895 | 0,874 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta (mSv/h) | 10,18 | 10,396 | 10,744 | 10,484 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 9,8 | overflow | 10,1 | 10 |

Taulukosta 9 havaitaan, että käytetty laite inventointinumero 2421 mittaa annosta, vaikka mittari olisi koko mittauksen ajan ”overflow” tilassa eli mittaustulos ylittyy. Annosnopeusmittareiden tuloksista huomataan, että kaikki mittarit ovat yliarvostaneet hieman verrattuna vuoden 2021 kalibrointitulokseen.

1 mSv/h kentässä tehdyt mittaukset taulukossa 10.

Taulukko 10. Automess 6150AD 1 mSv/h mittaustulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | Automess 6150 AD3 | Automess 6150 AD2 | Automess 6150 AD5 | Automess 6150 AD5 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 83,3 µSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 1.6.2021 | 2591 | 2421 | 1813 | 2959 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 1 | 86 | 87 | 88,9 | 86,7 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 1032 | 1044 | 1066,8 | 1040,4 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 2 | 84,5 | 87 | 88,4 | 86,9 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 1014 | 1044 | 1060,8 | 1042,8 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 3 | 85,5 | 88 | 88,6 | 86,5 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 1026 | 1056 | 1063,2 | 1038 |
| Keskiarvo annoksesta (µSv) | 85,333 | 87,333 | 88,633 | 86,700 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta (µSv/h) | 1024 | 1048 | 1063,6 | 1040,4 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 990 | 1030 | 990 | 1020 |

Taulukosta 10 nähdään, että sama lievä yliarvostaminen verrattuna vuoden 2021 kalibrointitulokseen ilmenee myös 1 mSv/h mittauksissa.

100 µSv/h mittaukset esitettynä taulukossa 11.

Taulukko 11. Automess 6150AD 100 µSv/h mittaustulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | Automess 6150 AD3 | Automess 6150 AD2 | Automess 6150 AD5 | Automess 6150 AD5 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 8,33 µSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 1.6.2021 | 2591 | 2421 | 1813 | 2959 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 1 | 8,51 | 8 | 8,76 | 8,79 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 102,12 | 96 | 105,12 | 105,48 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 2 | 8,42 | 8 | 9,01 | 8,68 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 101,04 | 96 | 108,12 | 104,16 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 3 | 8,38 | 8 | 8,73 | 8,71 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 100,56 | 96 | 104,76 | 104,52 |
| Keskiarvo annoksesta (µSv) | 8,437 | 8,000 | 8,833 | 8,727 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta (µSv/h) | 101,24 | 96 | 106 | 104,72 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 105 | 105 | 97 | 104 |

Taulukossa 11 esitetyistä mittaustuloksista havaitaan, että laite inventointinumero 2421 on antanut DGM-Turva annosnopeusmittarien tapaan mittaustulokseksi kaikissa mittauksissa 8 µSv. Muista Automess annosnopeusmittareista poiketen kyseinen laite mittasi annoksen 1 µSv tarkkuudella.

Muiden Automess mittarien ilmoittama tarkkuus annokselle oli 0,01 µSv, jolloin myös matalilla annosnopeuksilla saadaan tarkempi tulos.

7.2.3 Ultraradiac mittaustulokset

Suoritettiin kolme 5 min mittausa jokaiselle annosnopeusmittarille. 10 mSv/h annosnopeudessa tehdyt testit taulukossa 12.

Taulukko 12. Ultraradiac 10 mSv/h mittaustulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 0,833 mSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 1.6.2021 | 2882 | 2886 | 2892 | 838 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 1 | 0,785 | 0,831 | 0,729 | 0,868 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 9,42 | 9,972 | 8,748 | 10,416 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 2 | 0,785 | 0,834 | 0,729 | 0,872 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 9,42 | 10,008 | 8,748 | 10,464 |
| Annos (5min) (mSv) Mittaus 3 | 0,781 | 0,83 | 0,727 | 0,868 |
| Laskettu annosnopeus (mSv/Hh) | 9,372 | 9,96 | 8,724 | 10,416 |
| Keskiarvo annoksesta (mSv) | 0,784 | 0,832 | 0,728 | 0,869 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta (mSv/h) | 9,404 | 9,98 | 8,74 | 10,432 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 9,6 | 9,9 | 9 | 10,2 |

Taulukon 12 tuloksista havaitaan, että Ultraradiacien mittaustulokset annoksen avulla 10 mSv/h kentässä ovat lähimpänä vuoden 2021 kalibrointituloksia testeissä käytetyistä mittarityypeistä.

Taulukossa 13 Ultraradiacien mittaustulokset 1 mSv/h säteilykentässä.

Taulukko 13. Ultraradiac 1 mSv/h mittaustulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 83,3 µSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 2.6.2021 | 2882 | 2886 | 2892 | 838 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 1 | 78,3 | 81,9 | 71,6 | 85,6 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 939,6 | 982,8 | 859,2 | 1027,2 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 2 | 78,7 | 81,9 | 72,2 | 84,9 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 944,4 | 982,8 | 866,4 | 1018,8 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 3 | 78,9 | 82,1 | 72,1 | 85,4 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 946,8 | 985,2 | 865,2 | 1024,8 |
| Keskiarvo annoksesta (µSv) | 78,633 | 81,967 | 71,967 | 85,300 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta (µSv/h) | 943,6 | 983,6 | 863,6 | 1023,6 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 950 | 970 | 857 | 1030 |

Taulukossa 13 olevista mittaustuloksista huomataan, että myös 1 mSv/h säteilykentässä mittaustulokset ovat hyvin lähellä 2021 vuoden kalibrointituloksia.

Taulukossa 14 on esitettyä 100 µSv/h säteilykentässä tehdyt mittaukset Ultraradiacille.

Taulukko 14. Ultraradiac 100 µSv/h mittaustulokset annoksen avulla

| Mittarityyppi | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Referenssiannos = 8,33 µSv | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero | Inventointinumero |
| 2.6.2021 | 2882 | 2886 | 2892 | 838 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 1 | 7,93 | 8,09 | 7,06 | 8,36 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 95,16 | 97,08 | 84,72 | 100,32 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 2 | 7,84 | 8,09 | 7,13 | 8,41 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 94,08 | 97,08 | 85,56 | 100,92 |
| Annos (5min) (µSv) Mittaus 3 | 7,96 | 8,09 | 7,15 | 8,38 |
| Laskettu annosnopeus (µSv/Hh) | 95,52 | 97,08 | 85,8 | 100,56 |
| Keskiarvo annoksesta (µSv) | 7,910 | 8,090 | 7,113 | 8,383 |
| Keskiarvo Annosnopeudesta (µSv/h) | 94,92 | 97,08 | 85,36 | 100,6 |
| 2021 vuoden kalibrointi tulos | 93 | 103 | 83 | 98 |

Taulukosta 14 nähdään, että kaikki Ultraradiacit ovat mitanneet annosta 0,01 µSv tarkkuudella. Kyseiselle mittarityypille saadaan siis annosnopeus laskettua tarkasti myös kertyneen annoksen avulla.

7.2.4 Yhteenveto tuloksista

Kertyneen annoksen avulla voidaan laskea annosnopeus. Saatujen tulosten vaihteluväli on hyvin pieni verrattuna siihen, että annosnopeus luetaan suoraan mittarin näytöstä.

Ongelmana kyseisessä metodissa on se, että sitä ei voida soveltaa kaikille mittareilla luotettavasti. Etenkin matalilla annosnopeuksilla havaittiin, että mittareiden tarkkuudessa on huomattavia eroja osa mittareista mittasi annoksen $1 \mu\text{Sv}$ tarkkuudella, kun taas osassa tarkkuus oli jopa $0,01 \mu\text{Sv}$. Lisäksi kalibrointiin menevä aika on huomattavan pitkä noin 5 min ja tämän lisäksi tulee annosnopeusmittarin annos aina käydä nollamassa kunkin säteilytyksen jälkeen.

Positiivista kyseisessä metodissa on mittaustulosten riippumattomuus inhimillisesti tekijöistä. Mittauksia tekevän henkilön ei tarvitse kuin asettaa mittari kalibrointikelkkaan ja varmistaa, että säteilytysaika on oikea. Mittarin lukemaa ei tarvitse jatkuvasti seurata ohjauspäätteeltä.

Mittausten jälkeen opittiin uutta annosnopeusmittarien annoslaskennasta. Kaikki mittarit lukuun ottamatta AD2 annosnopeusmittaria hyppäsivät aina säteilyttäessä annosnopeusnäyttämään, jolloin annoksen kertymistä ei voinut seurata.

Annoksen mittaamisen liittyvien testien yhteydessä oma osaaminen annosnopeusmittarien käyttöliittymän käyttöön parani. Annosnopeusmittarien käyttöliittymät vaihtelivat valmistajan ja mallin mukaan. Ultraradiaceissa annoksen pystyi nollamaan laitteen ollessa käynnissä. Muissa opinnäytetyössä käytetyissä annosnopeusmittareissa annoksen nollaaminen tapahtui käynnistyksen yhteydessä.

Testien jälkeen varmistettiin vielä, että annosnopeusmittarit mittavat annosta tosiasian, että lukuarvo muuttuu vasta kuin $1 \mu\text{Sv}$ annos täyttyy tulokset taulukossa 15.

Taulukko 15. Annoksen laskenta annosnopeusmittarissa

| | | | |
|-------------------|-----------|-----------|--------------------------|
| Automess 6150AD 2 | | Inv.no | 2421 |
| Mittaus 1 | Mittaus 2 | Mittaus 3 | |
| Aika (s) | aika (s) | aika (s) | annos (μSv) |
| 34 | 34 | 34 | 1 |
| 69 | 68 | 70 | 2 |
| 103 | 103 | 104 | 3 |
| 136 | 137 | 138 | 4 |
| 170 | 171 | 173 | 5 |
| 206 | 207 | 208 | 6 |
| 238 | 239 | 241 | 7 |
| 272 | 274 | 277 | 8 |
| 300 | 300 | 300 | 8 |

Taulukosta 15 nähdään kuinka Automess 6150AD 2 annosnopeusmittari laskee annoksen. Annosta tulee kertyä kokonainen 1 μSv ennen kuin mittarin näyttämä lukuarvo muuttuu. Testin toteutus näkyy kuvasta 21.



Kuva 21 Annoksen laskenta Automess 6150AD 2 annosnopeusmittarissa

7.3 Annosnopeus 10 pisteen keskiarvolla

Kalibrointitulokset on otettu seuraamalla mittarin näyttämää ja tästä on otettu silmämääräisesti painotettu mediaani, joka on kirjattu MITKO-järjestelmään annosnopeusmittarin kalibrointitulokseksi. Ongelma kyseisessä metodissa on etenkin se, että lukemaa tulee seurata aivan koko ajan ja samalla miettiä millä välillä mittarin näyttämä on liikkunut.

Testattiin ottaa mittaustulokset siten, että luettiin mittalaitteen lukema 10 s välein ja otettiin yhteensä 10 lukeman keskiarvo. Kyseisen toimintatavan tuloksien tulisi vastata annoksien kautta laskettuja annosnopeuksien tuloksia. Toimintatapa on saatu ISO 4037 standardista.

Sufficient time shall be allowed for the instrument to stabilize before any measurements are carried out. Sufficient time shall be allowed between measurements so that the measurements are independent of the response time of the instrument. For measuring dose rates, the time interval between successive readings shall not be less than five times the value of the response time of the instrument range in use. The manufacturer shall state both the warm-up and response times of the instrument. (ISO 4037-2:2019, 2019, s. 25.)

Annosnopeusmittarin tulee siis antaa palautua jokaisen mittauksen jälkeen. Käytännössä tämä toteutettiin siten, että säteilylähde oli suojaan, kun lineaarisen kalibrointiradan kelkkaa ajettiin eri säteilytyspisteeseen. Tuloksia päätettiin kirjata 10 s välein, sillä esimerkiksi Automessin mittareille vasteajaksi oli luvattu 8 s.

The standard instrument shall be used to make at least four successive readings. However, sufficient readings shall be taken to ensure that the mean value of such readings may be estimated with sufficient precision. (ISO 4037-2:2019, 2019, s. 25.)

Tässä tapauksessa mittauksia otettiin yhteensä 10.

Taulukossa 16 on esitettyä 10 mSv/h säteilykentässä saadut mittaustulokset kaikille mittareille.

Taulukko 16. Annosnopeuden keskiarvo 10 mittapisteellä (10 mSv/h)

| Mittarityyppi | DGM | DGM1500 | DGM1500 | DGM1500 | AD3 | AD2 | AD5 | AD5 | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Inventointinumero | 2413 | 390 | 391 | 389 | 2591 | 2421 | 1813 | 2959 | 2882 | 2886 | 2892 | 838 |
| 2.6.2021 | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h |
| 10 s | 10 | 9,32 | 9,72 | 9,67 | 10,1 | ofl | 10,8 | 10,3 | 9,47 | 9,86 | 8,83 | 10,3 |
| 20 s | 10 | 9,78 | 9,47 | 9,57 | 10 | ofl | 10,7 | 10,4 | 9,4 | 10,1 | 8,7 | 10,4 |
| 30 s | 9,97 | 9,33 | 9,3 | 9,81 | 10,2 | ofl | 10,6 | 10,3 | 9,61 | 9,96 | 8,69 | 10,2 |
| 40 s | 9,95 | 9,4 | 9,43 | 9,59 | 10,2 | ofl | 10,6 | 10,4 | 9,6 | 9,86 | 8,74 | 10,2 |
| 50 s | 9,86 | 9,39 | 9,44 | 9,74 | 10,1 | ofl | 10,5 | 10,3 | 9,49 | 9,92 | 8,65 | 10,3 |
| 60 s | 10 | 9,43 | 9,52 | 9,53 | 10,1 | ofl | 10,6 | 10,4 | 9,38 | 9,89 | 8,94 | 10,4 |
| 70 s | 10 | 9,34 | 9,74 | 9,83 | 10,2 | ofl | 10,7 | 10,5 | 9,39 | 10 | 8,82 | 10,4 |
| 80 s | 10 | 9,31 | 9,36 | 9,79 | 10,1 | ofl | 10,7 | 10,4 | 9,49 | 9,9 | 8,81 | 10,2 |
| 90 s | 10 | 9,52 | 9,39 | 9,67 | 10,1 | ofl | 10,6 | 10,5 | 9,59 | 9,88 | 8,85 | 10,5 |
| 100 s | 10 | 9,49 | 9,45 | 9,85 | 10,1 | ofl | 10,5 | 10,4 | 9,6 | 9,88 | 8,74 | 10,3 |
| Keskiarvo (mSv/h) | 9,978 | 9,431 | 9,482 | 9,705 | 10,12 | #ARVO! | 10,63 | 10,39 | 9,502 | 9,925 | 8,777 | 10,32 |

Taulukon 16 tuloksista havaitaan, että Ultraradiaccien ja Automess 6150AD näyttämä pysyi koko mittauksen ajan hyvin stabiilina. DGM-Turvien näyttämä muuttui eniten 10 s aikana. Kaikki saadut mittapisteet olivat hyväksyntä rajan $\pm 20\%$ sisällä.

Taulukossa 17 on esitettyä saadut tulokset 1 mSv/h säteilykentässä

Taulukko 17. Annosnopeuden keskiarvo 10 mittapisteellä (1 mSv/h)

| Mittarityyppi | DGM | DGM1500 | DGM1500 | DGM1500 | AD3 | AD2 | AD5 | AD5 | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| Inventointinumero | 2413 | 390 | 391 | 389 | 2591 | 2421 | 1813 | 2959 | 2882 | 2886 | 2892 | 838 |
| 2.6.2021 | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h | mSv/h |
| 10 s | 1,07 | 0,976 | 0,985 | 0,935 | 1 | 1,05 | 1,02 | 1 | 0,93 | 1,01 | 0,846 | 1,02 |
| 20 s | 1,108 | 0,998 | 0,987 | 0,953 | 1 | 1,04 | 1,06 | 1,06 | 0,917 | 0,987 | 0,852 | 1,01 |
| 30 s | 1,038 | 1,037 | 0,982 | 0,938 | 1,04 | 1,05 | 1,05 | 1,06 | 0,915 | 0,983 | 0,874 | 1,03 |
| 40 s | 1,116 | 1,009 | 0,948 | 0,939 | 1,02 | 1,03 | 1,07 | 1,04 | 0,925 | 0,99 | 0,866 | 1,03 |
| 50 s | 1,02 | 1,021 | 1 | 0,958 | 1 | 1,05 | 1,08 | 1,02 | 0,937 | 0,988 | 0,875 | 1,03 |
| 60 s | 1,068 | 1,013 | 0,968 | 0,952 | 1 | 1,05 | 1,03 | 1,02 | 0,937 | 0,974 | 0,854 | 1 |
| 70 s | 1,102 | 1,033 | 0,971 | 0,948 | 1,03 | 1,04 | 1,04 | 1 | 0,943 | 0,966 | 0,854 | 1,01 |
| 80 s | 1,088 | 1,003 | 1,019 | 0,946 | 1,01 | 1,04 | 1,04 | 1,03 | 0,944 | 0,974 | 0,868 | 1,02 |
| 90 s | 1,08 | 0,999 | 1,027 | 0,959 | 1,02 | 1,05 | 1,09 | 1,04 | 0,961 | 0,988 | 0,866 | 1,03 |
| 100 s | 1,068 | 1,003 | 1,004 | 0,927 | 1,02 | 1,05 | 1,07 | 1 | 0,958 | 0,987 | 0,865 | 1,03 |
| Keskiarvo | 1,0758 | 1,0092 | 0,9891 | 0,9455 | 1,014 | 1,045 | 1,055 | 1,027 | 0,9367 | 0,9847 | 0,862 | 1,021 |

Taulukon 17 tuloksista huomataan samat ilmiöt kuin taulukosta 14. DGM-Turvien valmistajan ilmoittama kalibrointipiste on 1 mSv/h. Tuloksista näkyy, että lukeman heitely on vähäisintä 1 mSv/h kohdalla.

Taulukossa 18 on 100 μ Sv/h säteilykentässä saadut mittaustulokset.

Taulukko. 18 Annosnopeuden keskiarvo 10 mittapisteellä (100 $\mu\text{Sv/h}$)

| Mittarityyppi | DGM | DGM1500 | DGM1500 | DGM1500 | AD3 | AD2 | AD5 | AD5 | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac | Ultraradiac |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Inventointinumero | 2413 | 390 | 391 | 389 | 2591 | 2421 | 1813 | 2959 | 2882 | 2886 | 2892 | 838 |
| 2.6.2021 | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ | $\mu\text{Sv/h}$ |
| 10 s | 99,5 | 88,8 | 111 | 90,3 | 95,4 | 105 | 120 | 97,6 | 94,8 | 95,1 | 83,5 | 98,2 |
| 20 s | 99,1 | 95,4 | 87,7 | 112 | 93,4 | 106 | 101 | 103 | 91 | 96,1 | 88,9 | 104 |
| 30 s | 85 | 101 | 105 | 112 | 103 | 103 | 105 | 98,9 | 97,8 | 98,4 | 88,7 | 105 |
| 40 s | 89,6 | 104 | 80 | 87,1 | 109 | 106 | 114 | 104 | 96,7 | 97 | 84 | 101 |
| 50 s | 96,1 | 103 | 106 | 98 | 108 | 106 | 109 | 94,6 | 96,9 | 96,3 | 83,9 | 101 |
| 60 s | 91,3 | 105 | 117 | 84,5 | 110 | 108 | 96,5 | 98,5 | 96,4 | 95,6 | 85,7 | 100 |
| 70 s | 95 | 99 | 92,9 | 94,8 | 107 | 103 | 96,5 | 103 | 95,7 | 96 | 85 | 100 |
| 80 s | 109 | 88,2 | 94,2 | 88,4 | 111 | 105 | 97,3 | 106 | 95,3 | 95,8 | 85,8 | 102 |
| 90 s | 93,3 | 103 | 113 | 96,1 | 103 | 100 | 101 | 100 | 96,4 | 94 | 84,1 | 101 |
| 100 s | 101 | 92,4 | 101 | 91,6 | 97,8 | 104 | 97,8 | 99,1 | 96,1 | 93,6 | 85,3 | 100 |
| Keskiarvo | 95,89 | 97,98 | 100,78 | 95,48 | 103,76 | 104,6 | 103,81 | 100,47 | 95,71 | 95,79 | 85,49 | 101,22 |

Taulukosta 18 nähdään, että 100 $\mu\text{Sv/h}$ säteilykentässä annosnopeuden lukema heittelee paljon enemmän kuin korkeampien annosnopeuksien säteilykentässä.

7.3.1 Yhteenveto tuloksista

10 pisteen menetelmällä saadaan laskettua annosnopeuksien keskiarvo.

Ongelmana kyseisessä menetelmässä on inhimillisen virheen mahdollisuus. Annosnopeusmittarien näyttämiä lukemia tulee koko ajan seurata ja samalla kirjata näyttämä ylös. Kyseinen toimintatapa vaatii keskittymistä mittaukseen.

Positiivista kyseisessä toimintatavassa on mittausten nopeus, yhden mittaustuloksen saa tehtyä ajassa 1 min 40 s ja eri mittapisteiden välissä ei tarvitse mittaria nollata kuten kertynyttä annosta mitatessa. Kaikki mittapisteet saadaan mitattua yhdellä istumalla. Lisäksi alempia annosnopeuksia pystytään tällä menetelmällä mittaamaan luotettavammin kuin kertyneen annoksen avulla, sillä useimmissa annosnopeusmittareissa annosnopeuden lukeman pystyy lukemaan ainakin yhden desimaalin tarkkuudella.

Testeissä havainnointiin myös miten mittarit käyttäytyvät kalibroiddessa. Ultraradiacit reagoivat säteilytyksessä nopeasti ja näyttämä tasaantui muutamissa sekunneissa. Automesseille ja DGM-Turvilla taas näyttämän tasaantumiseen meni huomattavasti pidempi aika. Näiden tietojen avulla opittiin, että kalibrointeja tehdessä tulee ottaa huomioon mittalaitteen ominaisuudet kuten vaste-aika.

reiksi valittiin sellaiset mittarit, jotka olivat aikaisemmissa testeissä olleet mahdollisimman lähellä referenssi annosnopeutta. Kaavan 1 avulla saadaan laskettua 1 vuoden heittäjän vaikutus annosnopeuksiin seuraavasti:

$$e^{-\ln 2 \cdot \frac{365,242}{30,05 \cdot 365,242}} = 0,9772 = 2,28 \% \quad (1)$$

Mittaustuloksissa tulisi siis olla 2,28 % ero. 10 mSv/h testien tulokset taulukossa 19.

Taulukko 19. 10 mSv/h mittaukset puoliintumisen vaikutus

| Etäisyytiedot | 4.6.2021 | 4.6.2021 | 4.6.2020 | 4.6.2020 |
|---------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| Laitetyyppi | AD3 | Ultraradiac | AD3 | Ultraradiac |
| Säteilykenttä | 10 mSv/h | 10 mSv/h | 10 mSv/h | 10 mSv/h |
| 10 s | 10,4 | 10,5 | 10 | 10,5 |
| 20 s | 10,3 | 10,6 | 10,2 | 9,8 |
| 30 s | 10,2 | 10,4 | 10,1 | 10,2 |
| 40 s | 10,4 | 10,5 | 10,1 | 10,5 |
| 50 s | 10,4 | 10,4 | 10,2 | 10,2 |
| 60 s | 10,3 | 10,3 | 10,2 | 10,1 |
| 70 s | 10,2 | 10,8 | 10,1 | 10,3 |
| 80 s | 10,3 | 10,6 | 10,1 | 10,3 |
| 90 s | 10,5 | 10,5 | 10 | 10,4 |
| 100 s | 10,4 | 10,5 | 10,1 | 10,1 |
| KA | 10,34 | 10,51 | 10,11 | 10,24 |
| KA Ero | AD3 | 2,27 % | Ultraradiac | 2,64 % |

Taulukon 19 tuloksista huomataan, että 10 mSv/h mittausten tulokset muuttuivat 2,27–2,64 %. Säteilylähteen puoliintumisen vaikutus nähdään selvästi, jos tiedot ovat 1 vuoden tarkkuudella.

1 mSv/h mittausten tulokset esitetty taulukossa 20.

Taulukko 20. 1 mSv/h mittaukset puoliintumisen vaikutus

| Etäisyytiedot | 4.6.2021 | 4.6.2021 | 4.6.2020 | 4.6.2020 |
|---------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| Laitetyyppi | AD3 | Ultraradiac | AD3 | Ultraradiac |
| Säteilykenttä | 1 mSv/h | 1 mSv/h | 1 mSv/h | 1 mSv/h |
| 10 s | 1,02 | 1,05 | 0,981 | 1,06 |
| 20 s | 1,05 | 1,06 | 1 | 1,03 |
| 30 s | 1,01 | 1,03 | 0,995 | 1,02 |
| 40 s | 1,03 | 1,03 | 1,02 | 1,03 |
| 50 s | 1,03 | 1,04 | 0,995 | 1,03 |
| 60 s | 1,04 | 1,03 | 1,02 | 1,02 |
| 70 s | 1,02 | 1,01 | 1,01 | 0,995 |
| 80 s | 1,02 | 1,03 | 1 | 1,01 |
| 90 s | 1,02 | 1,03 | 0,981 | 0,993 |
| 100 s | 1,01 | 1,03 | 0,987 | 0,985 |
| KA | 1,025 | 1,034 | 0,9989 | 1,0173 |
| KA Ero | AD3 | 2,61 % | Ultraradiac | 1,64 % |

Taulukon 20 tuloksista havaitaan, että 1 mSv/h mittauksissa mitausten tulokset vaihtuivat 1,64–2,61 %.

100 µSv/h mitausten tulokset nähtävillä taulukossa 21.

Taulukko 21. 100 µSv/h mittaukset puoliintumisen vaikutus

| Etäisyytiedot | 4.6.2021 | 4.6.2021 | 4.6.2020 | 4.6.2020 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Laitetyyppi | AD3 | Ultraradiac | AD3 | Ultraradiac |
| Säteilykenttä | 100 µSv/h | 100 µSv/h | 100 µSv/h | 100 µSv/h |
| Inv.no | 2591 | 838 | 2591 | 838 |
| 10 s | 92,3 | 105 | 94,5 | 97,6 |
| 20 s | 103 | 102 | 91,5 | 100 |
| 30 s | 94,8 | 102 | 90,1 | 100 |
| 40 s | 92,1 | 103 | 103 | 99,4 |
| 50 s | 90,8 | 101 | 100 | 100 |
| 60 s | 106 | 101 | 94 | 99,9 |
| 70 s | 98,8 | 102 | 99,8 | 98,8 |
| 80 s | 94,7 | 103 | 103 | 99,9 |
| 90 s | 113 | 103 | 100 | 101 |
| 100 s | 108 | 102 | 95,4 | 100 |
| KA | 99,35 | 102,4 | 97,13 | 99,66 |
| KA Ero | AD3 | 2,29 % | Ultraradiac | 2,75 % |

Taulukon 21 tuloksista havaitaan, että mittauksen tulokset vaihtuivat 2,29–2,75 %.

7.4.1 Yhteenveto tuloksista

Vertailemalla mittauspäivän etäisyystietoja vuoden vanhoihin etäisyys tietoihin havaittiin, että mittarien annosnopeuksien tulokset vaihtelivat 1,64–2,75 % välillä. Cs-137 säteilylähteen puoliintumisen tulisi vaikuttaa tuloksiin siten, että vuoden vanhoilla tiedoilla saadaan 2,28 % pienempiä annosnopeuden arvoja. Mittausten perusteella voidaan todeta, että päivittämällä etäisyystiedot useammin kuin kerran vuodessa saadaan mittarien kalibroinnin tuloksen virhettä pienennettyä.

Mikäli lineaarisen kalibroitiradan ohjausjärjestelmää päivitetään, tulisi ottaa huomioon, miten etäisyystiedot voidaan ottaa nykyistä tarkemmin. Tämä voitaisiin toteuttaa siten, että ohjelmoitava logiikka hakisi etäisyystiedot Excel-taulukosta.

Lineaarisen kalibroitiradan ohjausliittymän käyttöön perehdyttiin lähteen puoliintumiseen liittyvissä testeissä tarkemmin kuin normaalisti kalibrointeja tehdessä. Tehtyjen testien avulla saatiin tietoa ohjausliittymän heikkouksista ja vahvuuksista. Etäisyysien syöttäminen ohjelmistoon on työlästä ja riski syöttää vääriä etäisyystietoja on suuri. Eri kalibroitipisteiden käyttö on tehty käyttäjäystävällisesti, valitaan vain haluttu annosnopeuden arvo ja kelkka ajaa kyseiselle paikalle.

8 VERTAILUMITTARIN KÄYTTÖ

8.1 Vertailumittari kalibrointityökaluna

The Calibration factor, N , is defined as the conventional true value of the quantity the instrument is intended to measure (the measurand), H , divided by the indication, M (corrected, if necessary) given by the instrument, i.e. (IAEA, 2000, s. 4)

Kalibroitikertoimella siis lasketaan, kuinka paljon mittalaitteen tulos eroaa referenssiarvosta.

Kalibroitikerroin voidaan laskea kaavalla 4:

$$N = \frac{H}{M} \quad (4)$$

N on kalibrointikerroin

H on mitattava arvo esimerkiksi (10 mSv/h)

M on mittalaitteen antama tulos

Vertailumittaria testattiin radalla 100 µSv/h, 1 mSv/h ja 10 mSv/h pisteissä, kussakin pisteessä suoritettiin 5 eri mittausta virheen vähentämiseksi ja näistä laskettiin keskiarvo mittarin näyttämälle. Tulokset on kirjattu taulukkoon 22.

Taulukko 22. Vertailumittarin kalibrointi

| Vertailumittarin testit | | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 26.5.2021 | Mittaus 1 | Mittaus 2 | Mittaus 3 | Mittaus 4 | Mittaus 5 | Keskiarvo |
| 10 mSv/h | | 10,5 | 10,4 | 10,4 | 10,5 | 10,5 | 10,5 |
| 1 mSv/h | | 1,03 | 1,04 | 1,01 | 1,03 | 1,04 | 1,03 |
| 100 µSv/h | | 106 | 109 | 101 | 99 | 104 | 103,8 |

Nämä tulokset ovat TVO:n kalibrointiradalla saatuja tuloksia. Keskiarvo tulokset muutettiin vielä lisäksi Stukin toimittaman kalibrointitodistuksen MN/114/24 mukaisilla kalibrointikertoimilla. Kalibrointikertoimet ovat taulukossa 23.

Taulukko 23. Kalibrointikertoimet vertailumittarille (Säteilyturvakeskus, Kalibrointitodistus MN/114/24, 2020)

| Säteily-laatu | Energia [keV] | $\dot{H}^*(10)$ [mSv/h] | Kalibrointi-kerroin mittarille #12 |
|-------------------|---------------|-------------------------|------------------------------------|
| ^{137}Cs | 662 | 0,040 | 1,05 |
| ^{137}Cs | 662 | 0,100 | 1,03 |
| ^{137}Cs | 662 | 1,00 | 1,02 |
| ^{137}Cs | 662 | 8,00 | 1,04 |
| ^{137}Cs | 662 | 10,0 | 1,04 |
| ^{137}Cs | 662 | 50,0 | 1,03 |
| ^{137}Cs | 662 | 100 | 1,04 |
| ^{60}Co | 1250 | 500 | 0,89 |
| ^{60}Co | 1250 | 800 | 0,87 |
| ^{60}Co | 1250 | 1000 | (1) |

¹⁾ Mittarin näyttämässä "ofl", mittaustulos yli mitta-alueen.

Tuloksista huomataan, että Stukin akkreditoitussa laboratoriossa säteilyn vertailumittarin on aliarvoistanut hieman, kun taas TVO:n kalibrointiradalla tulokset ovat hieman yliarvostettuja.

Linearisella kalibrointiradalla saadut keskiarvon tulokset siis kerrotaan Stukin kalibrointitodistuksen kalibrointikertoimilla. Näin saadaan tuloksiksi seuraavat annosnopeudet:

106,9 $\mu\text{Sv/h}$, 1,05 mSv/h ja 10,88 mSv/h

Mikäli vertailumittaria käytetään kalibrointityökaluna. Tulee vertailumittarin kalibrointikertoimella korjatusta näyttämästä muodostaa $\pm 20\%$ välillä olevat arvot. Arvot ovat taulukossa 24.

Taulukko 24. Cs-137 inventointinumero 55 kalibroinnin raja-arvot vertailumittarilla

| Minimi | Maksimi |
|-----------------|------------------|
| 8,7 mSv/h | 13,05 mSv/h |
| 0,84 mSv/h | 1,26 mSv/h |
| 85,5 μ Sv/h | 128,3 μ Sv/h |

Saatuja tuloksia voidaan käyttää muiden mittalaitteiden kalibroinnissa. Ennen kalibroinnin suorittamista annosnopeusmittarille tulee etsiä etäisyys säteilylähteestä, jossa vertailumittari näyttää taulukossa 18 esitettyjä mittaustuloksia, jonka jälkeen voidaan kalibrointi suorittaa.

Normaalitilanteessa nämä pisteet ovat 100 μ Sv/h, 1 mSv/h ja 10 mSv/h kalibrointipisteet lineaarisella kalibrointiradalla.

8.2 Vertailumittarilla kalibrointipisteiden etsiminen

Tässä osuudessa testattiin, millä tarkkuudella lineaariselta kalibrointiradalta, voidaan löytää jokin tietty annosnopeus ”tuntemattomasta Cs-137 säteilylähteestä” käyttäen säteilyn vertailumittaria. Tuloksia verrattiin Stukin kalibrointitodistuksen pohjalta tehdyn Excel-laskurin antamiin etäisyyksiin.

Testin tarkoitus oli mallintaa tilannetta, jossa käytössä olisi tuntematon säteilylähde, jolloin sille pitäisi määrittää kalibrointipisteiden etäisyydet vertailumittaria hyödyntämällä.

Testeissä käytettiin Cs-137 lähdettä inventointinumero 55. Kyseisen lähteen säteilykeilasta etsittiin 500 μ Sv/h 1 mSv/h ja 5 mSv/h pisteet säteilyn vertailumittarilla. Tuloksia käsitellessä tulee ottaa huomioon, että 500 μ Sv/h sekä 5 mSv/h annosnopeuksille ei ole kalibrointikerrointa. Suoritettiin 5 mittausta per annosnopeus, joista laskettiin etäisyyden sekä annosnopeuden keskiarvo.

Käytettävä säteilyn vertailumittari oli malliltaan Automess 6150AD5. Testin suorittamista esitellään kuvassa 24.



Kuva 24 etäisyyksien etsintä "tuntemattomasta" säteilylähteestä

Lineaarisen kalibroitiradan ohjauspäätteeltä pystytään samanaikaisesti tarkastelemaan mittarin näyttämää lukuarvoa sekä mittarin sijaintia.

1 mSv/h mittapisteen näyttämää on korjattu, Stukin kalibroititodistuksen mukaisella kalibroitikertoimella 1,02. Mittausten tulokset ovat taulukossa 25.

Taulukko 25. Annosnopeuden etsinnän tulokset

| Referenssimittari | Mittapiste (5 mSv/h) | | Mittapiste (1 mSv/h) | | Mittapiste (500 µSv/h) | |
|-------------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | Etäisyys (m) | (mSv/h) | Etäisyys (m) | (mSv/h) | Etäisyys (m) | (mSv/h) |
| 28.5.2021 | | | | | | |
| Mittaus 1 | 1,013 | 4,95 | 2,223 | 1,01 | 3,173 | 0,498 |
| Mittaus 2 | 1,003 | 5,03 | 2,229 | 1,01 | 3,12 | 0,502 |
| Mittaus 3 | 0,996 | 4,99 | 2,2 | 1,02 | 3,145 | 0,495 |
| Mittaus 4 | 1,002 | 5,1 | 2,224 | 1,02 | 3,144 | 0,508 |
| Mittaus 5 | 1,018 | 4,97 | 2,242 | 1 | 3,113 | 0,506 |
| Keskiarvo | 1,006 | 5,008 | 2,224 | 1,032 | 3,139 | 0,502 |

Etäisyyden arvoa korjattiin käyttämällä kaavaa 4:

$$x_{haluttu} = \sqrt{\frac{x_{Rata}^2 * H_{Automess}}{H_{haluttu}}} \quad (4)$$

$x_{haluttu}$ on korjattu etäisyys halutulle säteilytyspisteelle

x_{rata} on mittauksista saatu etäisyyksien keskiarvo

$H_{haluttu}$ on mittauksissa etsittävä annosnopeuden arvo

$H_{Automess}$ on säteilyn vertailumittarin mittausten annosnopeuden keskiarvo.

Säteilyn vertailumittarilla Mitatuista arvoista saatiin yllä esitetyn kaavan avulla laske-
malla lineaarisen kalibrointiradan etäisyyksien arvoiksi taulukossa 26 esitetyt tulokset.

Taulukko 26. Säteilyn vertailumittarilla saadut radan etäisyydet annosnopeuksille

| Mittaamalla saadut radan etäisyydet | | |
|-------------------------------------|----------------|------------------|
| 5 mSv/h (m) | 1 mSv/h (m) | 0,5 mSv/h (m) |
| 1,007 | 2,259 | 3,145 |

Saatuja tuloksia verrattiin Stukin kalibrointitodistuksesta laskettuihin etäisyyden ar-
voihin, jotka ovat taulukossa 27.

Taulukko 27. Kalibrointitodistus MN/109c/19 etäisyydet annosnopeuksille

| Kalibrointitodistuksen Excel-laskuri | | |
|--------------------------------------|----------------|------------------|
| 5 mSv/h (m) | 1 mSv/h (m) | 0,5 mSv/h (m) |
| 0,987 | 2,196 | 3,095 |

Säteilyn vertailumittarilla saatuja tuloksia verrattaessa Stukin tuloksiin huomataan,
että etäisyydet ovat vertailumittarilla mitattuna hieman pienempiä, kuin kalibrointito-
distuksen arvot. Laskettiin saatujen tuloksien avulla vertailumittarin etäisyyden sekä
annosnopeuden virhe verrattuna Stukin kalibrointitodistukseen taulukko 28.

Taulukko 28 Säteilyn vertailumittarin virhe verrattuna Stukin kalibroitodistukseen.

| | 5 mSv/h | 1 mSv/h | 0,5 mSv/h |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | Virhe (%) | Virhe (%) | Virhe (%) |
| Etäisyys | 2,05 % | 2,88 % | 1,60 % |
| Annosnopeus | 4,14 % | 5,84 % | 3,23 % |

Saadut virheprosentit ovat pieniä, ottaen huomioon seuraavat seikat. Testissä käytetyille annosnopeusmittarille on annettu tarkkuudeksi ± 10 %, mittarin luenta on suoritettu suoraan arvioimalla mittarin näyttämää mittarin näytöstä. Mittausten määrä oli vain viisi erillistä mittausta per annosnopeus. Mittauksissa ei ole myöskään otettu huomioon esimerkiksi säteilyn siroamista.

Suurin virhe on 1 mSv/h annosnopeuden kohdalla, jossa mitattua arvoa on korjattu Stukin kalibroitokertoimella vertailumittarille.

Kalibroituja säteilyn vertailumittaria voitaisiin hyvin käyttää muiden mittalaitteiden toiminnan tarkastamiseen myös Cs-137 lähteellä, jolle ei ole määritelty tarkemmin mittauksin etäisyyden suhdetta annosnopeuteen.

Säteilyn vertailumittarille tulee mitata akkreditoidusta laboratoriosta kalibroitokertoimet myös 5 mSv/h ja 0,500 mSv/h annosnopeuksille, jos kyseisiä annosnopeuksia aiotaan käyttää kalibroinnissa.

Cs-137 säteilylähteen sisältävien muun teollisuuden käyttämien mittalaitteiden säteilykeilan voimakkuutta pystyttäisiin mittaamaan säteilyn vertailumittarilla. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi jotkin pinnanmittaus sekä vaakasovellukset.

9 KEHITYSEHDOTUKSET

Tässä osiossa käydään läpi minkälaisia kehitysehdotuksia ja huomioita saatiin mittausten ja toiminnan havainnoinnilla aikaan. Monet käytännöt ovat sellaisia, jotka voidaan ottaa välittömästi käyttöön.

9.1 Annosnopeuden mittaamisen kehittäminen

Annosnopeuden mittaamiseen kokeiltiin kahta uutta menetelmää:

- Annosnopeuden keskiarvo 10 pisteellä
- Annosnopeus kertyneen annoksen avulla

Tarkoituksena oli löytää kalibrointimenetelmä, jonka avulla kalibroinnin tuloksen arvo heittelee vähemmän verrattuna nykyiseen toimintatapaan. Tarkoituksena ei ollut löytää tapaa, jolla päästään mahdollisimman lähelle säteilykentän referenssiarvoa, kuhan annosnopeusmittarin kalibrointi oli sallitun $\pm 20\%$ eron sisällä verrattuna referenssiarvoon.

Jotta uusia menetelmiä voidaan verrata toisiinsa, tehtiin taulukko 29.

KA 10p, kuvaa 10 pisteen menetelmällä saatua annosnopeuksien keskiarvoa.

KA Annos, kuvaa kertyneen annoksen avulla laskettua annosnopeuden keskiarvoa.

Taulukossa violetilla merkityt tulokset ovat DGM Turva inventointinumeron 2413 tuloksia, joita ei huomioita keskiarvon laskennassa, sillä kertyneen annoksen laskenta ei toiminut. Punaisella merkityt ovat mittauksia, joissa $8,33 \mu\text{Sv}$ referenssiannosta annosnopeusmittarit mittasivat $1 \mu\text{Sv}$ tarkkuudella, näitäkään ei otettu huomioon keskiarvon laskennassa.

Lihavoidut prosenttitulokset kuvaavat, millä mittarilla tuli kunkin annosnopeusalueen suurin ero kahden eri menetelmän välillä. Mittarin tyyppi on myös ilmoitettuna prosenttiluvun alapuolella.

Taulukko 29 Eri mittausmenetelmien vertailu

| 10 mSv/h säteilykentän tulokset | | | | | | |
|----------------------------------|-------------|-----------------|-------------------|---------------------|------------------|------------|
| | | KA 10p mSv/h | KA annos mSv/h | KA 10p ero KA annos | Maksimi erotus % | KA eroista |
| DGM | 2413 | 9,98 | 12,61 | 26,36 % | 4,16 % | 1,60 % |
| DGM1500 | 390 | 9,43 | 9,77 | 3,57 % | DGM1500 | |
| DGM1500 | 391 | 9,48 | 9,88 | 4,16 % | | |
| DGM1500 | 389 | 9,71 | 9,96 | 2,63 % | | |
| AD3 | 2591 | 10,12 | 10,18 | 0,59 % | | |
| AD2 | 2421 | Overflow | 10,40 | ei tulosta | | |
| AD5 | 1813 | 10,63 | 10,74 | 1,07 % | | |
| AD5 | 2959 | 10,39 | 10,48 | 0,90 % | | |
| Ultraradiac | 2882 | 9,50 | 9,40 | -1,03 % | | |
| Ultraradiac | 2886 | 9,93 | 9,98 | 0,55 % | | |
| Ultraradiac | 2892 | 8,78 | 8,74 | -0,42 % | | |
| Ultraradiac | 838 | 10,32 | 10,43 | 1,09 % | | |
| 1 mSv/h säteilykentän tulokset | | | | | | |
| | | mSv/h | mSv/h | KA 10p ero KA annos | Maksimi erotus % | KA eroista |
| DGM | 2413 | 1,08 | 1,36 | 26,42 % | 2,80 % | 0,88 % |
| DGM1500 | 390 | 1,01 | 1,02 | 1,07 % | DGM1500 | |
| DGM1500 | 391 | 0,99 | 1,00 | 1,10 % | | |
| DGM1500 | 389 | 0,95 | 0,97 | 2,80 % | | |
| AD3 | 2591 | 1,01 | 1,02 | 0,99 % | | |
| AD2 | 2421 | 1,05 | 1,05 | 0,29 % | | |
| AD5 | 1813 | 1,06 | 1,06 | 0,82 % | | |
| AD5 | 2959 | 1,03 | 1,04 | 1,30 % | | |
| Ultraradiac | 2882 | 0,94 | 0,94 | 0,74 % | | |
| Ultraradiac | 2886 | 0,98 | 0,98 | -0,11 % | | |
| Ultraradiac | 2892 | 0,86 | 0,86 | 0,19 % | | |
| Ultraradiac | 838 | 1,02 | 1,02 | 0,25 % | | |
| 100 µSv/h säteilykentän tulokset | | | | | | |
| | | µSv/h | µSv/h | KA 10p ero KA annos | Maksimi erotus % | KA eroista |
| DGM | 2413 | 95,89 | 120 | 25,14 % | 4,23 % | 1,67 % |
| DGM1500 | 390 | 97,98 | 96 | -2,02 % | AD5 | |
| DGM1500 | 391 | 100,78 | 96 | -4,74 % | | |
| DGM1500 | 389 | 95,48 | 96 | 0,54 % | | |
| AD3 | 2591 | 103,76 | 101,24 | -2,43 % | | |
| AD2 | 2421 | 104,6 | 96 | -8,22 % | | |
| AD5 | 1813 | 103,81 | 106 | 2,11 % | | |
| AD5 | 2959 | 100,47 | 104,72 | 4,23 % | | |
| Ultraradiac | 2882 | 95,71 | 94,92 | -0,83 % | | |
| Ultraradiac | 2886 | 95,79 | 97,08 | 1,35 % | | |
| Ultraradiac | 2892 | 85,49 | 85,36 | -0,15 % | | |
| Ultraradiac | 838 | 101,22 | 100,6 | -0,61 % | | |

Taulukon 24. tuloksista havaitaan, että menetelmien välinen ero mittaustuloksissa on keskiarvoltaan enimmillään 1,67 %, joka on erittäin vähän ottaen huomioon mittarien tarkkuus. DGM-Turva mittareille eroa tuli hieman enemmän muihin annosnopeusmittareihin verrattuna.

9.1.1 Kehitysehdotuksia annosnopeusmittarien kalibrointiin

Parhaaksi tavaksi tarkemman tuloksen saamiseksi valittiin 10 pisteen toimintatapa, sillä sitä pystyy soveltamaan lähes kaikkiin annosnopeusmittareihin toisinkuin kertyneen annoksen avulla mitattu annosnopeus, jossa tuloksen tarkkuus kärsii huomattavasti varsinkin alhaisemmilla annosnopeuksilla. 10 pisteen toimintatavalla saadaan myös huomattavasti enemmän mittareita kalibroitua lyhemmissä ajassa.

Saatujen tulosten perusteella, ehdotetaan että uuden annosnopeusmittarin saapuessa TVO:lle vastaanottotarkastuksen yhteydessä otetaan mittarilla niin sanottu referenssitulos käyttäen 10 pisteen toimintatapaa, johon voidaan verrata vuosittaisten kalibrointitulosten kehitystä. Tämän avulla pystytään seuraamaan alkaako annosnopeusmittarin näyttämä liikkumaan johonkin suuntaan.

10 pisteen toimintavasta voitaisiin luoda yleisohje, jonka avulla kuka tahansa kalibroijista voisi suorittaa kalibroinnin toimintatapaa hyödyntäen.

Stukin kalibrointitodistukseen MN/109c/19 perustavan Excel-laskurin avulla voidaan tarvittaessa laskea lineaariselle kalibrointiradalla jokin uusi kalibrointipiste, jos sellaista tarvitaan esimerkiksi (5 mSv/h). Säteilyn vertailumittarin avulla voidaan tarkastaa kalibrointipisteessä saavutettava annosnopeus.

Ultradiac annosnopeusmittareita kalibroidessa pystytään käyttämään jigiä ”keltainen automess”. Ultradiacin mahdollinen liikkuminen sivuttaissuunnassa vaikuttaa saatuun mittaustulokseen, jos käytetään 10 mSv/h annosnopeutta.

9.2 Lineaarisen kalibroitiradan toiminnan kehittäminen

Osiossa käydään läpi minkälaisia kehitysehdotuksia, saatiin mittausten perusteella sekä hyödyntämällä Stukissa havainnoituja käytäntöjä.

9.2.1 Kehitysehdotus kunnossapidon helpottamiseksi

Annosnopeus testien avulla visioitiin uusi toimintatapa lineaarisen kalibroitiradan kunnonvalvontaan. Stukin kalibroitietäisyys mittausten jälkeen tulisi ottaa esimerkiksi kolmella annosnopeusmittarilla referenssitulos lineaarisen kalibroitiradan eri kalibroitipisteissä 10 pisteen menetelmää käyttäen. Näiden tulosten avulla voitaisiin seurata, havaitaanko kalibroitipisteistä saatavissa annosnopeuksissa muutosta, kun etäisyydet vaihdetaan vuosittain. Tarkoituksena on, seurata toimiiko Stukin sovitusp parametri halutusti. Jos lineaarisen kalibroitiradan toimivuutta epäillään, otetaan näitä kolmea mittaria käyttäen uudet tulokset 10 pisteen menetelmää käyttäen ja verrataan vanhoihin. Käytettävien mittarien tulee olla sellaisia, joiden toimivuus on varmistettu akkreditoidussa laboratoriossa esimerkiksi Stukin laboratoriossa.

9.2.2 Kehitysehdotukset lineaarisen kalibroitiradan uusintaan liittyen

Lineaarisen kalibroitiradan laitteistoa uusiessa tulisi ottaa seuraavia asioita huomioon. Kelkan liikkuvuuden tulisi olla sellainen, että myös ionisaatiokammioon perustuvia kookkaampia annosnopeusmittareita pystyttäisiin kalibroimaan siten, että tulos on toistettavissa. Käytännössä siis kelkan tulisi liikkua myös ylöspäin ja alaspäin. Kelkalle voisi antaa niin sanotun nollakorkeuden, jossa pystytään kalibroimaan muut mittarit. Vaihtoehtoisesti tulisi säteilykentän keilan korkeus olla osoitettu esimerkiksi laserien avulla, jotta laitteen tähtäyspiste pystytään kohdistamaan varmasti.

Säteilylähteen puoliintumisen vaikutus tulisi ottaa huomioon nykyistä tarkemmin varsinkin, jos vertaillaan kahden eri vuodenaikana tehdyn mittauksen tulosta. Voitaisiin toteuttaa esimerkiksi yhdistämällä Stukin kalibroitipisteiden Excel-laskurin tulos suoraan kelkkaa ohjaavaan logiikkaan, jolloin saavutettaisiin vuosittaisten etäisyyssietojen sijaan päivittäiset tiedot.

9.3 Säteilyn vertailumittarin käyttö

Tässä opinnäytetyössä on kerrottu, kuinka säteilyn vertailumittaria voidaan käyttää. Laitetta käyttäessä säteilyn vertailumittarina tulee ottaa huomioon, että laitteen jäljittelevyys (kalibrointikertoimet) on Stukin laboratorioon eikä TVO:n lineaariseen kalibrointirataan.

9.3.1 Kehitysehdotukset vertailumittarin käyttöön

Kehitysehdotuksena säteilyn vertailumittaria tulisi käyttää seuraamaan havaitaanko radan kalibrointipisteissä muutosta. Esimerkiksi vertaillaan TVO:n lineaarisen kalibrointiradan näyttämää, jossain kalibrointipisteessä akkreditoidussa laboratorioissa saatuun tulokseen. Jos havaitaan, että mittaustuloksissa lineaarisella kalibrointiradalla ja akkreditoidussa laboratorioissa on suuri ero, tulee ryhtyä toimenpiteisiin, joilla varmistetaan, että lineaarisen kalibrointiradan kalibrointipisteet ovat kohdallaan. Esimerkiksi pyytää Stukkia tarkastamaan mittauksin lineaarisen kalibrointiradan kalibrointipisteiden etäisyydet.

Jos jonkin Cs-137 säteilylähteen säteilykentän voimakkuus on tuntematon, voidaan säteilyn vertailumittarin avulla määrittää sen voimakkuus eri etäisyyksillä. Esimerkiksi teollisissa sovelluksissa, joissa on Cs-137 säteilylähde kuten pinnanmittaukset ja erilaiset vaa'at. Tietoa voitaisiin käyttää arvioimaan mahdollisia säteilyannoksia, joita tulee työskennellessä säteilylähteen läheisyydessä.

10 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää toimintatapoja lineaarisella kalibrointiradalla. Opinnäytetyössä testattiin eri kalibrointimenetelmiä, joiden avulla voidaan saada toistettava mittaustulos. Tekemällä lukuisia mittauksia pystyttiin arvioimaan eri toimintatapojen käytettävyyttä. 10 pisteen menetelmällä pystytään soveltamaan laajemmin ja tehokkaammin.

Työhön valittujen testien suorittaminen sujui hyvin, sillä laitteistot olivat entuudestaan tuttuja. Useat käynnit Stukin vastaavassa laboratoriossa auttoivat arvioimaan, minkälaisia menetelmiä ja laitteistoja voitaisiin soveltaa kehittäessä toimintaa TVO:n lineaarisella kalibroitiradalla. Työn aikana tuli myös tarkemmin tutustuttua testeissä käytettyjen annosnopeusmittarien käyttöön, toimintaan sekä tarkkuuteen. Vanhoja poistettujen annosnopeusmittarien jigejä pystyttiin hyödyntämään Ultradiac mittarien kalibroinneissa.

Opinnäytetyössä suoritettujen testien ansiosta oma osaaminen liittyen annosnopeusmittarien käyttöön parani. Lineaarisen kalibroitiradan ohjausliittymää käytettiin monipuolisemmin kuin normaalissa kalibroitikäytössä, jonka avulla sain arvokasta kokemustietoa sen heikkouksista ja vahvuuksista.

Työssä käytettyjä menetelmiä pystytään myös hyödyntämään lineaarisen kalibroitiradan kunnossapidon näkökulmasta tulevaisuudessa, kuhan mittaustuloksia saadaan enemmän. Havaittiin myös mitä asioita tulisi ottaa huomioon, jos lineaarista kalibroitirataa uusitaan.

Työn tuloksena saatiin lisäksi arvokasta mittaustietoa, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa. Mittaustiedon avulla voidaan verrata uusia mittaustietoja tässä opinnäytetyössä esitettyihin mittaustuloksiin.

LÄHTEET

- Ala-Jokimäki, A. (2020). *Kalibrointiradan ja karusellin laadunvarmistusohje*. Eurajoki: Olkidoc-tietokanta.
- Automation und Messtechnik GmbH. (1 2008). *Dose Rate Meter 6150AD / Automess*. Haettu 26.5.2021 osoitteesta <https://www.automess.de/en/products/productfamily-6150ad/dose-rate-meter-6150ad>
- CDC. (2015). *What is Radiation? Properties of Radioactive Isotopes*. Haettu 20.5.2021 osoitteesta <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/isotopes.html#halflife>.
- I.I. Suliman, B. Y. (2010). *Calibration of radiation protection area monitoring instruments in Sudan*. Haettu 24.5.2021 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448710001964>.
- IAEA. (2000). *Calibration of radiation protection monitoring instruments*. Wien: IAEA.
- ISO 4037-2:2019, *Radiological protection. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV* (2019). Suomen standardisoimisliitto. Haettu 7.6.2021 osoitteesta <https://online.sfs.fi/>
- Kata Safety Oy. (2021). DGM-1500 TURVA KÄYTTÖOHJE. Ylämylly.
- Katri Ojasalo, T. M. (2015). *Kehittämistyön menetelmät*. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Klemola, S. (2002). *Säteily ja sen havaitseminen*. Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- Mirion Technologies. (2 2018). *Ultraradiac -Plus personal radiation monitor*. Haettu 1.6.2021 osoitteesta <https://www.mirion.com/products/ultraradiac-plus-personal-radiation-monitor>
- Quality Knowhow Karjalainen Oy. (ei pvm). *Six Sigma*. Haettu 30.5.2021 osoitteesta <http://www.sixsigma.fi/index.php/fi/six-sigma/>
- Sisäasiainministeriö. (2008). *Kannettavien säteilymittarien laatu- ja tarkastusvaatimukset*. Helsinki: Haettu 26.5.2021 osoitteesta [Stuklex.fi](http://stuklex.fi).
- Säteilyturvakeskus. (2019). *Kalibrointitodistus MN/109c/19*. Helsinki: Säteilytoiminnan valvonta dosimetrialaboratorio.
- Säteilyturvakeskus. (2020). *Kalibrointitodistus MN/114/24*. Helsinki: Säteilytoiminnan valvonta dosimetrialaboratorio.

TVO. (2020). *Yhtiö*. Eurajoki: Haettu 28.5.2021 osoitteesta
<https://www.tvoy.fi/yhtio.html#>.

TVO. (ei pvm). *Säteilylähdekortisto*. Haettu 29.5.2021 osoitteesta
Säteilylähdekortisto.

Viishanke. (1992). *Kalibrontirata kokoonpano*. Rauma: Viishanke Oy.