



**IN-SITU -GAMMASPEKTROMETRIMITTAUSJÄRJESTELMÄN
KEHITTÄMINEN KÄYTÖSTÄPOISTOJÄTTEEN
KARAKTERISOINTIA JA VALVONNASTA VAPAUTUSTA
VARTEN**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2022

Santeri Vento

Työn tarkastajat: Professori, TkT Juhani Hyvärinen ja TkT Elina Hujala

Työn ohjaaja: FT Antti Rätty (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy)

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT Energiajärjestelmät
Energiatekniikka

Santeri Vento

In-Situ gammaspektrometrimittausjärjestelmän kehittämisen käytöstäpoistojätteen karakterisointia ja valvonnasta vapautusta varten

Energiatekniikan diplomityö
2022

133 sivua, 40 kuvaa, 17 taulukkoa, 15 liitettä

Työn tarkastajat: Professori, TkT Juhani Hyvärinen ja TkT Elina Hujala

Työn ohjaaja: FT Antti Rätty

Avainsanat: Gammaspektrometria, käytöstäpoisto, ydinjäte, tehokkuuskalibrointi, ISOCS, karakterisointi, valvonnasta vapautus

Ydinlaitoksen käytöstäpoistossa syntyy suuria määriä jätteitä, joista tulee määrittää jätteen aktiivisuus ja sen sisältämät nuklidit. Määrityksen perusteella aktivoituneet tai kontaminoituneet jätteet loppusijoitetaan ydinjätteenä ja puhtaat jätteet voidaan vapauttaa viranomaissääntelyn piiristä tavallisena jätteenä. Jätteiden sisältämien gammasäteilevien nuklidien aktiivisuus määritetään tavallisimmin gammaspektrometrian avulla.

Tässä diplomityössä tutkitut Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n kolme gammaspektrometrialaitteistoa ovat niin kutsuttuja ISOCS-laitteistoja, joiden detektorit on yhteensovitettu Mirion Technologiesin ISOCS™ -tehokkuuskalibrointiohjelmiston kanssa. Ohjelmistolla voidaan 3D-mallintaa yhteensovitettulla detektorilla suoritetun mittauksen geometria kokonaisuudessaan, jonka jälkeen luotua mallia käytetään mittauskohteen aktiivisuuden arviointiin. VTT on suunnitellut käyttävänsä ISOCS-laitteistoja käytöstä poistettavien FiR 1 -tutkimusreaktorin ja VTT:n entisen aktiivisten näytteiden käsittelylaboratorion purkuprojekteissa syntyvien jätteiden aktiivisuuksien mittaamiseen. Tämä työ tehtiin osana näiden ISOCS-laitteistojen Säteilyturvakeskukselle (STUK) selvitettävää pakollista soveltuvuusarviointia tähän käyttötarkoitukseen.

Työssä suoritettiin mittauskokeita tunnetuilla säteilylähteillä eri geometrioissa, sekä arvioitiin laajasti käytettyyn tehokkuuskalibrointimenetelmään, gammaspektrien analysointiohjelmaan, sekä yleisesti kenttäolosuhteissa suorittaviin In-Situ -mittauksiin liittyviä epävarmuustekijöitä. Tynnyrimittausmenetelmien kehityksen lisäksi työssä luotiin myös laaduntarkkailuohjelma, jolla voidaan varmistaa käytettävän mittauslaitteiston kunnossa olo ja mittauksen laadukas suoritus.

Tutkimuksen perusteella ISOCS-laitteistoilla voidaan määrittää aktiivisuus hyvällä tarkkuudella, kun mallinnettu ja todellinen mitattu geometria vastaavat hyvin toisiaan. Menetelmä todettiin kuitenkin hyvin herkäksi mallinuksen ja todellisen mittausgeometrian välisille epäsuhtaisuuksille ja sen todettiin vaativan käyttäjältään kokonaisvaltaista gammaspektrometrian ymmärrystä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Degree Program in Energy Technology

Santeri Vento

Development of In-Situ Gammasspectrometric Measurement System for Characterization and Clearance of Decommissioning Waste

Master's thesis

2022

133 pages, 40 figures, 17 tables and 15 appendices

Examiners: Professor D.Sc. (Tech.) Juhani Hyvärinen and D.Sc. (Tech.) Elina Hujala

Supervisor: D.Sc. Antti Rätty

Keywords: Gamma spectrometry, decommissioning, nuclear waste, efficiency calibration, ISOCS, characterization, clearance

During decommissioning of a nuclear facility large amounts of waste is generated, of which the activity and radionuclide contents must be determined. Based on the assessment activated or contaminated waste is sent to final repository as nuclear waste and clean waste can be cleared from regulatory control as conventional waste. The most common method for determining the activity and radionuclide contents of waste is using gamma spectrometry.

The three gammasspectrometric devices of VTT Technical Research Centre of Finland surveyed in this Master's thesis are so called ISOCS systems, whose detectors are compatible with ISOCS™ efficiency calibration software by Mirion Technologies. With the software it is possible to 3D-model the geometry of the measurement with the compatible detector in its entirety. After this the model is used to estimate the activity of the measured object. VTT has planned to use the ISOCS systems to assay the waste generated from the decommissioning projects of the FiR 1 reactor and VTT's former radioactive materials research laboratory. This thesis was done as a part of the mandatory suitability assessment of these ISOCS systems for their planned usage, which will be reported to Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK).

In this thesis measurements were done with radioactive sources with known activity in different geometries. Also, the uncertainty factors related to the used efficiency calibration method, used gamma spectrum analysis software and In-Situ measurements in general were assessed. In addition to the development of the measurement methods for barrel waste packages, a quality control program was created, which can be used to ensure the condition of the used measurement system and the qualified performance of the measurements.

It was concluded that the ISOCS systems can estimate the activity very accurately, when the correspondence between the modelled and the true measured geometry is good. However, the method was found to be prone to mismatches between the modelled and measured geometries, and it was concluded that the system requires comprehensive understanding of gamma spectrometry from its user.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Sisällysluettelo	4
Liiteluettelo	6
Symboli- ja lyhenneluettelo	7
1 Johdanto	11
2 Gammaspektrometria	14
2.1 Gammasäteilyn syntyminen	15
2.2 Gammasäteilyn vuorovaikutukset väliaineessa	17
2.3 Gammasäteilyn vaimeneminen.....	19
2.4 Puolijohdedetektorin toimintaperiaate.....	20
2.5 Gammaspektrin rakenne	22
2.6 Detektorin suorituskykyä kuvaavia parametreja	25
2.7 Gammaspektrometrilaitteiston muut komponentit	26
2.8 FiR 1 -laitosalueen gammaspektrometrilaitteistot.....	28
3 Aktiivisuuden määrittäminen analysointiohjelmistolla	31
3.1 Fotopiikin nettopinta-alan määrittäminen.....	34
3.2 Tehokkuuskalibrointi.....	37
3.3 Nuklidien tunnistaminen ja aktiivisuuden laskenta	41
3.4 MDA-arvojen määrittäminen	43
3.5 Genie2k:n tuloraportointi ja ajosekvenssit.....	44
4 FiR 1 -tutkimusreaktori ja sen gammaspektrometrinen käyttöympäristö	45
4.1 FiR 1 -tutkimusreaktorin rakenne.....	45
4.2 FiR 1 -reaktorin tärkeimmät nuklidit ja nuklidikirjasto.....	46
4.3 Käyttöympäristön vaikutus nuklidikirjaston laskenta-asetuksiin	49
4.4 200 litran standarditynnyri mittauskohteena	51
5 Aktiivisuustuloksiin ja valittaviin mittausmenetelmiin vaikuttavia muita asioita	53
5.1 Detektorien karakterisoinnin ja energioresoluution tarkkuus.....	54
5.2 Detektorin suojaaminen kollimoinnilla ja mittauskohteen mittausetäisyys	56
5.3 Homogeeninen ISOCS-malli ja sen käytön epävarmuustekijät	58
5.4 Mittauspaikan taustasäteilyn vaikutus aktiivisuustuloksiin.....	60
5.5 Jätteen valvonnasta vapautus ja erittäin matala-aktiiviset mittauskohteet	62
5.6 Voimakkaasti säteilevät mittauskohteet ja kuollut aika	64

6 Suoritetut mittauskokeet	66
6.1 Mittaus 1: ISOXSRCE-testilähteet.....	69
6.1.1 ISOXSRCE-testilähteet: Mittausjärjestelyt ja analysointimenetelmä.....	71
6.1.2 ISOXSRCE-testilähteet: Mittaustulokset.....	71
6.2 Mittaus 2: Eu-152 standardipistelähde sellaisenaan mitattuna.....	73
6.2.1 Eu-152 -pistelähdemittaus: Mittausmenetelmät ja ISOCS-geometriamallit ..	73
6.2.2 Eu-152 -pistelähdemittaus: Mittaustulokset.....	74
6.3 Mittaus 3: Homogeeninen tynnyri (I-131 -pitoinen vesi).....	75
6.3.1 I-131 -vesitynnyri: Mittausmenetelmät ja ISOCS-geometriamallit ..	76
6.3.2 I-131 -vesitynnyri: Mittaustulokset.....	78
6.4 Mittaus 4: NPL-interkalibrointitynnyri	84
6.4.1 NPL-tynnyri: Mittausmenetelmät ja ISOCS-geometriamallit.....	85
6.4.2 NPL-tynnyri: Mittaustulokset.....	87
6.5 Mittaus 5: Pistemäinen säteilylähde tynnyrissä.....	89
6.5.1 Pistelähteen vaikutus käytettäessä homogeenista ISOCS-mallia	92
6.5.2 Tynnyrin pyörittämisen vaikutus homogeenisella ISOCS-mallilla.....	96
7 Laskennallisia selvityksiä aktiivisuustuloksiin vaikuttavista tekijöistä	99
7.1 Tynnyrimalliin asetetun täyttöasteen vaikutus aktiivisuustulokseen.....	99
7.2 Tynnyrin virheellisen etäisyyden vaikutus aktiivisuustulokseen	101
7.3 Taustavähennyksen vaikutus mittaustulokseen	103
7.3.1 Co-60:n vaikutus prosentuaalinen vaikutus taustasäteilyssä.....	103
7.3.2 Miiluhallin Co-60 -taustasäteilytason vaikutus vapautusmittauksiin.....	105
7.3.3 Taustavähennyksen tekemättä jättämisen reunaehdot.....	107
8 Laaduntarkkailu	109
8.1 Detektorin ja laitteiston kunnan tarkastus	110
8.1.1 Detektorin karakterisoinnin tarkastaminen.....	111
8.1.2 Energiaresoluution tarkistaminen	112
8.1.3 Energiakalibroinnin tarkistaminen	112
8.2 Taustasäteilyn seuraaminen ja mittauspaikan vaikutus.....	113
8.3 Mittausgeometrian varmistaminen	114
8.4 Epähomogeenisen aktiivisuusjakauman tunnistaminen	115
9 Johtopäätökset ja yhteenveto	119
Lähteet	127
Liitteet	

LIITELUETTELO

Liite A. Tutkittujen nuklidien tärkeimmät gammasäteilyominaisuudet

Liite B. Gammasäteilyn vaimeneminen eri materiaaleissa

Liite C. Tutkittujen gammaspektrometrilaitteistojen tärkeimmät spesifikaatiot ja muut tiedot

Liite D. Käytetyt ohjelmistot

Liite E. Käytetty Genie2k -analysointiprosessi

Liite F. Esimerkki Geometry Composer -mallinteesta

Liite G. Esimerkki Genie2k -analysointiraportista

Liite H. Käytetty nuklidikirjasto

Liite I. MDA-arvojen määrittäminen Genie2k-ohjelmalla

Liite J. Mittauskokeissa käytetyt säteilylähteet

Liite K. Mittauskoe 2 (Eu-152 -pistelähde): Taulukoidut mittaustulokset

Liite L. Mittauskoe 3 (Homogeeninen I-131 -vesitynnyri): Taulukoidut mittaustulokset

Liite M. Mittauskoe 4 (NPL-tynnyri): Taulukoidut mittaustulokset

Liite N. Mittauskoe 5 (Pistelähde tynnyrissä): Taulukoidut mittaustulokset

Liite O. Taustasäteilyn laskennallinen vaikutus aktiivisuustulokseen

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Kreikkalaiset

γ	Gammakvantin intensiteetti	[-, %]
ε	Tehokkuus	[-, %]
μ	Matkavaimennuskerroin	[1/mm]
ρ	Tiheys	[g/cm ³]

Roomalaiset

<i>A</i>	Aktiivisuus	[Bq]
<i>BCR</i>	Tausta-alueen pulssinkeräysnopeus	[cps]
<i>C</i>	Aktiivisuuspitoisuus	[Bq/g; Bq/kg]
<i>CR</i>	Fotopiikin pulssinkeräysnopeus	[cps; cph]
<i>d</i>	Halkaisija	[mm]
<i>FH</i>	Jätepakkauksen mallinnettu täyttökorkeus	[mm]
<i>HVL</i>	Puoliintumispaksuus	[mm]
<i>h</i>	Korkeus	[mm]
<i>I</i>	Intensiteettitaso	[-; %]
<i>k</i>	Todennäköisyyskerroin	[-]
<i>LT</i>	Laitteiston aktiivinen toiminta-aika	[s]
<i>l</i>	Pituus	[mm]
<i>MDA</i>	Pienin havaittava aktiivisuus	[Bq]
<i>MDC</i>	Pienin havaittava aktiivisuuspitoisuus	[Bq/g; Bq/kg]
<i>m</i>	Massa	[g; kg]
<i>RE</i>	Suhteellinen virhe	[-; %]
<i>r</i>	Säde, etäisyys radiaalisuunnassa	[mm]

<i>S</i>	Fotopiikin nettopinta-ala (pulsseina)	[-]
<i>SD</i>	Detektorin ja mittauskohteen etäisyys	[mm]
<i>U</i>	Epävarmuus	[Bq; Bq/g; %]
<i>WM</i>	Painotettu keskiarvoaktiivisuus	[Bq]
<i>x</i>	Väliaineen paksuus	[mm]
<i>Z</i>	Järjestysluku	[-]

Alaindeksit

0	Alussa
Comb	Combined, yhdistetty
Genie	Genie2k-ohjelman laskema arvo
i	Indeksinumero
Lähde	Säteilylähde
sis	Sisältö

Lyhenteet

ADC	Analog to Digital Converter
BCNT	Boron Neutron Capture Therapy
BCR	Background Count Rate
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BT	Betonitynnyri
cph	Counts per hour
cps	Counts per second
CR	Count Rate
DTM	Difficult-To-Measure
ETM	Easy-To-Measure

FH	Filling Height
FWHM	Full Width at Half Maximum
Genie2k	Genie™ 2000
HETG	Heterogeeninen
HOMG	Homogeeninen
HPGe	High-Purity Germanium
HVL	Half-Value Layer
ISO	International Organization for Standardization
ISOCS	In-Situ Object Counting System
IUE	ISOCS Uncertainty Estimator
LT	Live Time
LTC	Live Time Correction
MCA	Multichannel Analyzer
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MDA	Minimum Detectable Activity
MDC	Minimum Detectable Concentration
MT	Metallitynnyri
NDA	Non-Destructive Assay
NPL	National Physical Laboratory
OK3	Otakaari 3 ydinmateriaalilaboratorio
RE	Relative Error
rpm	Rounds per minute
SD	Source-Detector distance
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten
STUK	Säteilyturvakeskus
TCSGS	Transmission Corrected Segmental Gamma Scanner

TRIGA	Training, Research, Isotopes, General Atomics
UN	United Nations
WM	Weighted Mean Activity
YVL	Ydinturvallisuusohje

1 JOHDANTO

Vuonna 1962 Espoon Otaniemeen rakennetun FiR 1 -tutkimusreaktorin käyttö lopetettiin 30. kesäkuuta 2015, kun reaktori ajettiin viimeisen kerran alas. Laitoksen luvanhaltija VTT on tämän jälkeen jatkanut lupaprosessia ja valmistelevien toimenpiteiden suorittamista reaktorin purkamista varten, jonka suunnitellaan alkavan vuonna 2023. Tavallisten ydinvoimalaitosten tapaan reaktorin rakennemateriaalit ovat altistuneet neutronivuolle ja sitä kautta aktivoitumiselle koko laitoksen käyttöhistorian ajan. Reaktorin purkamisesta syntyy näin ollen suuria määriä radioaktiivisia jätteitä, joiden turvalliseen käsittelyyn ja loppusijoittamiseen liittyy suuria määriä Suomen ydinturvallisuudesta vastaavan valvovan viranomaisen STUK:n (Säteilyturvakeskus) asettamia ydinenergi lakiin pohjautuvia määräyksiä.

STUK:n laatima ohje *YVL (Ydinturvallisuusohje) D.4: Matala- ja keskiaktiivisen ydinjätteen käsittely ja ydinlaitoksen käytöstäpoisto* (STUK 2019b) määrää, että radioaktiiviseksi luokitelluista ydinvoimalaitoksen jätteistä on selvitettävä niiden radionuklidikoostumus ja nuklidikohtainen aktiivisuuspitoisuus. Tavallisimmin näiden selvittämiseen käytetään jätteen gammaspektrometrisia mittauksia, jossa mitataan ilmaisimen eli detektorin avulla mittaustuloksen radioaktiivisten nuklidien lähettämiä gammasäteitä. Gammasäteet ovat energioiltaan nuklidikohtaisia ja diskreettejä, mikä mahdollistaa nuklidikohtaisen aktiivisuuden selvittämisen mittauksen perusteella. Menetelmää voidaan täydentää tarkemmilla näytteenotoilla ja laskennallisilla menetelmillä, joiden avulla voidaan mittaustuloksesta määrittää myös gammaspektrometrisilla mittauksilla huonosti havaittavien nuklidien aktiivisuuksia.

FiR 1 -tutkimusreaktorin purkamisesta syntyvien aktiivisten purkujätteiden gammaspektrometriin karakterisointimittauksiin on suunniteltu käytettäväksi Mirion Technologiesin ja siihen vuonna 2016 fuusioituneen Canberra Industriesin valmistamia HPGe-detektoreja (High-Purity Germanium). Detektorien keräämien mittaustulosten tehokkuuskalibrointi suoritetaan Mirionin Technologiesin *ISOCSTTM* (In-Situ Object Counting System) *Calibration Software* -ohjelmistolla, jota käytetään yhteistoiminnassa Mirion Technologiesin *GenieTM 2000* (lyh. Genie2k) -gammaspektrianalysointiohjelmiston kanssa.

ISOCS-ohjelmistolla suorittavassa tehokkuuskalibroinnissa mittauskohteen aktiivisuuden määrittämiseen käytetään käyttäjän itse tekemiä tietokonemallinnuksia todellisista mittauslaitteista, joihin voidaan asettaa muun muassa mitattavan kohteen muoto, kohteen etäisyys mittalaitteistosta ja sen tiheysominaisuudet. Mallinnuksen perusteella ohjelma luo arvion siitä, kuinka suurella todennäköisyydellä mittauskohteen eri osista lähtevät, energioiltaan erisuuret gammasäteet pääsevät detektorille tuottamaan havainnon. Kun nämä tehokkuuskalibrointilaskut yhdistetään ISOCS-ohjelmiston kanssa yhteensovitettulla detektorilla havaittuihin pulssihavaintoihin ja nuklidifysiikkadataan, voidaan analysointiohjelmalla laskea arvio mittauskohteen sisältämistä nuklidikohtaisista aktiivisuuksista. (Mirion Technologies 2017a, 1) Tämä niin kutsuttu ISOCS-tehokkuuskalibrointi mahdollistaa In-Situ -gamma-spektrometrian, jossa voidaan mitata perinteisten pienien näytteiden lisäksi myös erittäin suuria mittauskohteita kokonaisuudessaan, ja mittauksia voidaan suorittaa laboratoriotilojen lisäksi käyttöedellytyksien täytyessä tarvittaessa myös kenttäolosuhteissa. Menetelmän käyttöpotentiaali on erittäin laaja ja tietokonepohjainen analysointi on perinteisiin laboratoriomenetelmiin nähden kustannustehokkaampaa.

STUK:n ohje *YVL C.6 Ydinlaitoksen säteilymittaukset* (STUK 2019a, 12) määrää, että ydinlaitoksella käytettävästä radioaktiivisen jätteen mittausjärjestelmästä on laadittava soveltuvuusarvio STUK:lle, jolla osoitetaan käytettyjen laitteistojen vastaavan mitoitusarvojaan ja täyttävän niille asetetut vaatimukset. Tässä diplomityössä käydään läpi VTT:n käytöstäpoistojätteen mittaamiseen tarkoitetun In-Situ -mittausjärjestelmän kehittämisprosessia, sekä sen arvioidaan kykyä määrittää erityyppisten mittauskohteiden aktiivisuuksia vaadittavalla tarkkuudella. Työ toimii samalla pohjana VTT:n viranomaiselle toimitettavalle soveltuvuusarviolle. Mittausjärjestelmään kuuluu kolme erityyppistä gamma-spektrometrilaitteistoa, joista yksi on tarkoitettu päätoimisesti loppusijoitukseen menevän aktiivisen jätteen karakterisointiin, toinen puhtaan jätteen valvonnasta vapautukseen, kolmannen laitteen toimiessa varalaitteena.

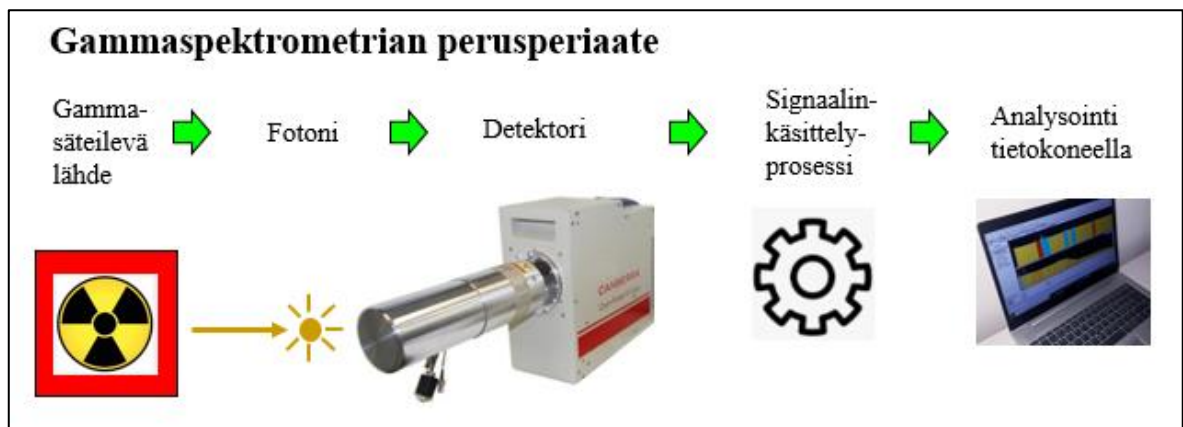
Työn tavoitteena on selvittää ISOCS-tehokkuuskalibrointia käyttävien gamma-spektrometrimittausten potentiaalia tutkimusreaktorin purkuprojektissa syntyvien radioaktiivisen jätteiden aktiivisuuksien määrittämiseen riittävällä tarkkuudella. Selvitys tulee olla tehty siten, että gamma-spektrometrimittaustekniikan teoria, sekä käytettäviin mittalaitteisiin, FiR 1:n gamma-spektrometriseen käyttöympäristöön ja nuklidi-inventaariin,

jätteiden ominaisuuksiin ja käytettävään jätepakkaustapaan, käytettävään Genie2k -analysointiohjelmistoon ja erityisesti ISOCS-tehokkuuskalibrointiin liittyvät erityispiirteet ja epävarmuudet on huomioitu. Tutkimukseen käytettiin sekä fyysisiä mittauskokeita, että laskennallisia selvityksiä. Työssä huomioidaan myös FiR 1 -reaktorin kanssa samoihin aikoihin käytöstä poistettavan Otakaari 3 -ydinmateriaalilaboratorion (lyh. OK3) purkuprojektissa syntyviä jätteitä, joille tullaan myös suorittamaan vastaavanlaisia aktiivisuusmittauksia tässä työssä tutkittavilla gammaspektrometrialaitteistoilla. Työn tavoitteena on myös kehittää Genie2k -ohjelmistolle gammaspektrien analysointiin käytettävä analysointiprosessi ja nuklidikirjasto, jotka optimoidaan vastaamaan käytettyjen mittalaitteiden, mittauskohteiden ja mittaustapojen asettamiin vaatimuksiin. Lisäksi työn tavoitteena on myös kehittää ohjeessa YVL C.6 (STUK 2019a, 15) esitetyt vaatimukset täyttävät laaduntarkkailumenetelmät, joilla voidaan varmistaa käytettävän mittauslaitteiston ja -olosuhteiden kunnossa olo, sekä mittauksen oikeanlainen suoritus. Työn viimeisenä tavoitteena on määrittää mahdolliset lisätutkimuksien tarpeet, jotka valittaville mittaustavoille täytyy selvittää viranomaiselle lähetettävää soveltuvuusarviota varten.

Menetelmien kehittämisessä hyödynnettiin standardia ISO 19017:2017 *Guidance for Gammaspectrometry Measurement of Radioactive Waste* (ISO 2017), jossa käydään läpi gammaspektrometriisiin mittauksiin liittyviä epävarmuustekijöitä, sekä esitetään periaatteita ja suosituksia johdonmukaisen mittaustavan ja laaduntarkkailuohjelman luomiselle. VTT:n lisäksi myös FiR 1 -reaktorin aktiivisten rakenteiden purun ja OK3-materiaalilaboratorion purkuprojektin pääurakoitsijana toimiva, sekä purkuprojekteista syntyvät loppusijoitettavat radioaktiiviset jätteet Loviisan voimalaitokselle vastaanottava Fortum Power & Heat Oy osallistui aktiivisesti mittausjärjestelmän, sekä tätä työtä ja viranomaiselle toimitettavaa soveltuvuusarviota varten tehtävien mittauskokeiden ja selvitysten suunnitteluun.

2 GAMMASPEKTROMETRIA

Gammaspektrometriaa käytetään radioaktiivisia aineita sisältävien mittauskohteiden nuklidikoostumuksen ja aktiivisuuden määrittämistä varten. Menetelmä perustuu siihen, että jokaisella radionuklidilla on itselleen ominaiset gammasäteilyn energiat, joiden avulla mitattavan kohteen sisältämät radionuklidit ja niiden aktiivisuudet voidaan määrittää. Gammaspektrometrisessa mittauksessa mitattavasta radioaktiivisesta kohteesta emittoituvat gammasäteet osuvat mittalaitteen ilmaisimeen eli detektoriin. Detektorimateriaalissa tapahtuvista fysikaalisista vuorovaikutusreaktioista syntyy sähköisiä signaaleja, jotka voidaan signaalinkäsittelyelektroniikan avulla koota gammaenergia-alueilla liikkuvien fotonien energiajakaumaksi, eli gammaspektriiksi. Mitatusta gammaspektristä voidaan määrittää mitatun kohteen nuklidikoostumus ja nuklidikohtaiset aktiivisuudet analysointisovelluksen avulla. (Ikäheimonen et al. 2008, 139-143) Gammasäteilyn peruseriaatetta on havainnollistettu kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Gammaspektrometrian peruseriaate. Kuvan detektori on Canberra Industriesin valmistama puolijohdedetektori. (Canberra Industries 2017a, 1)

Gammasäteily soveltuu erinomaisesti mitattavaksi ominaisuudeksi, sillä sen fysikaaliset ominaisuudet tunnetaan hyvin ja sitä emittoivat erittäin suuri osa radioaktiivisista aineista. Lisäksi gammasäteily on useimmiten tarpeeksi läpitunkevaa päästäkseen tarvittaessa mahdollisten suojakerrostenkin läpi detektorille tuottamaan havaintopulssin. Gammaspektrometrinen mittaus on NDA-analyysimenetelmä (Nondestructive Assay), eli näytteen tai mittauskohteen nuklidikoostumus on mahdollista selvittää mittauksella ilman,

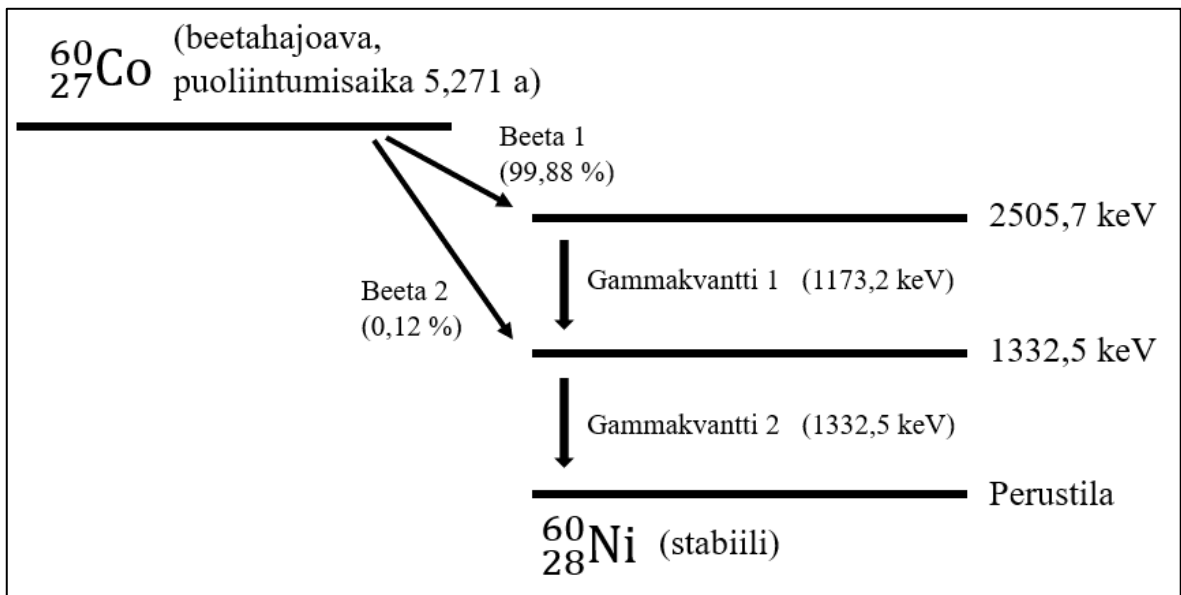
että sitä täytyisi hajottaa, vaan mitattava kohde voi olla esimerkiksi säilytyspakkauksessaan mittaustutkimuksen ajan. (Bruce 2017, 6) Tämä mahdollistaa radioaktiivisten jätteiden turvallisemman käsittelyn ja on usein myös hyvin kustannustehokasta esimerkiksi ainetta rikkoviin, mittaushetkestä otettujen näytteen laboratorioanalyysiin verrattuna.

Tässä kappaleessa käydään läpi gammasäteilyn syntymisperiaate, gammasäteiden ja väliaineen väliset tärkeimmät vuorovaikutusmekanismit, sekä tämän työn keskeisimpänä teknologiana käytettävien puolijohdedetektorien toimintaperiaatteet. Lisäksi käydään läpi detektoreilla mitattavien gammaspektrien tulkinnan perusteita ja tutustutaan lyhyesti tässä työssä tutkittaviin gammaspektrometrilaitteistoihin.

2.1 Gammasäteilyn syntyminen

Gammasäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota syntyy, kun korkeaenergisemmässä ja epästabiilissa viritystilassa oleva nuklidi purkautuu alemmalle energiatasolle, emittoiden sivutuotteena sähkömagneettisen gammahiukkasen, fotonin. Viritystila syntyy tavallisesti esimerkiksi radioaktiivisen hajoamisreaktion kautta. Yksittäisellä nuklidilla voi olla useita viritystiloja, jotka purkautuvat asteittain alemmille energiatasolle, kunnes nuklidi saavuttaa alimman energiataason, perustilan. (Gilmore 2008, 4-9) Viritystilan purkautuessa emittoituvaa, energialtaan tietyn suuruista fonia kutsutaan gammakvantiksi. Radioisotoopeilla on omat yksilölliset gammakvanttinsa, joiden energioiden tunnistukseen ja kvantifiointiin gammaspektrometriset mittaukset perustuvat. (Ikäheimonen et al. 2008, 139-140)

Alla kuvassa 2.2 on esitetty esimerkkinä ydinlaitoksilla erittäin tyypillisesti havaittavan, koboltin beetahajoavan isotoopin Co-60:n hajoamiskaavio, josta nähdään hajoamisreaktiossa syntyvän tytärytimen Ni-60:n viritystilojen purkautumisperiaate.



Kuva 2.2. Co-60:n hajoamiskaavio (Mukaiillen lähdeä Gilmore 2008, 5).

Kuvasta 2.2 nähdään, että kun Co-60 hajoaa, syntyvä tytärydin Ni-60 voi päätyä kahteen erisuuruiseen viritystilaan. Stabiiliin perustilaan pyrkiessään Ni-60 purkaa nämä viritystilat ja emittoi fotonin, jolloin gammaspektrometrilla on mahdollista havaita 1173,2 keV ja 1332,5 keV energioita.

Tämän työn gammaspektrometrinen käyttöympäristön, purettavan FiR 1 -tutkimusreaktorin, tärkeimmät radionuklidit ovat Co-60, Cs-137 ja Eu-152. Alla olevaan taulukkoon 2.1 on listattu näiden nuklidien puoliintumisajat ja hajoamismuodot, sekä gammaspektrometrian kannalta tärkeimmät ominaisuudet, gammakvanttien energiat ja intensiteetit. Gammakvantin intensiteetillä tarkoitetaan todennäköisyyttä, jolla gammakvantti emittoituu yhtä emänuklidin hajoamisreaktiota kohti (Gilmore 2008, 370). Gammakvantin suurempi intensiteetti kasvattaa näin kyseisen energian havaitsemisen todennäköisyyttä. Taulukosta 2.1 tulee huomioida, että Eu-152:lla on yli 100 tunnettua gammakvanttia, joista vain korkeaintensiteettisimmät on listattu alle. Nämä kolme nuklidia muodostavat tämän työn kannalta tärkeimmän gammasäteiden energia-alueen noin välille 100–1500 keV. Kaikki tässä työssä käytettävä nuklididata on otettu standardin ISO 19017:2107 suosituksen mukaisesti kansainvälisen standardointijärjestö BIPM:n (Bureau International des Poids et Mesures) koostamasta nukliditietokannasta (Bé et al. 2004-2016). Kaikkien tässä työssä tutkittavien radionuklidien gammasäteilyominaisuudet ovat taulukoituna liitteessä A.

Taulukko 2.1. FiR 1 tutkimusreaktorin tärkeimmät radionuklidit ja niiden yleisimpiä gammakvantteja (Bé et al. 2004-2016).

Nuklidi	Puoliintumis- aika [a]	Gammakvantin energia [keV]	Gammakvantin intensiteetti [%]
Co-60	5,271	1173,2	99,85
		1332,5	100,00
Cs-137	30,05	661,7	84,99
Eu-152	13,522	121,8	28,41
		244,7	7,55
		344,3	26,59
		411,1	2,24
		444,0	3,12
		778,9	12,97
		867,4	4,24
		964,1	14,50
		1085,8	10,13
		1112,1	13,41
		1408,0	20,85

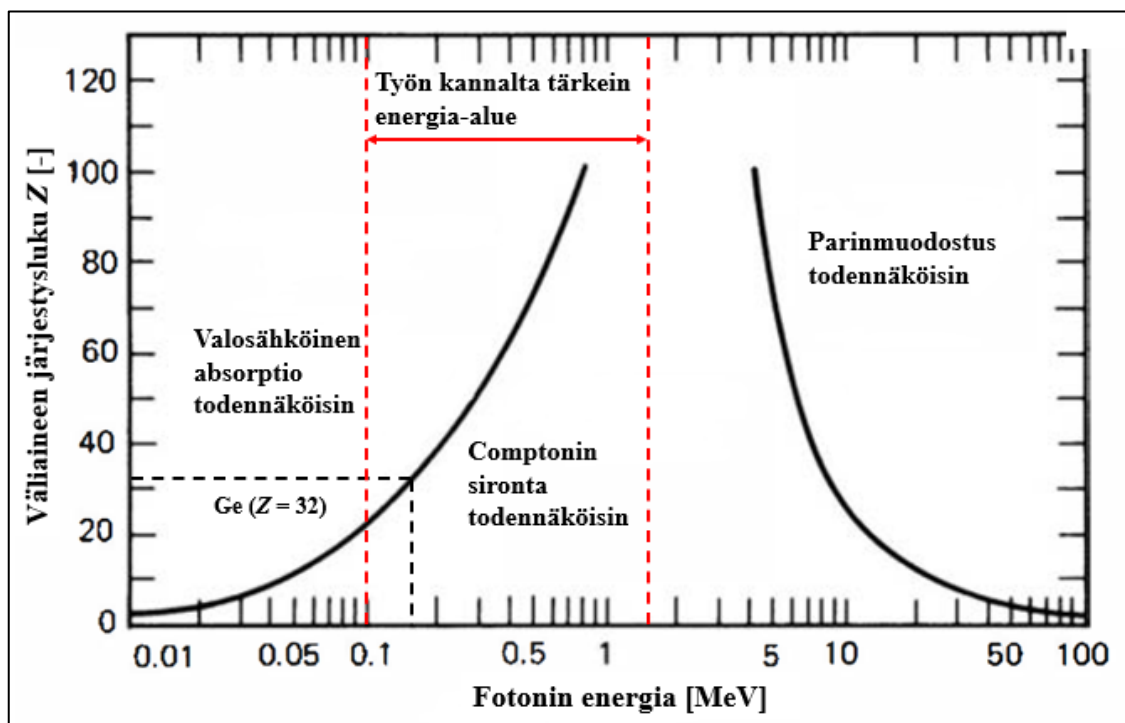
Gammaspektrometrisissa mittauksissa tulee huomioida, että mittauksessa saatetaan havaita myös muunlaista sähkömagneettista säteilyä kuin gammakvanttien lähettämää gammasäteilyä, eikä mittalaitteen detektori kykene erottamaan näitä erityyppisiä säteilylajeja toisistaan. Esimerkiksi matalalla energia-alueella havaitaan paljon erilaisia röntgensäteitä, jotka voivat hankaloittaa gammasäteistä johtuvien havaintojen tekemistä. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitellä näitä gammaspektrometrian sivuilmiöitä tarkemmin.

2.2 Gammasäteilyn vuorovaikutukset väliaineessa

Kun gammasäteilevän lähteen emittoimat fotonit kulkevat väliaineessa, kuten esimerkiksi ilmassa, betonissa tai gammaspektrometrisen mittauksen yhteydessä detektorin kidemateriaalissa, fotoneille aiheutuu jatkuvasti erilaisia luonnollisia vuorovaikutusreaktioita. Näissä vuorovaikutuksissa fotonin energia siirtyy osittain tai kokonaan väliaineessa oleville elektroneille. Gammasäteilyn mittaaminen perustuu siihen, että osa mittauskohteen lähettämistä fotoneista osuu gammaspektrometrin tarkoitukseen optimoituun detektorimateriaaliin, jossa mittauksen aikana tapahtuvista vuorovaikutusreaktioista voidaan pystyä jäljittämään mittauskohteen sisältämiä radionuklideja ja aktiivisuutta. (Gilmore 2008, 25-26)

Tärkeimmät väliaineen ja gammasäteiden väliset vuorovaikutusmekanismit ovat valosähköinen absorptio, Comptonin sironta ja parinmuodostus. Näistä valosähköisessä absorptiossa ja parinmuodostuksessa gammasäteilevästä lähteestä emittoituneen fotonin energia voi absorboitua kokonaisuudessaan detektorin kideateriaaliin, joka mikä on ideaalitalanne alkuperäisen gammasäteen energian jäljittämistä varten. Reaktiota, jossa gammasäteen koko energia absorboituu kideateriaaliin, kutsutaan kokonaisabsorptioksi. Comptonin sironnassa yksittäisessä vuorovaikutusreaktiossa absorboituvan energia määrä puolestaan vaihtelee hyvin voimakkaasti, jolloin alkuperäisen fotonin energian jäljittäminen on vaikeaa. (Knoll 2010, 47-50); Gilmore 2008, 26-29)

Fotonin ja väliaineen välillä tapahtuva vuorovaikutusmekanismi on riippuvainen fotonin energiasta ja väliaineen materiaalista. Gammaspektrometrinen mittausten kannalta on edullista, kun detektorimateriaalissa tapahtuu mahdollisimman paljon kokonaisabsorptioita suhteessa vajaisiin absorptioihin nähden, jotta mittauksesta voidaan erottaa tarkemmin nuklidin ja aktiivisuusjäljityksen kannalta tärkeät havainnot. (Gilmore 2008, 39) Kolmen tärkeimmän vuorovaikutusmekanismin tapahtumistodennäköisyyden riippuvuus väliaineen järjestysluvusta Z ja fotonin energiasta on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Väliaineen ja fotonien välillä tapahtuvien vuorovaikutusreaktioiden todennäköisyys riippuu väliaineen järjestysluvusta ja fotonien energioista (Muokattu lähteestä Knoll 2010, 51).

Kuvasta 2.3 nähdään, että valosähköinen ilmiö on hallitsevin vuorovaikutusmekanismi matalilla fotonin energioilla, Comptonin sironta keskisuurilla energioilla ja parinmuodostus korkeilla energioilla. Fotonien alkuperäisten energioiden jäljitettävyyden kannalta edullisimman valosähköisen absorptio osuus vuorovaikutusreaktioista pienenee fotonin energian kasvaessa, Kuvasta nähdään, että tämän työn kannalta tärkeimmällä energia-alueella gammaspektrometrian kannalta huono Comptonin sironta on hallitseva vuorovaikutusmekanismi. Lisäksi nähdään, että suuremmalla järjestysluvulla Z työn kannalta tärkeimmällä energia-alueella valosähköisten absorptioiden todennäköisyys kasvaa Comptonin sirontoihin verrattuna.

Detektorimateriaalissa tapahtuvien kokonaisabsorptioiden määrään vaikuttaa ratkaisevasti myös detektorin koko. Suuremmassa detektorissa fotoneille ehtii tapahtua enemmän peräkkäisiä vuorovaikutusreaktioita, jotka tapahtuvat kuitenkin niin nopeasti, että ne rekisteröityvät yhdeksi tapahtumaksi. Näin myös Comptonin sironnasta voi syntyä kokonaisabsorptio, mikäli niitä tapahtuu vain riittävän monta peräjälkeen ja koko alkuperäisen fotonin energia pääsee absorboitumaan detektorikiteeseen. (Gilmore 2008, 30-32)

2.3 Gammasäteilyn vaimeneminen

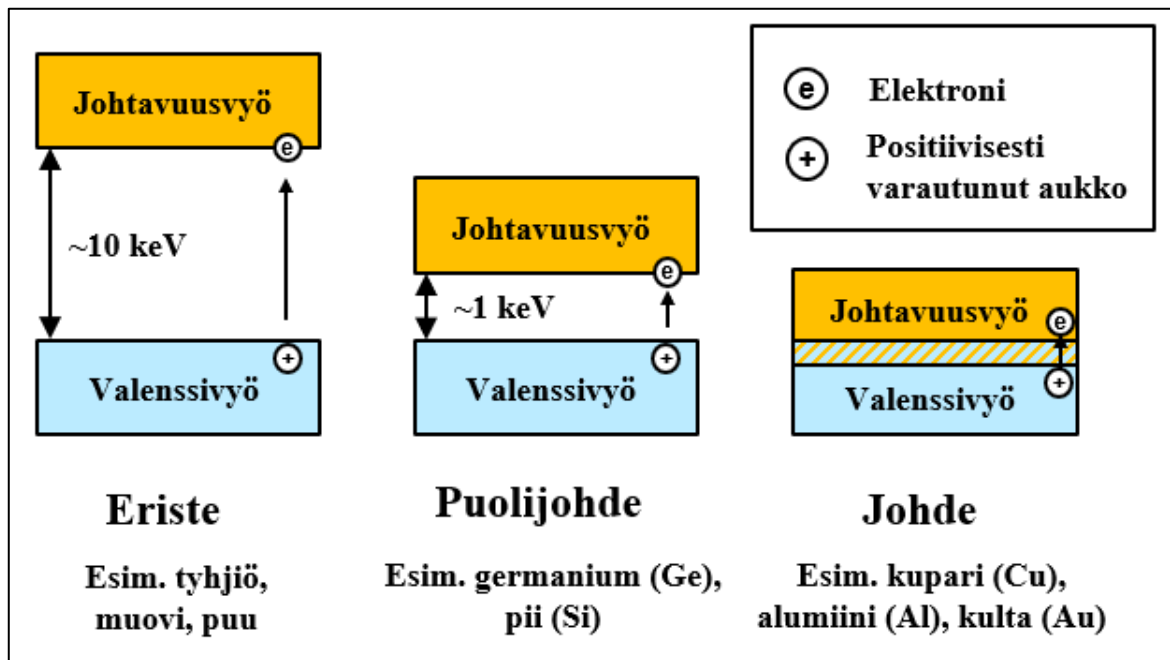
Säteilylähteestä tulevan gammasäteilyn intensiteetti heikkenee sen matkatessa väliaineessa, kun fotoneille tapahtuu valosähköisiä absorptiota, Comptonin sirontoja ja parinmuodostusreaktioita (Burnham 2001, 190). Gammaspektrometristen mittausten kannalta gammasäteilyn heikkenemisen fysiikka on tärkeä ymmärtää, sillä osa mittauskohteen emittoimista gammafotoneista voi absorboitua jo mittauskohteen koostumuksen sisällä. Tämä johtaa mittauskohteen sisäosista peräisin olevan gammasäteilyn heikentymiseen ja vaikuttaa suoraan detektorin mittaamaan vasteeseen. Gammasäteilyn vaimeneminen on sitä voimakkaampaa, mitä tiheämpää absorboiva väliaine on ja mitä matalaenergisempi gammafotoni on. Gammasäteilyn väliaineessa vaimenemisen kuvaamiseen käytetään usein puoliintumispaksuutta (Half-Value Layer), joka tarkoittaa väliaineen paksuutta, jonka läpi mentyään alkuperäisen gammasäteilyn intensiteetti on pudonnut puoleen alkuperäisestä. (Burnham 2001, 189-190) Gammasäteilyn puoliintumispaksuuskäyrästä eri materiaaleille energian funktiona on esitetty liitteessä B.

Gammasäteilyn vaimenemiseen vaikuttaa myös etäisyyden neliölaki (Inverse Square Law), jonka mukaan pistemäisen radioaktiivisen lähteen intensiteetti on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Ilmiö johtuu siitä, että gammasäteilevä lähde lähettää fotoneita tasaisesti eri suuntiin. Tällöin gammasäteen detektoriin osumisen todennäköisyys kasvaa huomattavasti lyhyemmältä etäisyydeltä mitatessa. Suuremmalla gammasäteitä lähettävällä tilavuudella tämäntyyppisen vaimennuksen vaikutus pienenee. (Burnham 2001, 182-183)

2.4 Puolijohdedetektorin toimintaperiaate

Detektorimateriaalissa tapahtuvat gammasäteiden absorptioiden synnyttämät varaukset kerätään talteen syöttämällä sähkövirtaa detektorikidemateriaaliin. Tämän vuoksi gammaspektrometrin detektorimateriaalilla täytyy olla hyvien absorptio-ominaisuuksien lisäksi myös sopivat sähköiset ominaisuudet. Yleisimmin tähän tarkoitukseen käytetään puolijohdemateriaaleja. (Gilmore 2008, 39-40)

Puolijohdedetektoreiden toiminta perustuu elektronien liikkeeseen kiinteässä väliaineessa, jossa elektroni siirtyy atomin valenssivyöltä johtavuusvyölle. Elektronit voivat saada energian näihin siirtymiin ulkoisesta lähteistä, gammaspektrometrian tapauksessa detektorimateriaaliin absorboituneiden gammafotonien energiasta. Elektronin valenssivyöltä johtavuusvyölle siirtymiseen vaadittava energia riippuu väliaineen materiaalista, esimerkiksi eristemateriaaleilla siirtymiin vaaditaan suhteessa enemmän energiaa, kun taas johdemateriaaleilla elektronit pääsevät siirtymään vapaasti vyöltä toiselle. Puolijohdemateriaalit soveltuvat gammasäteiden aiheuttamien elektronisiirtymien havaitsemiseen erinomaisesti, sillä gammasäteet pystyvät tuottamaan riittävästi elektronien siirtymiä havaintojen tekemiseksi, mutta gammasäteiden aiheuttamat siirtymät kyetään silti erottamaan riittävän tarkasti esimerkiksi matalaenergisestä lämpöliikkeen aiheuttamista siirtymistä. (Gilmore 2008, 40) Elektronien valenssivyöltä johtavuusvyölle siirtymiseen vaadittavaa energiaa eri materiaalityypeille on havainnollistettu kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Elektronin valenssivyöltä johtavuusvyölle siirtymiseen vaadittavan energian riippuvuus materiaalityypistä. Eriseillä siirtymiin tarvitaan enemmän energiaa, mikä johtaa vähäisiin siirtymämääriin. Johteissa elektronit pääsevät vapaasti siirtymään voiden välillä, mikä tekee siirtymän aiheuttajan erittelemisestä mahdotonta. Puolijohdeilla siirtymään vaadittu energia on sopivan suuruinen gammasäteistä aiheutuvien havaintojen erittelemiseen. (Gilmore 2008, 40)

Kun elektroni siirtyy johtavuusvyölle, valenssivyölle jää positiivisesti varautunut aukko. Johtavuusvyölle menevän elektronin ja sen valenssivyölle jättämän aukon yhdistelmää kutsutaan elektroni-aukko -pariksi. Kun puolijohdeväliaineeseen syötetään ulkoisesta lähteestä sähkökenttä, väliaineen kidehilan vierekkäiset elektroni-aukko -parit toimivat ketjureaktion tavoin kuljettaen gammasäteiden absorptioista syntyneen varauksen kiteen elektrodeille. Elektrodeista elektronien ja aukkojen väliaineessa kuljettama varaus kerätään talteen sähköistä käsittelyä varten. Väliaineelle on erittäin tärkeää, että sen kidehilassa ei ole epäpuhtauksia, jotka häiritsevät elektronien ja aukkojen liikettä väliaineessa. (Gilmore 2008, 40-51)

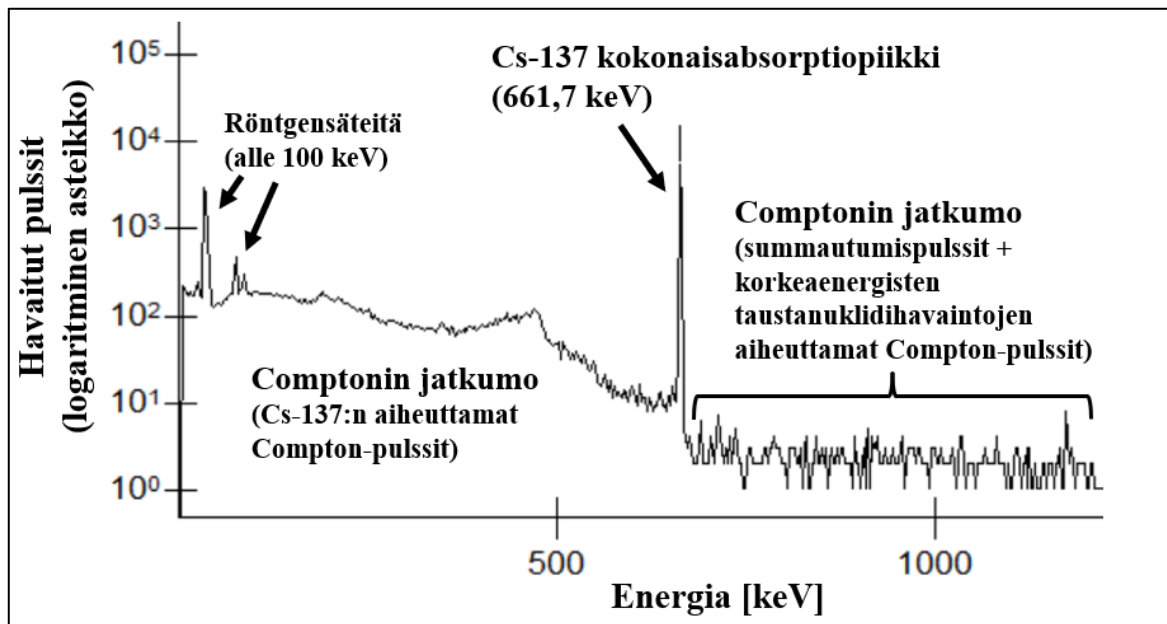
Germanium (Ge) on yleisimmin käytetty puolijohdemateriaali gammaspektrometriin detektoreissa ja käytössä kaikissa tässä työssä tutkittavissa mittalaitteissa. Sillä on gammasäteiden kokonaisabsorptioiden tapahtumistodennäköisyyden kannalta edullinen melko korkea järjestysluku ($Z = 32$), ja sitä on lisäksi saatavilla erittäin puhtaassa muodossa. Erittäin puhtaita germaniumkiteitä käytäviä detektoreita kutsutaan yleisesti HPGe-detektoreiksi. (Gilmore 2008, 41-42)

Puolijohdedetektorin täytyy jäähdyttää erittäin alhaiseen lämpötilaan, jotta detektorikiteessä ei tapahtuisi lämpöliikettä, jota tapahtuu samalla energia-alueella valenssivyöltä johtavuusvyölle tapahtuvien elektronisiirtymien kanssa. Näin jäähdytys mahdollistaa gammasäteistä aiheutuneiden signaalipulssien erottamisen. Germaniumista tehtyjä detektoreita jäähdytetään tyypillisesti nestemäisen typen lämpötilaan -196 °C . Detektorin jäähdytys toteutetaan kryostaatilla, joka yhdistää detektorikiteen ja jäähdyttävän mekanismin toisiinsa. Jäähdytyksen toteuttamiseen voidaan käyttää nestemäistä typpeä sisältävää astiaa tai sähkövirtaa käyttävää kompressorikoneistoa. (Knoll 2010, 424-426)

2.5 Gammaspektrin rakenne

Gammaspektrometrin mittauksen aikana detektorin havaitsee energioiltaan erisuuruisia pulsseja, joiden havaitsemistodennäköisyydet perustuvat gammasäteiden ja detektorin väliaineen välisten vuorovaikutusreaktioiden tapahtumistodennäköisyyksiin. Gammaspektrometrilaitteisto muodostaa tehdyistä pulssihavainnoista gammaspektrin, jonka energiajakaumassa havaittavista muodoista on mahdollista määrittää mittauskohteen sisältämiä radionuklideja, niiden aktiivisuuksia, sekä muita mittaukseen liittyviä asioita. Tässä työssä käsitellään ainoastaan tämän työn kannalta tärkeimpiä gammaspektreissä näkyviä ilmiöitä.

Kuvassa 2.5 on esimerkki tämän työn aikana gammaspektrometrilla mitatusta yksinkertaisesta gammaspektristä, joka on saatu mittaamalla HPGe-detektorilla ainoastaan yhdellä havaittavalla energialla gammasäteilevää Cs-137 -lähdetä. Kuva on peräisin tässä työssä käytössä olevasta Genie2k-gammaspektrianalysointiohjelmasta, josta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.



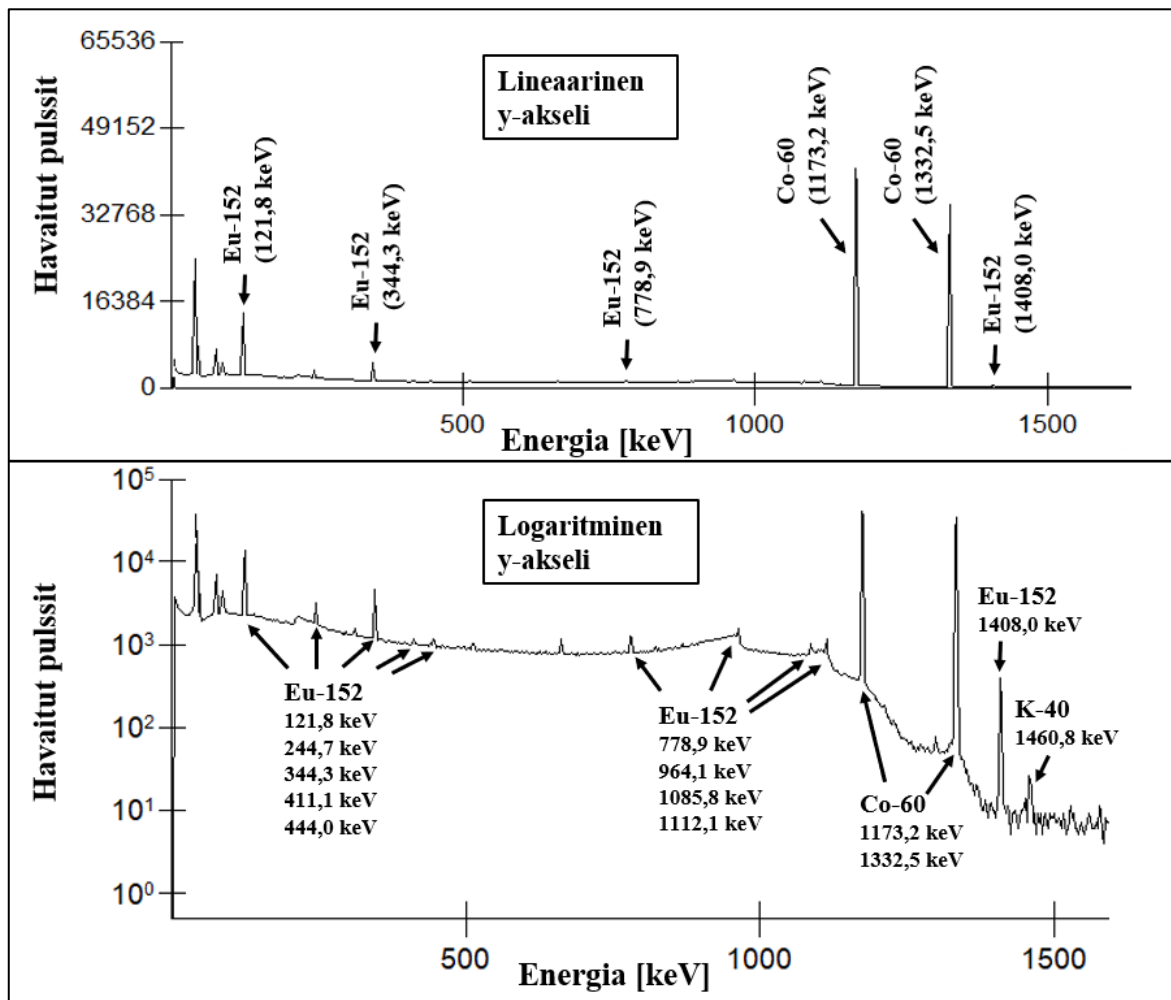
Kuva 2.5. Yksinkertainen esimerkki Genie2k-ohjelmalla tutkittavasta gammaspektristä, joka on saatu mittaamalla Cs-137 -aktiivista säteilylähdettä HPGe-detektorilla.

Kuvassa 2.5 näkyvä kokonaisabsorptiopiikki on tärkein gammaspektrissä havaittava muoto. Piikki syntyy energia-akselilla kohtaan, joka vastaa gammasäteen kokonaisabsorptioon vaadittavaa energiaa. Cs-137:n tapauksessa säteilylähteestä emittoituu havaittavasti ainoastaan energialtaan 661,7 keV suuruisia gammafotoneja, jolloin tämän energian kohdalla havaittava pulssipiikki mahdollistaa kyseisen nuklidin tunnistamisen. Kokonaisabsorptiopiikin piikkimäinen muoto muodostuu puolestaan sen takia, että kokonaisabsorptioita tapahtuu vain yksittäisissä nuklidikohtaisissa energiapisteissä, kun taas vajaita absorptioita havaitaan lähes koko spektrin leveydeltä. Näin kokonaisabsorptiohavainnot kasautuvat pulssijakaumassa piikeiksi ja erottuvat selkeästi spektristä. Kokonaisabsorptiopiikin koosta on mahdollista määrittää kyseisen piikin aiheuttaneen nuklidin aktiivisuus, joka on usein gammaspektrometrinen mittauksen päätavoite. (Ikäheimonen et al. 2008, 144)

Kuvassa 2.5 näkyvä Comptonin jatkumo (Compton Continuum) muodostuu Comptonin sirontojen synnyttämistä pulsseista, joista absorboituu detektoriin sirontakohtainen energiamäärä. Tällöin pulssien energiajakauma on hyvin tasainen, eikä selkeää pulssipiikkiä muodostu gammaspektriin. (Gilmore 2008, 31-33) Koska Comptonin ilmiössä absorptio jää pääsääntöisesti vajaaksi, jatkumon pulssit sijoittuvat tavallisimmin havaittua kokonaisabsorptiopiikkiä matalammalle energia-alueelle, mikä näkyy kuvassa selkeästi

kohonneina pulssimäärinä Cs-137 -piikin vasemmalla puolella. Comptonin jatkumo on erittäin tärkeä gammaspektrin ilmiö, sillä kokonaisabsorptiopiikkien kokoa määrittäessä piikeistä täytyy ottaa huomioon niiden Comptonin ilmiöstä johtuvat pulssimäärät.

Alla kuvassa 2.6 on toinen esimerkki Genie2k-analysointiohjelmalla tutkittavasta gammaspektristä, joka on saatu mittaamalla HPGe-detektorilla voimakkaasti aktiivista Co-60 -säteilylähdettä ja vähemmän aktiivista Eu-152 -säteilylähdettä.



Kuva 2.6. Co-60 ja Eu-152 -lähteitä mittaamalla saatu gammaspektri Genie2k-ohjelmassa.

Kuvasta 2.6 nähdään, että mitattu gammaspektri on muodoltaan huomattavasti aiemman kuvan 2.5 monoenergistä Cs-137 -gammaspektriä monimutkaisempi. Spektrin muotoon vaikuttaa erittäin paljon havaittavien nuklidien määrä, useat merkittävän kokoiset fotopiikit monimutkaistavat muotoa. Piikkien välisistä kokoeroista on helppo huomata jo tässä vaiheessa ennen aktiivisuuden laskemista, että Co-60 on selvästi dominoiva nuklidi.

Eu-152:sta voidaan huomata, että sen gammakvantteja on havaittu hyvin laajalla alueella ja että piikkien koot vaihtelevat sen gammakvanttien intensiteettien mukaan.

Gammaspektreihin liittyy muitakin ilmiöitä, kuten esimerkiksi parinmuodostusreaktioon liittyvät pakopiikit ja matalalla energia-alueella näkyvät karakteristiset röntgenpiikit. Nämä ilmiöt täytyy tunnistaa, jottei havaittuja piikkejä sekoiteta vahingossa jonkin toisen nuklidin energioihin. Näitä ilmiöitä ei kuitenkaan käydä tässä työssä tarkemmin läpi.

2.6 Detektorin suorituskykyä kuvaavia parametreja

Gammaspektrometrissä tutkimuksissa yritetään tunnistaa radioaktiivisen mittauskohteen sisältämät radionuklidit. Mitä selkeämmin radionuklidien ominaisten gammakvanttien energioiden kohdalla olevat pulssipiikit erottuvat gammaspektrissä toisistaan, sitä varmemmin mittauskohteen sisältämät nuklidit voidaan tunnistaa ja niiden aktiivisuudet määrittämään. Tätä detektorin erotuskykyä kutsutaan energioresoluutioksi. Energiarésoluution mittana käytetään gammaspektrille muodostuneen piikin puoliarvoleveyttä FWHM (Full Width at Half Maximum), joka kertoo Comptonin jatkumosta erottuvan piikin nettoalueen leveyden sen korkeuden puolivälistä energian yksikkönä. Detektorivalmistajat kuvaavat tavallisesti detektorien erotuskykyä mitatun Co-60:n 1332,5 keV piikin FWHM-arvosta, hyvälaatuisilla HPGe-detektoreilla se on tyypillisesti noin 1,7–1,9 keV. Mitä alhaisempi piikin FWHM-arvo on, sitä parempi on detektorin energioresoluutio. (Ikäheimonen et al. 2008, 148)

Detektorin energioresoluutioon vaikuttavat monet tekijät. Ensimmäinen näistä on elektroni-
aukko -parien syntymäärän tilastollinen vaihtuvuus, joka riippuu absorboituvien gammasäteiden energioista, detektorimateriaalista, sekä detektorin koosta. Toinen energioresoluutioon vaikuttava tekijä on epätäydellinen varausten keräys detektorista, johon vaikuttavat detektorikiteen puhtaus ja koko. Kolmas vaikuttava tekijä on gammaspektrometrin elektronisten komponenttien aiheuttama heilunta signaalien voimakkuuksissa. (Knoll 2010, 426-428)

Toinen yleinen parametri, jolla detektorivalmistajat kuvaavat tuotteensa suorituskykyä, on suhteellinen tehokkuus. Detektorin suhteellinen tehokkuus kertoo, kuinka nopeasti detektoripystyy keräämään standardijärjestelyllä asetetusta Co-60 -lähteestä pulsseja sen 1332,5 keV

piikille verrattuna siihen, että vastaava mittaus suoritettaisiin tietäntyyppisellä NaI-tuikainedetektorilla. Parametri kuvaa näin ainoastaan detektorin suhteellista pulssinkeräysnopeutta, jota voidaan käyttää myös HPGe-detektoreiden keskinäiseen vertailuun. (Gilmore 2008, 236). Detektorin suurempi suhteellinen tehokkuus mahdollistaa nopeammat mittausajat ja vastaavasti tarkemmat tulokset samassa mittausajassa. Suhteellinen tehokkuus riippuu pääasiassa detektorin koosta, suuressa detektorissa tapahtuu enemmän kokonaisabsorptioita, jolloin muun muassa parametrin määrittävälle Co-60:n piikin energialle kertyy nopeammin pulsseja. Esimerkiksi tässä työssä tutkittavien HPGe-detektorimallien suhteelliset tehokkuudet ovat väliltä 9–40 %.

Kolmas tyypillinen detektorivalmistajien käyttämä suorituskykyparametri on Peak-to-Compton -suhde. Se kuvaa standardijärjestelyllä mitatun Co-60 -lähteen 1332,5 keV piikin korkeimman kohdan ja Compton-alueen 1040–1096 keV kanavien pulssien keskiarvon välistä suhdetta. Peak-to-Compton -suhde paranee enemmän kokonaisabsorptioita synnyttävillä suurilla detektoreilla. Pienikokoiselle HPGe-detektorille tyypillinen Peak-to-Compton -suhde on tavallisesti noin 40:1, erittäin suurikokoisille detektoreille se voi olla jopa 90:1. Hyvä Peak-to-Compton -suhde mahdollistaa pienempien aktiivisuuspitoisuuksien havaitsemisen mittauskohteesta. (Gilmore 2008, 237)

2.7 Gammasektrometrilaitteiston muut komponentit

Detektorin ja sen jäähdytysjärjestelmän lisäksi gammasektrometriseen laitteistoon kuuluu useita signaalinkäsittelyyn tarvittavia elektroniikkakomponentteja. Näitä ovat esivahvistin, ADC (Analog to Digital Converter), signaalivahvistin ja monikanava-analysaattori MCA (Multi Channel Analyzer). Lisäksi laitteistoon liitetään tavallisesti tietokone, jolla ohjailaan kaikkien laitteiston komponenttien toimintaa ja jota voidaan käyttää mittaustulosten analysoimiseen. (Wallbrink et al. 2007, 5-7) Tässä työssä tarkasteltavilla laitteistoilla ADC, signaalivahvistin ja MCA ovat sisällytetty yhteen komponenttiin, digitaalitoimiseen signaalianalysaattoriin. Alla olevaan kuvaan 2.7 on tiivistetty gammasektrometrilaitteiston eri komponentit ja niiden tärkeimmät tehtävät.

Komponentti	Tärkeimmät tehtävät	
Jäähdytin (nestetyyppi- tai sähkökäyttöinen)	-Pitää detektorin kylmänä (< ~-180 °C) -Sähköisessä jäähdytyksessä lisäksi erillinen ohjausyksikkö	
Detektori	-Synnyttää detektoriin absorboituvien fotonien gammaenergioihin verrannollisia varauspulsseja	
Esivahvistin	-Välittää korkeajännitteen detektoriin -Vahvistaa matalaenergiset varauspulssit helpommin käsiteltävään muotoon -Tarkkailee detektorin lämpötilaa	
Signaali-analysaattori (digitaalinen)	-Luo ja syöttää detektorille korkeajännitettä -Muuttaa analogisen pulssisignaalin digitaalseksi -Pulssit suodatetaan ja vahvistetaan digitaalisilla pulssinkäsittelyalgoritmeilla -Monikanava-analysaattori (MCA) lajittelee pulssit niiden korkeuksien mukaan -Tallentaa tehdyt pulssihavainnot spektriin -Määrittää detektorin aktiivisen toiminta-ajan (Live Time) ja kuolleen ajan (Dead Time) -Estää toiminnan vikatilanteessa (mm. katkaisee korkeajännitteen detektorin jäähdytysongelmatilanteessa)	
Tietokone	-Signaalianalysaattorin pulssinkäsittelyasetusten muokkaus, korkeajännitteen ohjaus -Mittauksen käynnistys ja lopetus -Tulosten analysoiminen ja laskennallinen käsittely	

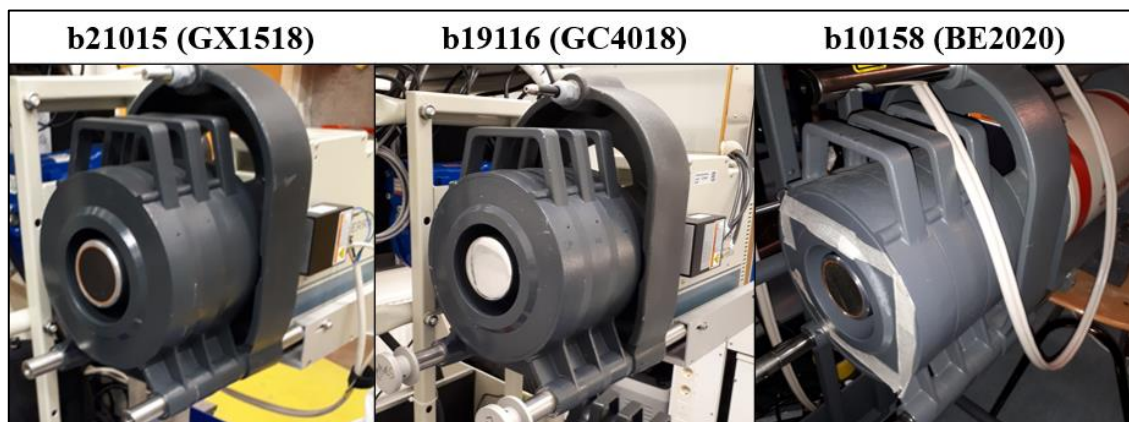
Kuva 2.7. Gammaskpektrometrilaitteiston komponentit ja niiden tärkeimmät tehtävät. Koostettu lähteistä (Canberra Industries 2017b) ja (Canberra Industries 2010).

Signaalianalysaattori ja esivahvistin voivat vaikuttaa saataviin aktiivisuustuloksiin pääasiassa niiden pulssinkäsittely- ja energiankäsittelykapasiteettien rajallisuuden muodossa, mikäli mitattava kohde säteilee erittäin voimakkaasti. Erittäin aktiivisten mittauskohteiden mittauksiin liittyviä asioita käydään lyhyesti läpi myöhemmin kappaleessa 5, mutta asiaa ei muuten tutkita tarkemmin tässä työssä. Tämän työn kannalta on kriittisempää tarkastella erityisesti mitattujen gammaskpektrien analysoimista eri tietokoneohjelmistojen avulla, joihin liittyviä asioita käsitellään yksityiskohtaisesti kappaleessa 3.

2.8 FiR 1 -laitosalueen gammaspektrometrilaitteistot

FiR 1 -laitosalueella on kolme erilaista gammaspektrometrilaitteistoa, joissa on tämän työn tutkimuskohteena olevan ISOCS-tehokkuuskalibrointiohjelmiston kanssa yhteensovitettuja, niin kutsutusti tehdaskarakterisoidut HPGe-detektorit b21015, b19116 ja b10158. Tässä työssä tutkittavien ISOCS-karakterisoitujen detektorien ja muiden gammaspektrometrin komponenttien muodostamia laitteistokokonaisuuksia kutsutaan yleisen tavan mukaisesti yksinkertaistetusti ISOCS-laitteistoiksi. Laitteistoja nimitetään niiden detektorien sarjanumeroiden perusteella, eli esimerkiksi puhuttaessa detektorista b21015 tarkoitetaan koko kyseiseen detektoriin liitettyä gammaspektrometrin laitteistokokonaisuutta. Kaikki tässä työssä käytettävät detektorit ja gammaspektrometrin muut komponentit ovat Mirion Technologiesin ja yhtiöön vuonna 2016 fuusioituneen Canberra Industriesin valmistamia.

Tässä työssä tutkittavat detektorien näkyvät alla olevassa kuvassa 2.8. Tutkittavat detektorit poikkeavat toisistaan ominaisuuksiltaan, sillä VTT on aikoinaan suunnitellut laitteistoille mittauskohdespesifisiä käyttötarkoituksia muun muassa syntyvien jätteiden aktiivisuustasoihin perustuen ja valinnut ominaisuuksiltaan soveltuvimmat tuotemallit laitteistojen suunniteltujen käyttötarkoitusten perusteella. Alempana olevaan taulukkoon 2.2 on koottu detektorien tärkeimmät ominaisuudet ja niiden suunnitellut käyttötarkoitukset. Detektorien ja muiden gammaspektrometrilaitteistojen komponenttien kattavammat tiedot on koottu liitteeseen C.

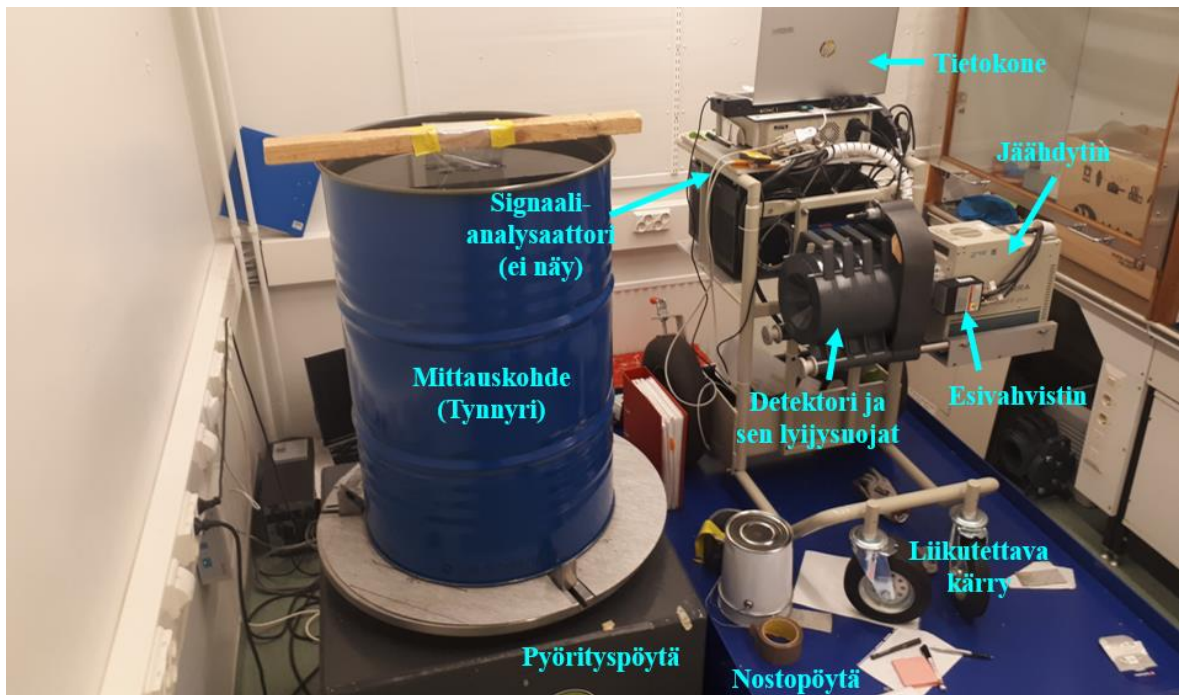


Kuva 2.8. FiR 1 -laitosalueen ISOCS-laitteistot. Kuvasta nähdään muun muassa detektorien erilaiset ikkunamateriaalit ja jäähdytysratkaisut.

Taulukko 2.2. Tässä työssä tutkittavien HPGe-detektorien tärkeimmät tiedot ja niiden ensisijaisesti suunnitellut käyttötarkoitukset.

Detektori	b21015	b19116	b10158
Valmistaja	Mirion Technologies	Mirion Technologies	Canberra Industries
Detektorin malli	GX1518	GC4018	BE2020
Hankintavuosi	2021	2018	2012
Detektorikiteen koko (halkaisija d ; pituus l)	$d = 54,2$ mm $l = 30,3$ mm	$d = 60,7$ mm $l = 63,5$ mm	$d = 51$ mm $l = 21,5$ mm
Suhteellinen tehokkuus (valmistajan määrittämä)	15,7 %	44,1 %	9,0 %
Detektorikapselin ikkunamateriaali	Hiiliepoksi (mittaa tarkemmin matalaenergisää gammasäteitä)	Alumiini	Hiiliepoksi (mittaa tarkemmin matalaenergisää gammasäteitä)
Laitteiston työn kirjoitushetkinen käyttöpaikka	”Pilot-halli”, varastotila OK3-alueen valvonta-alueella	”Miiluhalli”, varastotila OK3-alueen tarkkailualueella	Laboratorio FiR 1 -laitosalueen valvonta-alueella
Laitteiston ensisijainen käyttötarkoitus	Aktiivisen käytöstäpoistojätteen mittaukset	Erittäin matala-aktiivisen, mahdollisesti valvonnasta vapautettavan käytöstäpoistojätteen mittaus	Varalaite

Tässä työssä tarkasteltavat ISOCS-laitteistot on asennettu helposti paikasta toiseen liikuteltaviin karruihin. Näin ISOCS-laitteisto tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet suorittaa gammaspektrometrisia mittauksia erilaisille mittauskohteille erilaisissa kenttäolosuhteissa. Rutiininomaisia, samalla tavalla toistettavia mittauksia varten VTT on hankkinut nostopöytiä, joiden avulla mittalaite voidaan asettaa mittauskohtaisesti parhaaseen mahdolliseen asentoon myös korkeussuunnassa. Lisäksi pyörityssymmetrisiä mittauskohteita, kuten tynnyreitä varten on hankittu pyörityspöytiä, joilla mittauskohdetta voidaan pyörittää mittauskohteen epätasaisen aktiivisuus- tai tiheysjakauman vaikutuksen lieventämiseksi. Alla olevaan kuvaan 2.9 on eritelty detektorin b19116 gammaspektrometrilaitteiston komponentit ja mittauksissa käytettävät apuvälineet.



Kuva 2.9. Detektorin b19116 ISOCS-laitteiston komponentit ja mittauksissa käytettävät apuvälineet ja -laitteet. Kuvassa on tyypillinen tässä työssä tarkasteltava tynnyrimittaustilanne.

Kuvassa 2.9 on tyypillinen tässä työssä tarkasteltava, suurehkon sellaisenaan kokonaisuena mitattavalle mittauskohteelle suoritettu In-Situ -gamma spektrometrimittaus. Tähän perinteisistä laboratorioanalyyseistä poikkeavaan mittaustapaan liittyviä ilmiöitä ja huomioitavia asioita käsitellään erityisesti tämän työn kappaleissa 4 ja 5. Työssä tutkittaviin mittausten menetelmiin liittyviä mittauskohteita ja laskennallisia selvityksiä, sekä niiden tuloksia käsitellään kappaleissa 6 ja 7.

3 AKTIIVISUUDEN MÄÄRITTÄMINEN ANALYSOINTIOHJELMISTOLLA

Kun gammaspektrometrialaitteistolla on mitattu gammaspektri, se analysoidaan seuraavaksi analysointiohjelmistolla. Analysoinnin tärkein tavoite on selvittää gammaspektrin avulla mitatun kohteen sisältämät radionuklidit ja niiden aktiivisuudet. Tässä työssä analysointiin käytetään Canberra Industriesin (nykyisin Mirion Technologiesin alla) kehittämiä Genie2k- ja ISOCS-ohjelmistoja, joihin liittyy useita käytettäviä ohjelmia. Niistä tämän työn kannalta tärkeimmät ovat (kaikki käytetyt ohjelmistot ja niiden versiot ovat listattuna liitteessä D):

- *Genie™ 2000 Gamma Acquisition & Analysis*, (gammaspektrin keräys ja analysoiminen)
- *Geometry Composer*, (ISOCS-tehokkuuskalibrointiin käytettävien geometriamallien mallintaminen)
- *Genie™ 2000 Nuclide Library Editor*, (nuklidikirjastojen muokkaus)

Analysointiohjelma Genie2k laskee mittauksesta saadusta gammaspektristä kohteen aktiivisuuden tietyllä energialla yhtälön 3.1 mukaisesti. (Mirion Technologies 2020c, 400):

$$A = \frac{S}{\varepsilon \cdot \gamma \cdot LT} = \frac{CR}{\varepsilon \cdot \gamma} \quad (3.1)$$

Missä A on Genie2k:n laskema aktiivisuus [Bq]

S on tarkasteltavan piikin laskettu nettopinta-ala pulsseina [-]

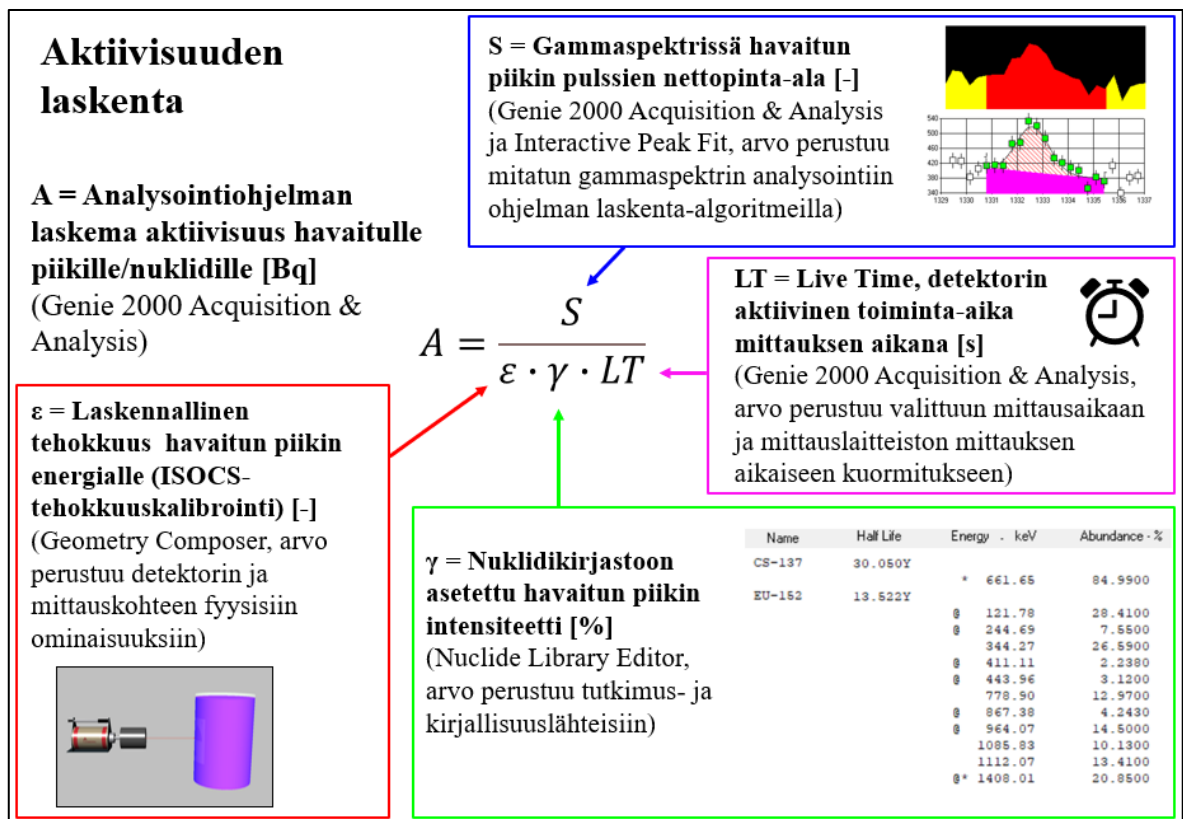
ε on tehokkuuskerroin [-; %]

γ on tarkasteltavaa piikkiä vastaavan gammakvantin intensiteetti [-; %]

LT on detektorin aktiivinen toiminta-aika mittauksen aikana (Live Time) [s]

CR on tarkasteltavan piikin pulssinkeräysnopeus (Count Rate) [cps; cph]

Jokaisella tässä työssä käytettävällä tietokoneohjelmalla on merkittävä rooli aktiivisuuden määrittämisessä. Alla olevaan kuvaan 3.1 on havainnollistettu yhtälön 3.1 laskentakomponenttien ja tässä työssä käytettävien tietokoneohjelmien välisiä suhteita.



Kuva 3.1. Aktiivisuuden laskentakomponenttien ja tässä työssä käytettävien tietokoneohjelmien väliset suhteet. Aktiivisuuden määrittämisen kannalta suurimmat epävarmuudet ovat piikin nettopinta-alaan ja tehokkuuden määrittäminen.

Gammaspektrin analysointiin Genie2k käyttää erilaisia analysointialgoritmeja, jotka suorittavat yhden laskentavaiheen kerrallaan. Yhdistämällä eri algoritmeja perätysten muodostuu analysointiprosessi, jolla voidaan määrittää muun muassa gammaspektristä havaittujen fotopiikkien pinta-ala, lisätä ISOCS-ohjelmistolla suoritettu tehokkuuskalibrointi, tunnistaa kohteessa olevat radionuklidit ja määrittää niiden aktiivisuudet. Yksi tämän työn tärkeimmistä tavoitteista oli luoda aktiivisuuden määrittämiseen Genie2k-ohjelmalle analysointiprosessi, joka on optimoitu tässä työssä tutkittavaan gammaspektrometriseen käyttöympäristöön mittalaitteistojen ominaisuuksien ja käyttötavan, mitattavien jätetyyppien, sekä jätteestä havaittavien nuklidien erityispiirteet huomioiden. Tämän työn aikana kehitetty analysointiprosessi ja siihen valitut algoritmit on tiivistetty taulukkoon 3.1. Analysointiprosessin vaiheet ja valitut analysointialgoritmit perustuvat pääasiassa Mirion Technologiesin omiin suosituksiin.

Taulukko 3.1. Tämän työn aikana kehitetty analysointiprosessi, joka perustuu Mirion Technologiesin suosituksiin HPGe-detektoreille (Mirion Technologies 2020c, 358). Taustavähennysvaihetta ei käytetty kaikissa työssä myöhemmin esiteltävissä mittaustapauksissa.

Analysointivaihe	Vaiheen kuvaus	Käytettävä algoritmi/ohjelma
Piikin paikannus (Peak Locate)	Kokonaisabsorptiopiikkien paikannus gammaspektristä	”Unidentified 2nd Difference”
Piikin pinta-alan laskenta (Peak Area)	Kokonaisabsorptiopiikkien nettopinta-alojen laskenta	”Sum/Non-Linear LSQ Fit”
Interactive Peak Fit	Piikkien sovitteiden muodon tarkistus	Genie2k-ohjelman Interactive Peak Fit -työkalu
Pinta-alan korjaus (Area Correction), ei käytössä kaikissa tapauksissa	Taustasäteilyn osuuden vähentäminen varsinaisen mittauskohteen gammaspektristä	”Standard Background Subtract”
Tehokkuuskalibrointi (Efficiency Correction)	Tehokkuuskalibrointi, määritetään mittauskohteen laskennallinen todennäköisyys tuottaa kokonaisabsorptio tietyllä energialla	Tehokkuuskalibrointimallin mallinnus ISOCS-ohjelmistolla, Genie2k-ohjelmassa sovitemenetelmänä ”Standard Dual” tai ”Standard Interpolated”
Nuklidin tunnistus (Nuclide Identification)	Nuklidien tunnistaminen piikkihavaintojen perusteella, nuklidikohtaisten aktiivisuuksien laskenta	”NID with Interference Correction”
Havaitsemisrajojen määrittäminen (Detection Limits)	Havaitsemisrajojen määrittäminen, pienimmän havaittavan aktiivisuuden laskenta	”Currie MDA”

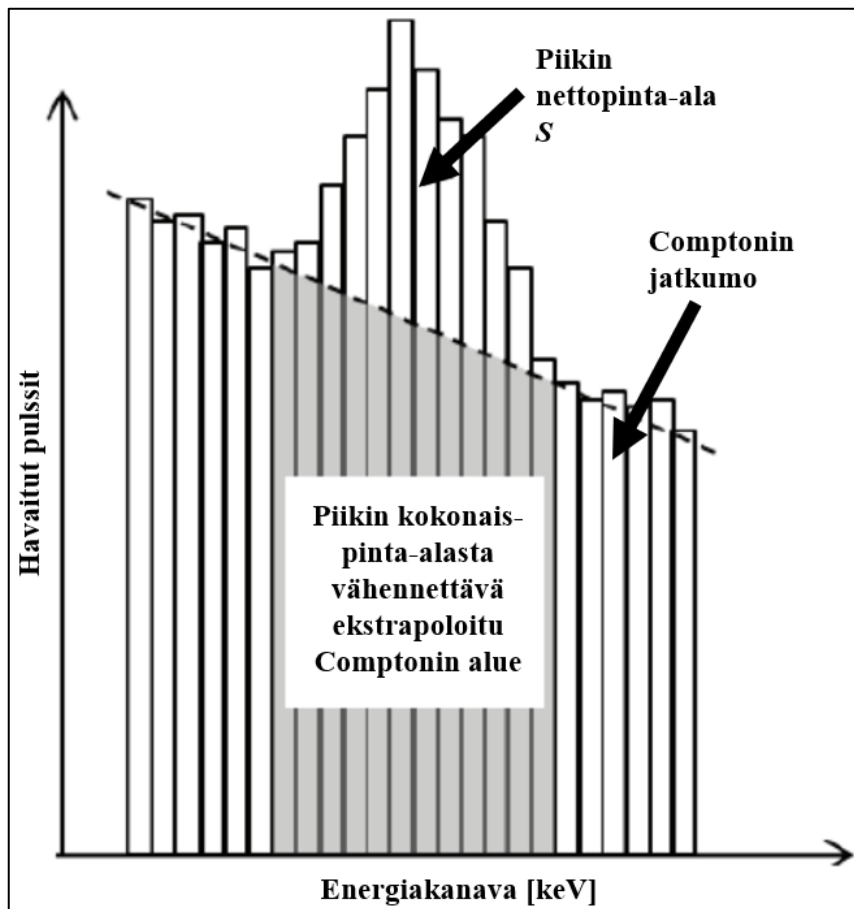
Taulukossa 3.1 oleviin analysointivaiheisiin ja -algoritmeihin liittyy runsaasti eri laskentaparametreja, joiden suuruudet perustuvat pitkälti Mirion Technologiesin suositusarvoihin HPGe-detektoreille ja työn aikana kerätyn kokemuksen perusteella tehtyihin valintoihin. Parametrien suuruudet ovat taulukoituna liitteessä E. Tässä kappaleessa esitellään kuitenkin aktiivisuuden määrittämiseen käytettävien laskentavaiheiden teoria vain pääpiirteittäin, eikä laskentaprosessia käsitellä algoritmien parametritasolla. Algoritmien ja niihin asetettujen parametrien toiminnan kuvaukset löytyvät Canberran ohjekirjasta *Genie™ 2000 Spectroscopy Software: Customization Tools Manual* (Canberra Industries 2013). Lisäksi tämän työn kannalta tärkeimmästä analysointivaiheesta, ISOCS-tehokkuuskalibroinnista löytyy erikseen laajoja ohjekirjoja, kuten muun muassa Canberran ohjekirjasta *Model S573 ISOCS Calibration Software: Technical Reference Manual* (Canberra Industries 2012c).

3.1 Fotopiikin nettopinta-alan määrittäminen

Detektorin havainnoista koostuva gammaspektri ei todellisuudesta poiketen ole jatkuva jakauma, vaan se on jaettu rajalliseen määrään saman levyisiä energiakanavia. Yksittäinen kanava edustaa tiettyä energiaväliä, johon gammaspektrometrielaitteiston monikanava-analysaattori sijoittaa käsittelemänsä pulssin. Tietokoneelle saatavaa gammaspekttriä voidaan pitää näin eräänlaisena histogrammina, jossa yksittäisen energiakanavan pylvään korkeus riippuu sen energia-alueella havaittujen pulssien määrästä. Tässä työssä monikanava-analysaattori on asetettu jakamaan gammaspektri 8192:en energiakanavaan, mikä on tyypillinen HPGe-detektoreilla käytettävä kanavajako. (Ikäheimonen et al. 2008, 143) Gammaspektrin kanava-alueena käytettiin väliä 0–2700 keV, jolloin yksittäisen energiakanavan leveys on noin 0,33 keV.

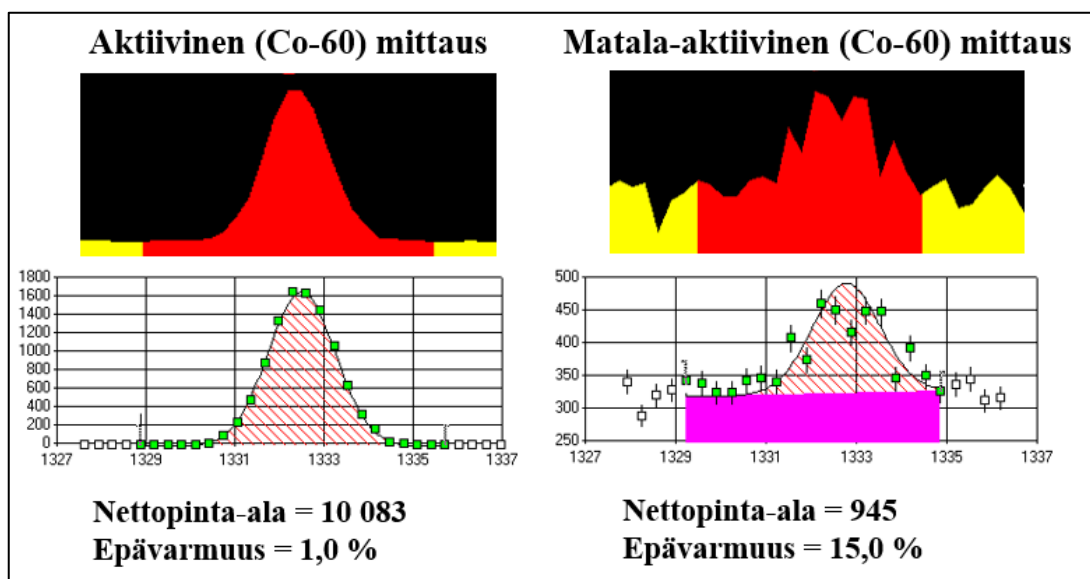
Radionuklidit lähettävät gammakvantin aina täsmälleen samoilla niille ominaisilla energioilla, mutta detektorissa syntyneiden varausten kerääminen ei ole aina täydellistä ja myös gammaspektrometrin muut elektroniset komponentit aiheuttavat pieniä epätarkkuuksia foneiden energioiden jäljitykselle. Tämä johdosta yksittäisen gammakvantin synnyttämät pulssit eivät kasaudu vain sen ominaisenergiaa vastaavalle yksittäiselle energiakanavalle, vaan myös tämän viereisille kanaville molemmiin puolin. Pulssit kertyvät gammaspektriin tilastollista todennäköisyyttä noudattaen, muodostaen ajan myötä Gaussin käyrää muistuttavan piikin. Tavallisesti suurin osa havaittavan piikin kanava-alueelle kerääntyvistä pulsseista kasautuu piikin keskikohdalle, jonka pitäisi olla laitteiston ollessa oikein kalibroitu havaitun nuklidin gammakvantin tarkkaa energiaa vastaava energiakanava. (Ikäheimonen et al. 2008, 144-145)

Gammaspektristä havaitun fotopiikin nettopinta-ala lasketaan tavallisesti siten, että piikin molempia puolia ympäröivästä Comptonin jatkumosta ekstrapoloidaan tasainen Compton-alue myös havaitun piikin kohdalle. Tämä pinta-ala vähennetään piikin kohdalla havaitusta kokonaispulssimäärästä, jolloin jäljelle jäävän nettopinta-alan voidaan olettaa koostuvan pulsseista, jotka ovat syntyneet jäljitettävistä kokonaisabsorptioreaktioista. (ISO 2017, 23-24). Alla kuvassa 3.2 on esitetty yksinkertaistettu periaate piikin nettopinta-alan laskennasta.



Kuva 3.2. Gammaskpektristä havaitun fotopiikin nettopinta-alan laskennan periaate (Muokattu lähteestä ISO 2017, 24).

Genie2k laskee havaitun fotopiikin kanavakohtaisten pulssihavaintojen perusteella muodon sovitteen, jonka perusteella piikin nettopinta-ala lasketaan (Canberra Industries 2013, 251). Laskettavan sovitteen tarkkuus parantuu piikin pulssimäärien kasvaessa, sillä silloin gammaskpektrissä näkyvä piikin pulssijakauma asettuu todennäköisemmin sovittemallin oletamaan muotoon. Yleisesti suositellaan, että tarkasteltavan nuklidin aktiivisuuslaskentaan käytettävän piikin nettopinta-alan tulisi olla vähintään 10 000 pulssia tilastollisen epävarmuuden minimoimiseksi. (Mirion Technologies 2020c, 249) Aktiivisilla jätteillä tämä määrä voidaan saavuttaa minuuteissa, kun taas erittäin matala-aktiivisia jätteitä voidaan joutua mittaamaan jopa kymmeniä tunteja päästäkseen samaan. Alla olevassa kuvassa 3.3 on esitetty kahdesta eri mittauksesta havaitut Co-60:n 1332,5 keV gammapiikit Genie2k:n gammaskpektrinäkymässä ja Interactive Peak Fit -työkalussa, toisessa mittauksessa Co-60 aktiivisuutta on havaittu melko paljon ja toisessa melko vähän.



Kuva 3.3. Kahdesta aktiivisuustasoltaan eriävästä mittauksesta havaitut Co-60:n 1332,5 keV fotopiikit Genie2k:n tarkastelunäkymässä (yllä) ja Interactive Peak Fit -työkalussa (alla). Interactive Peak Fit -työkalussa mittauksessa havaitut kanavakohtaiset pulssimäärät on merkitty, vihreillä neliöillä, Genie2k:n sovittama nettopinta-ala raidoitettu punaisella ja vähennettävä Comptonin alue väritetty violetilla.

Kuvasta 3.3 huomataan, että matala-aktiivisessa mittauksessa piikin ja sitä ympäröivän Comptonin jatkumon muodot on huomattavasti epätasaisemmat aktiiviseen mittaukseen verrattuna. Interactive Peak Fit -työkalun näkymästä nähdään myös, että matala-aktiivisessa mittauksessa Genie2k:n luoma sovite vastaa vähemmän mitatusta gammaspektristä havaittavaa fotopiikin muotoa, aktiivisemmän mittauskohteen mittaukseen verrattuna. Nämä vaikuttavat merkittävästi piikin nettopinta-alan laskentaan ja myös sen laskennalliseen epävarmuuteen. Hyvä muistisääntö epävarmuudelle on, että kohtuullisen hyvin muotoutuneen piikin nettopinta-alan pulssimääräinen epävarmuus on tavallisesti noin lasketun nettopulssimäärän neliöjuuren verran (Mirion Technologies 2017c, 2). Näin suositellun 10 000 nettopulssin suuruisen fotopiikin pinta-alan epävarmuus on noin 1 %.

Fotopiikkien aktiivisuuslaskentoihin käytettäviin nettopinta-aloihin voidaan vaikuttaa myös suorittamalla taustavähennys, jolla huomioidaan mittauspaikalla havaittavan taustasäteilyn vaikutus mittaustulokseen. Taustavähennysmittaus suoritetaan mittauspaikalla, ja sen gammaspektristä havaittujen fotopiikkien nettopinta-alat vähennetään varsinaisen mittauskohteen mittauksessa havaittujen fotopiikkien pinta-aloista. Taustavähennykseen sisältyy riskejä ja epävarmuuksia, joita käsitellään myöhemmin tässä työssä kappaleessa 5.

3.2 Tehokkuuskalibrointi

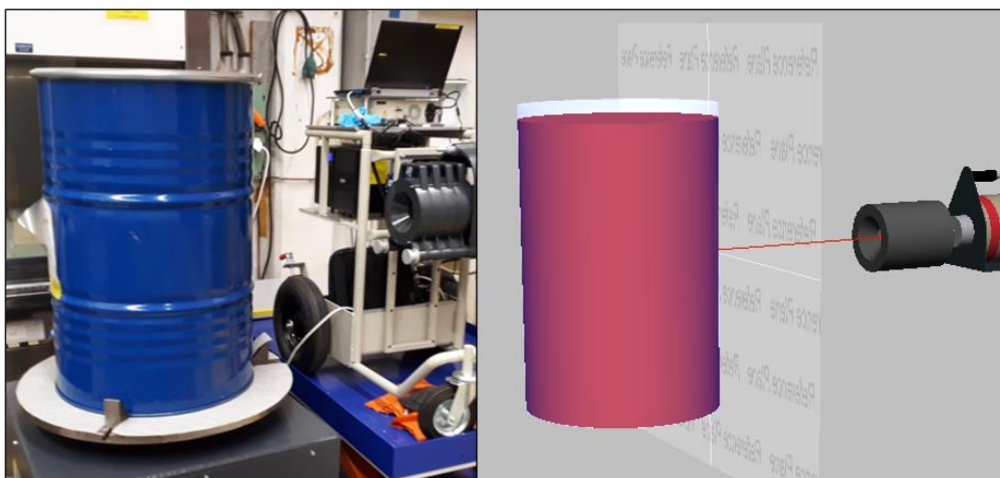
Mittauksen aikana radioaktiivisessa kohteessa syntyneistä gammafotoneista vain murto-osa päätyy detektoriin. Fotonit saattavat vain matkata detektorin ohi tai absorboitua detektorin ja fotonin lähtöpisteen välissä olevissa väliaineissa, useimmiten tämä vaimeneminen tapahtuu itse mittauskohteen tilavuuden sisällä. Detektorin väliaineeseen päässeistä fotoneistakin vain osa pystyy tuottamaan gammaspektrometrian kannalta hyödyllisen kokonaisabsorption. Näiden syiden takia täytyy määrittää tehokkuuskerroin, joka arvioi lähteessä syntyvien gammasäteiden todennäköisyyden tuottaa kokonaisabsorptio detektorin väliaineessa. Kokonaisabsorption tuoton todennäköisyyttä kutsutaan kokonaistehokkuudeksi (Full-Energy Peak Efficiency), mutta tässä työssä asiasta puhutaan lyhyemmin vain tehokkuutena. Tehokkuuskertoimen määrittämisen prosessia kutsutaan tehokkuuskalibroinniksi (Efficiency Calibration). (Mirion Technologies 2020c, 238-242)

Tässä työssä tehokkuuskalibrointi suoritetaan Mirion Technologiesin *ISOCS Calibration Software* -ohjelmiston avulla, jossa Genie2k:lla analysoitava mittauksesta saatu gammaspektri tehokkuuskalibroidaan *Geometry Composer* -ohjelmalla luodun, todellista mittaustilannetta jäljittävän 3D-geometriamallinnuksen avulla. Mallinnus luo arvion siitä, että kuinka suuri osuus radioaktiivisen mittauskohteen lähettämistä erienergisistä gammasäteistä kyettäisiin havaitsemaan gammaspektrometrilaitteistossa asti mittauksen aikana. Prosessin lopputuloksena saatavia tehokkuuskertoimia ϵ voidaan käyttää erienergistien mittauskohteiden aktiivisuuksien laskentaan yhtälöllä 3.1.

Tämä niin kutsuttu ISOCS-tehokkuuskalibrointi perustuu detektorille suoritettavaan, niin kutsuttuun tehdaskarakterisointiprosessiin. Karakterisointiprosessi perustuu detektorista luotavaan MCNP-malliin (Monte Carlo N-Particle), joka simuloi satunnaisten gammasäteiden tunnettua fysikaalista käyttäytymistä detektorin eri rakenteissa ja kidehilassa, millä simuloidaan detektorin gammasäteilystä mittaamaa vastetta. MCNP-mallit luodaan detektorikohtaisiksi, ja ne validoidaan suurilla määrillä eri standardilähteillä suoritettavia mittauskokeita, joilla varmistetaan muun muassa detektorin kidehilan epäpuhtauksien vaikutukset eri suunnista tulevista gammasäteistä saatavaan mittausvasteeseen. Lopuksi validoidaan karakterisointitiedosto, joka yhdistää tietokonemallinnuksilla saatavan pistetehokkuusdatan ja detektorin fyysisten ominaisuuksien välisen yhteyden. Valmistaja suorittaa tämän prosessin ennen detektorin

toimittamista asiakkaalle. Karakterisointiprosessista kerrotaan yksityiskohtaisemmin valmistajan laatimissa detektorikohtaisissa karakterisointiraporteissa, jotka valmistaja toimittaa asiakkaalle karakterisoidun laitteiston mukana, raportit sisältävät myös suoritettujen validointimittausten mittaustulokset. (Mirion Technologies 2021b; Mirion Technologies 2018a; Canberra Industries 2012b)

Geometry Composer -ohjelmassa mittausgeometriaa ei voi mallintaa täysin mielivaltaisesti, vaan ohjelma käyttää erilaisia valmiita mallinteita, joiden dimensioita voidaan muuttaa halutun suuruiseksi. Liitteessä F on esitetty tämän työn eniten käytetty malline ”Simple Cylinder”, jota voidaan käyttää tynnyrigeometrian mallintamiseen, sekä kyseisen mallin dimensionmuokkausnäkyä Geometry Composerissa. Alla kuvassa 3.4 on todellinen jätetynnyrin mittaustilanne, sekä kyseistä mittaustilannetta jäljittävä, ”Simple Cylinder” -mallinteesta tehty geometriamallinnus.



Kuva 3.4. Todellinen jätetynnyrin mittaustilanne, sekä sitä jäljittelevä Geometry Composerin ”Simple Cylinder” -mallinteesta tehty ISOCS-geometriamalli.

Geometriamallin eri osille valitaan mittauskohdetta vastaavat materiaalit, joille voidaan asettaa käyttäjän toimesta haluttu tiheys. Ohjelman tehokkuuslaskentaan käyttämät materiaali-parametrit on kirjattu ohjelman käyttämään ASCII-formaattiseen materiaalikirjastotiedostoon. Geometry Composerissa voi tarvittaessa luoda myös omia materiaaleja. (Canberra Industries 2012a, 77-79)

Geometriamallin eri osille voidaan määrittää, ovatko ne radioaktiivisia vai toimivatko ne ainoastaan gammasäteilyä vaimentavina elementteinä. Aktiivisuusjakaumaltaan

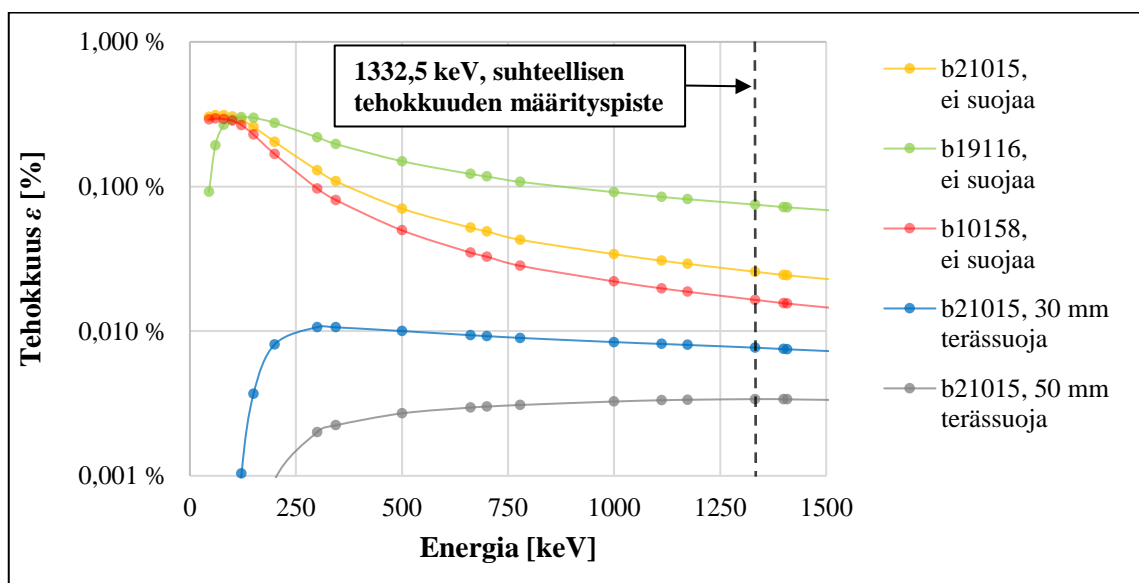
epätasaisille mittauskohteille voidaan asettaa myös suhteellisia aktiivisuusosuuksia, jotta geometriamalli osaa laskea suurimman osan havaitusta aktiivisuudesta olevan peräisin aktiivisimmaksi mallinnetusta segmentistä. Geometriamalliin valitaan myös mittauksessa käytetyn tehdaskarakterisoidun detektorin malli, sekä mahdollisesti mittauksissa käytetyn kollimaattorisuojan malli, joille on omat laskentaparametritiedostonsa.

Geometriamallin ollessa valmis suoritetaan datapisteiden generointi, jossa ohjelma laskee mallikohtaiset tehokkuuskertoimet ε käyttäjän määrittämille energioille. Tässä työssä tehokkuuskertoimien laskenta suoritettiin taulukossa 3.2 listatuille energioille, jotka perustuvat Geometry Composerin oletusasetuksiin ja tämän työn käyttöympäristön tärkeimpiin gammaenergioihin. Taulukossa on listattu myös prosentuaaliset epävarmuudet energioille, jotka Geometry Composer olettaa kyseisellä energia-alueella tapahtuvan. (Canberra Industries 2012c, 171-172) Energialistan kannalta on tärkeintä, että energiat kattavat käyttöympäristössä tarvittavan energia-alueen.

Taulukko 3.2. Tässä työssä käytettyjä tehokkuuskalibroinnin energiadatapisteitä. Asetettujen epävarmuuksien suuruus perustuu oletusasetusten epävarmuusarvoihin.

Energia [keV]	Asetettu epävarmuus [%]	Peruste datapisteen valinnalle
45,0	15,0	Oletusasetus
60,0	10,0	Oletusasetus
80,0	10,0	Oletusasetus
100,0	10,0	Oletusasetus
121,8	10,0	Eu-152:n yleinen gammakvantti
150,0	10,0	Oletusasetus
200,0	8,0	Oletusasetus
300,0	8,0	Oletusasetus
344,3	8,0	Eu-152:n yleinen gammakvantti
500,0	6,0	Oletusasetus
661,7	6,0	Cs-137:n gammakvantti
700,0	6,0	Oletusasetus
778,9	6,0	Eu-152:n yleinen gammakvantti
1000,0	4,0	Oletusasetus
1112,1	4,0	Eu-152:n yleinen gammakvantti
1173,2	4,0	Co-60:n gammakvantti
1332,5	4,0	Co-60:n gammakvantti
1400,0	4,0	Oletusasetus
1408,0	4,0	Eu-152:n yleinen gammakvantti
2000,0	4,0	Oletusasetus

Alla kuvassa 3.5 on vertailtu viittä ISOCS-tehokkuuskalibroinnilla taulukon 3.2 mukaisista energiadatapisteistä laskettua ja muodostettua tehokkuuskäyrää. Jokaisessa ISOCS-geometriamallissa on mallinnettu halkaisijaltaan $d = 10$ mm pistemäinen lähde detektorista kohtisuoraan 200 mm etäisyydelle. Kolmeen malliin valittiin detektorimalleiksi tässä työssä tutkittavat detektorit b21015, b19116 ja b10158. Lisäksi mallinnettiin kaksi lisätapausta detektorimallille b21015, joissa saman säteilylähteen eteen on mallinnettu vaimentavat 30 mm ja 50 mm paksut teräskerrokset.



Kuva 3.5. Kuvaajassa on kolmen tutkitun detektorin b21015, b19116 ja b10158 tehokkuuskäyrät mittauseroalialle, jossa halkaisijaltaan $d = 10$ mm pistelähde on mallinnettu 200 mm etäisyydelle detektorista. Lisäksi detektorille b21015 mallinnettiin kaksi geometriaa, joissa säteilylähteen ja detektorin väliin on mallinnettu absorboivat, 30 mm ja 50 mm paksut teräskerrokset. Kuvaajasta tulee huomioida käytetty logaritminen asteikko tehokkuuksille.

Kuvasta 3.5 nähdään, että ilman suojaamattomista säteilylähteistä matalaenergiset fotonit pääsevät helposti detektorille. Näillä energioilla kokonaisabsorption todennäköisyys on suuri ja tehokkuus on näin korkea. Detektorien b21015 ja b10158 suuremmat tehokkuudet hyvin matalalla energia-alueella verrattuna detektoriin b19116 selittyvät niiden matala-absorboivilla hiiliepoksi-ikkunoilla. Korkeammilla energioilla tehokkuus alkaa laskemaan fotonien detektorin väliaineesta karkaamisen todennäköisyyden kasvaessa. Detektorin suhteellisen tehokkuuden määrittämispisteen 1332,5 keV kohdalla nähdään selkeästi detektorikiteen koon merkitys, tehokkuus on tällä energialla suurin suurikokoisimmalla

detektorilla b19116 ja pienin pienikokoisimmalla detektorilla b10158. Kun lähde on mallinnettu absorboivien teräskerrosten taakse, tehokkuudet romahtavat ja alempien gammaenergioiden havaitseminen voi olla jopa mahdotonta käytännössä. Teräskerrostapauksissa tehokkuusarvot kasvavat aluksi energian kasvaessa, mutta kääntyvät lopulta lievään laskuun fotonien korkeamman väliaineesta karkaamisen todennäköisyyden vuoksi. Kuvaajasta voidaan todeta yleisesti, että aktiivisuuslaskentaan käytettävät tehokkuusarvot ovat prosentuaalisesti hyvin matalia, vaikka säteilylähteellä emittoimilla fotoneilla olisi esteetön pääsy detektorille.

Genie2k-ohjelmassa tehokkuuskäyrä lasketaan luomalla sovitus Geometry Composerin taulukon 3.2 mukaisille datapisteille lasketuista tehokkuuksista. Aktiivisuuslaskentaan käytettävä lopullinen tehokkuusarvo ϵ määräytyy Genie2k:n sovittama tehokkuuskäyrästä gammaspektristä havaittavan piikin keskikohdan funktiona. Tehokkuuskäyrän avulla tehokkuus voidaan laskea myös taulukkoon 3.2 listaamattomille energioille. Tässä työssä sovituksen muodostamiseen käytettiin pääsääntöisesti sovitusvaihtoehtoa ”Standard Dual”, joka luo matalalle ja korkealle energia-alueelle omat polynomisovituksensa, käyttäjä voi itse määrittää sovitusvälin jatkuvuuspuolelta (Cross-over Point). Sovituspolynomien asteluku määräytyy käytettävien datapisteiden määrän mukaan. (Canberra Industries 2013, 264-265)

3.3 Nuklidien tunnistaminen ja aktiivisuuden laskenta

Genie2k käyttää nuklidien tunnistamisessa lähteenään nuklidikirjastoja. Nuklidikirjasto on käytännössä lista radionuklideista ja niiden gammaspektrometrian kannalta tärkeimmistä ominaisuuksista, joita ohjelma käyttää nuklidien tunnistamiseen ja aktiivisuuden laskentaan. Gammaspektristä havaittujen piikkien nuklidintunnistuksessa tärkein nuklidikirjaston parametri on gammakvantin energia, sillä analysointiohjelma voi tunnistaa vain havaittujen piikkejä, joiden energiat löytyvät nuklidikirjastosta. Aktiivisuuden määrittämisen kannalta tärkein nuklidikirjastosta löytyvä parametri on puolestaan gammakvantin intensiteetti γ , joka on yksi aktiivisuuden yhtälön 3.1 päälaskentakomponenteista. (Mirion Technologies 2020c, 139-143) Nuklidikirjastojen sisältöä ja asetuksia ohjataan Nuclide Library Editor -ohjelmassa.

Nuklidin tunnistaminen ja aktiivisuuden laskenta Genie2k-ohjelmassa menee tiivistetysti seuraavalla tavalla:

- Genie2k vertaa havaitun piikin keskikohdan energiaa käytettyyn nuklidikirjastotiedostoon kirjattuihin energioihin. Mikäli piikin keskikohta on tarpeeksi lähellä jonkin nuklidin kirjastoenergiaa, piikki voidaan tunnistaa kyseiselle nuklidille kuuluvaksi.
- Genie2k tarkistaa, että monigammakvanttisilla nuklideilla spektristä on havaittu kyseisille nuklideille myös muita kirjastossa niille kirjattuja energioita. Prosessissa otetaan huomioon gammakvanttien intensiteettisuhteet ja toisen nuklidin kanssa päällekkäiset, eli interferoivat energiat. Nuklidi tunnistetaan, mikäli se voidaan tunnistaa riittävällä luottamusarvolla. Hylätyt piikit menevät tunnistamattomien piikkien listalle.
- Genie2k laskee jokaiselle tunnistetulle fotopiikille energiakohtaisen aktiivisuuden ja sen epävarmuuden. Aktiivisuuden laskenta perustuu yhtälöön 3.1, jossa tehokkuuden arvo ϵ on saatu ISOCS-tehokkuuskalibrointimallin avulla. Aktiivisuustulos korjataan myös ottamaan huomioon mittauksen aikana tapahtuvan puoliintumisen. Aktiivisuuden laskentaan voidaan käyttäjän halutessa liittää myös yksinkertaisia puoliintumiskorjauskertoimia, mikäli aktiivisuus halutaan laskea esimerkiksi näytteenottohetkelle. (Mirion Technologies 2020c, 400-410)
- Mahdollisten interferenssikorjauksen jälkeen algoritmi määrittää monikvanttisille nuklideille painotetun keskiarvoaktiivisuuden WM (Weighted Mean Activity). Painotus riippuu energiakohtaisten tulosten epävarmuuksista, jolloin siihen huomioituu muun muassa piikkien pinta-ala ja eri energioille asetettu tehokkuuden epävarmuus. Nuklidikirjastossa on mahdollista merkitä lipulla, mitä nuklidin energioita ei käytetä keskiarvolaskentaan. (Canberra Industries 2013, 348-351)

Nuklidin tunnistusta ja aktiivisuuden määrittystä varten on erittäin tärkeää, että käytettävä nuklidikirjasto ja analysointiprosessin laskentaparametrit ovat optimoitu oman gammaspektrometrin käyttöympäristön tarpeisiin. Pohdittaviin asioihin kuuluu näin muun muassa, että mitä nuklideja esiintyy ympäristön jätteessä, onko kyseisillä nuklideilla interferenssejä toistensa kanssa, minkä tyyppistä ja kuinka tiheää jätettä syntyy, millaisella laitteella mitataan, sekä mitä energioita kullakin nuklidilla on mahdollista havaita

suunnitellulla mittaustavalla tyypillisistä mittaushohteista. Gammaspektrometrisestä käyttöympäristöstä ja nuklidikirjaston koontiperusteista kerrotaan enemmän kappaleessa 4.

3.4 MDA-arvojen määrittäminen

Gammaspektrometriassa nuklidin tunnistamatta jääminen ei tarkoita automaattisesti sitä, etteikö nuklidia voisi olla mitatussa kohteessa vähäisiä määriä. Jäte voi olla esimerkiksi gammasäteilyä vaimentavalta tiheydeltään niin suuri, että gammaspektrissä näkymättömänkin nuklidin aktiivisuus voi olla potentiaalisesti merkittävän suuruinen. Aktiivisemmilla jätteillä osa nuklideista voi puolestaan jäädä dominoivimpien nuklidien aiheuttaman Compton-taustan peittämäksi. Näiden syiden vuoksi nuklideille lasketaan MDA-arvo (Minimum Detectable Activity), joka kertoo nuklidin matalimman aktiivisuuden, joka mitatusta gammaspektristä on mahdollista havaita.

Tässä työssä MDA-arvon määrittämiseen Genie2k-ohjelmalla valittiin Currien menetelmä, johon sovelletaan 95 %:n luottamusväliä, joka on yleisin tapa laskea MDA-arvo (Mirion Technologies 2020c, 418-422). Menetelmässä MDA-arvoksi lasketaan pienin aktiivisuus, joka voidaan havaita 95 %:n luottamuksella, edellyttäen samalla, että aktiivisuutta sisältämättömästä näytteestä voidaan olla havaitsematta aktiivisuutta 95 %:n luottamuksella (Currie 1968, 587).

MDA-arvot lasketaan kaikille nuklidikirjaston nuklideille lukuun ottamatta luonnonnuklideja, joiden aktiivisuustuloksella ei ole merkitystä jätteen jatkokäsittelylle. Yksittäiselle nuklidille MDA-arvot lasketaan energiakohtaisesti sille nuklidikirjastoon kirjatuille energioille ja nuklidin lopulliseksi MDA-arvoksi määräytyy näistä arvoista matalin. On huomioitava, että MDA-arvot lasketaan myös niille nuklidikirjastossa oleville gammakvanteille, jotka käyttäjä on halunnut poistaa aktiivisuuden määrittämiseen käytettävistä energioista. Tällöin esimerkiksi interferenssitilanteet voivat vaikuttaa saatavaan MDA-arvoon.

MDA-arvo lasketaan tavallisesti jätteen massaa kohden, jolloin saadaan pienin havaittava aktiivisuuspitoisuus *MDC* (Minimum Detectable Concentration). MDC-arvot ovat erityisen tärkeitä radioaktiivisen jätteen valvonnasta vapautuksessa, johon STUK on määrittänyt nuklidikohtaisia enimmäisaktiivisuuspitoisuuksia mitattavalle jätteelle. Matala-aktiivisten ja

valvonnasta vapautettavien jätteiden mittaamisessa huomioitavia asioita, sekä laskettavien MDA- ja MDC-arvojen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä käydään läpi kappaleessa 5.

3.5 Genie2k:n tulostusraportointi ja ajosekvenssit

Tätä työtä varten luotu analysointiprosessi, siinä käytetyt analysointialgoritmit ja niiden parametrit on koottu liitteeseen E. Analysointiprosessiin lisätään Genie2k:ssa myös raportointivaiheita, jossa halutut analysointivaiheet voidaan kirjata raporttitiedostoon. Laaja raportointi helpottaa mahdollisten virheiden jäljittämistä jälkikäteen Raportointiin otetaan mukaan vähintään:

- Perustietoraportti (muun muassa mittauskohteen tunnistetiedot, mittausaika, mahdollinen referenssiaika, käytetty mittausaika, mitä yksikköä kohti aktiivisuus lasketaan)
- Havaittujen piikkien tiedot (muun muassa keskikohdan energia, nettopinta-ala ja sen epävarmuus ja FWHM-arvo)
- Tehokkuuskalibrointiraportti (Geometry Composerin laskemat pistetehokkuudet ja Genie2k:n niistä luoma sovite)
- Nuklidien tunnistusraportti ja energiakohtaisten aktiivisuuksien laskentaraportti
- Painotetun keskiarvoaktiivisuuden laskentaraportti
- Tunnistamattomat piikit
- MDA-raportti
- Mahdolliset laaduntarkkailuraportit

Liitteeseen G on koottu esimerkki Genie2k:n tulostamasta analysointiraportista ja sen eri vaiheista, sekä selostettu analysointivaiheiden toiminta pääpiirteisesti.

Genie2k:ssa on mahdollista luoda ennalta määritettyjä ajosekvenssejä, joihin voidaan syöttää muun muassa käyttäjän valitsevat analysointialgoritmit, niiden parametrit ja käytettävä nuklidikirjasto. Automatisoitujen ajosekvenssien käyttäminen nopeuttaa analysointiprosessia huomattavasti ja vähentää inhimillisten virheiden määrää.

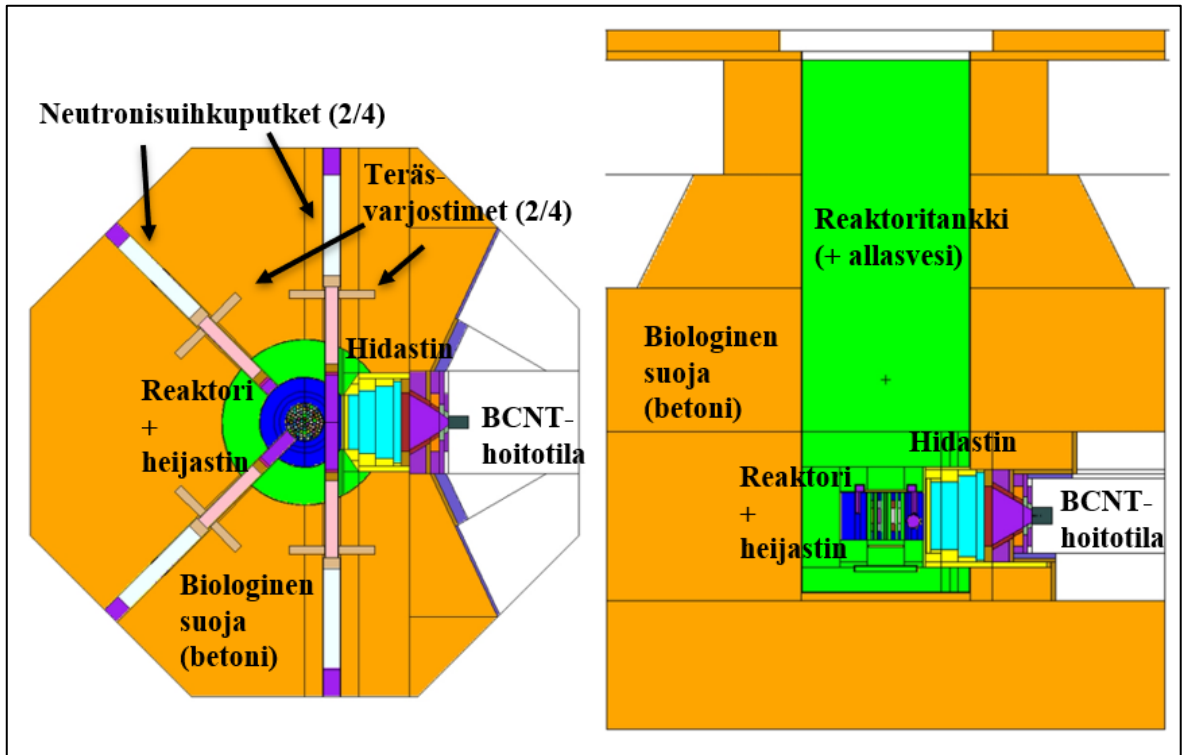
4 FIR 1 -TUTKIMUSREAKTORI JA SEN GAMMASPEKTROMETRINEN KÄYTTÖYMPÄRISTÖ

Kuten johdannossa mainittiin, FiR 1 -tutkimusreaktori on tarkoitus purkaa vuonna 2023 ja suuri osa sen aktiivisten osien purusta syntyvien purkujätteiden karakterisointimittauksista on suunniteltu suoritettavan In-Situ -tyyppisinä gammaspektrometrisina mittauksina, hyödyntäen ISOCS-tehokkuuskalibrointia. Reaktorin tyyppi, rakenne, neutronivuolle altistuneiden komponenttien materiaalit ja käyttöhistoria vaikuttavat suuresti siihen, mitä nuklideja purkujätteestä voidaan havaita gammaspektrometrisilla mittauksilla. Nuklidikoostumusten lisäksi eri purkujätetyyppien tiheysominaisuudet ja pakkaustavat vaikuttavat suuresti valittavaan mittaus- ja analysointitapaan.

Tässä kappaleessa käydään läpi FiR 1 -tutkimusreaktorin rakenne, reaktorin aktiivisuusinventaarissa esiintyvät gammaspektrometrilla havaittavat nuklidit, sekä lyhyesti käyttöympäristöön perustuvia päätöksentekoperusteita nuklidikirjastoon asetettaviin laskenta-asetuksiin. Lisäksi käsitellään lyhyesti tässä työssä pääasiallisesti tarkasteltavaa standardijätepakkausta, 200 litran tynnyriä. Kappaleessa käsitellään hyvin lyhyesti myös FiR 1 -reaktorin kanssa samoihin aikoihin käytöstä poistettavan OK3-materiaalilaboratorion gammaspektrometrin käyttöympäristöä.

4.1 FiR 1 -tutkimusreaktorin rakenne

FiR 1 -tutkimusreaktori on tyypiltään TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics) Mark II avoallasreaktori. Reaktorin allastankki on valmistettu alumiinista ja reaktorissa on grafiitista tehty heijastin. Allastankin ympärillä on betonista rakennettu biologinen suoja, joka toimii reaktorista peräisin tulevan säteilyn vaimentavana rakenteena. Reaktorin yhteydessä on 1990-luvulla rakennettu, lääketieteelliseen sädehoitoon tarkoitettu BNCT-hoitoasema (Boron Neutron Capture Therapy), jossa sädehoitoon käytetyt neutronit hidastettiin Fluental-materiaalista valmistetulla hidastimella. (Räty et al. 2020, 2) Kuvassa 4.1 on esitetty FiR 1 -tutkimusreaktorin perusrakenteet.



Kuva 4.1. FiR 1 -tutkimusreaktorin perusrakenteet (Muokattu lähteestä Kotiluoto & Rätty 2016, 17).

Reaktorin rakenteet muodostavat perustan sen käyttöhistorian aikana syntyneille aktivoitumistuotteille, ja siten reaktorin purkuprojektissa syntyville radioaktiivisille jätteille ja niiden sisältämille nuklideille. Nämä ovat perustana tässä työssä ja myös myöhemmin viranomaiselle toimitettavissa dokumenteissa tutkittaville asioille ja kehitettävillä mittausmenetelmille eri materiaalien ja nuklidien osalta.

4.2 FiR 1 -reaktorin tärkeimmät nuklidit ja nuklidikirjasto

FiR 1 -reaktorin purkuprojektissa gammaspektrometrian kannalta merkittävimmiiksi nuklideiksi on tunnistettu Co-60, Cs-137 ja Eu-152. Alla olevaan taulukkoon 4.1 on koostettu tiivistetysti näiden nuklidien alkuperät ja niiden merkittävimmät esiintymät tutkimusreaktorin rakenteissa.

Taulukko 4.1. FiR 1 -tutkimusreaktorin merkittävimmät nuklidit, niiden syntyalkuperät ja merkittävimmät esiintymät tutkimusreaktorilla (Kotiluoto & Rätty 2016, 58-61).

Nuklidi	Nuklidin alkuperä	Merkittävimmät lähteet FiR 1:llä + muut huomiot
Co-60	Teräksen sisältämän luonnonkoboltin Co-59 aktivoituminen reaktorin läheisyydessä	-Reaktorin aktivoitunut teräksinen säteilytysrengas -Muut reaktorin aktivoituneet teräsosat -Biologisen suojan aktivoituneet teräsvarjostimet -Prosessiveden aktivoituneet korroosioepäpuhtaudet (kontaminaatio) -Havaitaan myös aktivoituneessa alumiinissa, mutta merkittävästi terästä pienemmissä määrissä -Aktiivisuusinventaariltaan suurin avainnuklideista
Cs-137	Fissiotuote, leviää kontaminaationa polttoainevuotojen yhteydessä	-Prosessiveden puhdistukseen tarkoitetut ioninvaihtohartsit -Prosessiveden mukana levinnyt kontaminaatio -Aktiivisuusinventaariltaan <u>pienin</u> avainnuklideista
Eu-152	Grafiitissa ja betonissa esiintyvän luonnollisen europiumin Eu-151 aktivoituminen reaktorin läheisyydessä	-Aktivoitunut reaktorin grafiittihidastin -Aktivoituneet termisen patsaan grafiittijätteet -Aktivoitunut biologisen suojan betoni

FiR 1 -tutkimusreaktorin kanssa samoihin aikoihin käytöstä poistettavassa OK3-materiaalilaboratoriossa lähes kaikki aktiivisuus on peräisin aktiivisen teräksen Co-60:stä. Tämän lisäksi OK3-tiloissa havaitaan myös pieniä määriä Cs-137 -kontaminaatiota, sekä U- ja Pu-kontaminaatiota. (Rätty 2022, 7)

Alla olevassa taulukossa 4.2 on FiR 1 -purkuprojektin purkujätteen karakterisointisuunnitelmassa (Seitoma 2022, 43) esitetty, hieman muokattu lista tutkimusreaktorin eri purkujätetyypeissä mahdollisesti esiintyvistä, gammaspektrometrilla helposti havaittavista ETM-nuklideista (Easy To Measure). Purkujätteen karakterisointisuunnitelmassa esitetystä alkuperäisestä nuklidilistasta on karsittu pois tässä kaikki nuklidit, joiden puoliintumisaika on alle puoli vuotta, sillä vuoden 2015 kesäkuusta laskettuna niitä voidaan katsoa olevan aktiivisuusinventaarissa reaktorin purkuprojektin aikana enää merkityksettömiä määriä. Listatut nuklidit loivat perustan tässä työssä ja myöhemmin purkujätteen gammaspektrometrisessa karakterisoinnissa käytettävälle nuklidikirjastolle, jota kehitettiin ja optimoitiin tutkimuksen edetessä.

Taulukko 4.2. Listaus FiR 1 -tutkimusreaktorin eri purkujätetyypeissä mahdollisesti esiintyvistä ETM-nuklideista, joiden pohjalta käytettävä nuklidikirjasto rakennettiin. Flualental-jätteessä ei ole havaittavia ETM-nuklideja, sen aktiivisuuden määrittäminen perustuu gammaspektrometrin mittausten sijaan näytteenottoon. Lyijy ja vismutti karakterisoidaan myös näytteenoton perusteella gammaspektrometrin kannalta hankalien suurien tiheyksien takia. (Muokattu lähteestä Seitomaa 2022, 43)

Nuklidi	Puolintumisaika [a]	Primääripiirin kontaminaatio	Aktivoitunut alumiini	Aktivoitunut teräs	Aktivoitunut lyijy	Aktivoitunut betoni	Grafiitti	Ioninvaihtohartsit	Vismutti	Flualental
Mn-54	0,855	X	X	X						
Co-60	5,271	X	X	X		X	X	X		
Zn-65	0,668	X	X							
Nb-94	20 300	X		X						
Ag-110m	0,684	X	X	X			X			
Sb-125	2,759	X						X		
Ba-133	10,50		X			X	X			
Cs-134	2,064					X	X			
Cs-137	30,05	X						X		
Eu-152	13,52	X				X	X	X		
Eu-154	8,601	X				X	X			
Eu-155	4,753	X				X				
Ho-166m	1133			X			X			

Nuklidikirjastoa voidaan tarpeen vaatiessa muokata laajemmaksi, mikäli purkuprojektin aikana havaitaan mittauksessa aiemmin listaamattomia nuklideja. OK3-materiaalilaboratorion puolella on havaittu myös esimerkiksi nuklideja Ag-108m ja Am-241 satunnaisesti. Tässä työssä käytettävän nuklidikirjasto ja siihen listatut nuklidit on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä H. Nuklidikirjastosta voidaan huomioda, että pitkään käyttämättömällä reaktorilla havaittava nuklidikirjo ei ole kovin laaja, koska lyhytikäisiä nuklideja ei enää havaita. Näin muun muassa interferenssiongelmiä havaitaan huomattavasti vähemmän verrattuna aktiivisessa käytössä oleviin ydinlaitoksiin.

Gammaspektrometrilla helposti mitattavien ETM-nuklidien lisäksi radioaktiivisessa jätteessä on tavallisesti myös vaikeasti mitattavia DTM-nuklideja (Difficult To Measure). DTM-nuklideja syntyy samalla tavalla kuin ETM-nuklideja, mutta ne saattavat olla gammaenergioiltaan liian matalaenergisiä tai harvinaisia, jotta niitä voitaisiin mitata

gammasektrometrin menetelmin. (IAEA 2009, 1-3) FiR 1:n ja OK3:n purkuprojekteissa DTM-nuklidien aktiivisuudet voidaan määrittää esimerkiksi näytteenoton perusteella tai soveltamalla gammasektrometrilla saatuun ETM-avainnuklidin aktiivisuustulokseen tietylle jätetyypille määritettyä nuklidivektoria. DTM-nuklidien määrittystä ja nuklidivektoreita ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä, asiaa käydään läpi muun muassa purkujätteen karakterisointisuunnitelmassa (Seitomaa 2022).

4.3 Käyttöympäristön vaikutus nuklidikirjaston laskenta-asetuksiin

Käytetyssä nuklidikirjastossa nuklidille listattuja energioita ja niiden keskiarvoaktiivisuuden laskenta-asetuksia täytyy muokata niin, että käyttöympäristön asettamat vaatimukset huomioidaan. Käytöstäpoistojätteen In-Situ -mittauksissa jäte voi olla esimerkiksi tiheydeltään niin vaimentavaa, ettei matalaenergisiä gamma-asteita saateta havaita. Nuklidia voi olla käyttöympäristön jätteissä myös niin vähäisiä määriä, että vain sen korkeaintensiteettisempiä gammakvantteja voidaan havaita jätteessä, näin ylimääräisten energioiden listaaminen kirjastoon voisi aiheuttaa ongelmia nuklidin tunnistamisessa. Keskiarvoaktiivisuuslaskenta-asetuksia päätettäessä tulee vaimennuksen ja intensiteetin osalta ottaa huomioon myös käytettävä mittausaika ja siinä ajassa muodostuvien fotopiikkien pulssistatistiikan tarkkuus, keskiarvoaktiivisuuden määrittämiseen ei kannata käyttää liian epätarkkoja piikkejä. Kahden radionuklidin toistensa kanssa interferoivat energiat voivat haitata sekä nuklidintunnistusta, että aktiivisuuden laskentaa. Tästä syystä niitä suositellaan suljettavaksi ulos keskiarvoaktiivisuuslaskennasta, mikäli nuklidin aktiivisuus on mahdollista määrittää usean interferoimattomankin piikin avulla. Painotettuun keskiarvoaktiivisuuslaskentaan käyttämättömiä piikkejä voidaan kuitenkin käyttää yhä nuklidintunnistustarkoituksiin.

Tyypillinen esimerkki FiR 1 -käyttöympäristössä esiintyvistä nuklidista, jolla joudutaan pohtimaan kaikkia edellä mainittuja asioita, on Eu-152. Alla olevassa taulukossa 4.3 on esimerkkinä käytetyssä nuklidikirjastossa olevat Eu-152:n gammakvantit ja niille päätetyt aktiivisuuslaskentalippumerkinnot. Työn aikana tehtiin vastaavanlaiset pohdinnat myös kaikille muille nuklidikirjastoon listatuille nuklideille, mutta niitä ei esitellä tässä työssä.

Taulukko 4.3. Nuklidikirjastossa olevat Eu-152:n gammakvantit ja perustelut niiden painotetussa keskiarvoaktiivisuuslaskennassa käytölle.

Energia [keV]	Intensiteetti [%]	Käytetäänkö keskiarvoaktiivisuuslaskennassa?	Perustelu käytölle tai käyttämättä jättämiselle painotetun keskiarvoaktiivisuuden WM laskennassa
121,8	28,41	Ei	Liian matala energia In-Situ -mittaamiseen
244,7	7,55	Ei	Liian matala intensiteetti ja energia
344,3	26,59	Kyllä	Korkea intensiteetti, hyvä tehokkuus
411,1	2,24	Ei	Liian matala intensiteetti
444,0	3,12	Ei	Liian matala intensiteetti
778,9	12,97	Kyllä	Kohtuullinen energia ja intensiteetti, hyvä tehokkuus
867,4	4,24	Ei	Liian matala intensiteetti
964,1	14,50	Ei	Interferenssi luonnonnuklidin Ac-228 (964,8 keV)
1085,8	10,13	Kyllä	Tarpeeksi korkea intensiteetti ja energia
1112,1	13,41	Kyllä	Tarpeeksi korkea intensiteetti ja energia
1408,0	20,85	Ei/Kyllä	Korkea energia ja intensiteetti, mutta interferenssi luonnonnuklidin Bi-214 (1408,0 keV) kanssa, voidaan käyttää aktiivisemmissä Eu-152 -mittaustapauksissa

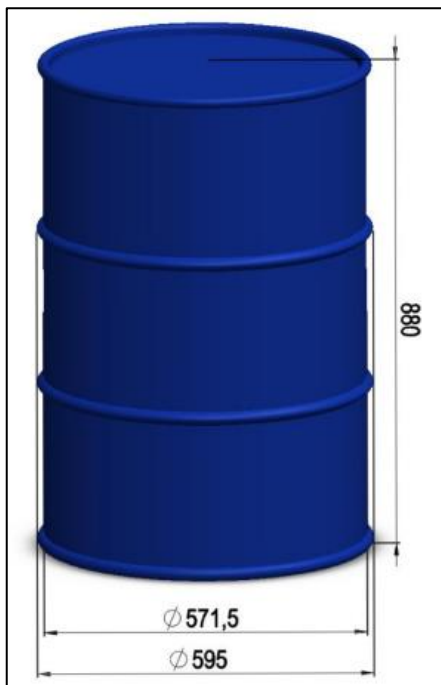
Taulukon 4.3 perusteluista nähdään, että esimerkiksi Eu-152:n korkeaintensiteettisin gammakvantti 121,8 keV todettiin työn aikana energialtaan liian matalaksi ollakseen luotettava aktiivisuuden määrittämisessä, ongelmia havaittiin varsinkin tiheydeltään suuremmilla mittauskohteilla. Päätöstä 121,8 keV gammakvantin laskennasta sulkemisesta helpotti toisen korkeaintensiteettisen, mutta korkeaenergisemmän 344,3 keV gammakvantin olemassaolo, jota voidaan havaita lähes yhtä paljon, mutta sen aktiivisuus voidaan laskea lähtökohtaisesti luotettavammin. Vaikka Eu-152:lla on myös korkeaenergisempiä gammakvantteja, on 344,3 keV varsinkin kevyempien Eu-152 jätteiden tapauksessa dominoiva aktiivisuustulos. Tiheydeltään suuremmilla jätteillä puolestaan selkeämmin erottuvat, matalaintensiteettisemmät ja korkeaenergisemmät gammakvantit 1085,3, 1112,1 ja 1408,0 keV ovat lähes aina dominoivia aktiivisuustuloksia.

Nuklidien laskenta-asetuksien ja tunnistustarkoitukseen käytettävien gammakvanttien määrää tulee voida muuttaa tarvittaessa, ja tarpeita näihin todetaan hyvin todennäköisesti purkuprojektien aikana saatujen käyttökokemusten kerääntyessä. On myös mahdollista luoda esimerkiksi oma nuklidikirjasto tiheydeltään raskaammille jätteille, tai matalaaktiivisille jätteille, mikäli kaikille jätteille käytettävän yhden nuklidikirjaston malli osoittautuu toimimattomaksi.

4.4 200 litran standarditynnyri mittauskohteena

Kuten johdannossa mainitaan, FiR 1 -tutkimusreaktorin ja OK3-laboratorion purkuprojekteissa syntyvät aktiiviset purkujätteet on suunniteltu vietävän Loviisan voimalaitokselle loppusijoitukseen ja puhtaaksi todennettua jätettä voidaan puolestaan vapauttaa valvonnasta. FiR 1 -purkuprojektin purkujätteen pakkaussuunnitelman (Tommila & Seitomaa 2021b) mukaan jätettä tullaan pakkaamaan muutama erityyppiseen jätepakkaukseen, jonka valinta riippuu jätteen rakenteesta ja aktiivisuudesta. Tässä työssä näistä tutkitaan ainoastaan tärkeintä yksittäistä jätepakkausta, 200 litran standarditynnyriä.

200 litran standarditynnyreitä syntyy tutkimusreaktorin purkuprojektin aikana lukumäärällisesti suurin määrä kaikista pakkaustyypeistä ja se on merkittävin jätepakkaustyyppi myös OK3-laboratorion käytöstäpoistoprojektissa. Alla kuvassa 4.2 on esitetty reaktorin purussa käytettävä UN-hyväksytty (United Nations) 200 litran standardijätetytynnyri mittoineen.



Kuva 4.2. 200 litran standardijätetytynnyri mittoineen (Tommila & Seitomaa 2021b, 7). Tynnyrin seinämäpaksuus on noin 1 mm.

Tässä työssä tutkitaan, miten erilaisille gammaspektrometrilla mitattaville tynnyreille asetetut ISOCS-tehokkuuskalibrointimallit vaikuttavat saataviin aktiivisuustuloksiin. Samalla pyritään myös käymään läpi erilaisia mahdollisuuksia luoda käytetty ISOCS-malli ja arvioidaan malleihin liittyvien epävarmuuksien suuruuksia. Tehokkuuskalibrointiin liittyvistä tutkittavista asioista kerrotaan tarkemmin seuraavassa kappaleessa 5.

5 AKTIIVISUUSTULOSSIIN JA VALITTAVIIN MITTAUSMENETELMIIN VAIKUTTAVIA MUTTA ASIOITA

Tämän työn aiemmissa kappaleissa käytiin läpi teoriassa, miten aktiivisuus määritetään mittauskohteesta gammaspektrin, ISOCS-tehokkuuskalibroinnin ja käyttöympäristöön perustuvan nuklidikirjaston avulla. Gammaspektrometrilaitteiston komponenttien suorituskykyyn, In-Situ -mittaamiseen ja -mittaustapaan, sekä ISOCS-tehokkuuskalibrointiin liittyy kuitenkin useita saataviin aktiivisuustuloksiin vaikuttavia asioita, jotka täytyy ottaa huomioon kaikissa tehtävissä mittauksissa. Lisäksi yksi merkittävimmistä kehitettyihin mittausmenetelmiin vaikuttaneista tekijöistä on FiR 1- ja OK3-purkuprojekteissa syntyvän jätteen lajitteleminen aktiivisuuden perusteella muun muassa aktiiviseen loppusijoitettavaan jätteeseen, sekä olettavasti puhtaisiin ja mahdollisesti valvonnasta vapautettaviin jätteisiin. Tässä kappaleessa käydään läpi näitä edellä mainittuja tekijöitä ja niissä huomioitavia asioita. Lisäksi kerrotaan myös, miten ne vaikuttivat muun muassa työn aikana suorittujen mittauskokeiden valintaan, tarkemman laskennallisen tutkimuksen tekemiseen joidenkin ilmiöiden osalta, sekä lopulta valittuihin mittaus- ja analysointitapoihin.

Mittauksissa tulee aina varmistaa, että gammaspektrometrilaitteisto on kunnossa ja suorituskykyinen. Tässä kappaleessa käydään läpi muun muassa, että miten esimerkiksi laitteiston kunto ja sen muuttuminen voivat vaikuttaa ISOCS-tehokkuuskalibroinnin avulla saataviin aktiivisuustuloksiin.

ISOCS-tehokkuuskalibroinnissa keskeisin haaste on mittauskohteen tarpeeksi realistinen mallintaminen. Esimerkiksi tynnyriin pakattava jäte voi poiketa tiheys- ja aktiivisuusjakaumaltaan merkittävästi mallinnuksesta. Haastetta lisää se, että mallinnukseen käytettävän Geometry Composer -ohjelman muokkausmahdollisuudet ovat rajalliset. Tässä kappaleessa käydään läpi tässä työssä pääasiallisesti tarkasteltaville tynnyrigeometrioille tehtäviin ISOCS-tehokkuuskalibrointeihin liittyviä epävarmuustekijöitä.

Mahdollisesti valvonnasta vapautettavan jätteen mittaaminen on tavallisesti aktiivisemmän jätteen mittaamiseen verrattuna huomattavasti hankalampaa, sillä mittauksessa gammaspektriin syntyvien piikkien nettopinta-alat voivat olla hyvin pieniä ja tulokset sitä kautta hyvin epävarmoja. Monesti näissä mittauksissa joudutaan turvautumaan myös

nuklidien MDA-aktiivisuustuloksiin, sillä usein gammaspektriin ei synny tunnistettavia fotopiikkejä, jolloin nuklidin arvioitua aktiivisuutta ei pystytä määrittämään tavalliseen tapaan. Lisäksi, koska In-Situ -mittaukset tapahtuvat kenttäolosuhteissa laboratoriotilojen sijaan, erityisesti vähemmän aktiivista jätettä mitatessa gammaspektrissä havaittavan taustasäteilyn määrä voi olla myös suhteellisesti merkittävä. Tämä vaatii erityishuomioita mittausta paikan taustasäteilyolosuhteiden tiedostamiseen ja tarkkailemiseen, ja sen vaikutukset täytyy ymmärtää. Tässä kappaleessa käydään läpi mittauksissa havaittavan taustasäteilyn ominaisuuksia ja erityisesti sen vaikutusta aktiivisuudeltaan hyvin matalien jätteiden mittaustuloksiin. Lisäksi käydään läpi pääpiirteittäin STUK:n ohjeen *YVL D.4* (STUK 2019b) mukaisen matala-aktiivisen jätteen valvonnasta vapautuksen periaate ja viranomaisen asettamia vaatimuksia näille mittauksille.

Tässä kappaleessa käydään läpi myös, kuinka detektoria voidaan suojata muun muassa taustasäteilyn vaikutukselta, ja miten valittava suojaustapa yhdistettynä 200 litran tynnyrigeometriaan vaikuttaa tämän työn aikana päätettyihin vakiomittaustäisyyksiin. Erittäin aktiivisten mittaustulosten osalta käydään läpi myös lyhyesti, miten ne voivat vaikuttaa laitteiston signaalinkäsittelyelektronikan suorituskykyyn ja sitä kautta saataviin aktiivisuustuloksiin.

5.1 Detektorien karakterisoinnin ja energioresoluution tarkkuus

Lähellä detektorikiteen kidehilan ulkopintaa on tavallisesti ohut, niin kutsuttu kuollut kerros, johon fotoni voi absorboitua, mutta varauksen kerääminen tästä tilavuudesta ei onnistu. Kidehilan kuolleen kerroksen paksuus kasvaa ajan myötä ja HPGe-detektoreilla kasvuprosessi voi nopeutua esimerkiksi detektorin virheellisen jäähdyttämisen johdosta. Kuolleen kerroksen kasvun johdosta detektorin tehokkuus heikkenee, koska se kykenee havaitsemaan aiempaa vähemmän pulsseja aikayksikköä kohti. (Andreotti et al. 2013, 1) Tämä on ISOCS-tehokkuuskalibroinnille ongelma, sillä detektorista tehty ISOCS-malli laskee tehokkuuden valmistajan tehtaalla määrittämien parametrien perusteella. Tällöin tästä valmistushetkisestä tehokkuudesta sittemmin heikentyneellä detektorilla saadaan ISOCS-tehokkuuskalibrointia käytettäessä liian matalia aktiivisuustuloksia. Lisäksi ISOCS-tehokkuuskalibrointiin liittyy itsessään suuria epävarmuuksia, jolloin virheellinen

karakterisointi voi kasvattaa aktiivisuusmäärityksen virheen suuruutta entisestään. (Mirion Technologies 2017b, 9)

Mittaustehokkuudeltaan muuttuneen detektorin virheellinen karakterisointi on mahdollista päivittää valmistajan toimesta, mutta sen tarkkuutta ja mahdollisia muutoksia on pystyttävä seuraamaan jatkuvasti. Tässä työssä tarkistettiin myöhemmin kappaleessa 6.1 esitettävällä mittauskokeella, että ovatko tutkittavien detektorien karakterisointien tarkkuudet hyväksyttävällä tasolla käyttöympäristön kannalta kriittisen energia-alueen osalta. Myöhemmin kappaleessa 8 käsitellään, miten detektorien karakterisointien paikkansapitävyyttä voitaisiin seurata jatkuvasti laaduntarkkailuohjelman avulla.

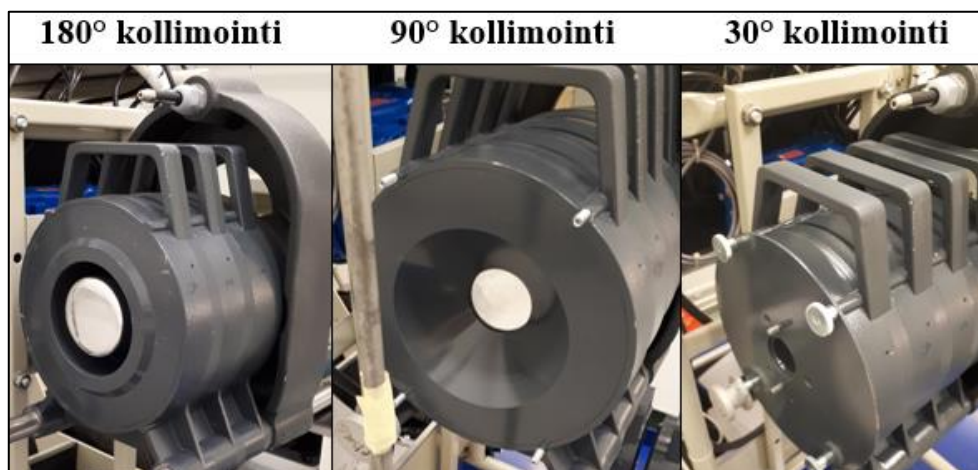
HPGe-detektorien energiaresoluution tarkkuus huonontuu, jos detektorikiteen hilarakenteeseen syntyy epäpuhtauksia, jotka häiritsevät varauksenkeräystä. Niitä voi syntyä pitkän ajan kuluessa muun muassa edellä mainitun kuolleen kerroksen kasvun ja myös säteilyn aiheuttamien vaurioiden muodossa. (Knoll 2010, 396-398) Epäpuhtauksia voi syntyä myös detektorin vikaantuessa. Esimerkiksi jos detektorikapselin tyhjiöön syntyy vuoto, ilman vesihöyryä lauhtuu kylmän detektorikiteen pinnalle, joka sotkee varauksenkeräystä. Myös gammaspektrometrilaitteistojen elektroniikkakomponentit ja niiden kaapelit voivat aiheuttaa resoluution heikentymistä mennessään epäkuuntoon. (Gilmore 2008, 241-244) Myös esimerkiksi mittauspaikan lämpötilan vaihtelu voi aiheuttaa energiaresoluution huonontumista, sillä se voi aiheuttaa siirtymää energioiden kanavatallennuspaikoissa. Mikäli siirtymää tapahtuu mittauksen aikana, havaittavat fotopiikit voivat olla tavallista leveämpiä. Tämä tulee huomioida varsinkin pitkillä mittausajoilla, joissa muun muassa vuorokaudenajan muuttuminen voi vaikuttaa ympäristön lämpötilaan. (Gilmore 2008, 89)

Energiaresoluution tarkkuus ei ole karakterisoinnin tarkkuuteen verrattuna yhtä kriittinen parametri, sillä piikin nettopinta-alan suuruus ei muutu oleellisesti energiaresoluution heikentyessä. Tärkeintä on varmistaa, että Genie2k:n sovittaman fotopiikin muoto vastaa hyvin gammaspektrissä näkyvän, mitatun fotopiikin muotoa ja että sen tilastollinen tarkkuus on riittävä. (Markovic 2022) Detektorin energiaresoluution heikkenemisen suurin ongelma liittyy interferenssitilanteisiin, joissa tavallista leveämpien ja vierekkäisten piikkien pinta-alojen laskenta voi osoittautua hankalaksi. Energiaresoluution tarkkuutta tulee kuitenkin myös tarkkailla jatkuvasti, tästä kerrotaan tarkemmin laaduntarkkailuohjelmasta kertovassa kappaleessa 8.

5.2 Detektorin suojaaminen kollimoinnilla ja mittauskohteen mittausetäisyys

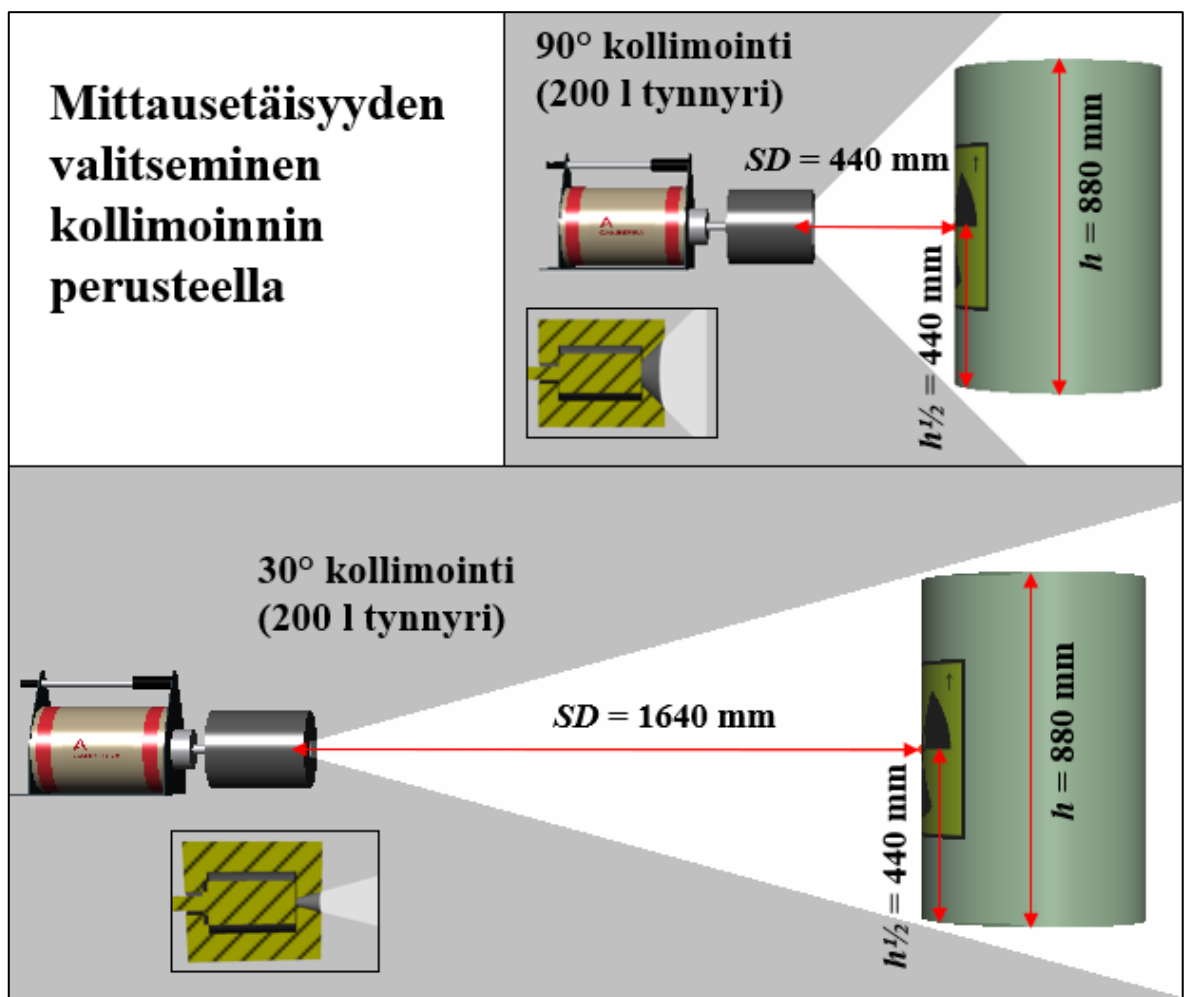
Gammaspektrometrin detektorilla voidaan havaita vain fotoneita, jotka osuvat sen kiteen väliaineeseen. Tehdäkseen havainnon detektorin väliaineella tulisi näin olla suora näköyhteys gammakvantteja lähettäviin säteilylähteisiin. Detektori voi kuitenkin havaita mittauskohteesta emittoituvien fotonien lisäksi myös luonnon taustasäteilyä, sekä maaperästä, rakennusmateriaaleista, sekä muista mittausympäristön lähistöllä olevista radioaktiivisista kohteista peräisin olevia gammakvantteja. Näin ollen detektorin näkemää aluetta on viisasta suojata säteilyä vaimentavalla materiaalilla, jotta mahdollisimman suuri osuus detektorin tekemistä havainnoista olisi peräisin mittauskohteesta. (Knoll 2010, 779) Tavallisin detektorin taustasäteilyltä suojaamiseen käytettävä materiaali on lyijy.

Tässä työssä tutkittavat detektorit on suojattu sivuilta 50 mm paksulla lyijykerroksella käyttämällä detektorivalmistaja Mirion Technologiesin ISOXSHLD-lyijysuojalevyjä. Monesti gammaspektrometri on suojattu niin, että sen sivut ovat lyijylevyjen ympäröimät, mutta detektorin päätypinta näkee kolmiulotteisen 180 asteen näkymän. On kuitenkin mahdollista laittaa detektorin eteen vielä lisäsuojalevyjä, niin kutsuttuja kollimaattorilevyjä, jotka rajaavat detektorin näkemää aluetta pienemmäksi. Detektorin näkyvyyskulman asettamista kutsutaan kollimoinniksi. Alla olevassa kuvassa 5.1 on kuvattu detektori b19116 suojattuna ISOXSHLD-lyijysuojasarjan 180, 90 ja 30 asteen kollimaattorilevyillä.



Kuva 5.1. Detektori b19116 suojattuna ISOXSHLD-lyijysuojasarjan 180, 90 ja 30 asteen kollimaattorilevyillä.

Valittu kollimointikulma vaikuttaa valittavaan mittausetäisyyteen, sillä mittaushohteen tulisi näkyä kokonaisena detektorille. Mittaushohteen olisi hyvä olla kuitenkin mahdollisimman lähellä detektoria, jotta mittauksen tehokkuus olisi mahdollisimman suuri. Hyvän mittausetäisyyden määrittäminen onnistuu monesti yksinkertaisten geometrialaskujen avulla. Esimerkiksi 90 asteen kollimointia käytettäessä 880 mm korkealle 200 litran tynnyrille sopivaksi detektorin ja tynnyrin referenssitason väliseksi etäisyydeksi SD (Source-Detector distance) valitaan suorakulmaisen kolmion laskusääntöjen perusteella 440 mm, kun detektori on kohdistettu tynnyrin puolivälin korkeudelle $h = 440$ mm. Alempana kuvassa 5.2 on esitetty periaate mittausetäisyyden valinnalle 200 litran standarditynnyrin tapauksessa 90 ja 30 asteen kollimaattorilevyjen kanssa.



Kuva 5.2. Mittausetäisyyden valitsemisen periaate 200 litran tynnyrin tapauksessa 90 ja 180 asteen kollimoinneilla, valkoiset alueet kuvaavat detektorin näkökenttää. 180 asteen kollimoinnilla käytetään samaa mittausetäisyyttä kuin 90 asteen kollimoinnilla.

Kuvista 5.1 ja 5.2 nähdään, että 90 ja varsinkin 30 asteen kollimaattorilevyt rajoittavat merkittävästi detektorin paljasta päätyypinta-alaa, mikä vähentää detektorilla havaittavien gammasäteiden määrää. Detektoria peittävä kollimaattorilevy aiheuttaa epävarmuustekijän ISOCS-tehokkuuskalibrointiin, sillä se tulee olla mukana mallinnuksessa ja se vaikuttaa tehokkuuslaskentaan. 90 ja 30 asteen kollimointien käyttöön on kuitenkin usein perusteltuja syitä, esimerkiksi 90 asteen kollimointi voidaan käyttää hankalammissa mittaussympäristöissä taustasäteilyhavaintojen vähentämiseen. 30 asteen kollimaattorilevy voi olla puolestaan hyödyllinen silloin, kun mitattava kohde olisi niin aktiivinen, että se häittäisi gammaspektrometrilaitteiston toimintaa.

ISOCS-laitteistoilla suoritettavien mittausten järjestelmällisyyden ja toistettavuuden kannalta on toivottavaa, että mittauksia suoritetaan ainoastaan rajallisilla määrillä eri vakiomittausetäisyyksiä ja pyrittäisiin valitsemaan laitteistoilla ensisijaisesti käytettävät kollimaattorityypit. Tätä työtä varten suoritetuissa 200 litran tynnyrimittauskokeissa alustavaksi pääasialliseksi vakiomittausetäisyydeksi valittiin $SD = 440$ mm ja kollimointikulmaksi 90 astetta. Mittauskokeissa pyrittiin kuitenkin kokeilemaan myös muita mahdollisia vakiomittausetäisyyksiä, ja pyrittiin tarkastelemaan lyhyesti myös eri kollimointikulmien vaikutusta saataville mittaustuloksille.

5.3 Homogeeninen ISOCS-malli ja sen käytön epävarmuustekijät

Tässä työssä tutkittiin pääasiallisesti 200 litran tynnyreistä tehtyjä ISOCS-malleja, joiden aktiivisuus- ja tiheysjakaumat asetetaan homogeeniseksi. Homogeenisessa tynnyrimallissa jätetilavuuden tiheys asetetaan lieriöperiaatteella standarditynnyrin sisähalkaisijan, jätteen täyttökorkeuden ja tynnyrin sisällön massan perusteella, ja koko tilavuus oletetaan homogeenisesti aktiiviseksi. Tutkittavan mallinnustavan valintaan vaikutti ensisijaisesti se, että purkuprojekteissa syntyvät jätteet tullaan esilajittelemaan jätetyyppi- ja aktiivisuusperusteisesti, ja ne pyritään pakkaamaan mahdollisimman homogeenisesti (Tommila & Seitomaa 2021a, Liite 1). Homogeeninen malli olisi myös hyvin järjestelmällinen tapa käyttää ISOCS-tehokkuuskalibrointia ja vähentäisi mahdollisten inhimillisten virheiden vaaraa.

Monesti gammaspektrometriseen mittaukseen tuleva jätepakkaus ei ole kuitenkaan aktiivisuusjakaumaltaan täysin homogeeninen, ja esimerkiksi esilajittelussa sattuneen virheen vuoksi pakkaukseen voi jäädä yksittäisiä aktiivisempia kohtia. Esimerkiksi mikäli jätepakkauksen toinen puoli on aktiivisempi kuin toinen, mitattaessa aktiivisempaa puolta havaitaan huomattavasti korkeampia pulssinkeräysnopeuksia matala-aktiivisempaan puoleen verrattuna. Mikäli jätepakkauksen molemmilta puolilta saatuihin gammaspektreihin sovellettaisiin saman homogeenisen ISOCS-tehokkuuskalibroitimallin antamia tehokkuusarvoja, mittausten aktiivisuustulokset voivat poiketa merkittävästi toisistaan.

Markovic (2020, 15) on tutkinut aiemmin, että varsinkin pienet, muuhun jätetilavuuteen verrattuna merkittävästi aktiivisemmat pistelähteet voivat aiheuttaa suuria virheitä homogeenisia ISOCS-geometrialleja käytettäessä. Mikäli pistelähde on keskellä tynnyriä, lähdettä ympäröivä jäte vaimentaa tynnyrin pintakerroksesta käsin havaittavaa aktiivisuutta. Tällöin homogeenisella tehokkuuskalibroinnilla voidaan saada monikymmenkertaisesti aliarvioiva aktiivisuustulos. Tämä johtuu homogeenisen mallin olettamasta, että säteilyä havaitaan myös läheltä jätepakkauksen ulkopintaa pienemmällä vaimennuksella, jolloin laskennallinen tehokkuusarvio on todellisen mittausgeometrian tehokkuutta merkittävästi korkeampi. Matalalla pulssimäärällä ja korkealla tehokkuusarvolla aktiivisuus määräytyy yhtälön 3.1 mukaisesti hyvin alhaiseksi. Pistelähteen ollessa lähellä mittauskohteen detektorin vastaista ulkopintaa detektori puolestaan kerää pulsseja paljon homogeenisen mallin olettaa tehokkaammin, jolloin saatava aktiivisuustulos voi yliarvioitua moninkertaisesti. Tämän työn kappaleessa 6 esitellään useita työn aikana suoritettuja mittauskokeita aktiivisuusjakaumiltaan erilaisille 200 litran tynnyreille, joilla arvioitiin homogeenisen ISOCS-mallinnustavan luotettavuutta.

Homogeenisuusoletus voi olla jätepakkauksen tiheysjakauman osalta toisinaan melko ongelmallista. Esimerkiksi metallisella jätteellä pakkaukseen voi jäädä paljon tyhjiä ilmatilavuuksia, mutta toisaalta osa jätteestä voi olla erittäin tiheää. Jos tynnyrin tiheys asetetaan lieriöperiaatteella, asetettu tiheys voi olla merkittävästi alhaisempi kuin itse tynnyrissä olevien metallikappaleiden tiheys. Monesti tynnyrin alaosa voi painaa myös merkittävästi tynnyrin yläosaa enemmän. ISOCS-malliin asetettu tiheysjakauma vaikuttaa merkittävästi saataviin tehokkuusarvoihin. Tämän työn kappaleessa 7 arvioidaan lyhyesti tynnyrin mallin tiheyden muutoksen vaikutusta saatavaan tehokkuusarvoon ϵ .

Tarkan aktiivisuus- ja tiheysjakauman selvittäminen on monesti erittäin vaikeaa ja Geometry Composerin rajoitteet heikentävät aktiivisuusjakauman mallinnusmahdollisuuksia. Yhtenä ratkaisuna ongelmaan standardissa ISO 19017:2017 suositellaan jätepakkausten homogenisointia joko mittaamalla pyörivää kohdetta tai mittaamalla kohdetta useammalta eri sivulta ja ottamalla tuloksista keskiarvon. Näin mittauskohteen aktiivisuus- ja tiheysjakaumasta tulee detektorin näkökulmasta tasaisempi. (ISO 2017, 13-16) Tässä työssä tutkittiin pääasiallisesti pyörityspöydällä pyöritettäviä tynnyreitä.

5.4 Mittauspaikan taustasäteilyn vaikutus aktiivisuustuloksiin

Standardi ISO 19017:2017 suosittelee, että gammaspektrometriset mittaukset tulisi suorittaa paikassa, jossa taustasäteily on mahdollisimman alhainen (ISO 2017, 24). Tällöin gammaspektrissä on mahdollisimman vähän muualta kuin mittauskohteesta peräisin olevia pulssihavaintoja, mikä mahdollistaa tarkempien ja matalampien aktiivisuuksien ja MDA-arvojen määrittämisen.

FiR 1:n ja OK3:n merkittävimpänä taustasäteilyssä havaittavana ja gammaspektrometriin tuloksiin vaikuttavana nuklidina voidaan pitää Co-60:tä, jota esiintyy vaihtelevia määriä laitoksen eri tiloissa. Toisena merkittävänä taustanuklidina voidaan pitää sisätiloissa havaittavan radonin Rn-222 hajoamisketjussa olevaa vismuttia Bi-214, jonka gammakvantin 1408,0 keV energia on täsmälleen sama kuin Eu-152:n yleisimmällä korkeaenergisellä gammakvantilla. Interferenssi Bi-214:n kanssa hankaloittaa esimerkiksi raskaammin suojatun ja matala-aktiivisen Eu-152 -pitoisen betonijätteen mittaamista. Tässä työssä käsitellään kuitenkin ainoastaan mittauspaikkojen taustasäteilyssä havaittavan Co-60:n vaikutusta aktiivisuustuloksiin.

VTT on valinnut matala-aktiivisten jätteiden valvonnasta vapautusmittausten paikaksi Miiluhallin sen alhaisten taustasäteilytasojen vuoksi. Miiluhallissa tehtävissä taustamittauksissa havaitaan hyvin pieniä määriä Co-60 -pulsseja, sekä radonista aiheutuvaa nuklidia Bi-214. Tässä työssä tarkastellaan Miiluhallin Co-60 -taustasäteilytasojen vaikutusta detektorilla b19116 saataviin aktiivisuustuloksiin.

Ensimmäisenä suoritettavassa OK3-purkuprojektissa VTT on päättänyt mitata aktiivisempaa tynnyrijätettä Pilot-hallissa. Pilot-hallissa varastoidaan työn kirjoitushetkellä

aktiivisia jätetyynyreitä, jotka nostavat huoneen taustasäteilytasoa. Pääasiallisena aktiivisuuden lähteenä on Co-60. Työn alkupuolella ISOCS-laitteiston mittauspaikalla havaittava annosnopeus oli enimmillään noin $0,7 \mu\text{Sv/h}$. Työn kirjoitushetkinen taustasäteilytaso ei kuitenkaan estänyt mittaamista, mikäli mitattava kohde oli tarpeeksi aktiivinen, sillä taustassa havaittavien pulssinkeräysnopeuksien prosentuaalinen osuus itse mittauskohteesta havaittaviin vastaaviin pulssinkeräysnopeuksiin pienenee hyvin nopeasti mittauskohteen aktiivisuuden kasvaessa. Säteilevämmillä mittauskohteilla tämä taustasäteilytaso on jo täysin merkityksetön. Tässä työssä arvioidaan lyhyesti, kuinka aktiivista Pilot-hallissa mitattavan jätteen tulisi olla Co-60:n osalta, jotta taustasäteily ei vaikuttaisi merkittävästi saatavaan aktiivisuustulokseen. FiR 1 -tutkimusreaktorin purkuprojektissa Pilot-hallissa ollut laitteisto b21015 tullaan siirtämään reaktorihalliin, jossa taustasäteilyolosuhteet tulevat olemaan huomattavasti paremmat (Seitomaa 2022, Liite 1). Tällöin laitteistolla on mahdollista mitata myös aktiivisuudeltaan matalampaa jätettä.

Kuten kappaleessa 3.1 kerrottiin, mittauskohteen gammaspektrille on mahdollista suorittaa taustavähennys, muuta siihen liittyy monia riskejä, joiden pohjalta tulisi arvioida perusteellisesti menetelmän kannattavuutta. Mikäli taustamittaus suoritetaan tyhjälle detektorin näkymälle ilman mittauskohdetta, ympäristöstä emittoituvat gammafotonit voivat päästä vapaasti detektorille. Sen sijaan varsinaisen mittauskohteen mittauksen aikana osa ympäristöstä peräisin olevista gammafotoneista saattaa absorboitua itse mittauskohteeseen. Tällöin taustavähennys vähentää liian paljon pulsseja gammapiikeistä, mikä johtaa aktiivisuuden aliarvioitumiseen ja voi estää myös nuklidihavainnon tekemisen. (Markovic 2020, 31) Taustavähennys toimisi parhaiten, jos taustasäteilyn mittaus voitaisiin suorittaa samoilla mittausjärjestelyillä varsinaista mittauskohdetta vastaavalle, mutta inaktiiviselle mittauskohteelle. Tämä ei ole kuitenkaan FiR 1 -purkuprojektissa realistinen vaihtoehto jätteiden aktiivisuuksien ja tiheyksien vaihdellessa suuresti.

Taustavähennykseen liittyviä muita riskejä ovat taustamittausten yleensä huono pulssistatistiikka, mikä kasvattaa vähennyksen epäluotettavuutta. Pitkällä taustamittausajalla saavutettu pulssikertymä ei puolestaan vastaisi lyhyemmällä mittausajalla saavutettavaa, huonommin muotoutuvaa pulssikertymää. Taustavähennyksen haittapuoleksi voidaan lukea myös ylimääräinen analysointivaihe, mikä kasvattaa analysointiprosessissa tapahtuvan inhimillisen virheen riskiä.

Tässä työssä pyrittiin arvioimaan lyhyesti laskennallisilla selvityksillä, kuinka paljon työn kirjoitushetkisillä mittauspaikeilla tyhjällä detektorin näkymällä mitatut taustaspektrit ja niissä havaitut pulssinkeräysnopeudet voivat vaikuttaa erilaisilla ISOCS-malleilla saataviin aktiivisuustuloksiin. Lisäksi pyrittiin määrittämään, että kannattaako taustavähennystä suorittaa ollenkaan, sekä mitkä olisivat reunaehdot sille, että näin voitaisiin menetellä.

5.5 Jätteen valvonnasta vapautus ja erittäin matala-aktiiviset mittaushohteet

FiR 1 -purkuprojektissa syntyy runsaasti jätettä, joka ei ole aktivoitunutta tai kontaminoitunutta. Tällaista jätettä ei kannata loppusijoittaa, vaan se voidaan todeta esimerkiksi gammaspektrometrillä mittaamalla puhtaaksi. Puhtaaksi todettu jäte voidaan tämän jälkeen siirtää Ydinenergiain piiristä Jätelain piiriin, mikä mahdollistaa muun muassa jätteen kierrättämisen Tätä prosessia kutsutaan valvonnasta vapautukseksi. (STUK 2019b, 4)

Suomessa radioaktiivisen jätteen valvonnasta vapautuksessa sovelletaan STUK:n määrittämiä nuklidikohtaisia enimmäisaktiivisuuspitoisuusrajoja, jotka on määritelty ohjeessa *YVL D.4*. Raja-arvojen suuruus riippuu siitä, kuinka paljon ydinlaitokselta vapautetaan vuosittain jätettä. FiR 1 -purkuprojektissa sovelletaan pääasiassa yleisen rajoitetun materiaalmäärän (alle 100 t/a) menettelyn raja-arvoja, sekä joissakin tapauksissa raja-arvoiltaan tiukemman yleisen rajoittamattoman materiaalmäärän (yli 100 t/a) menettelyn raja-arvoja. Rajoittamattomalla menettelyllä aktiivisuuspitoisuuksien raja-arvot ovat tärkeimmille käyttöympäristön nuklideille Co-60, Cs-137 ja Eu-152 0,1 Bq/g. Sama raja-arvo on käytössä myös lähes kaikille muille nuklidikirjastoon kirjatuille ETM-nuklideille, lukuun ottamatta paria nuklidia, joilla raja-arvo on löysempi. Rajoitetulla menettelyllä enimmäisaktiivisuuspitoisuuksien raja-arvo on tärkeimmille käyttöympäristön gammasäteileville nuklideille kymmenen kertaa löysempi 1 Bq/g. (STUK 2019b, 30-32) Valvonnasta vapautusmenettelyjen valinnasta, niiden raja-arvoista ja muista vaatimuksista kerrotaan tarkemmin FiR 1 -purkuprojektin purkujätteen valvonnasta vapautussuunnitelmassa (Seitomaa 2021).

Valvonnasta vapautusmittaukseen tulevat jätteet ovat tyypillisesti erittäin matala-aktiivisia tai täysin puhtaita. Tällöin mittauksissa fotopiikkejä ei pääse muodostumaan gammaspektriin ollenkaan, tai ne ovat muodoiltaan melko epäluotettavia. Tällöin nuklideille määritettävät MDA- ja MDC-arvot nousevat erittäin tärkeään rooliin aktiivisuuden arvioinnissa. Mittauksesta saatavien MDA-arvojen on suositeltavaa olla mahdollisimman matalia, jotta voidaan hyvällä luottamuksella arvioida, että jäte ei sisällä aktiivisuuspitoisuusrajat ylittäviä määriä aktiivisuutta.

MDA-arvon suuruus riippuu monista tekijöistä. Pidemmällä mittausajalla spektri muuttuu tasaisemmaksi ja MDA-arvo voidaan määrittää matalammaksi. Myös käytetty ISOCS-tehokkuuskalibrointi vaikuttaa laskettavaan MDA-arvoon, MDA-arvo kasvaa tehokkuuden pienentyessä. Näin tiheämpiä mittauskohteita joudutaan mittaamaan pidempiä aikoja saavuttaakseen saman MDA-arvon. MDA-arvoon vaikuttavaan tehokkuusarvoon vaikuttaa myös käytettävän detektorin suhteellinen tehokkuus ja käytetty mittausetäisyys. Myös alhainen taustasäteilytaso ja hyvä detektorin suojaus madaltavat MDA-arvoja. Jätteen massa vaikuttaa puolestaan MDC-arvoon, painavammalla jätteellä se on alempi. (Jensen et al. 2005, 6) Genie2k:n tarkka tapa laskea MDA- ja MDC-arvoja on esitetty liitteessä I.

Mittauksesta ja sen tehokkuuskalibroinnista saatavaa MDC-arvoa voidaan käyttää valvonnasta vapautusmittauksissa indikaattorilukuna siitä, että mittaus kykenee tunnistamaan riittävän alhaisia aktiivisuuspitoisuuksia. Esimerkiksi parhaillaan purettavan Barsebäckin ydinvoimalaitoksen organisaation sisäinen vaatimus ISOCS-laitteistolla suoritettaville vapautusmittauksille on saavuttaa Co-60:lle MDC-arvo alle 0,02 Bq/g, mikä on alle viidesosan Ruotsin valvovan viranomaisen SSM:n (Strålsäkerhetsmyndigheten) Co-60:n vapautusraja 0,1 Bq/g (Persson 2021). Koska SSM:n aktiivisuuspitoisuusraja Co-60:lle on samansuuruinen STUK:n määrittämän rajoittamattoman materiaalmäärän Co-60 -vapautusrajan kanssa, vastaavaa rajaa voitaisiin soveltaa myös FiR 1 -purkuprojektissa syntyville, valvonnasta vapautettaville jätteille. Sovellettaessa rajoitetun materiaalmäärän valvonnasta vapautuksen raja-arvoja MDC-arvojen suuruuksien tulisi olla tärkeimpien gammanuklidien Co-60, Cs-137 ja Eu-152 osalta alle 0,1 Bq/g, eli alle kymmenesosan niiden vapautusrajasta 1 Bq/g.

Mikäli mittauksesta lasketut MDC-arvot ovat liian korkeat, mittaus tulisi suorittaa uudestaan pidemmällä mittausajalla. Koska MDC-arvon kehittyminen on hyvin riippuvaista detektorin tehokkuudesta, valvonnasta vapautukseen on päätetty käyttää ensisijaisena mittalaitteena

tehokkainta detektoria b19116. Tästä huolimatta valvonnasta vapautukseen voidaan joutua käyttämään pidempiä mittausaikoja aktiivisempien kohteiden mittauksiin verrattuna.

Tässä työssä ei kuitenkaan tutkita tarkemmin valvonnasta vapautusmittauksiin käytettäviä mittausaikoja ja niillä saavutettavia MDC-arvoja eri jätetyypeille, vaan sitä tulisi selvittää myöhemmin viranomaiselle toimitettavassa soveltuvuusarviossa. Työn aikana tutkittiin kuitenkin mittauspaikalla havaittavan taustasäteilyn vaikutusta matala-aktiivisten mittauskohteiden aktiivisuustuloksiin, josta kerrotaan myöhemmin kappaleessa 7.

5.6 Voimakkaasti säteilevät mittauskohteet ja kuollut aika

Kun detektorilla mitataan erittäin aktiivisia mittauskohteita, detektorin signaalinkäsittelyelektroniikka ei välttämättä enää ehdi rekisteröimään kaikkia laitteen keräämiä pulsseja, vaan osa jää havaitsematta. Tämä kasvattaa laitteiston toimimatonta aikaa suhteessa aktiiviseen toiminta-aikaan, eli niin kutsuttua kuollutta aikaa (Dead Time). (ISO 2017, 24). Kuollut aika ilmoitetaan tavallisesti prosenteissa. Esimerkiksi jos laitteisto mittaa reaaliajassa 300 sekuntia, mutta sen aktiivinen toiminta-aika on tuona aikana vain 270 sekuntia, mittauksen kuollut aika on 10 %.

Laitteiston aktiivisen toiminta-ajan määrittää signaalianalysaattorin LTC-toiminto (Live Time Correction), joka luo päällekkäisistä pulssitapahtumista signaaleja, joiden määrästä arvioidaan kuolleen ajan suuruus. Kuollut aika ei saa olla liian suuri, sillä LTC-toiminnon tarkkuus voi heiketä erittäin korkeilla kuolleilla ajoilla. Asialla on suuri merkitys aktiivisuuden määrittämiselle, sillä detektorin aktiivinen toiminta-aika LT on yhtälön 3.1 mukaisesti yksi aktiivisuuden päälaskentakomponenteista. Mikäli LTC-toiminto arvioi aktiivisen toiminta-ajan LT väärin, laitteiston havaitsemat pulssinkeräysnopeudet ja siten aktiivisuudet lasketaan virheellisesti.

Standardi ISO 19017:2017 ei ole määrittänyt suurinta sallittua kuollutta aikaa mittaukselle. Lähteestä riippuen ylärajaksi on määritetty yleensä noin 10–30 %. FiR 1 -reaktorin ja OK3-laboratorion käytöstäpoistoissa syntyy paljon jätettä, jossa nämä rajat ylittyvät ilman poikkeavia mittaustoimenpiteitä, kuten esimerkiksi mittausetäisyyden kasvattamista tai rajoittavamman kollimaattorilevyn käyttöä. Tämä työn tekoaikana tutkittiin, että detektorin kuollut aika voi olla ainakin 20 % ilman mainittavaa vaikutusta aktiivisuuden

määritystarkkuuteen. Tämä mittauskoe ei kuitenkaan mahtunut diplomityöhön mukaan, vaan se lisätään myöhemmin viranomaiselle toimitettavaan soveltuvuusarvioon. Kaikissa tässä työssä esitettävissä mittaustapauksissa kuolleet ajat ovat alle 20 %. Työssä käsitellään lyhyesti myös mittausetäisyyden ja kollimoinnin merkitystä aktiivisuustuloksille.

6 SUORITETUT MITTAUSKOKEET

Tässä työssä tutkittavilla detektoreilla suoritettiin useita eri mittauskokeita, joiden tarkoituksena oli tarkastella mittalaitteiden suorituskykyä, sekä erityisesti ISOCS-tehokkuuskalibroinnin tarkkuutta erilaisilla mittausgeometrioilla ja radionuklideilla. FiR 1- ja OK3-purkujätteet loppusijoitukseen vastaanottava Fortum on määrittänyt, että ISOCS-tehokkuuskalibroinnilla tulisi päästä $\pm 30\%$:n tarkkuuteen jätteen todellisesta aktiivisuudesta. Lisäksi tulisi tutkia mittalaitteiden ja ISOCS-tehokkuuskalibroinnin toimintarajoitteita muun muassa jätteen tiheyden ja aktiivisuusjakauman epähomogeenisuuksien, sekä mitattavan energia-alueen osalta. (Seitomaa 2022, Liite 1) Näiden vaatimusten pohjalta tässä työssä tutkittaviksi mittaustapauksiksi valittiin alla olevaan taulukkoon 6.1 luetellut mittauskohteet ja radionuklidit. Valinnoissa korostuivat erityisesti tämän työn kannalta tärkeimmät tynnyrigeometrit, joilla testattiin tämän työn aikana suunniteltuja vakiomittaustapoja ja yritettiin osoittaa ne toimiviksi.

Taulukko 6.1. Työn aikana suoritettavat mittauskokeet ja niissä tutkitut asiat.

Koe	Mittauskohde	Radio-nuklidit	Tärkeimmät tutkitut asiat	Tutkitut geometriamallit
1	ISOXSRCE-testilähde	Na-22, Eu-155	Tutkittavien detektorien karakterisointien tarkistaminen	Ei ISOCS-mallia
2	Standardipistelähde sellaisenaan mitattuna	Eu-152	ISOCS-tehokkuuskalibroinnin kyky määrittää tarkasti tunnetun mittauskohteen aktiivisuus	Tarkka ISOCS-mallinnus
3	200 litran vedellä täytettävä tynnyri, johon lisättiin radioaktiivinen jodiliuos (aktiivisuusjakaumaltaan homogeeninen tynnyri)	I-131	ISOCS-tehokkuuskalibroinnin kyky määrittää aidosti homogeenisen jätteen aktiivisuus, detektorin suorituskyky vaimennuksessa, gammasäteilyn energian vaikutus	Homogeeninen ISOCS-tynnyrimalli + vaimentavan kerroksen mallinnus
4	NPL-laboratorion lähettämä kansainvälinen vertailumittaustynnyri (aktiivisuusjakaumaltaan epähomogeeninen tynnyri)	Co-60 Cs-137 Am-241	ISOCS-tehokkuuskalibroinnin kyky määrittää epähomogeenisen jätteen aktiivisuus	Homogeeninen ISOCS-tynnyrimalli + tarkka ISOCS-mallinnus
5	Metalliromulla (146,4 kg) ja betonilla (370 kg) täytetyt 200 litran tynnyrit, joihin asetettiin pistemäinen säteilylähde	Eu-152	Pistemäisen säteilylähteen aiheuttama virhe homogeenisella ISOCS-tehokkuuskalibroinnilla, detektorin suorituskyky vaimennuksessa, pyöritysmittaamisen vaikutus	Homogeeninen ISOCS-tynnyrimalli + tarkka ISOCS-mallinnus

Mittauskokeissa ISOCS-tehokkuuskalibroinnin tarkkuuden arviointiin käytettiin pääasiallisesti säteilylähteitä, joiden valmistaja on ilmoittanut valmistussertifikaatissa niiden aktiivisuuden referenssipäivämääränä. Tämän työn aikana käytetyt säteilylähteet ja niiden tärkeimmät tiedot on esitetty liitteessä J.

Osassa mittaustapauksia säteilylähteen aktiivisuus laskettiin nuklidin puoliintumisajan avulla mittaushetkelle, tähän tarkoitukseen käytettiin internetistä löytyvän Rad Pro Calculator -sivuston puoliintumislaskutyökalun avulla (Rad Pro Calculator 2009). Osassa mittaustapauksia oli puolestaan kätevämpää korjata Genie2k:lla laskettava aktiivisuustulos suoraan lähteen valmistajan ilmoittamalle referenssipäivälle, käyttäen Genie2k:n omaa aktiivisuuden päivämääräkorjausominaisuutta. Päivämääräkorjauksen tarkkuudeksi riitti yksi päivä kaikilla muilla nuklideilla, paitsi I-131:llä, jonka puoliintumisaika on ainoastaan 8 päivää. Samalle päivämäärälle korjattuja aktiivisuuksia käytettiin mittaustarkkuutta kuvaavan suhteellisen virheen RE (Relative Error) määrittämiseen yhtälöllä 6.1:

$$RE_i = \frac{A_{i,Genie} - A_{i,Lähde}}{A_{i,Lähde}} \cdot 100 \% \quad (6.1)$$

Missä RE_i on aktiivisuuden suhteellinen virhe nuklidille [%]

$A_{i,Genie}$ on Genie2k:n laskema aktiivisuus nuklidille i [Bq]

$A_{i,Lähde}$ on käytetyn säteilylähteen todellinen aktiivisuus nuklidille i [Bq]

Aktiivisuustuloksia tarkastellaan tässä työssä sekä energiakohtaisesti, että painotettuina keskiarvoaktiivisuuksina WM . Aktiivisuustulokset laskettiin pääsääntöisesti becquerelleiksi (Bq), osassa tapauksia aktiivisuus lasketaan myös mittauskohteen painoyksikköä kohti.

Mittausten epävarmuuksia laskiessa otettiin huomioon Genie2k:n laskeman yhden keskijakauman suuruisen epävarmuuden lisäksi myös käytettyjen säteilylähteiden sertifikaateissa ilmoitetut aktiivisuuden epävarmuudet. Näiden tekijöiden yhdistetty epävarmuus (Combined Uncertainty) U_{Comb} lasketaan yhtälöllä 6.2 (JCGM 2008, 18-19):

$$U_{Comb} = \sqrt{U_{Genie}^2 + U_{Lähde}^2} \quad (6.2)$$

Missä U_{Comb} on yhdistetty epävarmuus [%]

U_{Genie} on Genie2k:n laskeman aktiivisuustuloksen epävarmuus [%]

$U_{Lähde}$ on käytetyn säteilylähteen valmistajan ilmoittama epävarmuus [%]

Käytännön mittausjärjestelyistä voidaan mainita, että kaikissa tynnyrimittauksissa tynnyri asetettiin siten, että detektori osoittaa tynnyrin horisontaaliseen keskikohtaan, korkeudelle $h = 440$ mm. Mikäli tynnyrimittaus tehtiin pyöritysmittauksena, pyörityspöytää pyöritettiin vakionopeudella 1 rpm (rounds per minute). Gammaspекtrometrin mittausajat asetettiin halutun pituisiksi detektorin aktiivisessa toiminta-ajassa LT reaaliajan sijaan. Tämä helpottaa tulosten analysointia, sillä aktiivisuus määritetään aktiivisen toiminta-ajan avulla ja myös piikkien pulssinkeräysnopeuksien vertailu cps-yksikössä on helpompaa. Käytettävät mittausajat arvioitiin tapaus- ja detektorikohtaisesti. Mittausajan valinnassa tärkeimpänä kriteerinä oli pääasiassa tarkasteltavien fotopiikkien kelvollisen pulssistatistiikan saavuttaminen, jotta nettopinta-alan epävarmuus vaikututtaisi saatavaan aktiivisuustulokseen mahdollisimman vähän. Näin ISOCS-tehokkuuskalibroinnista aiheutuvaa vaikutusta aktiivisuustulokseen pystyttäisiin arvioimaan luotettavammin. Taustasäteilyn vähentämistarve arvioitiin mittaustapauskohtaisesti.

Mittauksista saadut gammaspекtrit analysoitiin Genie2k-ohjelmassa liitteessä E olevan analysointiprosessin mukaisesti. Osassa kokeita ISOCS-tehokkuuskalibrointia ei tarvinnut suorittaa ollenkaan, vaan tärkeimmät mittaustulokset saatiin fotopiikkien nettopinta-aloilla S . Näissä kokeissa analysointiprosessi parametreineen oli muutoin täysin sama, mutta tehokkuuskalibrointiin ja nuklidikohtaisiin tuloksiin liittyvät analysointivaiheet karsittiin pois.

Käytettyjen ISOCS-tehokkuuskalibrintimallien kuvailemiseen käytetään tässä työssä muun muassa seuraavia lyhenteitä ja symboleita:

- HOMG = Homogeeninen geometriamalli, jossa aktiivisuuden ja tiheyden oletetaan jakautuvan tasaisesti koko pakkauksen jätetilavuudelle
- HETG = Heterogeeninen geometriamalli, jossa aktiivinen tilavuus on mallinnettu erilliseksi tilavuudeksi pakkaukseen, useimmiten todellista mittaustilannetta enemmän vastaava ja täten aktiivisuuden määrittämisen kannalta tarkempi mallinnustapa
- SD = Source-Detector distance, detektorin päädyn etäisyys mittaustilanteen pintaan
- FH = Filling Height, mallinnetun pakkauksen sisällön täyttökorkeus
- ρ = Mallinnukseen yksittäiseen dimensioon asetettava tiheys
- ρ_{sis} = Mallinnetun pakkauksen sisällön tiheys, joka lasketaan tynnyrille lieriöperiaatteella pakkauksen pohjapinta-alan ja sisällön täyttökorkeuden FH avulla laskemalla
- h = tynnyrigeometriaan asetettavan pistelähteen sijainti korkeussuunnassa, tynnyrin pohjasta
- r = tynnyrigeometriaan asetettavan pistelähteen sijainti radiaalisuunnassa, tynnyrin radiaalikeskuksesta

Edellä mainittujen lyhenteiden ja symbolien lisäksi osassa mittaustapauksissa kertovissa kappaleissa annetaan mittaustapauksille erilliset mittaustapaustunnisteet selitteineen, jotka helpottavat mittaustulosten tarkastelua ja niiden vertailua keskenään.

6.1 Mittaus 1: ISOXSRCF-testilähteet

Kuten kappaleessa 5.1 kerrottiin, ISOCS-tehokkuuskalibrintimalli olettaa detektorin suorituskyvyn olevan valmistajan laitteen valmistushetkellä määrittämällä tasolla, ja näin detektorin mahdollisesti muuttunut tehokkuus vaikuttaisi suoraan saataviin aktiivisuustuloksiin. Tässä työssä tarkasteltavien detektorien tehokkuuden muutoksia on mahdollista tarkistaa Mirion Technologiesin detektorien mukana toimitettavilla

ISOXSRCE-testilähteillä. Kuvassa 6.1 näkyy ISOXSRCE-testilähde asetettuna detektorin b19116 detektorikapseliin kiinni karakterisoinnin tarkistusmittausta varten.



Kuva 6.1. ISOXSRCE-testilähde kiinnitettynä mittausasentoon detektoriin b19116.

ISOXSRCE-testilähteiden säteilevinä radionuklideina toimivat Eu-155 ja Na-22, joiden valmistushetkiseksi kalibroimattomiksi aktiivisuuksiksi on ilmoitettu noin 37 kBq molemmille nuklideille. Käytettyjen detektorikohtaisten ISOXSRCE-lähteiden tarkemmat spesifikaatiotiedot ovat liitteessä J. Lähdettä mitataan kuvassa 6.1 näkyvällä tavalla ja saadusta gammaspektristä analysoidaan detektorin pulssinkeräysnopeudet seuraaville fotopiikeille (tarkempi nuklididata liitteessä A):

- Eu-155: 60,0 keV, 86,5 keV ja 105,3 keV
- Na-22: 511,0 keV ja 1274,5 keV

Laitevalmistaja Mirion Technologies on ennen detektorin toimittamista suorittanut tehtaallaan samalla testilähteellä vastaavat mittaukset. Näiden mittausten tulokset on toimitettu VTT:lle tehdaskarakterisoidujen detektorien mukana toimitetuissa detektorikohtaisissa karakterisointiraporteissa (Mirion Technologies 2021b; Mirion Technologies 2018a; Canberra Industries 2012b). Nämä detektorikohtaiset mittaustulokset toimivat vertailuarvoina käyttäjän omatoimisesti ISOXSRCE-testilähteillä suorittamille mittaauksille. Mirion on määrittänyt, että mikäli käyttäjän suorittamien ISOXSRCE-

mittausten päivämääräkorjatut pulssinkeräysnopeudet poikkeavat vertailuarvoista matalalla energia-alueella yli 7–10 %, tai korkealla energia-alueella yli 4–5 %, on suositeltavaa ottaa yhteyttä detektorivalmistajaan ja päivittää ISOCS-tehokkuuslaskentaan käytettävä detektorin laskentamalli vastaamaan detektorin senhetkistä suorituskykyä. Tätä prosessia kutsutaan detektorin uudelleenkaracterisoinniksi. Mirion on ilmoittanut tehtaallaan suorittamistaan ISOXSRCE-mittauksista piikkien myös FWHM-arvot, joten myös energiaresoluution muutoksia on mahdollista seurata. (Mirion Technologies 2017b, 9-10)

6.1.1 ISOXSRCE-testilähteet: Mittausjärjestelyt ja analysointimenetelmä

Tässä työssä tarkasteltavat ISOXSRCE-mittaukset suoritettiin kuvan 6.1 mukaisesti testilähteen ollessa detektorin edessä. Ennen lähteen paikoilleen asettamista detektorin ympäriltä poistettiin lyijysuojat. Lähde on helppo asettaa aina samalle etäisyydelle sen varressa olevan ulokkeen avulla.

Vuosina 2021 ja 2018 tehdaskarakterisoidujen detektoreiden b21015 ja b19116 ISOXSRCE-lähteet olivat työn tekohetkellä vielä niin aktiivisia, että niiden mittausajaksi riitti 10 minuuttia. Huomattavasti vanhemman, vuonna 2012 tehdaskarakterisoidun b10158-detektorin ISOXSRCE-lähdettä jouduttiin puolestaan mittaamaan 2 tunnin ajan, jotta mittaus saavuttaisi tyydyttäviä pulssimääriä. Detektoreilla b21015- ja b19116 ISOXSRCE-mittaukset toistettiin viisi kertaa mittauksen toistettavuuden tutkimiseksi. Varadetektorilla b10158 mittaus toistettiin kolmesti. Taustasäteilyn merkityksen katsottiin olevan vähäinen kokeessa saavutettavilla pulssinkeräysnopeuksilla. Analysointituloksista saadut fotopiikkien pulssimäärät S jaettiin mittausajalla LT , jonka jälkeen saadut pulssinkeräysnopeudet korjattiin valmistajan referenssipäivään perustuvalla päivämääräkertoimella.

6.1.2 ISOXSRCE-testilähteet: Mittaustulokset

Taulukkoon 6.2 on koottu ISOXSRCE-mittauksissa havaittujen, päivämääräkorjattujen pulssinkeräysnopeuksien CR keskiarvot, laitevalmistajan ilmoittamat referenssiarvot, mittaustulosten suhteelliset erot referenssiarvoihin, sekä mittausten prosentuaaliset keskihajonnat keskiarvoon nähden.

Taulukko 6.2. ISOXSRCe-testilähteen mittaustulokset eri detektoreille. Mirion Technologies on määrittänyt, että mitattujen ja päivämääräkorjattujen pulssinkeräysnopeuksien suhteellinen ero *RE* valmistajan referenssiarvoihin ei saisi olla matalalla energia-alueella yli 7–10 %, tai korkealla energia-alueella yli 4–5 % (Mirion Technologies 2017b, 9).

b21015 (GX1518)		Mittauspäivä: 28.2.2022		
5 mittausta, mittausaika 10 min		Valmistajan mittauspäivä: 27.1.2021		
Energia [keV]	Pvm.-korjattu pulssinkeräysnopeus CR (keskiarvo) [cps]	Valmistajan ref. pulssinkeräysnopeus CR [cps]	Suhteellinen ero <i>RE</i> [%]	Mittausten keskihajonta [%]
60,0	4,76	4,77	-0,28	3,43
86,5	124,89	127,91	-2,36	0,30
105,3	82,74	82,24	+0,61	0,62
511,0	177,79	183,72	-3,23	0,55
1274,5	37,73	37,40	+0,88	0,77
b19116 (GC4018)		Mittauspäivä: 1.3.2022		
5 mittausta, mittausaika 10 min		Valmistajan mittauspäivä: 26.9.2018		
Energia [keV]	Pvm.-korjattu pulssinkeräysnopeus CR (keskiarvo) [cps]	Valmistajan ref. pulssinkeräysnopeus CR [cps]	Suhteellinen ero <i>RE</i> [%]	Mittausten keskihajonta [%]
60,0	3,00	3,38	-11,19	7,52
86,5	124,90	133,07	-6,14	0,30
105,3	91,77	95,40	-3,81	0,49
511,0	283,20	290,95	-2,66	0,32
1274,5	76,44	77,64	-1,55	0,43
b10158 (BE2020)		Mittauspäivä: 4.3.2022		
3 mittausta, mittausaika 2 h		Valmistajan mittauspäivä: 10.1.2012		
Energia [keV]	Pvm.-korjattu pulssinkeräysnopeus CR (keskiarvo) [cps]	Valmistajan ref. pulssinkeräysnopeus CR [cps]	Suhteellinen ero <i>RE</i> [%]	Mittausten keskihajonta [%]
60,0	4,62	4,78	-3,34	0,86
86,5	115,75	122,10	-5,20	1,29
105,3	76,48	80,12	-4,54	0,22
511,0	100,05	107,25	-6,72	0,29
1274,5	17,30	18,68	-7,41	0,29

Tuloksia tarkastelemalla nähdään, että detektorilla b21015 tulokset pysyvät hyvin tarkasti Mirionin määrittämässä rajoissa kaikilla energioilla. Detektorilla b19116 karakterisoinnin tarkkuus on myös erinomainen, mutta mittaustulosten perusteella sen alumiini-ikkuna aiheuttaa epätarkkuutta alle 100 keV energioille. Sen sijaan vanhimmalla detektorilla BE2020 fotopiikille 1274,5 keV pulssinkeräysnopeus on yli 7 % referenssiarvoa hitaampaa. Tämä johtaisi tehokkuuskalibroinnissa esimerkiksi käyttöympäristön aktiivisuusinventaarissa esiintyvien Co-60:n ja Eu-152:n korkeaenergistien gammakvanttien aktiivisuustulosten aliarvioitumiseen. BE2020-detektori täytyisi taten uudelleenkaracterisoida, jotta sitä voitaisiin käyttää varalaitteena. Kaikkien detektorien

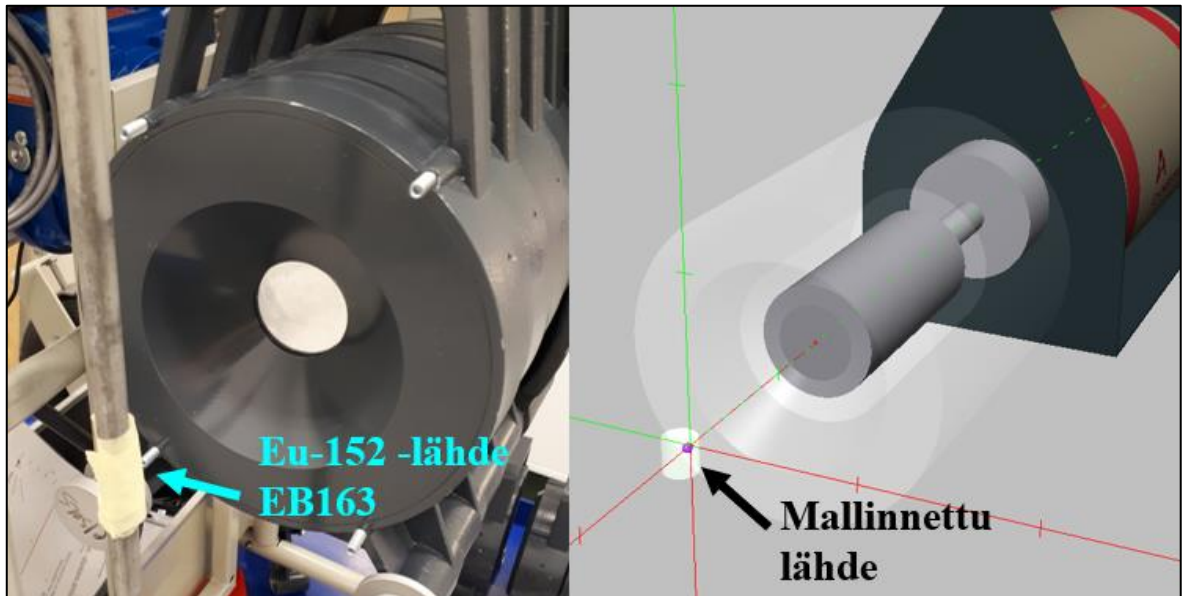
osalta voidaan todeta mittaustulosten keskihajontojen olevan hyvin pieniä, jolloin ISOXSRCE-mittausta voidaan pitää hyvin toistettavana ja siten luotettavana mittauksena.

6.2 Mittaus 2: Eu-152 standardipistelähde sellaisenaan mitattuna

Tässä kokeessa tarkastellaan, kuinka tarkasti ISOCS-tehokkuuskalibroinnilla voidaan määrittää aktiivisuudeltaan tarkasti tunnetun standardipistelähteen aktiivisuus. Mitattavaksi säteilylähteeksi näihin kokeisiin valittiin Eu-152 -standardilähde EB163, jonka tarkemmat spesifikaatiotiedot on esitetty liitteessä J. Eu-152 on yleisesti erinomainen testilähde, sillä sen gammakvantit kattavat tasaisesti työn kannalta kiinnostavimman energia-alueen ja ISOCS-tehokkuuskalibroinnin toimivuutta on näin mahdollista tarkastella laajalla energia-alueella. Tämän kokeen avulla voidaan arvioida myös edellisessä kappaleessa 6.1 esitettyjen detektorikohtaisten ISOXSRCE-mittausten tulosten vaikutusta saataviin aktiivisuustuloksiin.

6.2.1 Eu-152 -pistelähdemittaus: Mittausmenetelmät ja ISOCS-geometriamallit

Koe suoritettiin kaikilla kolmella tarkasteltavalla detektorilla. Koetta varten lähde EB163 asetettiin statiiviin etäisyydelle $SD = 200$ mm, ollen kohtisuorassa detektorin päädyn keskikohdan suhteen. Kaikilla detektoreilla mittauksessa käytettiin 90 asteen kollimaattorilevyä, joka esitettiin aiemmin kuvassa 5.1 ja näkyy myös seuraavassa kuvassa 6.2. Tehokkuuskalibrointiin käytettäväksi geometriamallinteeksi valittiin ”Complex Cylinder”, jossa sylinteriin on mahdollista mallintaa pallon muotoinen lähde. Sylinterin seinämä mallinnettiin ohueksi ilmakerrokseksi, ja seinämän lähinnä detektoria olevaan kohtaan mallinnettiin kiinni halkaisijaltaan $d = 1$ mm suuruinen pallo pistemäiseksi aktiiviseksi tilavuudeksi tiheydellä $1,4 \text{ g/cm}^3$. Mittausjärjestely ja siitä mallinnettu ISOCS-tehokkuuskalibrointimalli näkyvät kuvassa 6.2.



Kuva 6.2. Lähteen EB163 mittausjärjestely detektorilla b19116, sekä siitä mallinnettu ISOCS-tehokkuuskalibrointimalli. ISOCS-mallin kuvassa pistelähteen suuruutta ja ilmaksi mallinnettua sylinteriä on suurennettu selkeyden vuoksi. Lisäksi 90 asteen kollimaattorimalli on asetettu kuvassa läpinäkyväksi.

Mittausajoina valittiin detektoreilla b21015 ja b19116 $LT = 1800$ s ja suhteelliselta tehokkuudeltaan alhaisemmalla detektorilla b10158 $LT = 7200$ s. Lyhyeltä etäisyydeltä mitattaessa laitteistojen pulssinkeräysnopeudet olivat niin suuria, että taustavähennyksen suorittaminen katsottiin tarpeettomaksi.

6.2.2 Eu-152 -pistelähdemittaus: Mittaustulokset

Sellaisenaan mitatun Eu-152 -lähteen mittaustulokset on koottu alla olevaan taulukkoon 6.3. Tarkasteluun valittiin energiakohtaiset aktiivisuustulokset gammakvanteille 344,3, 778,9, 1112,1 ja 1408,0 keV, sekä painotettu keskiarvoaktiivisuus WM . Mittaukset suoritettiin 2.11.2022, jolloin lähteen EB163 laskennallinen aktiivisuus oli 99,2 kBq, tämän perusteella on laskettu aktiivisuuden suhteellinen virhe RE . Yhdistetyssä epävarmuudessa U_{Comb} huomioitiin lähteen valmistajan ilmoittama aktiivisuuden epävarmuus $\pm 5\%$. Yksityiskohtaisemmat mittaustulokset on esitetty liitteessä K.

Taulukko 6.3. Sellaisenaan mitatun lähteen EB163 aktiivisuustulokset Eu-152:n eri energioilla. Lähteen aktiivisuus mittauspäivänä 2.11.2022 oli $A_{Lähde} = 99,2$ kBq.

Energia	Suure	Detektori b21015	Detektori b19116	Detektori b10158
344,3 keV	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,20 E+04	9,67 E+04	8,57 E+04
	Epäv. U_{Comb} [%]	9,46	13,76	9,45
	Suht. virhe RE [%]	-7,29	-2,50	-13,59
778,9 keV	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,27 E+04	9,81 E+04	8,57 E+04
	Epäv. U_{Comb} [%]	7,91	12,72	7,86
	Suht. virhe RE [%]	-6,55	-1,09	-13,58
1112,1 keV	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,48 E+04	9,87 E+04	8,45 E+04
	Epäv. U_{Comb} [%]	6,52	12,03	6,47
	Suht. virhe RE [%]	-4,38	-0,47	-14,82
1408,0 keV	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,13 E+04	9,77 E+04	8,27 E+04
	Epäv. U_{Comb} [%]	6,51	11,90	6,46
	Suht. virhe RE [%]	-8,01	-1,49	-16,66
WM (Weighted Mean)	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,29 E+04	9,82 E+04	8,47 E+04
	Epäv. U_{Comb} [%]	5,57	11,46	5,56
	Suht. virhe RE [%]	-6,35	-0,99	-14,63

Tuloksista nähdään, että Eu-152:n aktiivisuustulokset eivät poikenneet merkittävästi EB163:n todellisesta aktiivisuudesta detektoreilla b21015 ja b19116. Vanhimmalla detektorilla b10158 saatiin kuitenkin selkeästi alhaisempia aktiivisuustuloksia, mikä johtuu aiemmin ISOXSRCE-lähteellä todetusta detektorin karakterisoinnin vanhentumisesta. Havainto vahvistaa päätöstä tarpeelle suorittaa detektorille b10158 uudelleenkaraktisointi Mirionin puolesta, eikä kyseistä detektoria enää tarkastella enempää tässä työssä. Tuloksista voidaan nähdä yleisesti myös, että detektorien energiakohtaiset aktiivisuustulokset poikkesivat vain hyvin vähän toisistaan, mikä on tavanomainen merkki mittauskohdetta hyvin vastaavasta tehokkuuskalibroinnista.

6.3 Mittaus 3: Homogeeninen tynnyri (I-131 -pitoinen vesi)

Tätä työtä ja viranomaiselle myöhemmin toimitettavaa soveltuvuusarviota varten tuli luoda aktiivisuusjakaumaltaan homogeeninen 200 litran tynnyrigeometria, jonka aktiivisuus on jäljitettävissä. Näin voidaan validoida tynnyrijätteille ensisijaiseksi mallinnustavaksi ehdotettavan homogeenisen ISOCS-tehokkuuskalibrointimallin toimivuus vaaditulla ± 30 %:n tarkkuudella aktiivisuusjakaumaltaan aidosti homogeenisen jätteen tapauksessa. Tähän tarkoitukseen soveltuvimmaksi mittauskokeeksi päätettiin valita vedellä täytettävä

tynnyri, johon lisätään radioaktiivista I-131 -jodiliuosta. Vaikka I-131 ei kuuluukaan FiR 1 -käyttöympäristön nuklideihin, sen gammasäteilyominaisuudet ovat tutkimuksen kannalta ajatellen kuitenkin riittävän samanlaisia käyttöympäristössä todellisuudessa esiintyvien nuklideihin verrattuna. Lisäksi I-131:n lyhyt puoliintumisaika (8,023 d) ja stabiiliksi jodiksi hajoaminen mahdollistaa kontaminoituneesta vesimassasta turvallisen eroon pääsyn kohtuullisessa ajassa. I-131:n tärkeimmät gammasäteilyominaisuudet ovat taulukoituna liitteessä A.

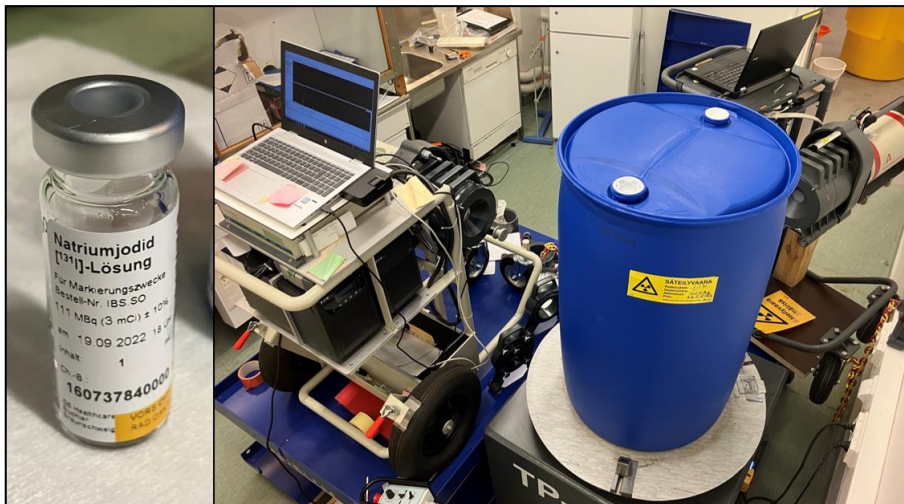
6.3.1 I-131 -vesitynnyri: Mittausmenetelmät ja ISOCS-geometriamallit

Koetta varten hankittiin korkillinen 200 litran muovitynnyri, joka täytettiin vedellä ensin 100 litraan asti väliin täyttökorkeudelle $FH = 425$ mm, jonka jälkeen 1 ml I-131 -liuos lisättiin veteen. Tämän jälkeen ampullia huuhdeltiin vielä huolellisesti ruiskupullon avulla, jottei siihen jäisi jäämiä radioaktiivisesta jodiliuksesta. Käsimitareilla ja gammaspektrometrilla tehtyjen mittausten perusteella arvioitiin, että ampulliin ja sen käsittelyvälineisiin jääneen kontaminaation määrä oli lähes merkityksetön liuoksen kokonaisaktiivisuuteen verrattuna. Kun puoleen väliin asti täytetyn tynnyrin mittaukset saatiin valmiiksi, täytettiin tynnyri vielä täyteen korkeuteen $FH = 860$ mm asti, jolloin vettä oli tynnyrissä 210 litraa.

Tynnyriä mitattiin kaikilla kolmella laitteistolla, mutta detektorin b10158 mittaamia spektrejä ei analysoitu, koska detektoria ei ole tämän työn tekohetkellä uudelleenkaracterisoitu. Mittauksia suoritettiin mittauksia eri etäisyyksiltä ja erilaisilla kollimaattoreilla, aiemmin kuvassa 5.2 esitettyjen valittujen vakiomittausetäisyyksien $SD = 440$ mm ja $SD = 1640$ mm lisäksi yhdeksi mittausetäisyydeksi valittiin $SD = 880$ mm. Osa mittauksista tehtiin myös ilman tynnyrin pyörittämistä, jolla varmistettiin mittauskohteen homogeenisuus. Osa mittauksista myös toistettiin kahteen kertaan mahdollisten tulosvaihteluiden havainnoimiseksi. Lopuksi tehtiin vielä detektorilla b21015 muutamia mittauskokeita mittaamalla tynnyriä vaimentavien teräs- ja lyijykerroksien läpi, joilla tutkittiin vaimennuksen vaikutusta mittaustuloksiin ja ISOCS-tehokkuuskalibroinnin taipumista haastavampiin mittausgeometrioihin. Alla olevaan taulukkoon 6.4 on listattu eri mittaustapausten tunnusten osat ja niiden selitteet. Alempana kuvassa 6.3 näkyy käytetyn I-131 -liuoksen ampulli, sekä esimerkki yhdestä mittausjärjestelystä Miiluhallissa.

Taulukko 6.4. Mittaustapausten tunnuksien selitteet, esimerkiksi tunnus *SD440 rota k90d 50mmPb* tarkoittaa etäisyydeltä $SD = 440$ mm tehtyä pyöritysmittausta 90 asteen kollimaattorilla, mitaten tynnyriä 50 mm lyijykerroksen läpi.

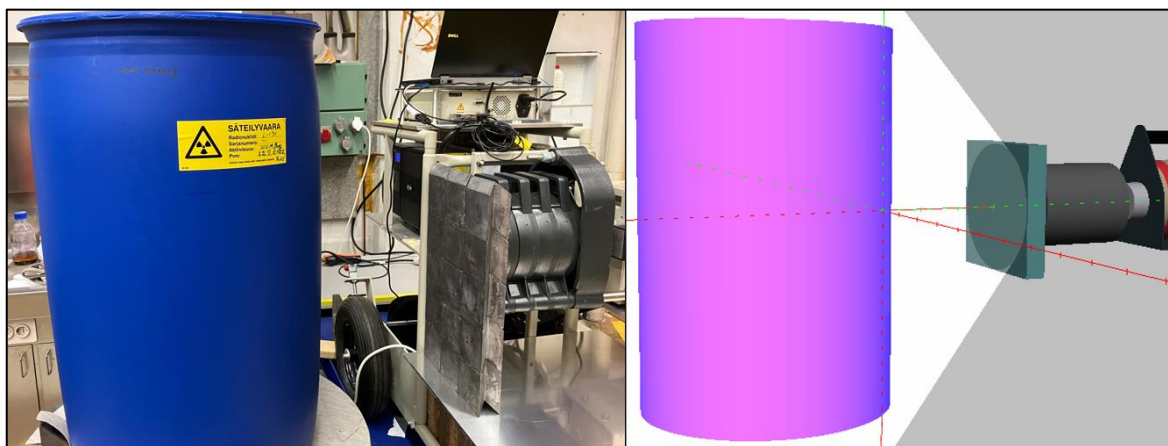
Mittaustapausten tunnuksen osa	Tunnuksen osan selite
SD440, SD880, SD1640	Mittauskohteen etäisyys SD 440, 880 tai 1640 mm
stat 0deg, stat 90deg, stat 180deg, stat 270deg	Staattinen mittaus ilman pyöritystä, tynnyrin asento 0, 90, 180 tai 270 astetta
rota	Pyöritysmittaus
k30d, k90d, k180d	Kollimaattori 30, 90 tai 180 astetta
29mmSteel	Detektorin edessä 29 mm paksu teräslevy
50mmPb	Detektorin edessä 50 mm paksu lyijykerros



Kuva 6.3. Vasemmalla käytetty 1 ml I-131 -liuos ampullissa ennen sen veteen lisäämistä. Oikealla radioaktiivinen vesitynnyri Miiluhallissa, mittauksessa samanaikaisesti laitteistoilla b19116 (vas.) ja b10158 (oik.). Kuvassa mittaukset etäisyydeltä $SD = 440$ mm 90 asteen kollimoineilla.

ISOCS-tehokkuuskalibrointia varten Geometry Composerilla luotiin homogeenisia malleja ”Simple Cylinder” -mallinteella, tynnyrin sisähalkaisijaksi asetettiin $d = 565$ mm ja sisällön korkeudeksi puolikkaalle tynnyrille $FH = 425$ mm ja täydelle tynnyrille $FH = 860$ mm. Sisällön tiheydeksi asetettiin veden tiheys $\rho_{sis} = 1,00$ g/cm³. Detektorilla b21015 suoritettavia vaimennuskokeita varten vaimentavat teräs- ja lyijykerrokset mallinnettiin ”Simple Cylinder” -mallinteen ”Absorber1” -dimensioon. 29 mm paksun teräslevyn tiheydeksi asetettiin punnituksen ja levyn dimensioiden perusteella $\rho = 7,47$ g/cm³. 50 mm lyijykerros muodostettiin massoiltaan lähellä toisiaan olevien lyijytiilien avulla. Muurin tiheys arvioitiin kollimointikulman näkemien lyijytiilien massojen ja dimensioiden perusteella, 90 asteella huomioiden myös lyijytiilien väliin jääviä ilmapälejä. 90 asteella

lyijykerroksen tiheydeksi asetettiin $\rho = 10,95 \text{ g/cm}^3$, 30 asteella $\rho = 10,96 \text{ g/cm}^3$. Alla kuvassa 6.4 on esimerkkinä detektorin b21015 todellinen mittaustilanne 50 mm lyijymuurin läpi, sekä siitä tehty ISOCS-tehokkuuskalibrointimalli.



Kuva 6.4. Detektorilla b21015 suoritetun vaimennuskokeen mittaustilanne 50 mm lyijymuurilla, sekä siitä tehty ISOCS-tehokkuuskalibrointimalli. Lyijymuuri on mallinnettu hyödyntäen ”Simple Cylinder” -mallinteen ”Absorber1” -dimensiota.

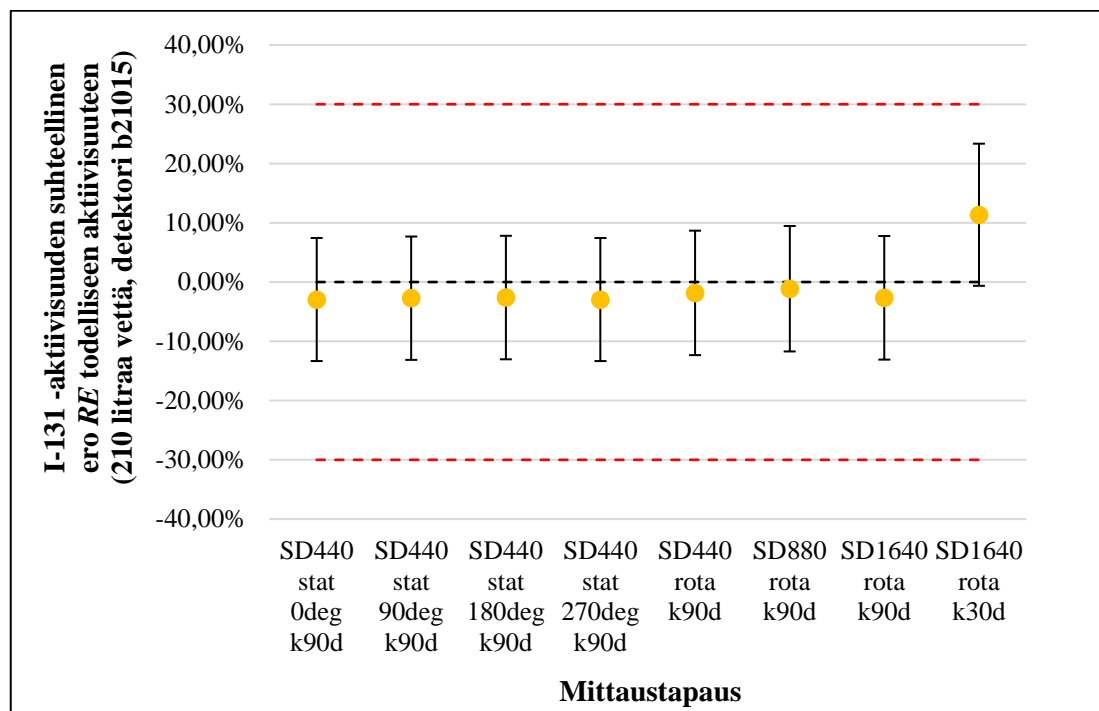
Väliaikaisesti nuklidikirjastoon lisätyn I-131:n gammakvanteista painotetun keskiarvoaktiivisuuden laskentaan määritettiin käytettäväksi gammakvantit 364,5, 637,0 ja 722,9 keV. Käytettävät mittaussajat valittiin pääasiassa sen perusteella, että näistä matalaintensiteettisin energia 722,9 keV saavuttaa kaikissa mittauksissa luotettavan pulssikertymän, mutta vaimennuskokeissa tästä jouduttiin välillä tinkimään. Mittauksille ei suoritettu taustavähennyksiä, sillä havaittavat I-131 -pulssit ovat varmuudella mittauserästä peräisin.

6.3.2 I-131 -vesitynnyri: Mittaustulokset

Kaikki I-131 -vesitynnyrin mittaushjelmasta saadut mittaustulokset 100 ja 210 litran vesitäytöllä ovat taulukoituna liitteessä L. Tässä kappaleessa käydään läpi tarkemmin ainoastaan 210 litraan asti täytetyn tynnyrin kokeiden, sekä detektorilla b21015 suoritettujen vaimennuskokeiden tuloksia. Käytetyn I-131 -lähteen nimellisaktiivisuus oli referenssipäivämääränä 19.9.2022 klo 14:00 111,75 MBq, kaikki aktiivisuustulokset korjattiin Genie2k:lla tälle ajanhetkelle. Liuoksen valmistaja (GE Healthcare) ilmoitti

aktiivisuuden epävarmuudeksi $\pm 10\%$, mikä huomioitiin mittaustulosten yhdistetyssä epävarmuudessa U_{Comb} . Aktiivisuustulokset on ilmoitettu painotettuina keskiarvoaktiivisuuksina, ellei erikseen mainita toisin. Mittaustulosten kuvaajiin on merkitty yhdistettyjen epävarmuuksien lisäksi myös jätteet vastaanottavan Fortumin määrittämä $\pm 30\%$ tarkkuusvaatimus aktiivisuuden määrittämiselle.

Alla kuvaan 6.5 on koottu Genie2k:n laskemien aktiivisuuksien ja I-131 -lähteen nimellisaktiivisuuden suhteelliset erot RE eri mittaustapauksissa laitteistolla b21015, kun mittauksessa on ollut 210 litran tynnyri.

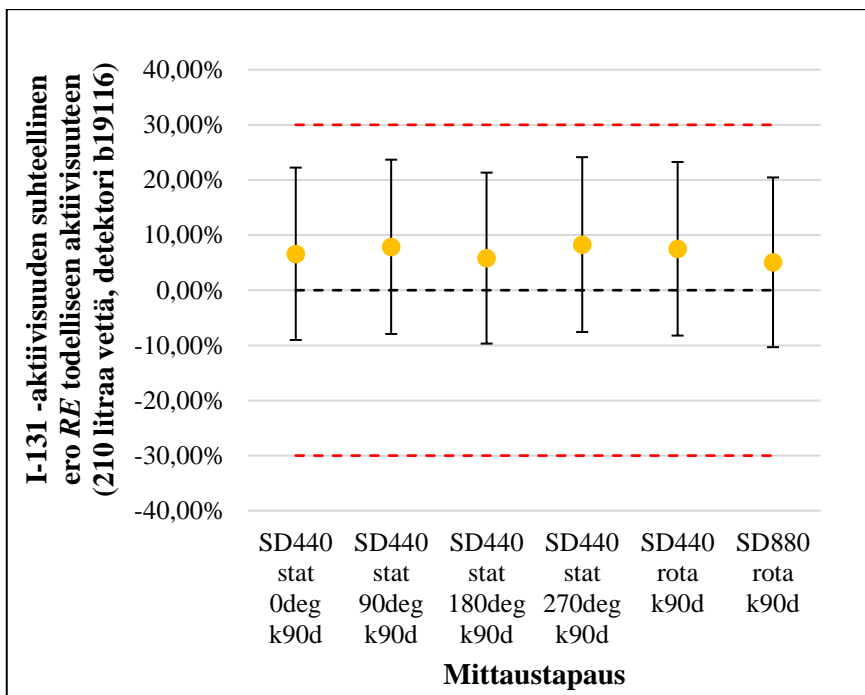


Kuva 6.5. Eri mittaustapausten tuloksia detektorilla b21015 210 litraan asti täytetyllä tynnyrillä, käyttäen homogeenista ISOCS-tehokkuuskalibrintimallia.

Kuvasta 6.5 nähdään, että laitteistolla b21015 homogeenisella ISOCS-tehokkuuskalibrintimallilla I-131:n aktiivisuus saatiin arvioitua tynnyristä erittäin tarkasti ja epävarmuudet huomioon ottaen tulokset pysyivät hyvin $\pm 30\%$ rajan sisäpuolella. Staattisten mittausten tulosten samansuuruisuuden perusteella tynnyrin sisältö oli erittäin homogeenista, eikä tynnyrin pyörittämisellä ollut merkitystä aktiivisuustuloksiin. Myöskään tynnyrin mittaaminen eri etäisyydeltä ei näyttänyt vaikuttavan saataviin aktiivisuustuloksiin. Sen sijaan 30 asteen kollimaattorilevyllä aktiivisuustulokset hieman yliarvioituivat. Tämä

johtuu siitä, että kyseinen kollimaattorilevy rajoittaa merkittävästi detektorikiteen kohteelle näkevää paljasta poikki-pinta-alaa rajusti, ja luo tehokkuuslaskennan kannalta haastavamman vaimentavan elementin ISOCS-geometriamallinnukseen. Tämäkin virhe pysyi kuitenkin epävarmuudet huomioiden $\pm 30\%$ rajan sisäpuolella ja on suunnaltaan konservatiivinen.

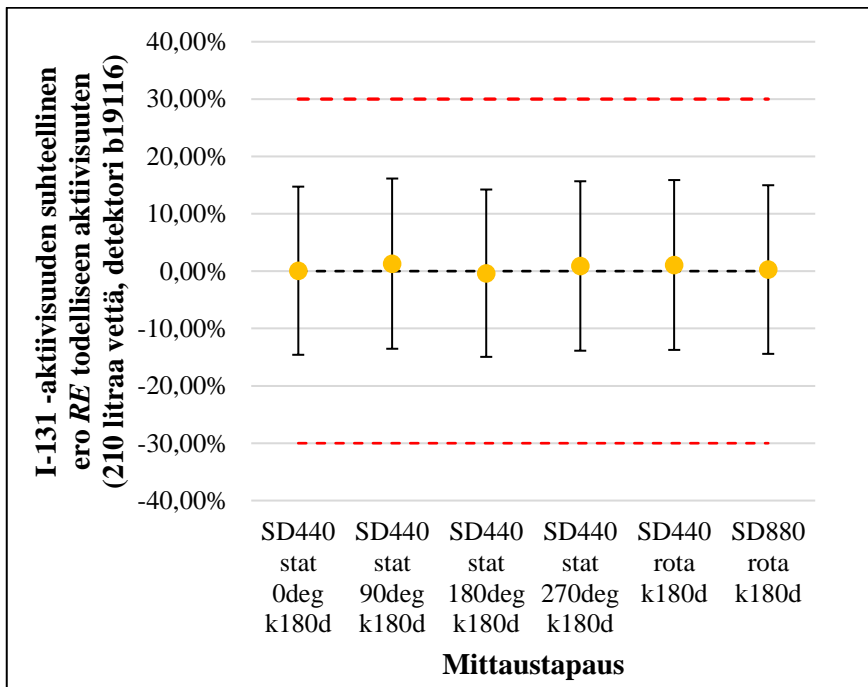
Alla kuvaan 6.6 on koottu Genie2k:n laskemien aktiivisuuksien ja I-131 -lähteen nimellisaktiivisuuden suhteelliset erot RE eri mittaustapauksissa laitteistolla b19116, kun mittauksessa on ollut 210 litran tynnyri ja käytössä 90 asteen kollimaattorilevy. Laitteistolla b19116 mittauksia ei suoritettu yhtä monelta eri etäisyyksiltä kuin detektorilla b21015, sillä sitä ei ole tarkoitettu käytettäväksi ensisijaisesti erittäin aktiivisten jätepakkausten mittaamiseen.



Kuva 6.6. Eri mittaustapausten tuloksia detektorilla b19116 210 litraan asti täytetyllä tynnyrillä, käyttäen 90 asteen kollimointia ja homogeenista ISOCS-tehokkuuskalibroitimallia.

Kuvasta 6.6 nähdään, että myös laitteistolla b19116 homogeenisella ISOCS-tehokkuuskalibroitimallilla I-131:n aktiivisuus saatiin arvioitua tynnyristä melko tarkasti, yhdistetyt epävarmuudet pysyivät hyvin $\pm 30\%$:n sisäpuolella, eikä mittausetäisyydenkään tuplaaminen etäisyydelle $SD = 880$ mm ei vaikuttanut tulokseen oleellisesti.

Laitteistolla b19116 suhteellinen virhe RE oli hieman suurempi kuin laitteistolla b21015. Syyksi tähän arveltiin käytetyn 90 asteen kollimaattorilevyn halkaisijaltaan ~50 mm reikää, joka jättää detektorikiteen paljasta päätyypinta-alaa lyijykerroksen alle. Ilmiö on merkityksetön pienikiteisillä detektoreilla b21015 ja b10158, mutta se rajoittaa merkittävästi detektorin b19116 halkaisijaltaan 63 mm suuruisen detektorikiteen päätyypinta-alaa. Tästä syystä laitteistolla b19116 päätettiin ajaa sama mittaushjelma myös ilman kollimaattorilevyä, 180 asteen kollimoinnilla. Näiden mittausten tulokset on koottu kuvaan 6.7.

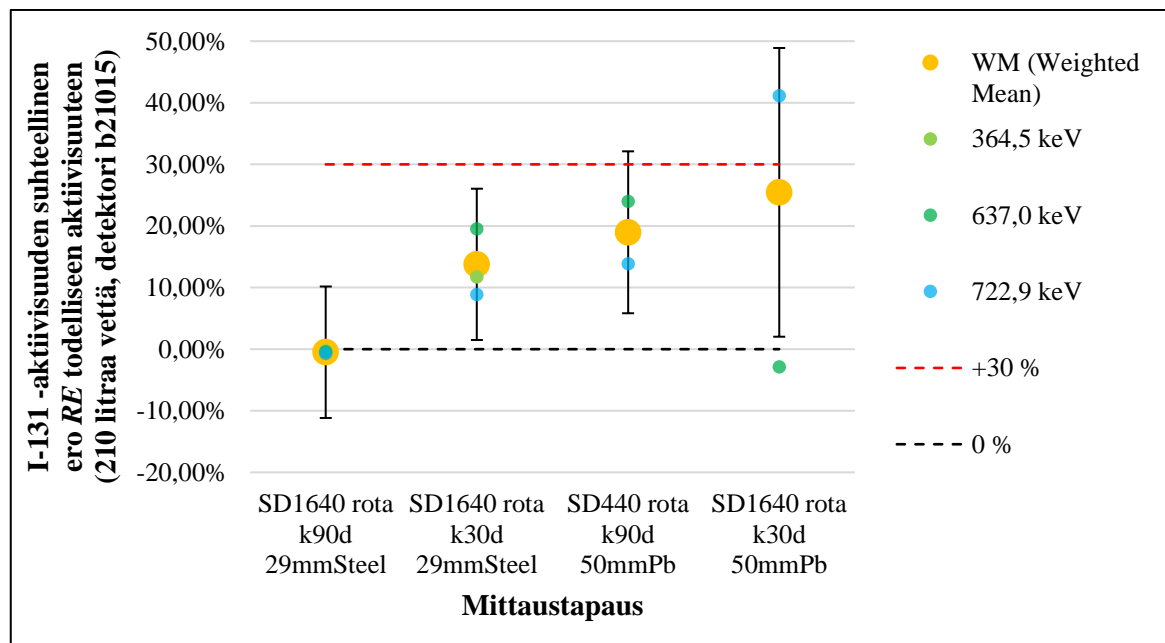


Kuva 6.7. Eri mittaustapausten tuloksia detektorilla b19116 210 litraan asti täytetyllä tynnyrillä, käyttäen 180 asteen kollimointia ja homogeenista ISOCS-tehokkuuskalibrointimallia.

Kuvasta 6.7 nähdään, että vaihtamalla 180 asteen kollimointiin laitteistolla b19116 mittaustarkkuus parani huomattavasti. Tämän vuoksi on perusteltua, että laitteistolla b19116 voisi käyttää mittaolosuhteiltaan hyvässä Miiluhallissa 180 asteen kollimointia mittauksiin. Tämä parantaisi myös mittaustehokkuutta valvonnasta vapautuksessa, sillä 180 asteen kollimoinnilla pulsseja havaitaan huomattavasti nopeammin verrattuna 90 asteen kollimaattorilevyn käyttämiseen.

Viimeisenä I-131 -vesitynnyrin tuloksista käydään läpi detektorilla b21015 suoritettujen vaimennuskokeiden tulokset, jotka on koottu kuvaan 6.8. Aiemmin esitellyistä

mittaustuloksista poiketen näissä kokeissa on ilmoitettu myös energiakohtaiset aktiivisuustulokset. Syynä tähän on pääasiassa vaimennuksen takia heikentynyt pulssistatistiikka ja sen aiheuttamat lisäepävarmuudet. Esimerkiksi vaimennuksen kannalta haastavimmassa mittaustapauksessa, jossa tynnyriä mitattiin 30 asteen kollimaattorilla etäisyydeltä $SD = 1640$ mm 50 mm lyijykerroksen läpi mitattiin tynnyriä peräti 100 tunnin ajan, fotopiikkien 637,0 ja 722,9 keV nettopinta-alat jäivät ainoastaan noin ~300 pulssin kokoisiksi. Kuvaajaan on merkitty painotetuille keskiarvoaktiivisuuksille lasketut yhdistetyt epävarmuudet U_{Comb} . Vaimennuskokeiden energiakohtaiset nettopulssimäärät, aktiivisuustulokset ja epävarmuudet on taulukoitu yksityiskohtaisemmin liitteeseen L.



Kuva 6.8. Eri mittaustapausten tuloksia detektorilla b21015 210 litraan asti täytetyllä tynnyrillä, kun detektorin eteen on asetettu vaimentavia kerroksia.

Kuvasta 6.8 huomataan, että 29 mm teräskerroksen läpi mitatessa 90 asteen kollimoinnilla tulokset olivat käytännössä yhtä tarkkoja kuin mitatessa ilman vaimennusta. 30 asteen kollimoinnilla tuloksessa havaittiin sama aiemmin todettu, kollimaattorilevystä aiheutuva aktiivisuustuloksen yliarviointi, lisäksi energiakohtaiset tulokset poikkesivat enemmän toisistaan 90 asteella saatuihin tuloksiin verrattuna. 50 mm lyijykerroksen läpi mitatessa huomattiin, ettei I-131:n intensiteetiltään merkittävintä gammakvanttia 364,5 keV pystytä enää havaitsemaan, vaan WM aktiivisuus oli määritettävä gammakvanttien 637,0 ja 722,9 keV avulla. 90 asteen kollimaattorilla mittaustarkkuus pysyi kuitenkin yhä kohtuullisena.

Kuvasta 6.8 huomataan lisäksi, että voimakkaimmin vaimentavassa mittaustapauksessa *SD1640 rota k30d 50mmPb* mittaustuloksen epävarmuus oli erittäin suuri, johtuen pääasiassa heikosta pulssistatistiikasta. Mittauksen heikosta pulssistatistiikasta kertoo muun muassa se, että mittaustuloksena saatu päivämääräkorjattu I-131:n MDA-arvo ~119 MBq oli korkeampi kuin I-131 -lähteen referenssiaktiivisuus 111,75 MBq. Jälkeenpäin ajateltuna tämä mittaus olisi kannattanut suorittaa aiempänä ajankohtana, kun I-131 säteili vielä voimakkaammin. Tällöin fotopiikkien pulssikertymät olisi saatu suuremmiksi, ja olisi voitu arvioida luotettavammin ISOCS-tehokkuuskalibroinnin osuutta mittaustuloksen tarkkuudessa. Huonolla pulssistatistiikalla saadun aktiivisuustuloksen suhteellinen virhe oli kuitenkin melko maltillinen $\pm 30\%$ -tarkkuuteen verrattaessa, sekä lisäksi konservatiiviseen suuntaan. Voidaan myös olettaa, että mitatessa korkeaenergisempiä, käyttöympäristön inventaarissa esiintyviä nuklideja Co-60 ja Eu-152 edellytykset mitata paksummankin vaimentavan kerroksen läpi ovat olemassa.

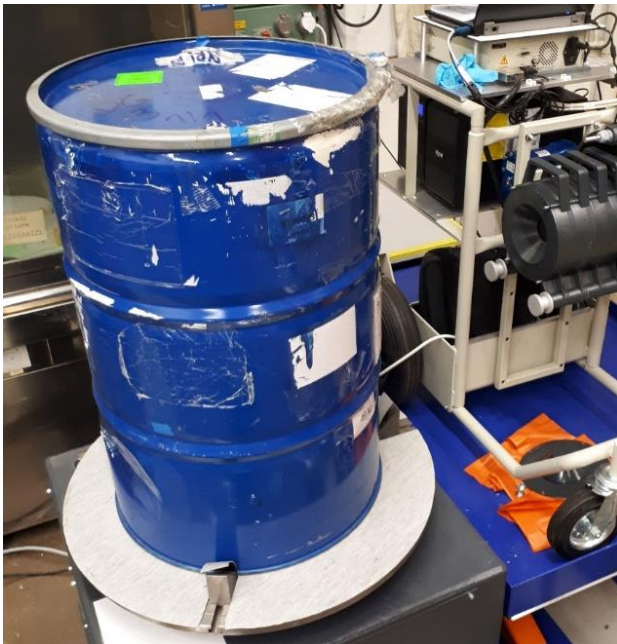
I-131 -vesitynnyrillä suoritetuilla mittauskokeilla osoitettiin, että ISOCS-tehokkuuskalibrointi pystyy arviomaan erittäin hyvällä tarkkuudella aktiivisuus- ja tiheysjakaumaltaan homogeenisen mittausingeometrian aktiivisuuden detektoreilla b21015 ja b19116. Homogeeninen ISOCS-tehokkuuskalibrointimallinnusmenetelmä voidaan todeta myös hyvin toimivaksi myös melko raskaallakin jätteellä. Liitteessä L olevien 100 litraan asti täytetyn I-131 -vesitynnyrin mittaustuloksista nähdään myös, ettei tynnyrin täyttöasteella ollut merkitystä saavutettavaan mittaustarkkuuteen. 30 asteen kollimoinnin käytöstä paljastui monia ongelmia, mutta kyseistä kollimaattorimallia ei tarvita kuin hyvin erikoisissa mittaustapauksissa. Lähtökohtaisesti voidaan todeta, että kuollutta aikaa on luotettavampaa hallita kasvattamalla käytettävää mittausetäisyyttä, sillä se etäisyyden muuttaminen näytä vaikuttavan tuloksiin merkittävästi, kunhan tehokkuuskalibrointimallinnus on suoritettu oikein.

I-131 -vesitynnyriä voidaan käyttää myöhemmin vielä diplomityön jälkeen valvonnasta vapautusmittauksissa käytettyjen menetelmien validoimiseen ja soveltuvuusarviointiin, kun sen aktiivisuus on puoliintunut riittävästi vastaamaan tärkeimpiä STUK:n ohjeessa *YVL D.4* (STUK 2019b) asetettuja aktiivisuuspitoisuusrajoja.

6.4 Mittaus 4: NPL-interkalibrointitynnyri

Englantilainen tutkimuslaboratorio NPL (National Physical Laboratory) järjesti tämän työn aikana kansainvälisen interkalibrointiharjoituksen, johon osallistui 16 ydintekniikan laboratorioita ja ydinlaitoksia seitsemästä eri Euroopan maasta, myös VTT osallistui harjoitukseen yhtenä osanottajana. Harjoituksessa oli tarkoituksena mitata gammaspektrometrilla NPL:n valmistama jätetynnyri, joka sisältää radioaktiivisia aineita ennalta tuntemattomassa kohdassa tynnyriä. Kaikki osallistujat saivat itse päättää tutkimusmenetelmänsä vapaasti. Interkalibrointiharjoituksen päätteeksi NPL paljasti tynnyrissä olleiden radioaktiivisten aineiden sijainnin ja aktiivisuuden, sekä ja julkaisi tutkimusraportin osallistujien saamista mittaustuloksista ja niiden vertailemisesta. (van Es & Pearce 2022)

NPL:n valmistama jätetynnyri oli tyypiltään 200 litran standarditynnyri, jonka sisällä oli 240 vermikuliittisavella täytettyä muovipulloa. Pullot on kasattu viiteen kerrokseen. Pullojen joukkoon NPL oli lisännyt Co-60, Cs-137 ja Am-241 -säteilylähteet. NPL ilmoitti tynnyrin sisällön massaksi 28,166 kg. NPL:n valmistama interkalibrointitynnyri on esitetty alla kuvassa 6.9.



Kuva 6.9. NPL:n valmistama interkalibrointitynnyri Pilot-hallissa detektorin b21015 edessä.

NPL-tynnyriä voidtiin käyttää homogeenisen ISOCS-tehokkuuskalibrointimallin epävarmuuden arviointiin epähomogeenisessa mittaustilanteessa, lisäksi myös tynnyristä tehtäviä tarkempia, heterogeenisiä mallinnuksia voitiin tarkastella. NPL-tynnyri on myös tiheydensä puolesta vertailukelpoinen monien kevyempien purkujätteiden kanssa. Tynnyrin nuklidit kattavat myös hyvin laajan energia-alueen 59,5–1332,5 keV, joten ISOCS-tehokkuuskalibroinnin tarkkuutta voitiin arvioida hyvin laajalla energia-alueella.

6.4.1 NPL-tynnyri: Mittausmenetelmät ja ISOCS-geometriamallit

NPL-tynnyriä mitattiin detektoreilla b21015 ja b19116. Mittaukset suoritettiin pyörimismittauksina etäisyydeltä $SD = 440$ mm, käyttäen 90 asteen kollimointia. Mittausajaksi asetettiin molemmille laitteistoille $LT = 4$ h. Detektorin b21015 gammaspektreille suoritettiin taustavähennys johtuen mittauspaikkana toimineen Pilot-hallin korkeahkosta Co-60 -taustasäteilytasosta, josta kerrottiin kappaleessa 5.4. Taustaspektri mitattiin mittaamalla Pilot-hallissa tyhjää detektorin näkymää 72 tunnin ajan. Taustasäteilytasoltaan matalassa Miiluhallissa taustavähennyksen tekeminen detektorin b19116 mittaukselle katsottiin tynnyrin aktiivisuuteen nähden merkityksettömäksi toimenpiteeksi.

NPL-tynnyristä päätettiin luoda Geometry Composerilla aktiivisuusjakaumaltaan homogeeninen malli ”Simple Cylinder” -mallinteella ja heterogeeninen malli ”Complex Cylinder” -mallinteella. Tynnyrin täyttökorkuudeksi oletettiin $FH = 850$ mm, ja tiheys tämän sisällön ilmoitetun massan perusteella arvoon $\rho_{sis} = 0,13$ g/cm³. Heterogeenista mallia varten tehtiin NPL:n tynnyristä toimittamien tietojen ja käsikäyttöisellä kontaminaatiomittarilla tehdyn mittauksen perusteella arvio, että aktiivisuutta olisi ainoastaan toiseksi alimmassa pullokerroksessa ja ainoastaan kerroksen yläosassa. Heterogeenisen geometrian geometriamallin aktiiviseksi mallinnettu dimensio päätettiin mallintaa korkeudelle 280–330 mm.

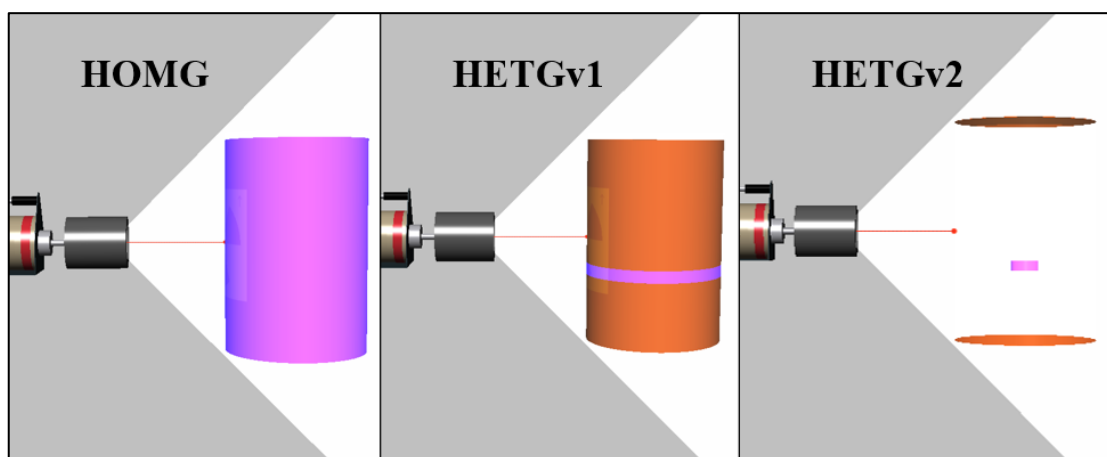
NPL ilmoitti myöhemmin aktiivisuuden olleen kolmessa 20 ml ampullissa, joissa oli radioaktiivisilla standardiliuoksilla käsiteltyä ioninvaihtohartsia. Ampullit oli sijoitettu alhaalta päin katsottuna toisen pullokerroksen yläosiin, keskelle tynnyriä. Tämän pohjalta tehtiin vielä kolmas, paranneltu heterogeeninen geometriamalli, jossa aktiivisuus

mallinnettiin ”Complex Pipe” -mallinteella pienemmäksi, halkaisijaltaan $d = 110$ mm kiekoksi, korkeudelle $h = 280\text{--}320$ mm tynnyrin sisäpohjasta.

Alla olevassa taulukossa 6.5 on koottu eri mittaustapaukset ja niille sovelletut ISOCS-tehokkuuskalibrintimallit. Alempana olevassa kuvassa 6.10 on vielä esitetty käytetyt kolme geometriamallia. Aktiiviseksi mallinnetut tilavuudet näkyvät kuvassa violetteina.

Taulukko 6.5. Tutkittavat ISOCS-tehokkuuskalibrintimallit NPL-tynnyrille.

Mallin tunniste	Mittalaite	Käytetty mallinne	Geometriamallinnus (kaikissa vakioina $SD = 440$ mm, $FH = 850$ mm $\rho_{sis} = 0,13$ g/cm ³ , 90° kollimointi, materiaalina sand)
b21 HOMG	b21015	Simple Cylinder	Aktiivisuus homogeenisesti koko sisällössä
b19 HOMG	b19116	Simple Cylinder	Aktiivisuus homogeenisesti koko sisällössä
b21 HETGv1	b21015	Complex Cylinder	Aktiivinen kerros korkeudella $h = 280\text{--}330$ mm
b19 HETGv1	b19116	Complex Cylinder	Aktiivinen kerros korkeudella $h = 280\text{--}330$ mm
b21 HETGv2	b21015	Complex Pipe	Aktiivisuus kiekossa ($d = 110$ mm) keskellä tynnyriä, korkeudella $h = 280\text{--}320$ mm
b19 HETGv2	b19116	Complex Pipe	Aktiivisuus kiekossa ($d = 110$ mm) keskellä tynnyriä, korkeudella $h = 280\text{--}320$ mm



Kuva 6.10. Tutkittavat ISOCS-tehokkuuskalibrintimallit NPL-tynnyrille.

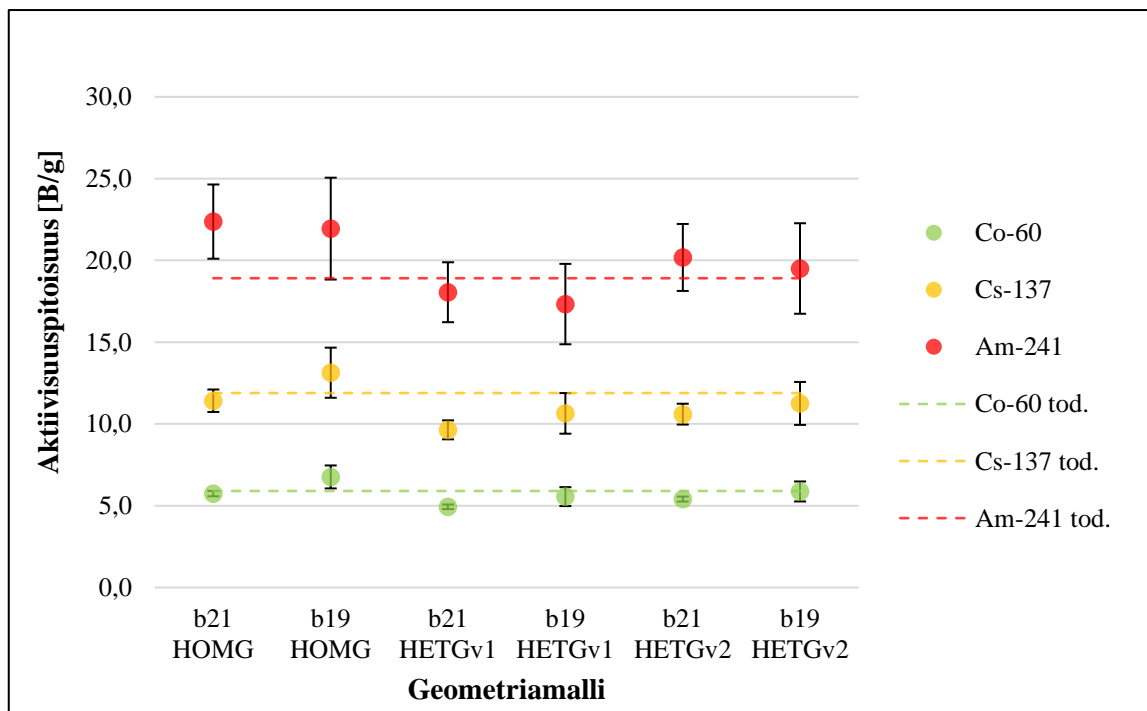
Seuraavaksi käydään läpi NPL-tynnyrin mittaustulokset eri detektoreille ja niille luoduille ISOCS-tehokkuuskalibrintimalleille.

6.4.2 NPL-tyynnyri: Mittaustulokset

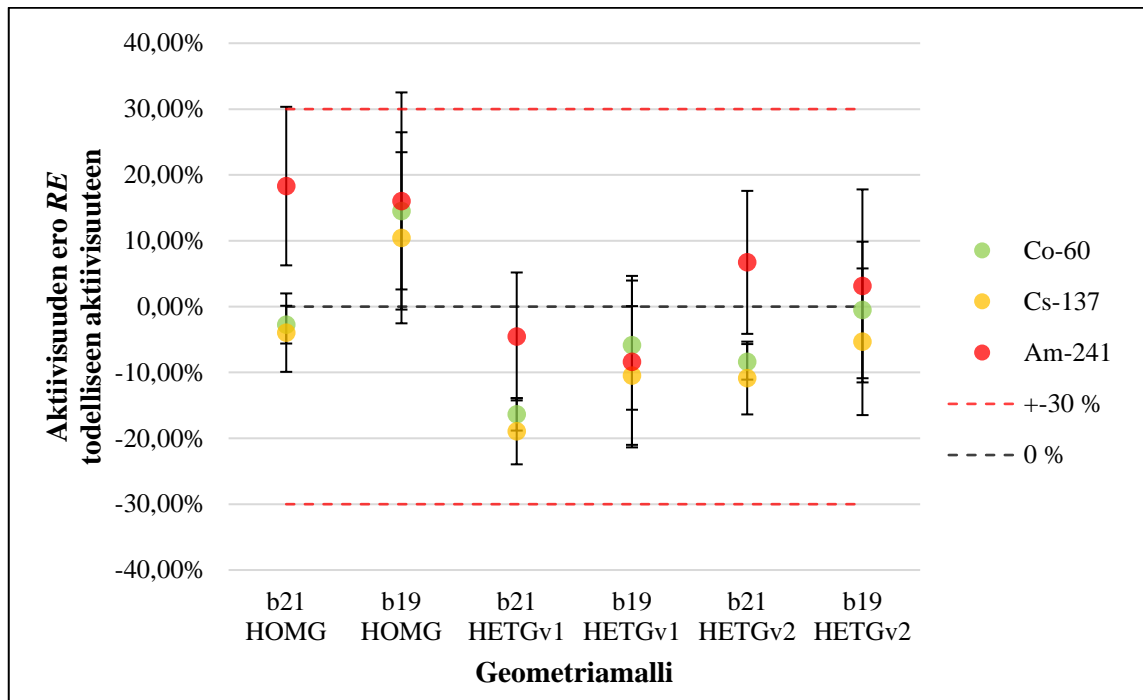
Tammikuun 2022 lopussa NPL paljasti tynnyrissä olevien säteilylähteiden aktiivisuuspitoisuudet ja niiden epävarmuudet, jotka on ilmoitettu liitteessä J. Ilmoitetut aktiivisuuspitoisuudet on merkitty referenssipäivämäärälle 1.6.2021 ja kaikki saadut mittaustulokset on laskettu tälle päivämäärälle.

Alla olevaan kuvaan 6.11 on koottu eri nuklidien aktiivisuuspitoisuustulokset eri detektoreilla ja geometriamalleilla ja alempana olevaan kuvaan 6.12 näiden nuklidikohtaisten tuloksien suhteelliset virheet verrattuna NPL:n ilmoittamiin aktiivisuuspitoisuuksiin. Kuvaajien epävarmuuspalkkeja varten laskettiin mittaustulosten yhdistetyt epävarmuudet U_{Comb} . Suhteellisen virheen kuvaajaan on merkitty Fortumin vaatima $\pm 30\%$:n tarkkuusraja.

Kaikki NPL-tyynnyrin analysointitulokset eri geometriamalleille ovat taulukoituna liitteessä M.



Kuva 6.11. NPL-tyynnyrille Genie2k:lla lasketut aktiivisuuspitoisuustulokset ja niiden epävarmuudet detektoreille b21015 ja b19116 ja tutkituille ISOCS-geometriamalleille.



Kuva 6.12. NPL-tynnyrin aktiivisuuspitoisuustulosten suhteelliset virheet ja niiden epävarmuudet eri detektoreille ja ISOCS-geometriamalleille.

Tuloksista nähdään, että homogeenisilla geometriamalleilla saatiin keskimäärin hieman muita malleja korkeampia aktiivisuustuloksia. Tästä huolimatta kaikilla nuklideilla päästiin alle 20 %:n tarkkuuteen NPL:n ilmoittamista aktiivisuuspitoisuuksista, epävarmuudetkin huomioiden pysyttiin melkein 30 %:n tarkkuudessa. Tuloksista nähdään myös, että Am-241:n tulokset olivat matalammat detektorilla alumiini-ikkunallisella detektorilla b19116. Am-241:n muihin nuklideihin nähden prosentuaalisesti suuremmat epävarmuudet aiheutuivat pääasiassa Geometry Comporserilla matalammille energioille asetettavista suuremmista virheolettamista.

Tuloksissa on huomionarvoista, että detektorilla b21015 Co-60:n ja Cs-137:n aktiivisuudet olivat systemaattisesti matalampia kuin detektorilla b19116. Lisäksi detektorilla 21015 niiden suhteelliset virheet erosivat huomattavasti Am-241:n suhteellisesta virheestä, kun taas detektorilla b19116 eri nuklidien suhteellisten virheiden suuruudet olivat yhtenäisemmät. Tähän on syynä detektorilla b21015 mitatuille gammaspektreille suoritettu taustavähennys. NPL-tynnyrimitaukset suoritettiin Pilot-hallissa suhteellisen korkeassa taustasäteilytasossa (annosnopeus laitteistolla noin 0,7 $\mu\text{Sv/h}$). Tyhjälle detektorin näkymälle mitattu taustavähennysspektri ilmeisesti vähensi liian paljon pulsseja tynnyrin mittauksessa havaituista Co-60:n ja Cs-137:n pulssipiikeistä, jonka johdosta niiden aktiivisuustulokset

aliarvioituivat. Taustavähennyksellä ei ollut puolestaan merkitystä Am-241:n aktiivisuustuloksiin, koska sitä ei havaita Pilot-hallin taustasäteilyssä. Jälkeenpäin taustasäteilytason ongelmallisuuteen havahtuneina Pilot-halliin päätettiin rakentaa lisäsäteilysuojia. Taustasäteilyolosuhteiltaan erinomaisessa Miiluhallissa detektorilla b19116 suoritettujen mittausten tuloksista voidaan nähdä selkeämmin tarkemman geometriamallin tuoma hyöty.

Vaikka tässä mittauskokeessa eri tehokkuuskalibrointimalleilla saadut tulokset olivat melko lähellä toisiaan, tulee huomioida säteilylähteen paikan merkitys aktiivisuustuloksessa. Pistemäinen säteilylähde on saattanut sijaita NPL-tynnyrissä sellaisessa sijainnissa, josta pulsseja kertyy spektriin sopivasti niin, että kaikilla tehokkuuskalibrointimalleilla saatiin melko samansuuruisia aktiivisuustuloksia. NPL-tynnyrin tiheys oli myös niin matala, ettei säteilylähdettä vaimentava jätekerros aiheuttanut virheellisellä homogeenisella mallilla merkittäviä eroavaisuuksia nuklidien suhteellisiin virheisiin, vaikka mitattujen nuklidien gammaenergioiden väliset erot olivat äärimmäisen suuria. Mikäli NPL-tynnyrin tiheys olisi ollut suurempi ja säteilylähteiden sijainti sama, homogeenista ISOCS-mallia käytettäessä matalaenergisestä Am-241:n aktiivisuus olisi aliarvioitunut huomattavasti korkeaenergisempää Co-60:tä enemmän. NPL-tynnyrin tulosten perusteella työssä päätettiin tutkia vielä tarkemmin pistemäisten säteilylähteiden vaikutusta homogeenisella ISOCS-tehokkuuskalibroinnilla saataviin aktiivisuustuloksiin, muun muassa raskaammilla mittauskohteilla ja erilaisten pistelähteiden sijaintien suhteen.

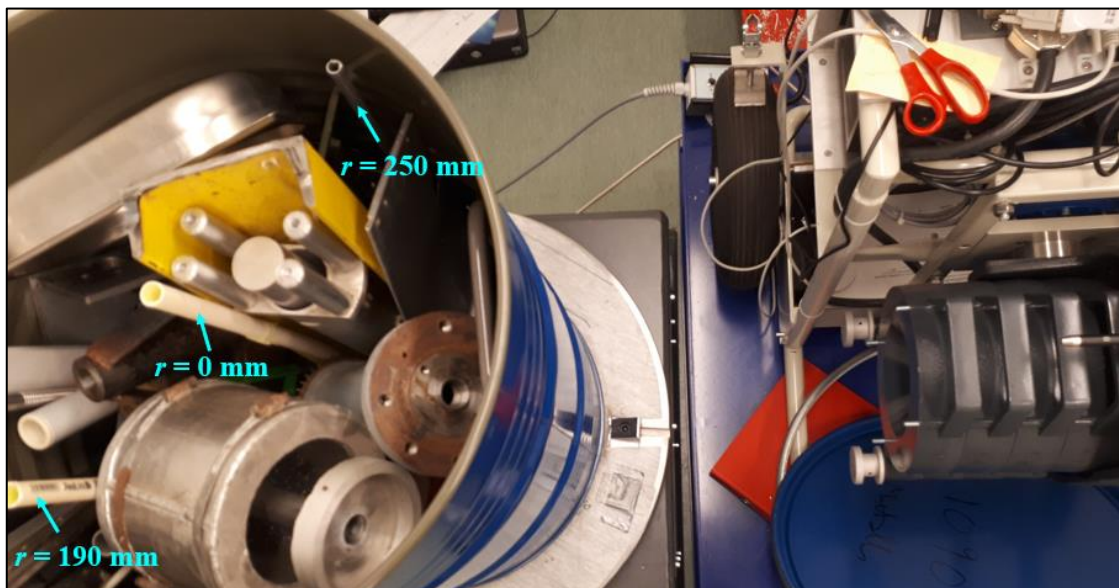
6.5 Mittaus 5: Pistemäinen säteilylähde tynnyrissä

Kuten kappaleessa 5.3 kerrottiin, epähomogeeninen aktiivisuusjakauma käytettäessä homogeenista ISOCS-mallia voi aiheuttaa suuria virheitä saataviin aktiivisuustuloksiin. Homogeenisen ISOCS-geometrian epävarmuustarkastelua varten rakennettiin kaksi jätetynnyriä, jotka voisivat vastata todellista purkujätettä tiheydeltään ja koostumukseltaan. Tynnyreihin asetettiin pistemäisiä standardilähteitä eri sijainteihin, joilla voitiin tarkastella homogeenisen ISOCS-mallin käytön aiheuttamaa virhettä tapauksissa, jossa aktiivisuus onkin yhdessä pisteessä sen sijaan että se olisi tasaisesti koko tynnyrissä.

Pistelähteiden sijainnit päätettiin niin, että niiden avulla voitaisiin tarkastella sekä kovan vaimennuksen aiheuttamaa aktiivisuuden aliarviointia, sekä lähellä tynnyrin pintaa olevan lähteen aiheuttamaa yliarviointia. Lähteitä asetettiin seuraaviin paikkoihin:

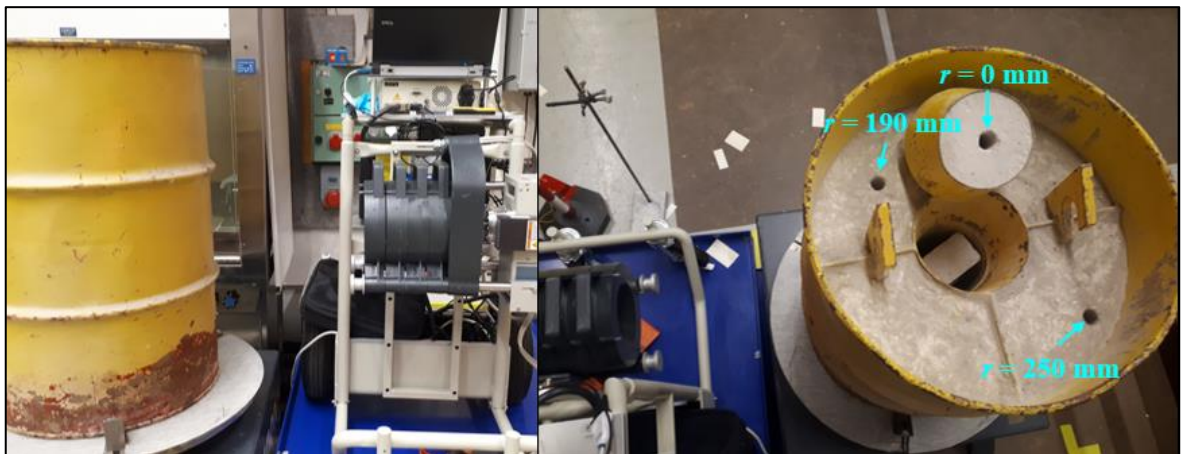
- korkeus $h = 220$ mm tynnyrin pohjasta, etäisyys radiaalikeskuksesta $r = 0$ mm
- korkeus $h = 440$ mm tynnyrin pohjasta, etäisyys radiaalikeskuksesta $r = 0$ mm
- korkeus $h = 660$ mm tynnyrin pohjasta, etäisyys radiaalikeskuksesta $r = 0$ mm
- korkeus $h = 440$ mm tynnyrin pohjasta, etäisyys radiaalikeskuksesta $r = 190$ mm
- korkeus $h = 440$ mm tynnyrin pohjasta, etäisyys radiaalikeskuksesta $r = 250$ mm

Ensimmäiseksi mallitynnyriksi päätettiin valita metalliromutynnyri (lyh. MT), joka näkyy kuvassa 6.13. Tynnyriin kerättiin satunnaista metalliromua, jotka on tutkittu käsikäyttöisillä kontaminaatiomittareilla ja gammaherkillä työkalumonitorimittauksilla puhtaaksi. Tynnyrin sisällön massa oli 146,4 kg. Lähteiden asettaminen tynnyriin tapahtui tynnyriin työnnettävien muoviputkien avulla.



Kuva 6.13. Mallimetallitynnyri MT kuvattuna Miiluhallissa detektorin b19116 edessä.

Toiseksi mallitynnyriksi päätettiin valita 200 litran betonitynnyri (lyh. BT), joka on valettu korkeuteen $FH = 700$ mm asti betonia. Tynnyrissä on tavallista 200 litran metallitynnyriä paksumpi 2,8 mm seinämä. Tynnyrissä on keskellä halkaisijaltaan 150 mm ja korkeudeltaan 300 mm kokoinen ilmatila, jonne asetettiin kaksi betoniharkkoa täyttämään tilaa. Tynnyriin porattiin standardilähteitä varten kaksi kuilua etäisyyksille 190 mm ja 250 mm tynnyrin radiaalikeskuksesta. Tynnyrin sisällön massaksi määritettiin 370 kg. Lisäksi ilmatilan kanteen porattiin vielä kuilu, jotta betonitynnyrillä voitaisiin tarkastella myös pahin mahdollinen pistelähteen sijainti maksimivaimennuksella. Lähteet asetettiin porattuihin kuiluihin muovitikkujen avulla. Mallibetonitynnyri ja siihen poratut kuilut näkyvät kuvassa 6.14.



Kuva 6.14. Mallibetonitynnyri BT kuvattuna Pilot-hallissa detektorin b21015 edessä.

Molemmille tynnyreille luotiin homogeeniset tynnyrimallit detektoreille b21015 ja b19116. Lisäksi betonitynnyrille luotiin molemmille detektoreille yksi heterogeeninen tynnyrimalli, jossa tynnyriin sijoitettava pistelähde on mallinnettu tarkasti todelliselle sijainnilleen tynnyrissä. Tynnyreille luotujen ISOCS-mallien tärkeimmät tiedot ja niiden tunnisteet on koottu taulukkoon 6.6.

Taulukko 6.6. Mallitynnyreille käytetyt ISOCS-tehokkuuskalibrintimallit.

Tynnyri ja detektori	Mallin tunniste	Käytetty mallinne	Geometriamallinnus (vakiona etäisyys $SD = 440$ mm ja 90° kollimointi)
Metallitynnyri, b21015	MT b21 HOMG	Simple Cylinder	$FH = 850$ mm, $\rho_{sis} = 0,68$ g/cm ³ , HOMG aktiivisuus- ja tiheysjakauma, materiaalina csteel
Metallitynnyri, b19116	MT b19 HOMG	Simple Cylinder	$FH = 850$ mm, $\rho_{sis} = 0,68$ g/cm ³ , HOMG aktiivisuus- ja tiheysjakauma, materiaalina csteel
Betonitynnyri, b21015	BT b21 HOMG	Simple Cylinder	$FH = 700$ mm, $\rho_{sis} = 2,09$ g/cm ³ , HOMG aktiivisuus- ja tiheysjakauma, materiaalina concrete
Betonitynnyri, b19116	BT b19 HOMG	Simple Cylinder	$FH = 700$ mm, $\rho_{sis} = 2,09$ g/cm ³ , HOMG aktiivisuus- ja tiheysjakauma, materiaalina concrete
Betonitynnyri, b21015	BT b21 HETG	Complex Cylinder	$FH = 700$ mm, $\rho_{sis} = 2,13$ g/cm ³ , HETG aktiivisuusjakauma, halkaisijaltaan $d = 1$ mm pistelähde lähteen sijainnissa, materiaalina concrete
Betonitynnyri, b19116	BT b19 HETG	Complex Cylinder	$FH = 700$ mm, $\rho_{sis} = 2,13$ g/cm ³ , HETG aktiivisuusjakauma, halkaisijaltaan $d = 1$ mm pistelähde lähteen sijainnissa, materiaalina concrete

Mittaustapausten tunnistetut toimivat taulukon mukaisesti tynnyrytyypin, detektorin ja homogeenisuuden puolesta, mutta niihin lisätään vielä tunnisteosat asetetun pistelähteen sijainnista:

- $h220, h440, h660$: Pistelähde sijoitettu korkeudelle $h = 220$ mm, 440 mm tai 660 mm tynnyrin pohjasta
- $r0, r190, r250$: Pistelähde sijoitettu etäisyydelle $r = 0$ mm, 190 mm tai 250 mm tynnyrin radiaalikeskuksesta

Eli esimerkiksi mittaustapaustunniste $BT\ b21\ h660\ r0\ HOMG$ tarkoittaa betonitynnyrille detektorilla b21015 suoritettua mittausta, jossa pistelähde on sijoitettu tynnyriin sijaintiin ($h = 660$ mm, $r = 0$ mm), käyttäen homogeenista ISOCS-tehokkuuskalibrintimallia.

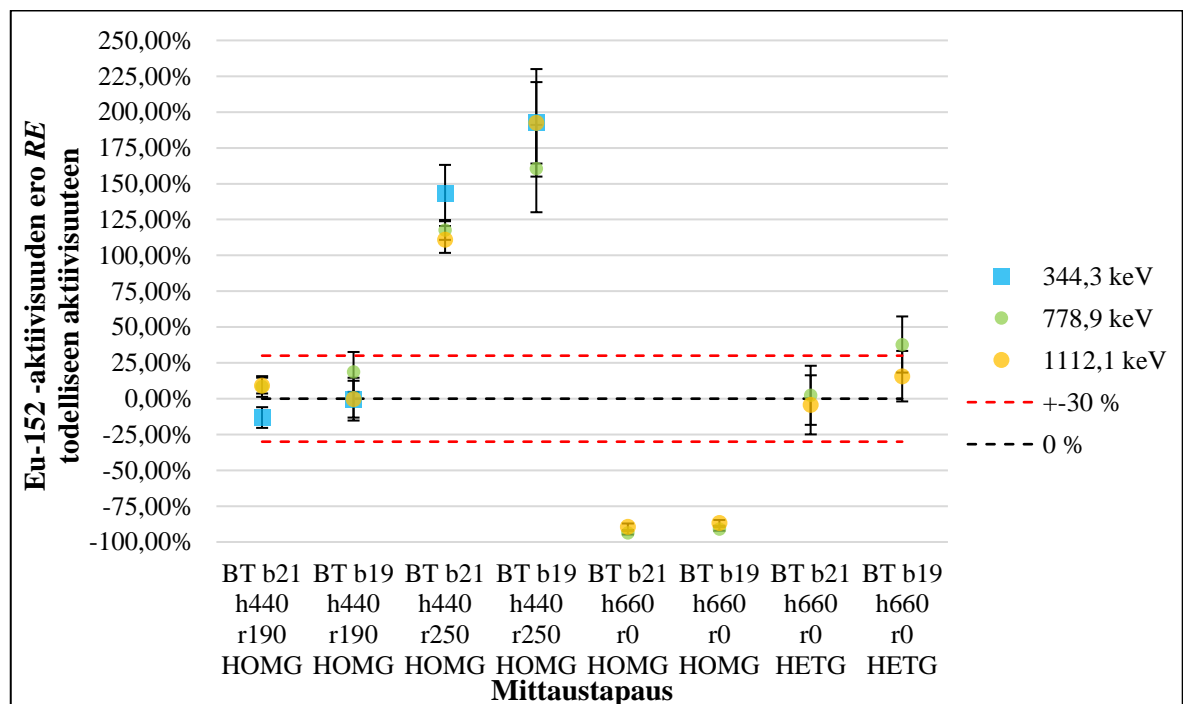
6.5.1 Pistelähteen vaikutus käytettäessä homogeenista ISOCS-mallia

Mallitynnyreihin asetettavaksi säteilylähteeksi valittiin Eu-152 -lähde CV195, jonka aktiivisuus oli mittausten aikana noin ~80 kBq, lähteen muut tiedot ovat saatavilla liitteessä J. Myöhemmin tutkimalla lähteen hankinnanaikaisia tietoja tarkemmin, sen huomattiin olevan kalibroimaton olemassa olevasta valmistussertifikaatista huolimatta. Lähteen

mittauksen perusteella sen aktiivisuuden voidaan katsoa olevan kuitenkin hyvin lähellä valmistajan ilmoittamaa päivämääräkorjattua nimellisaktiivisuutta. Lisäksi tässä epävarmuustarkasteluluontoisessa kokeessa saatavien tulosten suhteelliset virheet ovat niin suuria, että lähteen kalibroimattomuutta voidaan näin pitää tutkimustulosten kannalta merkityksettömänä.

Metallitynnyrillä lähde asetettiin kaikkiin viiteen positioon, betonitynnyrillä lähde sijoitettiin ainoastaan kolmeen eri positioon tynnyrin keskellä olevan ilmatilavuuden johdosta. Kaikissa mittauksissa tynnyrit asetettiin etäisyydelle $SD = 440$ mm detektorin päätyypinnasta, ja niissä käytettiin 90 asteen kollimointia. Tämän epävarmuustarkastelun mittaukset suoritettiin pyöritysmittauksina. Eu-152:n aktiivisuustuloksia tarkasteltiin energioilla 344,3 keV, 778,9 keV ja 1112,1 keV. Kaikkien suoritettujen mittausten yksityiskohtaiset tulokset on koottu liitteeseen N.

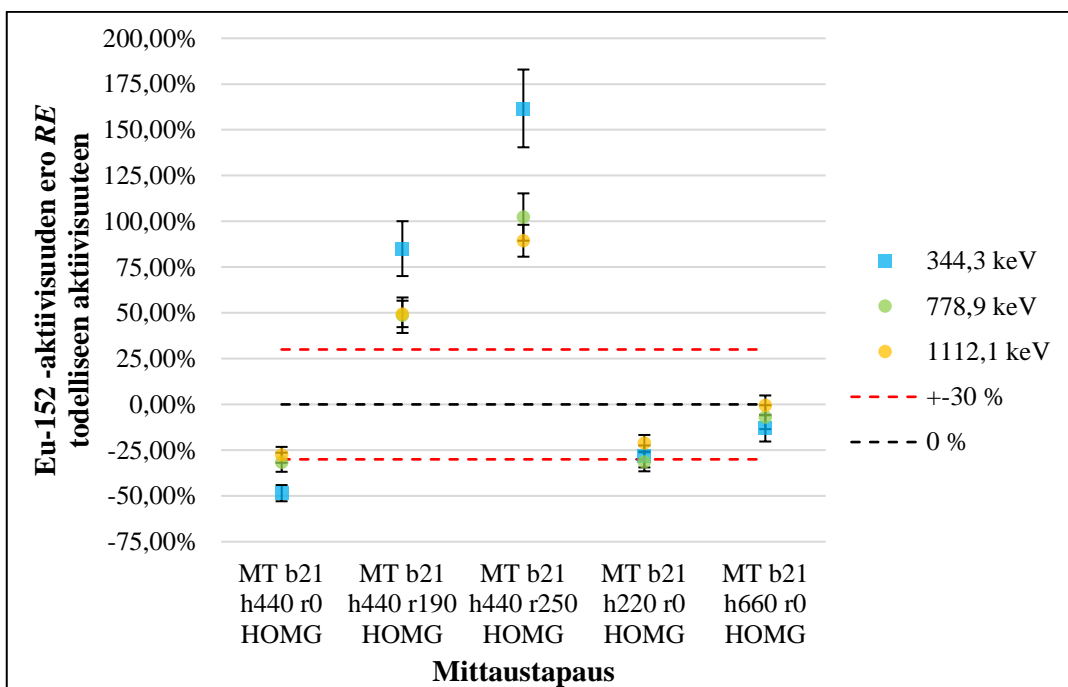
Tarkastellaan ensimmäiseksi betonitynnyrille BT detektoreilla b21015 ja b19116 suoritettujen mittausten aktiivisuustuloksia, jotka ovat metallitynnyriin verrattuna tasaisemman tiheysjakauman johdosta huomattavasti selkeämmät. Kaikissa betonitynnyrimittauksissa mittausaika oli $LT = 20$ h. Tulokset on koottu kuvaan 6.15



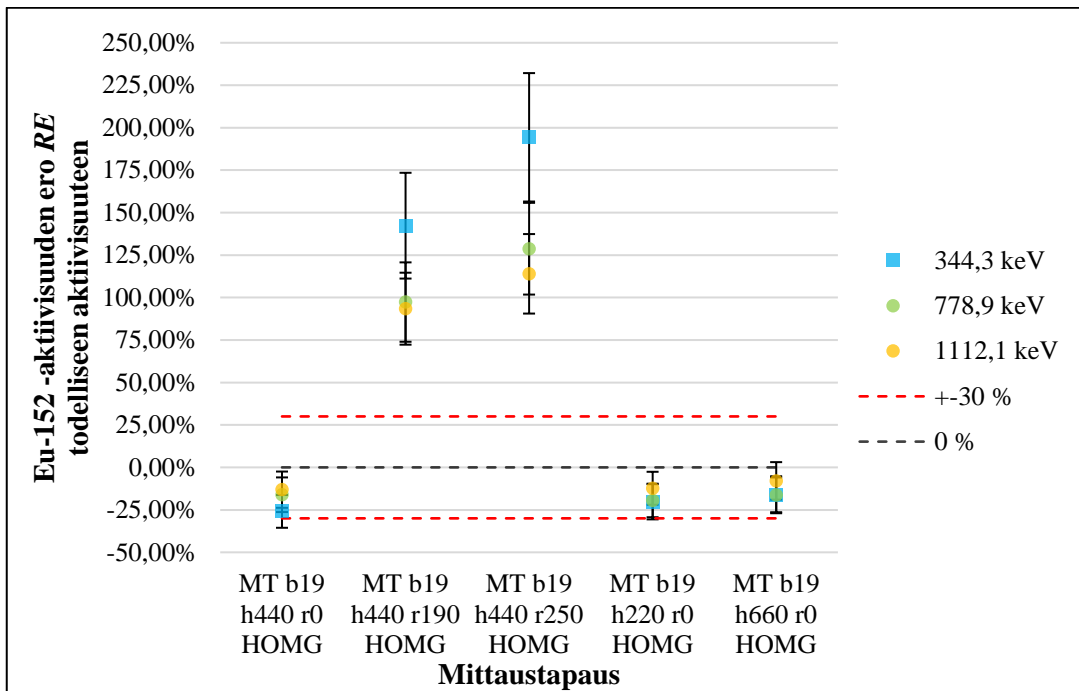
Kuva 6.15. Detektoreilla b21015 ja b19116 mitatun mallibetonitynnyrin BT aktiivisuustulokset eri mittaustapauksilla ja tehokkuuskalibroinneilla.

Kuvasta 6.15 nähdään selkeästi, että lähteen ollessa betonitynnyrin laidalla positiossa ($h = 440$ mm, $r = 250$ mm) aktiivisuustulokset yliarvioituivat homogeenista ISOCS-mallia käytettäessä detektorista ja energiasta riippuen noin 100–200 % lähteen CV195 todellisesta aktiivisuudesta. Huolestuttavampaa on, että gammasäteilyä kovimmin vaimentavassa positiossa ($h = 660$ mm, $r = 0$ mm) aktiivisuustulokset erosivat homogeenisilla malleilla jopa -86 – -95 % todellisesta aktiivisuudesta. Tämä tarkoittaa pahimmillaan lähes 20-kertaista aktiivisuustuloksen aliarvioitumista. Samasta positioista heterogeeniset geometriamallit pystyivät sen sijaan arvioimaan aktiivisuuden melko tarkasti suhteellisen matalista fotopiikkien nettopulssimääristä huolimatta.

Metallitynnyrille MT suoritettujen mittausten aktiivisuustulokset on koottu kuviin 6.16 ja 6.17. Tehokkuudeltaan heikommalla detektorilla b21015 mittaussajaksi asetettiin kaikille mittaustapauksille $LT = 4$ h, detektorilla b19116 mittaussajoiksi asetettiin lyhyempi $LT = 2$ h.



Kuva 6.16. Detektorilla b21015 mitatun mallimetallitynnyrin MT aktiivisuustulokset eri mittaustapauksilla.



Kuva 6.17. Detektorilla b19116 mitatun mallimetallitynnyrin MT aktiivisuustulokset eri mittaustapauksilla.

Kuvista 6.16 ja 6.17 nähdään, että metallitynnyrillä vaimentavissa positioissa, joissa $r = 0$ mm, aktiivisuuden aliarvioituminen ei ole läheskään yhtä voimakasta, kuin betonitynnyrin tapauksessa. Tämä johtuu pääasiassa metallitynnyrin erittäin epätasaisesta tiheysjakaumasta, jossa on hyvin paljon vaimentamattomia ilmatilavuuksia, joista gammasäteily pääsee helpommin detektorille. Suuremmat havaittavat pulssimäärät johtavat näin suurempiin aktiivisuustuloksiin. Tästä syystä myös positioissa, joissa $r = 190$ mm ja $r = 250$ mm, havaittiin erittäin suuria yliarviointeja, varsinkin korkeaintensiteettinen gammakvantti 344,3 keV yliarvioitui suuresti muihin gammakvantteihin verrattuna. Samasta syystä myös tehokkaammalla detektorilla b19116 saatiin kaikilla mittaustapauksilla korkeampia aktiivisuustuloksia kuin detektorilla b21015.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että jätetynnyreihin päätyvät pistemäiset säteilylähteet voivat aiheuttaa erittäin suuria virheitä homogeenisilla ISOCS-malleilla suoritettaville tehokkuuskalibroinneille. Erityisesti kovassa vaimennuksessa olevien pistelähteiden aiheuttama aktiivisuuden aliarvioituminen on erittäin vakava ilmiö, mittaustulosten perusteella tämän ilmiön vakavuus kasvaa jätteen massan kasvaessa. Mittaustulokset osoittavat FiR 1- ja OK3-purkuprojektiin suunnitellun, jätteiden pakkaamista edeltävän esimittauksen ja aktiivisuusperusteisen jätteen lajittelun olevan hyvin

kriittinen toimenpide saatavien aktiivisuustulosten luotettavuuden kannalta. Mikäli purkuprojekteissa tulee eteen tilanteita, jossa jätepakkaukseen täytyy pakata pistemäisesti säteilevää jätettä, tulisi varmistaa, että pistemäiset säteilylähteet sijoittuisivat tynnyrissä radiaalikeskustan ja tynnyrin laidan puolivälin seudulle.

Vaikka monet tässä kappaleessa esitetyt mittaustapaukset aiheuttivat erittäin suuria virheitä, tulee kuitenkin huomioida niiden olevan ääritapauksia, jotka luotiin tarkoituksella ISOCS-tehokkuuskalibroinnin epäluotettavuuden arviointia varten pahimmissa mahdollisissa mittaustilanteissa. Todellisuudessa mitattavat jätteet ovat aktiivisuusjakaumiltaan huomattavasti homogeenisempia.

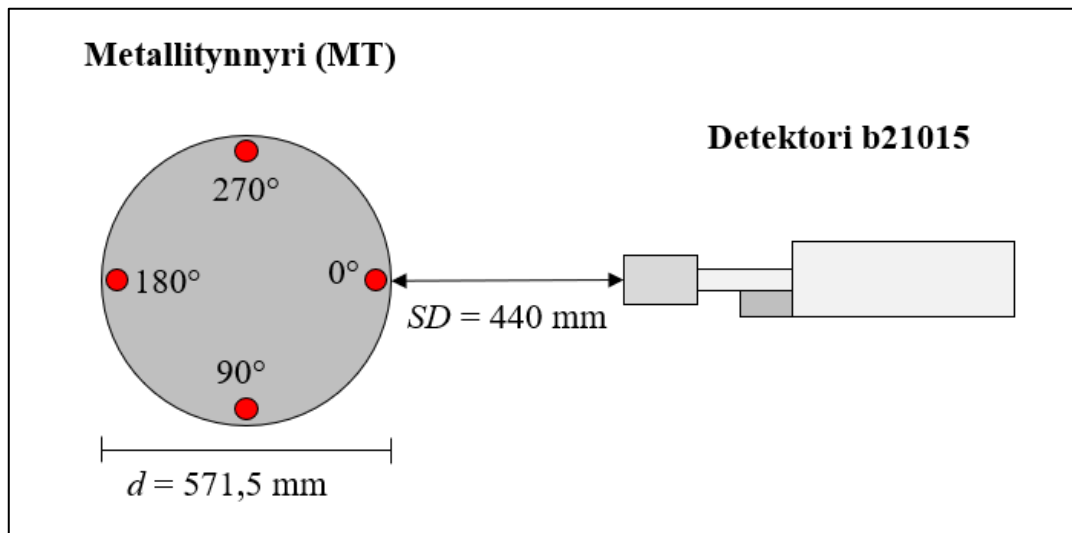
Jätepakkausten sisällön mahdollisia epähomogeenisuuksia on mahdollista havaita myös jälkikäteen vertailemalla monikvanttisen nuklidin eri gammakvanttien saamia aktiivisuustuloksia toistensa kanssa. Mikäli ne poikkeavat toisistaan, on oletettavaa, että käytetty tehokkuuskalibrointimalli ei vastaa todellista mittaustilannetta. Epähomogeenisen aktiivisuusjakauman tunnistamista käsitellään laaduntarkkailuohjelmasta kertovassa kappaleessa 8.

6.5.2 Tynnyrin pyörittämisen vaikutus homogeenisella ISOCS-mallilla

Tynnyrin pyörittämisen vaikutusta aktiivisuustuloksiin arvioitiin mittaamalla detektorilla b21015 mallimetallitynnyriä MT, johon on asetettu pistemäinen säteilylähde. Säteilylähteeksi koetta varten valittiin pinnasta noin ~ 4 mSv/h säteilevä Co-60 -lähde TEF6, jota käytettäessä mittaustaikana toimineen Pilot-hallin korkeampi Co-60 -taustasäteilytaso (annosnopeus laitteistolla noin $0,7 \mu\text{Sv/h}$) on saatavien mittaustulosten kannalta merkityksetön. TEF6-lähde ei ole kalibroitu, mutta sen nimellisaktiivisuus todettiin riittävän tarkaksi tätä epävarmuustarkastelua varten. Mittauspäivänä 22.2.2022 TEF6-lähteen laskennallinen aktiivisuus oli 1,235 MBq, lähteen muut tiedot ovat liitteessä J.

Metallitynnyri asetettiin etäisyydelle $SD = 440$ mm, käyttäen 90 asteen kollimointia. Lähde TEF6 asetettiin korkeudelle $h = 440$ mm tynnyrin pohjasta ja etäisyydelle $r = 250$ mm tynnyrin radiaalikeskuksesta. Tätä lähteen sijaintia voidaan pitää homogenisoinnin kannalta ongelmallisimpana tilanteena, sillä detektorin havaitsemat pulssinkeräysnopeudet voivat tuolloin vaihdella hetkittäin hyvin paljon riippuen tynnyrin asennosta.

Tynnyri asetettiin aluksi rotaatiosuunnassa siten, että lähde sijaitsi kohtisuoraan detektoria vasten, jolloin sen etäisyys detektoriin nähden on lyhin mahdollinen. Tätä kulmaa merkittiin mittauksen nollakulmana. Mittauksen jälkeen tynnyriä käännettiin myötäpäivään 90 asteen väleissä ja lopuksi suoritettiin vertailutarkoituksessa tavallinen pyöritysmittaus. Mittausjärjestely on havainnollistettu alla olevaan kuvaan 6.18. Staattisiin mittausasentoihin käytettiin mittausaikaa $LT = 3600$ s ja pyöritysmittaukseen mittausaikaa $LT = 1800$ s, jotka riittivät hyvän pulssistatistiikan saavuttamiseen. Kaikkien mittausten tehokkuuskalibrointiin käytettiin aiemmin taulukossa 6.6 esitettyä homogeenista tynnyrimallia *MT b21 HOMG*.



Kuva 6.18. Havainnekuva detektorilla b21015 suoritetuista, mallimetallitynnyrin MT mittauksista, joissa tynnyriin asetettua säteilylähdettä TEF6 mitattiin kuvassa punaisilla ympyröillä merkityissä sijainneissa (etäisyys radiaalikeskustasta $r = 250$ mm). Lopuksi suoritettiin vielä pyöritysmittaus. Kuvassa olevia kappaleita ja niiden etäisyyksiä ei ole asetettu oikeisiin mittasuhteisiin.

Taulukkoon 6.7 on koottu homogeenisella ISOCS-mallilla *MT b21 HOMG* saadut aktiivisuustulokset eri mittaustapauksissa, sekä niiden suhteelliset erot lähteen laskennalliseen aktiivisuuteen nähden. Staattisten mittausten aktiivisuustuloksista on laskettu myös kahden ja neljän sivun keskiarvo.

Taulukko 6.7. Staattisten ja pyöritysmittausten aktiivisuustulosten vertailua ääritapauksessa, jossa pistemäinen säteilylähde on tynnyrin laidalla. Mittauspäivänä $A_{Lähde} = 1,235 \text{ MBq}$.

Staattinen vai pyöritysmittaus	Lähteen sijainti detektoriin nähden	Mittausaika	Laskettu Co-60 aktiivisuus (ISOCS-malli MT b21 HOMG) A_{Genie} [Bq]	Suhteellinen ero RE [%]
Staattinen	0 astetta	1 h	6,154 E+06	+398,3
Staattinen	90 astetta	1 h	2,106 E+06	+70,6
Staattinen	180 astetta	1 h	7,782 E+04	-93,7
Staattinen	270 astetta	1 h	1,771 E+06	+43,5
Pyöritys	-	0,5 h	2,792 E+06	+126,1
Kahden sivun keskiarvo (0 ja 180 astetta)			3,116 E+06	+152,4
Neljän sivun keskiarvo			2,527 E+06	+104,7

Taulukosta 6.7 voidaan nähdä muun muassa, että lähteen ollessa paikoillaan 0 asteessa aktiivisuustulos yliarvioitui lähes viisinkertaisesti, 180 asteen positiossa aktiivisuustulos puolestaan aliarvioitui lähes 16-kertaisesti. Tämä vahvistaa edellisessä kappaleessa tehtyjä havaintoja pistemäisten säteilylähteiden virhevaikutuksesta, kun homogeenista ISOCS-mallinnusta käytetään epähomogeenisen mittausgeometrian tehokkuuskalibroimiseen. Tuloksista nähdään myös, että pyöritysmittauksella saatiin keskiarvotuloksiin verrattuna melko samansuuruinen tulos.

Tulosten perusteella pyörähdyssymmetristen tynnyrien tapauksessa staattisilla mittauksilla ei saavuteta merkittäviä lisähyötyjä pyörittämiseen nähden. Pyörittäminen voidaan todeta myös mittauskäytäntöjen ja tulokäsittelyn kannalta yksinkertaisemmaksi toimenpiteeksi, kun yhden mittauskohteen aktiivisuus voidaan arvioida yhden, eikä useamman gammaspektrin perusteella. Samalla myös inhimillisten sekaannusvirheiden vaara pienenee.

7 LASKENNALLISIA SELVITYKSIÄ AKTIIVISUUSTULOSSIIN VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ

Kuten kappaleessa 3 kerrottiin, ISOCS-tehokkuuskalibroinnista saadaan lopputuloksena mallikohtainen tehokkuusarvo ε , joka on kääntäen verrannollinen aktiivisuustulokseen muiden aktiivisuuslaskennan yhtälön 3.1 laskentakomponenttien pysyessä vakiona. Tämä mahdollistaa useita laskennallisia tutkimusmenetelmiä, joissa aktiivisuustulokseen vaikuttavien tekijöiden merkitystä voidaan arvioida ainoastaan tutkimalla Geometry Composerin erilaisille ISOCS-malleille laskemia tehokkuusarvoja, sen sijaan että jokaiselle tutkittavalle tapaukselle suoritettaisiin erillisiä mittauskokeita. Esimerkkinä tästä toimii yhdelle mittaustapaukselle käytettävän ISOCS-mallin muuttaminen toisenlaiseksi, jolloin alkuperäisen ja uuden mallin väliset tehokkuusarvojen suhteelliset erot ovat kääntäen verrannollisia malleilla saatavien aktiivisuustulosten suhteellisille eroille.

Tässä kappaleessa käydään läpi muutamia laskennallisia selvityksiä, joissa on arvioitu käytettävän ISOCS-mallin merkitystä saataville aktiivisuustuloksille. Tutkimuksen kohteena ovat tässä työssä tynnyrimallin täyttöasteen ja tiheyden muuttamisen vaikutus, mitattavan kohteen virheellisen etäisyyden SD vaikutus, sekä taustasäteilyssä havaittavien aktiivisuuksien vaikutus saataville aktiivisuustuloksille.

7.1 Tynnyrimalliin asetetun täyttöasteen vaikutus aktiivisuustulokseen

Jätepakkauksesta mallinettavan ISOCS-mallin tiheyden ja tiheysjakauman asettaminen voi olla toisinaan hankalaa tehdä realistisesti. Esimerkiksi mallimetallitynnyrin ISOCS-malliin *MT b21 HOMG* asetettava tiheys on oletetulla täyden tynnyrin täyttökorkeudella $FH = 850$ mm ainoastaan $\rho_{sis} = 0,68$ g/cm³, joka on merkittävästi esimerkiksi Geometry Composerin csteel-teräsmateriaalin oletustiheyttä 7,86 g/cm³ matalampi. Lisäksi mallimetallitynnyrin kuvasta 6.13 nähdään, että tynnyrin yläosassa on selkeitä suuria ilmatilavuuksia, ja että tynnyrin sisällön massa painottuu selkeästi enemmän tynnyrin alaosiin. Näin käytettävä ISOCS-malli voisi olla tiheysjakaumaltaan realistisempi.

Tarkastellakseen jätepakkauksen tiheysjakauman realistisemmaksi muutoksen vaikutusta saataviin aktiivisuustuloksiin metallitynnyrimallin *MT b21 HOMG* täyttökorkeus laskettiin

75 %:iin arvoon $FH = 637$ mm. Tällöin lieriöperiaatteella laskettava sisällön tiheys kasvaa arvoon $\rho_{sis} = 0,90$ g/cm³. Alla olevaan taulukkoon 7.1 on koottu näiden kahden täyttökorkeudeltaan eroavien ISOCS-mallien tehokkuudet, tehokkuuksien prosentuaaliset erot, sekä yhtälöllä 3.1 (S , γ ja LT vakioita) lasketut vaikutukset aktiivisuustuloksiin tärkeimmillä tässä työssä tarkasteltavilla energioilla.

Taulukko 7.1. Tehokkuusarvojen vertailu ISOCS-mallin *MT b21 HOMG* täyttökorkeuksilla $FH = 850$ mm ja $FH = 637$ mm.

Energia [keV]	Tehokkuus $FH = 850$ mm, $\rho_{sis} = 0,68$ g/cm ³ [-]	Tehokkuus $FH = 637$ mm, $\rho_{sis} = 0,90$ g/cm ³ [-]	Tehokkuuden ero täyttökorkeudella $FH = 637$ mm [%]	Vaikutus aktiivisuustulokseen [%]
121,8	2,37 E-05	1,99 E-05	-15,87	+18,87
344,3	2,37 E-05	2,04 E-05	-13,95	+16,21
661,7	1,54 E-05	1,35 E-05	-12,37	+14,50
778,9	1,39 E-05	1,22 E-05	-12,37	+14,12
1112,1	1,13 E-05	1,00 E-05	-11,33	+12,78
1173,2	1,10 E-05	9,74 E-06	-11,16	+12,57
1332,5	1,01 E-05	9,00 E-06	-10,82	+12,13
1408,0	9,71 E-06	8,68 E-06	-10,60	+11,86

Taulukosta 7.1 nähdään, että madaltamalla homogeenisen ISOCS-mallin *MT b21 HOMG* täyttökorkeutta arvosta arvoon $FH = 637$ mm ja kasvattamalla tiheyttä arvoon $\rho_{sis} = 0,90$ g/cm³ saavutetaan energiasta riippuen noin 12–19 % korkeampia aktiivisuustuloksia. Kappaleessa 6.5.1 esitellyistä mittaustuloksista nähtiin, että metallitynnyriin sijoitettavan pistelähteen CV195 vaimentavammilla mittaustapauksilla *MT b21 h220 r0 HOMG* ja *MT b21 h440 r0 HOMG* aktiivisuustulokset jäivät melko lähelle -30 %:n virhettä (kuvat 6.16 ja 6.17). Käyttämällä konservatiivisempaa mallinnustapaa mahdollisessa ei-toivotussa pistelähdetilanteessa aktiivisuustulosten aliarvioitumisen vaikutusta voitaisiin lieventää. Ensisijaisesti kuitenkin jätepakkausten täyttämistä edeltävä aktiivisuusperusteinen esilajittelu tulisi suorittaa huolellisesti, jotta tämänkaltaisia tilanteita ei pääsisi syntymään.

Tässä työssä on moneen otteeseen havaittu, että lähtökohtaisesti mittauskohdetta paremmin vastaavilla geometriamalleilla saadaan tarkempia aktiivisuustuloksia. Tiheysjakaumaltaan epätasaisen mallimetallitynnyrin tapauksessa olisi myös mahdollista esimerkiksi jakaa tynnyri ”Simple Cylinder” -mallinteesta kahteen yhtä korkeaan tiheysvyöhykkeeseen, jossa

esimerkiksi 60 tai 75 prosenttia jätepakkauksen sisällön massasta oletetaan olevan alemmassa dimensiossa ja vastaavasti 40 tai 25 prosenttia ylemmässä dimensiossa. Esimerkiksi tiheysjakaumaltaan epätasaisen mallimetallitynnyrin tapauksessa homogeenista ISOCS-mallia olisi mahdollista muuttaa realistisemmaksi jakamalla tynnyri ”Simple Cylinder” -mallinteessa esimerkiksi kahteen yhtä korkeaan tiheysvyöhykkeeseen, jossa esimerkiksi 60 tai 75 prosenttia jätepakkauksen sisällön massasta oletetaan olevan alemmassa dimensiossa ja vastaavasti 40 tai 25 prosenttia ylemmässä dimensiossa. Tämänkaltaisten mallinnustapojen vaikutusta aktiivisuustuloksiin voitaisiin analysoida tässä kappaleessa esitellyn tavan mukaisesti, lisäksi tutkimus olisi yksinkertaista toistaa usean eri tiheysluokan jätepakkauksista luoduille mallinnoille. Tässä työssä homogeenisten ISOCS-mallien tiheysjakaumien muokkaamisen vaikutusta aktiivisuustuloksiin ei kuitenkaan tutkita enempää, vaan mahdolliset lisätutkimukset esitetään viranomaiselle toimitettavassa soveltuvuusarviossa.

7.2 Tynnyrin virheellisen etäisyyden vaikutus aktiivisuustulokseen

Tynnyriä on lähes mahdotonta saada asetettua aina tismalleen samalle etäisyydelle detektorista, ja pyöritysmittauksissa tynnyrin etäisyys voi vaihtelee tavallisesti hiukan yhden pyörähdyksen aikana. Tämän työn aikana arvioitiin, että tynnyri voidaan realistisesti asettaa joka kerta niin tarkasti, että pinnan etäisyys detektorista vaihtelisi enintään noin ± 10 mm tavoite-etäisyydestä $SD = 440$ mm.

Asetteluvirheen vaikutusta aktiivisuustulokseen on mahdollista arvioida Geometry Composerin yhteydessä olevalla ISOCS Uncertainty Estimator -työkalulla (IUE). IUE:lla voidaan luoda tehdystä geometriamallista epävarmuusmalleja, jossa muutetaan yhtä ISOCS-mallin parametria kerrallaan käyttäjän asettamien määrien ja intervallivälien verran. IUE laskee tämän jälkeen epävarmuusmalleille uudet tehokkuusarvot käyttäjän määrittämille energiadatapisteille ja kertoo tehokkuusarvojen muutoksen suhteen alkuperäisen mallin tehokkuusarvoihin, joka on kääntäen verrannollinen aktiivisuustuloksen muutokseen. (Canberra Industries 2012a, 141)

Virheellisen etäisyyden vaikutuksen arviointia varten tarkasteltiin detektorille b21015 luotuja homogeenisia ISOCS-malleja metalli- ja betonitynnyreille *MT b21 HOMG* ja

BT b21 HOMG siten, että IUE:ssa luotiin epävarmuusmallit ± 10 mm ja ± 20 mm poikkeamille tavoite-etäisyydestä $SD = 440$ mm. Alla olevaan taulukkoon 7.2 on koottu kunkin epävarmuusmallin tehokkuusarvojen poikkeamat alkuperäisistä malleista tärkeimmillä tässä työssä tarkasteltavilla energioilla.

Taulukko 7.2. Tynnyrin virheelliselle etäisyydelle asettamisen vaikutus saatavaan tehokkuusarvoon tynnyrimalleilla *MT b21 HOMG* ja *BT b21 HOMG*.

Energia [keV]	Tehokkuusarvon muutos muutettaessa parametria SD , (malli <i>MT b21 HOMG</i>)				Tehokkuusarvon muutos muutettaessa parametria SD , (malli <i>BT b21 HOMG</i>)			
	-20 mm [%]	-10 mm [%]	+10 mm [%]	+20 mm [%]	-20 mm [%]	-10 mm [%]	+10 mm [%]	+20 mm [%]
121,8	+4,26	+2,13	-1,97	-4,02	+4,38	+2,10	-2,34	-4,46
344,3	+4,26	+2,12	-2,03	-4,00	+4,42	+2,13	-2,26	-4,36
661,7	+4,35	+2,16	-2,09	-4,13	+4,58	+2,24	-2,28	-4,43
778,9	+4,39	+2,18	-2,11	-4,17	+4,64	+2,27	-2,29	-4,47
1112,1	+4,43	+2,20	-2,13	-4,20	+4,68	+2,29	-2,29	-4,47
1173,2	+4,44	+2,20	-2,14	-4,21	+4,68	+2,29	-2,29	-4,47
1332,5	+4,48	+2,22	-2,15	-4,24	+4,76	+2,33	-2,32	-4,53
1408,0	+4,51	+2,24	-2,17	-4,27	+4,77	+2,34	-2,33	-4,56

Tuloksista nähdään, että realistiseksi asetteluvirheeksi ajatellulla ± 10 mm epävarmuudella vaikutus aktiivisuustulokseen on noin parin prosentin luokkaa. Virheasettelun prosentuaalinen vaikutus ei myöskään näytä eroavan kovinkaan paljoa tynnyreiden ja energioiden välillä. Kun tynnyri mallinnetaan todellista etäisyyttä lähemmäs, tehokkuusarvo kasvaa ja saatava aktiivisuustulos pienenee. Mahdollisessa asetteluvirhetilanteessa olisi näin parempi, jos tynnyri olisi hieman mallinnettua etäisyyttä lähempänä detektoria, kuin että se olisi liian kaukana siitä, jotta virhe syntyisi olisi konservatiiviseen suuntaan.

Tulosten perusteella etäisyyden virheasettelun aiheuttama vaikutus aktiivisuustuloksiin voidaan todeta melko marginaaliseksi verrattuna ISOCS-malliin asetettavien tiheys- ja aktiivisuusjakaumien vaikutuksiin. Tästä huolimatta voidaan kuitenkin todeta, että mittajaan on tärkeää osata asetella mittauskohde oikealla tavalla mitattavaksi. Mittauskohteen asettelussa huomioitavista asioista kerrotaan lyhyesti laaduntarkkailuohjelmasta kertovassa kappaleessa 8.

7.3 Taustavähennyksen vaikutus mittaustulokseen

Kuten kappaleessa 5.4 kerrottiin, mikäli taustavähennykseen käytettävän gammaspektrin suoritetaan tyhjälle detektorin näkymälle, suoritettava taustavähennys ei ota huomioon kohteen mittauksen aikana tapahtuvaa taustasäteilyn absorboitumista itse mittaushetkeen. Koska taustasäteilyn mittaaminen tapauskohtaisen inaktiivisen geometrian avulla on epärealistinen vaihtoehto, tulee epätäydellisenä suoritettavan taustavähennyksen vaikutusta varsinaisen mittaushetken aktiivisuustulokseen arvioida.

ISOCS-geometriamalli ei pysty erottamaan taustasäteilyä mittaushetkestä lähtevästä säteilystä, joten se olettaa kaiken radioaktiivisuuden olevan peräisin mallinnetusta aktiivisuustilavuudesta. Taustavähennyksen vaikutusta tynnyrimittaukseen aktiivisuustulokseen on näin mahdollista arvioida laskennallisesti tarkastelemalla taustamittauksissa havaittavia pulssinkeräysnopeuksia verrattuna mittaushetkeissä havaittaviin pulssinkeräysnopeuksiin, sekä tarkastelemalla eri ISOCS-mallien tehokkuuksia näille energioille.

7.3.1 Co-60:n vaikutus prosentuaalinen vaikutus taustasäteilyssä

Mittauspaikkoina tässä työssä toimivien Pilot-hallin ja Miiluhallin taustasäteilyssä havaittavan Co-60 -aktiivisuuden prosentuaalista merkitystä aktiivisuustulokseen tarkasteltiin valitsemalla muutamia tämän työn aikana eri Co-60 -lähteillä suoritettuja mittaustapauksia. Näistä mittauksista analysoitiin Co-60 -pulsinkeräysnopeudet fotopiikille 1332,5 keV. Co-60:n toisen gammakvantin 1173,2 keV energian ja intensiteetin voidaan katsoa olevan niin samansuuruisia 1332,5 keV gammakvantin kanssa, että tarkastelu riittää suorittaa fotopiikille 1332,5 keV. Tämän jälkeen analysoitiin valittuja mittauksia varten suoritetuista, tavanomaisesta mittausasennosta tyhjälle detektorin näkymälle tehdyistä taustamittauksista vastaavat pulssinkeräysnopeudet. Alla olevaan taulukkoon 7.3 on koottu valitut Miiluhallissa ja Pilot-hallissa suoritettavat mittaustapaukset, ja lasketut taustasäteilyn prosentuaaliset vaikutukset aktiivisuustulokseen. Tulokset ovat konservatiivisia, sillä ne jättävät mittaushetken itseabsorption huomiotta.

Taulukko 7.3. Taustavähennyksen merkitys Pilot- ja Miiluhallissa erisuuruille Co-60 -lähteille, erilaisissa lähdegeometrioissa.

Mittauspaikka ja detektori	Mittauskohde	Co-60 lähde	Lähteen aktiivisuus mittaushetkellä [kBq]	Lähteen sijainti (korkeus pohjasta, etäisyys keskipisteestä)	1332,5 keV pulssin-keräysnopeus [cph]	1332,5 keV tausta [cph]	1332,5 keV taustan osuus
Pilot-halli, detektori b21015	NPL-tynnyri	NPL	~158	Lue NPL-kappale 6.4	10 048	547,0	5,47 %
	MT	AE2716	~144	$h = 220 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$	3885	260,0	6,69 %
	MT	AE2716	~144	$h = 440 \text{ mm}$, $r = 190 \text{ mm}$	7150	260,0	3,64 %
	MT	TEF6	~1235	$h = 220 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$	35 600	260,0	0,73 %
	MT	TEF6	~1235	$h = 440 \text{ mm}$, $r = 190 \text{ mm}$	82 400	260,0	0,32 %
	BT	AE2716	~144	$h = 660 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$	411	260,0	63,22 %
Miiluhalli, detektori b19116	NPL-tynnyri	NPL	~158	Lue NPL-kappale 6.4	29 266	8,3	0,03 %
	MT	AE2716	~144	$h = 220 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$	12 087	10,4	0,09 %
	BT	AE2716	~144	$h = 660 \text{ mm}$, $r = 0 \text{ mm}$	844	10,4	1,23 %

Taulukosta 7.3 voidaan huomata, että Co-60 -taustasäteilyn vaikutus aktiivisuutulokseen voi olla Miiluhallissa monikymmenkertaisesti pienempi kuin Pilot-hallissa. Tuloksista nähdään myös, että taustavähennyksen merkitys pienenee lähteen aktiivisuuden kasvaessa, esimerkiksi TEF6:n kaltaista aktiivisempaa kohdetta mitatessa taustavähennyksen merkitys jää alle Pilot-hallissakin alle prosenttiin. Myös kohteen tiheydellä ja lähteen sijainnilla suuri merkitys, kovemmassa vaimennuksessa olevasta lähteestä havaitaan vähemmän pulsseja ja taustavähennyksen merkitys kasvaa suuremmaksi. Tämä tutkimus selittää myös NPL-tynnyrin tapauksessa detektorin b21015 havaittua, kuvassa 6.12 nähtyä Co-60 -aktiivisuutuloksen aliarvioitumista taustasäteilyn kannalta kehojen mittausolosuhteiden takia.

Huomionarvoista on, esimerkiksi NPL-tynnyrin ulkopinnasta havaittiin Miiluhallissa kannettavalla Automess AD6 -annosnopeusmittarilla suoritettulla annosnopeusmittauksella ainoastaan korkeintaan noin 2,0 $\mu\text{Sv/h}$ suuruisia annosnopeuksia. Tästä huolimatta, kun NPL-tynnyriä mitattiin taustasäteilyn kannalta ongelmallisemmassa Pilot-hallissa,

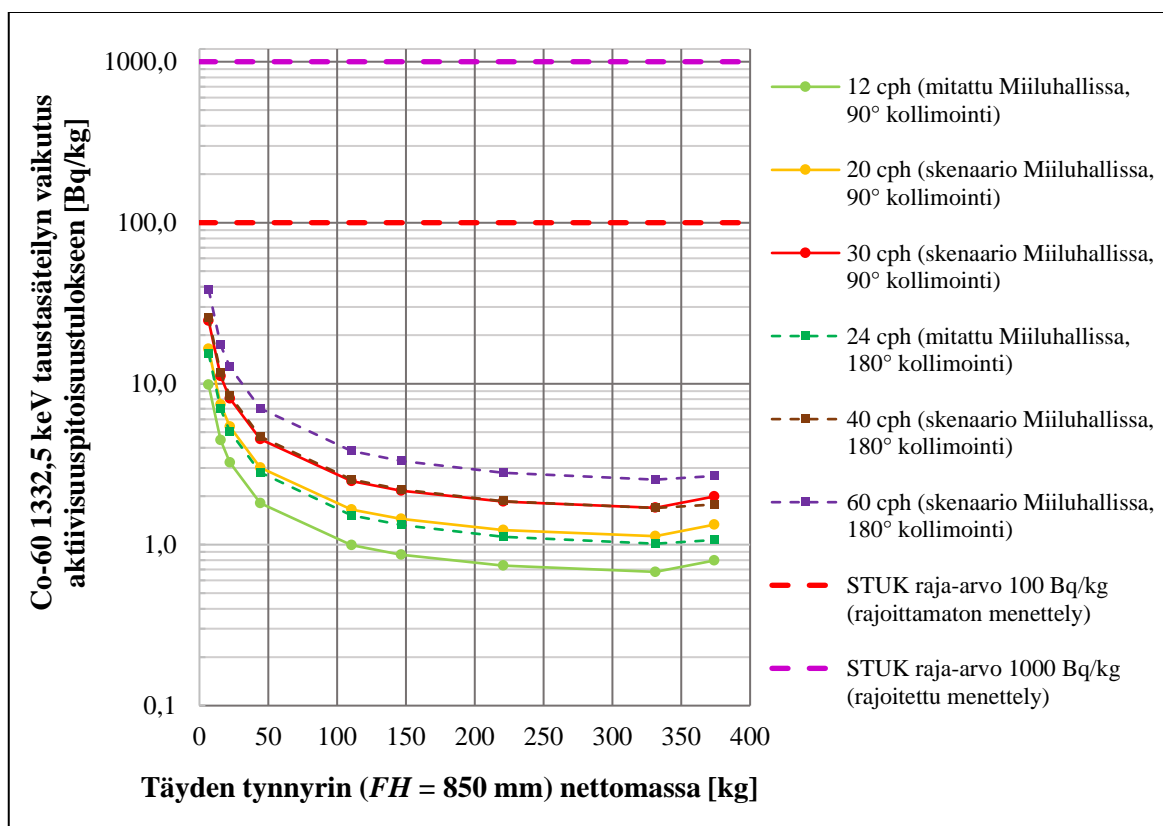
taustasäteilyn prosentuaalinen vaikutus jäi melko pieneksi. Tästä voidaan päätellä, ettei mittauskohteen tarvitsisi olla kovinkaan säteilevä, jotta sitä voitaisiin mitata luotettavasti myös Pilot-hallissa. Työn aikana Pilot-hallin rakennetut lisäsäteilysuojat, sekä laitteiston siirto FiR 1 -purkuprojektissa parempiin mittausolosuhteisiin antavat edellytyksiä mitata myös NPL-tynnynriin verrattuna matala-aktiivisempaa jätettä.

7.3.2 Miiluhallin Co-60 -taustasäteilytason vaikutus vapautusmittauksiin

Erittäin matala-aktiivisella jätteellä, kuten esimerkiksi valvonnasta vapautukseen menevällä jätteellä yleisimmän nuklidin Co-60:n aktiivisuuspitoisuus on tavallisesti hyvin matala, puhtaan jätteen tapauksessa olematon. Kun mittauskohteen mittauksessa tehdyistä Co-60 -pulssihavainnoista lähes kaikki ovat peräisin taustasäteilystä, taustavähennyksen prosentuaalinen osuus mittauksessa havaittavista pulssinkeräysnopeuksista ei ole enää toimiva indikaattori taustasäteilyn merkityksestä aktiivisuustulokseen, vaan tulisi tarkastella taustasäteilytason absoluuttista vaikutusta saataviin tuloksiin.

Tarkastelua varten Miiluhallissa suoritettiin detektorilla b19116 taustamittauksia tavanomaisessa mittausasennossa tyhjälle detektorin näkymälle 90 ja 180 asteen kollimoinneilla. Tämän jälkeen taustaspektreistä laskettiin detektorien pulssinkeräysnopeudet 1332,5 keV fotopiikille. Tämän jälkeen Geometry Composerilla luotiin 200 litran tynnyrimalleja erisuuruisilla tiheyksillä, täyttökorkeuden ollessa $FH = 850$ mm ja mittausetäisyyden $SD = 440$ mm. Yksittäisestä ISOCS-mallista katsotaan Geometry Composerin laskema pistetehokkuusarvo energialle 1332,5 keV, jonka jälkeen voidaan laskea yhtälön 3.1 avulla taustasäteilystä aiheutuva aktiivisuuspitoisuus tällä energialla. Tämän jälkeen luotiin vielä molemmille kollimointi kaksi kuvitteellista tilannetta, jossa Miiluhallissa havaittava Co-60 -taustasäteilytaso on kasvanut merkittävästi.

Tarkastelua varten tehtyjen geometriamallien tiedot, sekä Miiluhallin Co-60 -taustasäteilyn aiheuttamat laskennalliset aktiivisuuspitoisuusvaikutukset jätemassoiltaan erilaisille tynnyreille ovat taulukoituna liitteessä O. Tuloksista on koottu kuva 7.1, jossa aktiivisuuspitoisuusvaikutuksia verrataan STUK:n rajoittamattoman materiaalmäärän valvonnasta vapautusmenettelyn Co-60:n enimmäisaktiivisuuspitoisuusrajaan 0,1 Bq/g, sekä rajoitetun materiaalmäärän vapautusmenettelyn vastaavaan rajaan 1,0 Bq/g.



Kuva 7.1. Miiluhallissa havaittavan Co-60 -taustasäteilyn laskennallinen vaikutus tynnyrien aktiivisuuspitoisuuksiin ISOCS-mallinnetun tynnyrin tiheyden funktiona. Kuvaajaan on merkitty vaikutuksen vertailemista varten STUK:n Co-60 -vapaarajat rajoitetun ja rajoittamattoman materiaalmäärän valvonnasta vapautusmenettelyillä.

Kuvasta 7.1 nähdään, että taustasäteilyn merkitys aktiivisuustulokselle oli suurempi kevyille jätteille, mutta jopa merkittävästi huonontuneilla taustasäteilyolosuhdeskenaarioilla vaikutus jäisi merkittävästi alle STUK:n rajoittamattoman valvonnasta vapautuksen Co-60 -raja-arvon 0,1 Bq/g (100 Bq/kg). Hieman painavammilla jätteillä vaikutus oli nykyisellä taustasäteilytasolla enää muutamien prosenttien luokkaa tästä raja-arvosta, ja niiden osalta laskennalliset aktiivisuuspitoisuudet olivat myös konservatiivisia, kun otetaan huomioon mittauskohteen itseabsorptio. Mikäli valvonnasta vapautukseen sovellettaisiin rajoitetun valvonnasta vapautuksen raja-arvoa 1,0 Bq/g (1000 Bq/kg), taustasäteilyn vaikutus jäisi täysin merkityksettömäksi.

7.3.3 Taustavähennyksen tekemättä jättämisen reunaehdot

Saatujen tutkimustulosten perusteella ja kappaleessa 5.4 esitettyjen syiden johdosta taustan vähentäminen aktiivisempien kohteiden mittauksista, tai Miiluhallin kaltaisessa taustasäteilytasoltaan alhaisessa mittaustaikassa on kyseenalaista. Vaikka taustavähennyksen jättämättä tekeminen on konservatiivinen toimenpide, mutta se ei tulosten perusteella aiheuttaisi esimerkiksi merkittävää lisäystä valvonnasta vapautuksessa hylättävien kohteiden määrään. Lisäksi taustavähennyksen tekeminen on kyseenalaista myös matalan pulssikertymän johdosta, esimerkiksi Miiluhallissa fotopiikin 1332,5 keV pulssikertymä voi olla useiden kymmenien tuntienkin jälkeen vain muutamia satoja pulsseja, mikä tekee taustavähennyksestä myös statistisesti epäluotettavan.

Taustavähennyksen tekemättä jättäminen tulee kuitenkin huomioida mittaustoiminnassa. Taustasäteilyn voimakkuutta mittaustaikoilla täytyy seurata jatkuvasti laaduntarkkailuohjelmalla, josta kerrotaan kappaleessa 8. Lisäksi luonnonnuklidien aiheuttamat, analysointiraporttiin listautuvat tunnistamattomat piikit tulee identifioida analysointivaiheessa. Tutkimuksen perusteella tulisi myös varmistaa, että mitattavien tynnyreiden jätemassa on riittävän suuri, mielellään vähintään useita kymmeniä kiloja. Näin taustasäteilyn vaikutus aktiivisuuspitoisuustuloksiin jäisi mahdollisimman pieneksi. Pakkaustehokkuuden maksimoiminen on mielekästä myös logistiikan ja jätekirjanpidon kannalta, kun mitattavia jätepakkauksia syntyy pienempiä määriä.

Tutkimusten perusteella päätettiin alustavasti erilaisia kriteerejä sille, milloin mittaustaikalla havaittavien taustasäteilytasojen voidaan katsoa olevan niin matalia, että taustavähennys voidaan jättää tekemättä. Aktiivisempien mittaustarkkohteiden osalta tarkastellaan ensisijaisesti prosentuaalista vaikutusta, vähemmän aktiivisella jätteellä absoluuttista vaikutusta. Mikäli taustavähennyksen tekemättömyyden perusteena käytetään absoluuttista vaikutusta, tulee laskea kuvan 7.1 kaltainen, detektori- ja mittaustaikkakohtainen vaikutuksen arviointikuvaaja. Yleisesti voidaan huomioida myös, että mittaustaikalla havaittavan taustasäteilyn vaikutus on mahdollista arvioida laskennallisesti myös muille nuklideille, kuten esimerkiksi Cs-137:lle. Absoluuttisen vaikutuksen ylärajaksi valitaan konservatiivisesti

Taustavähennyksen jättämättä tekeminen on laskennallisesti perusteltua havaittavan säteilyn voimakkuuden perusteella, mikäli jokin seuraavista ehdoista toteutuu:

- Mittauspaikan taustasäteilyn laaduntarkkailumittauksissa havaittavat fotopiikkien pulssinkeräysnopeudet ovat alle 3 % itse mittauskohteen aktiivisuuslaskentaan käytettävien fotopiikkien pulssinkeräysnopeuksista. Tällöin taustavähennyksen prosentuaalinen vaikutus aktiivisuustulokseen voidaan katsoa vähäiseksi.
- Taustasäteilyssä havaittavien fotopiikkien energiakohtainen laskennallinen vaikutus täydeksi mallinnetun tynnyrin aktiivisuuspitoisuudelle on alle 0,1 Bq/g (100 Bq/kg), kun vertailumallina käytetään konservatiivisesti valittua, nettomassaltaan erittäin alhaista 15 kg tynnyrimallia. Tällöin taustasäteilyn absoluuttista vaikutusta aktiivisuustuloksiin voidaan pitää alhaisena. Lisäksi näin alhaisen laskennallisen vaikutuksen aiheuttavan taustamittauksen pulssistatistiikka voidaan olettaa melko epätarkaksi, jolloin sitä ei ole järkevää käyttää taustan vähentämiseen.
- Valvonnasta vapautusmittauksissa mittauspaikan taustasäteilyn laskennallinen vaikutus aktiivisuuspitoisuudelle on vastaavalle, tarkastelunettomassaiselle tynnyrimallille rajoitettua valvonnasta vapautusmenettelyä sovellettaessa alle 0,05 Bq/g (50 Bq/kg), rajoittamattomalla menetelmällä alle 0,02 Bq/g (20 Bq/kg).
- Mitattavasta kohteesta havaittuja fotopiikkejä ei havaita laaduntarkkailuohjelman mukaisesti mitatuissa mittauspaikan taustasäteilyspektreissä. Tällöin mittauspaikan taustasäteilyn ei katsota vaikuttavan saataviin mitaustuloksiin. Myöskään taustasäteilyssä esiintyvien, aktiivisuuslaskennasta poistettavien energioiden vaikutusta ei tarvitse huomioida.

Yleisesti voidaan todeta, että mittauspaikoilla havaittavan taustasäteilytason on hyvä olla mahdollisimman matala, jotta aktiivisuuden määrittämisestä saadaan yksi epävarmuustekijä minimoitua. Mikäli mittauksia ei pystytä suorittamaan ideaalisissa taustasäteilyolosuhteissa, tulee varmistaa, että sen vaikutukset jäävät merkityksettömiksi. Mittauspaikan taustasäteilytasojen ja niiden aktiivisuustuloksiin aiheuttamien vaikutusten hallintaan liittyviä käytännön toimenpiteitä käydään läpi taustasäteilytason laaduntarkkailusta kertovassa, seuraavassa kappaleessa 8.

8 LAADUNTARKKAILU

Gammaspektrometrian luotettavuuden kannalta on erittäin tärkeää tehdä jatkuvaa seuranta laaduntarkkailuohjelmalla, jonka seurantaan on valittu mittaustuloksiin oleellisesti vaikuttava tekijöitä ja parametreja. Seurannalla varmistetaan, että nämä parametrit eivät ole muuttuneet saatavien tulosten kannalta merkityksellisesti, jolloin mittausten voidaan katsoa pysyvän tasalaatuisina ja laitteiston toimivan suunnitellusti.

Laaduntarkkailuohjelmassa valituille tärkeimmille seurantaparametreille valitaan hälytys- ja toimenpiderajat, jotka kertovat niiden muuttuneen merkityksellisesti. Kun valittuja laaduntarkkailuparametreja tarkkaillaan säännöllisesti ja aina identtisesti suoritettavilla mittauksilla, mittaustuloksista voidaan muodostaa trendi, josta määritetyn hälytys- tai toimenpiderajan verran poikkeavat tapahtumat voidaan tulkita virheelliseksi toiminnaksi. (Mirion Technologies 2021b, 42) Käytettäville gammaspektrometrilaitteistoille sovellettava laaduntarkkailuohjelma ja siihen sovellettavien hyväksymiskriteerien määrittäminen on ohjeessa *YVL C.6* (STUK 2019a, 15) määritetty viranomaisvaatimus, ja ohjelman alustava kehittäminen päätettiin ottaa yhdeksi tämän työn tavoitteeksi.

Laaduntarkkailuohjelman seurantaan valittiin seuraavat parametrit:

- Detektorin karakterisointi (detektorin pulssinkeräysnopeuksien tarkistus)
- Detektorin energioresoluutio (fotopiikkien leveyden tarkistus)
- Detektorin energiakalibrointi (havaittavien fotopiikkien sijainnin tarkistus)
- Taustasäteilyssä havaittavat pulssinkeräysnopeudet eri fotopiikeille

Tässä kappaleessa käydään läpi valitut menetelmät yllä olevien parametrien tarkkailulle. Suurin osa valituista laaduntarkkailumenetelmistä perustuu standardin ISO 19017:2017 (ISO 2017) ja detektorivalmistaja Mirion Technologiesin suosituksiin (Mirion Technologies 2021b, 41-44). Lisäksi osa esitellyistä menetelmistä perustuu muun muassa Barsebäckin ydinvoimalaitoksella käytössä olevaan HPGe-detektorien laaduntarkkailuohjelman menettelyihin (Markovic 2021). Ohjeen *YVL C.6* määrittämiä hyväksymiskriteerejä ei määritellä tässä työssä kuin selkeimpien tapausten osalta, sillä niiden asettaminen vaatii alustavasti suunnitellun laaduntarkkailuohjelman koekäyttöä. Nämä tullaan määrittämään

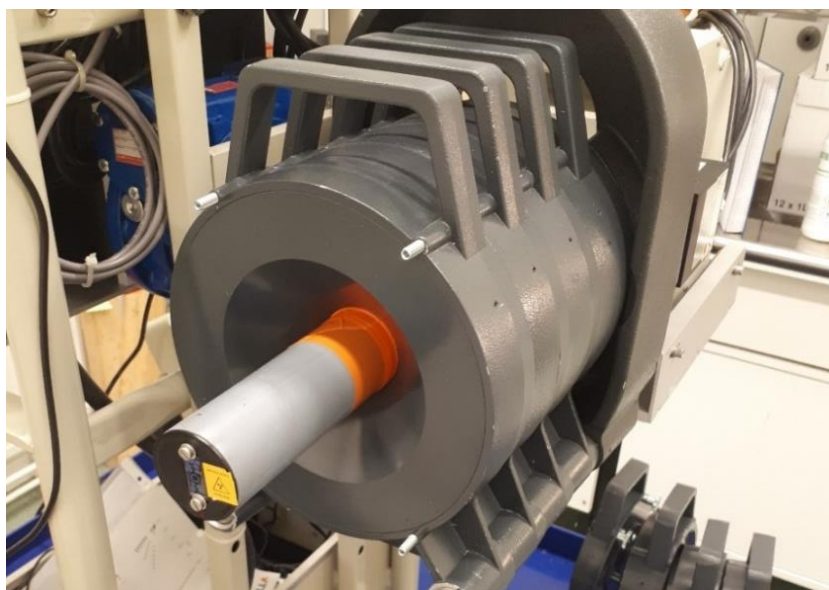
viranomaiselle toimitettavassa, tutkituista ISOCS-laitteistoista laadittavaan mittaajan ohjeeseen, joka on myös ohjeessa *YVL C.6* vaadittu dokumentti (STUK 2019a, 15).

Tässä kappaleessa käydään lisäksi läpi myös käytännön laadunhallintaan liittyviä asioita ja toimintatapoja, joilla voidaan muun muassa varmistaa mittauksen toteutus käytettävän geometriamallin mukaisesti ja estää ei-toivottujen taustasäteilyilmiöiden näkyminen mittaustuloksissa. Lisäksi kappaleessa pohditaan lyhyesti keinoja tunnistaa käytetyn ISOCS-tehokkuuskalibrintimallin vastaamattomuutta todellisen mittaustilanteen kanssa, esimerkiksi jos homogeenista ISOCS-mallia on käytetty aktiivisuusjakaumaltaan epähomogeenisen jätteen kanssa.

8.1 Detektorin ja laitteiston kunnan tarkastus

Gammaspektrometrian laaduntarkkailussa on erittäin tärkeää varmistaa detektorin ja laitteiston signaalelektronikan kunnossa olo. Tämä suoritetaan tavallisesti mittaamalla säteilylähdettä rutiininomaisesti, ja analysoimalla gammaspektristä valitut laaduntarkkailuparametrit karakterisointi, energioresoluutio ja energiakalibrointi. Monilla ydinvoimalaitoksilla tämänkaltainen mittaus suoritetaan päivittäin, kuten esimerkiksi Barsebäckin ydinvoimalaitoksella (Markovic 2021, 4-5).

Detektorin karakterisoinnin, energioresoluution ja energiakalibroinnin tarkistukseen voidaan käyttää Eu-152 -standardipistelähdettä, joka asetetaan tämän työn aikana kehitettyyn mittaustelineeseen. Käytettävää Eu-152 -lähdettä on käytetty alkuun yhteistoiminnassa detektorikohtaisten ISOXSRCE-lähteiden kanssa. Näin voitiin arvioida esimerkiksi uusien Eu-152 -tarkastelufotopiikkien pulssinkeräysnopeuksien stabiilina pysymistä suhteessa ISOXSRCE-mittauksilla saataviin, Mirionin virallisina vertailuarvoina toimiviin pulssinkeräysnopeuksiin. Kuvassa 8.1 on tämän työn aikana kehitetty mittausteline Eu-152 -lähteelle, joka kiinnitetään tarkastusmittauksessa 90 asteen kollimaattorilevyyn. Eu-152 -lähteen käytön etuja ISOXSRCE-lähteellä mittaamiseen verrattuna on laajempi gammaenergiaskaala, sekä se, ettei detektorin ympäriltä tarvitse poistaa sivulyijysuojia näitä tiheästi suoritettavia mittauksia varten.



Kuva 8.1. Eu-152 -standardipistelähteellä suoritettava laaduntarkkailumittaus detektorilla b19116. Lähde on asetettu detektoria vasten olevaan putkeen sovitettavaan korkkiin, jolloin lähteen etäisyys detektorista SD on noin 150 mm. Putken detektoria vasten olevassa päässä on uloke, jonka avulla putki pysyy tukevasti paikoillaan ja mittaus voidaan toistaa lähes identtisesti joka mittauskerralla.

Seuraavaksi käydään läpi Eu-152 -lähteen mittauksesta suoritettavat laaduntarkkailuparametrien tarkistukset pääpiirteittäin. Tarkat mittausten suoritusohjeet, ja käytettävät hälytys ja toimintarajat ja niiden korjaustoimenpiteet käydään läpi myöhemmin viranomaiselle toimitettavassa mittaajan ohjeessa.

8.1.1 Detektorin karakterisoinnin tarkastaminen

Detektorin karakterisointi tarkistetaan analysoimalla Eu-152 -lähteellä suoritetusta mittauksesta saadusta gammaspektristä fotopiikkien 121,8, 778,9 ja 1408,0 keV työn aikana valittuun päivämäärään 15.7.2022 korjatut pulssinkeräysnopeudet. Mikäli niiden prosentuaaliset muutokset ovat verrannollisia kappaleessa 6.1 kerrottuihin, detektorivalmistaja Mirion Technologiesin määrittämiin ISOXSRCE-lähteiden pulssinkeräysnopeuksien sallittaviin poikkeamiin, suoritetaan tarkistusmittaus ISOXSRCE-lähteellä edellä mainitussa kappaleessa esitetyn tavan mukaisesti. ISOXSRCE-mittaus on hyvä suorittaa detektorille vähintään kerran vuodessa, tai silloin jos sen epäillään heikentyneen, esimerkiksi epäonnistuneen jäähdytyksen johdosta.

8.1.2 Energiaresoluution tarkistaminen

Kuten kappaleessa 5.1 mainittiin, detektorin vähitellen tapahtuvat energiaresoluution muutokset eivät ole kovin haitallisia aktiivisuuden kvantifioinnin kannalta. Sen sijaan energiaresoluution äkillinen heikentyminen voi kertoa gammaspektrometrialitteiston komponenttien vikaantumisesta. Eu-152 -lähteellä suoritetusta mittauksesta saadusta gammaspektristä analysoidaan FWHM-arvot fotopiikeiltä 121,8, 778,9 ja 1408,0 keV.

Energiaresoluutiolle selkein menetelmä laaduntarkkailun hälytys- ja toimintarajojen asettamiseen olisi käyttää laaduntarkkailumittausten FWHM-arvojen keskihajontoja valitulla aikavälillä. Hälytysrajaksi asetetaan alustavasti kahden keskihajonnan ja toimintarajaksi kolmen keskihajonnan poikkeama mittausten keskiarvosta, vastaavat rajat ovat käytössä myös Barsebäckin ydinvoimalaitoksella energiaresoluution tarkastuksen osalta (Markovic 2022). Energiaresoluution laaduntarkkailuun liittyvistä hälytys- ja toimenpiderajoista, sekä toimintaohjeet nämä rajat ylittävälle tilanteille käydään läpi myöhemmin viranomaiselle toimitettavassa mitaajan ohjeessa.

Kappaleessa 5.1 mainittua mittauspaikan lämpötilan vaihtelun vaikutusta energiaresoluutioon, sekä tämän ilmiön huomiointia mittauksissa käsitellään lyhyesti tulevassa, mittauspaikan hyväksyttävien mittausolosuhteiden varmistamisesta kertovassa kappaleessa 8.2.

8.1.3 Energiakalibroinnin tarkistaminen

Energiakalibroinnilla tarkistetaan, että gammaspektrin energiakanaviin tallentuvien fotopiikkien keskikohdilla ja niitä vastaavien gammakvanttien todellisten, nuklidikirjastoon kirjattujen energioiden välillä on yhteys. Energiakalibroinnin aktiivisella seurannalla varmistetaan myös, ettei piikkien kanavatalennuksissa ole tapahtunut mahdollista siirtymää, joka voi aiheutua esimerkiksi mittauspaikan lämpötilan vaihtelusta (Gilmore 2008, 89). Energiakalibroinnin ollessa virheellinen havaitun piikin tehokkuusarvo ε otetaan nuklidin nuklidikirjastoenergiaa poikkeavasta kohtaa tehokkuussovitetta, mikä vaikuttaa saataviin aktiivisuustuloksiin. Lisäksi erittäin paljon siirtynyt fotopiikki voi aiheuttaa nuklidin tunnistamatta jättämisen tai tunnistaa sen vahingossa väärän nuklidin aiheuttamaksi.

Energiakalibrointi tarkastetaan Eu-152 lähteellä energiaresoluution ja karakterisoinnin tarkistuksen yhteydessä. Gammasektristä analysoidaan fotopiikkien piikkien 121,8, 344,3, 778,9, 1112,1 ja 1408,0 keV keskikohdat. Mikäli keskikohdat poikkeavat yli 0,5 keV niiden nuklidikirjastoenergioista, tulee piikkien kanavasijainnit korjata. Energiakalibroinnin tarkastus- ja korjausohjeet käydään läpi tarkemmin myöhemmin viranomaiselle toimitettavassa mittaaajan ohjeessa.

8.2 Taustasäteilyn seuraaminen ja mittauspaikan vaikutus

Kuten kappaleessa 5.4 kerrottiin, detektorin on hyvä sijaita paikassa, jossa taustasäteily on mahdollisimman matala ja jossa se altistuu muuttuville taustasäteilytapauksille mahdollisimman vähän. Valvonnasta vapautusmittauksiin käytettävä Miiluhalli on hyvä esimerkki tällaisesta mittauspaikasta. FiR 1:n ja OK3:n purkuprojekteissa In-Situ -mittauksia joudutaan puolestaan vähäisen tilan ja purkutyön logistiikan takia suorittamaan kuitenkin myös paikoissa, joissa taustasäteilyolosuhteet ovat haastavammat tai ne voivat muuttua ajoittain. Mittausten kannalta on oleellista, että mittauspaikkojen taustasäteilytasoa seurataan jatkuvasti laaduntarkkailuohjelmalla, jotta taustasäteilyn voidaan arvioida vaikuttavan riittävän vähäisesti saataviin aktiivisuustuloksiin mittauskriteereistä riippuen.

Tätä työtä laatiessa päätettiin, että detektoreilla tulisi suorittaa niiden mittauspaikalla lyhyt 12 tunnin taustamittaus kerran viikossa, tai jos taustasäteilyn katsotaan muuttuvan oleellisesti esimerkiksi purkuprojektiin liittyvän työvaiheen johdosta. Näin pystytään seuraamaan tuloksiin eniten vaikuttavien nuklidien fotopiikkien pulssinkeräysnopeuksien muutoksia. Taustasäteilyn voimakkuudelle ei aseteta erikseen hälytys- ja toimenpiderajoja, vaan tyydytään tarkkailemaan, että mittauspaikan taustasäteilyssä havaittavien fotopiikkien vaikutukset eri nuklidien aktiivisuuspitoisuustuloksiin pysyvät alle kappaleessa 7.3.3 alustavasti määritettyjen raja-arvojen.

Haastavammilla mittauspaikoilla ei-toivottuja taustasäteilyilmiöitä voidaan estää aktiivisen taustasäteilytason seurannan lisäksi mittausalueen selkeällä mittausten aikaisella rajaamisella, detektorin järkevällä suuntaamisella, sekä radioaktiivisten jätepakkausten logistiikasta ja aktiivisuustasoista perillä olemisella. Lisäksi haastavaksi tunnistetulle

mittauspaikalle olisi järkevää asentaa automaattinen annosnopeuden mittaus. Mikäli haastavampien taustasäteilyolosuhteiden odotetaan paranevan projektin aikana esimerkiksi radioaktiivisten jätteiden poiskuljetusten johdosta, olisi mittausstrategisesti järkevää mitata ensin aktiivisempia jätteitä, ja mitata matala-aktiivisempia syntyneitä jätteitä vasta parantuneissa taustasäteilyolosuhteissa.

Mikäli projekteissa syntyy erittäin matala-aktiivista, lähellä valvonnasta vapautuksen rajaa olevaa jätettä, jota ei voida mitata luotettavasti korkeammassa taustasäteilytasossa, voidaan jätepakkaus kuljettaa mitattavaksi Miiluhallin kaltaiselle matalataustaisemmalle mittauspaikalle. Valvonnasta vapautusmittauksia voidaan suorittaa ainoastaan Miiluhallissa, tai sen tämän työn kirjoitushetkestä taustasäteilytasoa vastaavalla mittauspaikalla.

Kappaleessa 5.1 mainittiin, että myös mittauspaikan lämpötilavaihteluilla voi olla merkitystä varsinkin pidemmällä mittausajoilla saataviin mittaustuloksiin energioresoluution huonontumisen muodossa. Gilmoren (2008, 89) mukaan noin 10 °C lämpötilan muutos voi aiheuttaa noin yhden tai kahden energiakanavan suuruisen siirtymän gammaspektriin. Purkuprojekteissa ISOCS-laitteistoilla suoritettavat mittaukset tullaan suorittamaan sisätiloissa, mutta osassa mahdollisista mittauspaikoista laitteistot saattavat altistua esimerkiksi suurien, ulos vievien kuljetusovien avaamisesta syntyville huonetilan lämpötilavaihteluille. Mikäli jokin mittauspaikka tunnustetaan lämpötilan osalta mahdollisesti epästabiiliksi, tulisi harkita mahdollisesti automatisoidun mittauspaikan lämpötilan tarkkailun lisäämistä osaksi mittausten laaduntarkkailua.

8.3 Mittausgeometrian varmistaminen

Kuten kappaleessa 7.2 todettiin, jo hyvin pieni mittauskohteen mallista eroava sijainti voi vaikuttaa muutamia prosentteja saataviin aktiivisuustuloksiin. Mittausgeometrista on näin aina tärkeää varmistaa detektorin sijainti mittauskohteen suhteen. Kun ISOCS-tehokkuuskalibrointimalli vastaa todellista mittaustilannetta, se luo edellytykset paikkansapitävien mittaustuloksien saannille.

Kaikissa tutkitut detektorit on varustettu kohdistuslasereilla, joiden avulla on mahdollista tarkistaa detektorin oikea suuntaus ja korkeus mittauskohteen suhteen. Detektorin mahdollinen kaltevuus voidaan tarkistaa vatupassin avulla. Mittauskohteen etäisyys voidaan

tarkistaa esimerkiksi laseretäisyysmittarin avulla. Mittausgeometrian asettelu- ja varmistamisohjeet käydään läpi viranomaiselle toimitettavassa mittajaan ohjeessa.

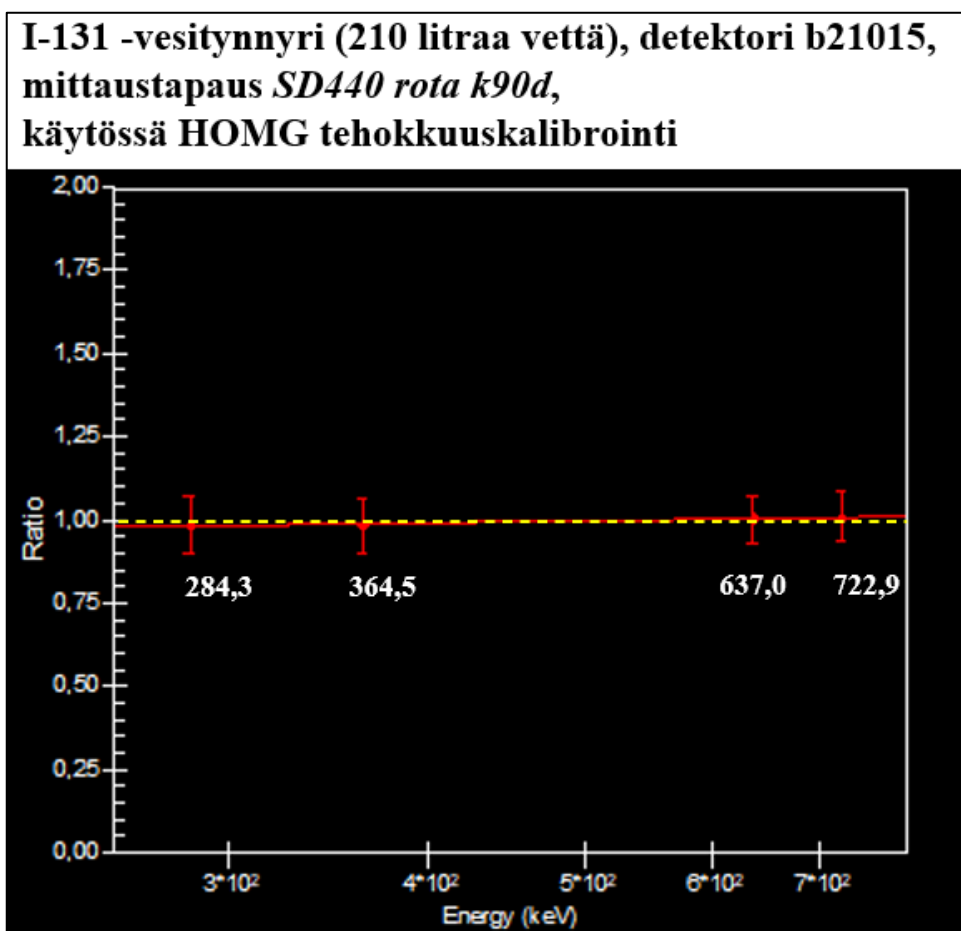
Myös Geometry Composerin mallinnuksessa tulee olla tarkka, että kaikki dimensioparametrit on syötetty ohjelmaan oikein. Useammalla detektorilla mitattaessa tulee myös varmistaa, että käytettävään ISOCS-malliin valitaan oikea detektorimalli.

8.4 Epähomogeenisen aktiivisuusjakauman tunnistaminen

ISOCS-tehokkuuskalibroinnin vastatessa todellista mittaustilannetta Genie2k:n laskemien aktiivisuustulosten tulisi olla nuklidin eri energioilla noin samansuuruisia. Mikäli monella eri energialla säteilevän radionuklidin energiakohtaiset aktiivisuustulokset poikkeavat merkittävästi toisistaan, käytetyn tehokkuuskalibroitimallin on syytä olettaa olevan epäoptimaalinen.

Yhtenä vaihtoehtona käytetyn tehokkuuskalibroinnin hyvyden tarkastelemiseen on lisätä Genie2k:ssa käytettyyn analysointiprosessiin LACE-työkalu (Line Activity Consistency Evaluator). LACE-työkalu laskee jokaiselle radionuklidin mittauksessa havaitulle, nuklidikirjastossa olevalle gammakvantille aktiivisuustuloksen ja radionuklidin painotetun keskiarvoaktiivisuustuloksen WM välisen suhdeluvun. Työkalu laskee suhdeluville myös epävarmuuden ja muodostaa lasketuista suhdeluista sovitetten. Näiden avulla voidaan tarkastella helposti visuaalisesti energiakohtaisten aktiivisuustulosten vaihtelua ja arvioida käytetyn ISOCS-mallin soveltuvuutta kyseiseen mittaustapaukseen.

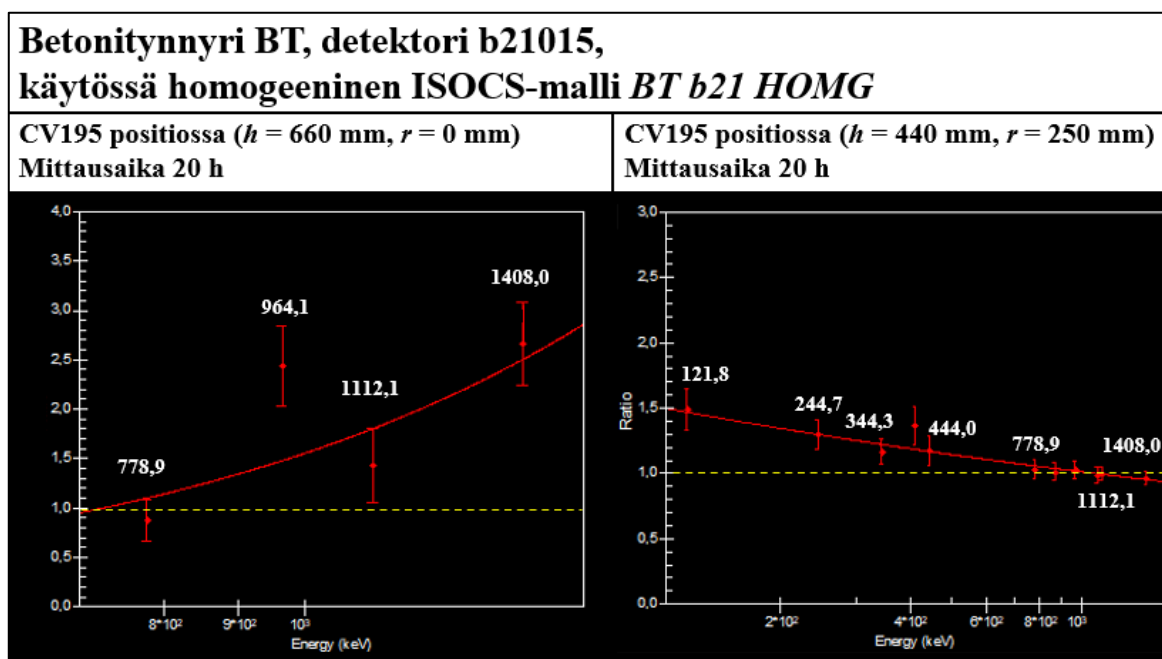
Alla kuvassa 8.2 on esimerkkinä LACE-työkalulla analysoidut, kappaleessa 6.3 esitetyn I-131 -vesitynnyrin homogeenisella ISOCS-tehokkuuskalibroitimallilla saatujen energiakohtaisten aktiivisuustulosten suhdeluvut, kun 210 litraan asti täytettyä tynnyriä ($FH = 860$ mm) mitattiin detektorilla b21015 etäisyydeltä $SD = 440$ mm, 90 asteen kollimoinnilla.



Kuva 8.2. LACE-työkalulla tehty analyysi detektorilla b21015 suoritetusta I-131 -vesitynnyrin mittaustapauksesta *SD440 rota k90d*. Suhdeluvut on laskettu aktiivisuuden painotetun keskiarvon *WM* suhteen. Suhdeluku 1,0 on merkitty keltaisella katkoviivalla.

Kuvasta 8.2 nähdään, eri energioille laskettujen aktiivisuuksien suhdeluvut ovat hyvin lähellä suhdelukua 1,0 ja tulosten epävarmuudetkin ovat pitkälti toistensa rajoissa. Käytettyä homogeenista tehokkuuskalibrointimallia voidaan pitää näin tässä tapauksessa erittäin hyvänä.

Alla olevassa kuvassa 8.3 on puolestaan esimerkkinä kaksi LACE-työkalulla saatua vertailutulosta, kun tynnyrissä on epähomogeeninen aktiivisuusjakauma ja ISOCS-tehokkuuskalibrointiin on käytetty tuolloin epäoptimaalista homogeenista mallia. Tarkasteltaviksi mittaustuloksiksi valittiin aiemmin kappaleessa 6.5.1 esitetyt betonitynnyrin *BT b21 HOMG* -mallin aktiivisuustulokset silloin, kun Eu-152 -säteilylähde CV195 on asetettu tynnyrin kanteen positioon ($h = 660$ mm, $r = 0$ mm) ja positioon ($h = 440$ mm ja $r = 250$ mm) tynnyrin laidalle.



Kuva 8.3. LACE-työkalun näyttämä suhdelukujen vertailu nuklidin Eu-152 eri energioiden aktiivisuustuloksille, kun aktiivisuusjakaumaltaan epähomogeeniseen mittausgeometriaan on käytetty homogeenista ISOCS-tehokkuuskalibroitimallia. Suhdeluvut on laskettu aktiivisuuden painotetun keskiarvon WM suhteen. Suhdeluku 1,0 on merkitty keltaisella katkoviivalla.

Kuvasta 8.3 nähdään, että pistelähteen ollessa kovassa vaimennuksessa positiossa ($h = 660$ mm, $r = 0$ mm) havaitaan korkeammilla energioilla enemmän pulsseja, mikä johtaa suurempiin aktiivisuustuloksiin. Eu-152:n monia matalaenergisempiä gammakvantteja ei puolestaan ole havaittu mittauksessa ollenkaan, mikä olisi aktiivisuusjakaumaltaan aidosti homogeenisen Eu-152 -aktiivisen tynnyrin tapauksessa hyvin epätodennäköistä. Pistelähteen ollessa betonitynnyrin laidalla positiossa ($h = 440$ mm, $r = 250$ mm) detektori havaitsee puolestaan pyöritysmittauksessa matalampia energioita homogeenisen mallin olettamaa huomattavasti suurempia määriä. Tällöin niiden aktiivisuustulokset arvioituvat suuremmiksi, ja aktiivisuustulokset alkavat madaltua korkeammille energioille mentäessä.

LACE-työkalulla on monia rajoitteita, jotka haittaavat sen käytettävyyttä. Suurin rajoite koskee sitä, että analysointia voidaan tehdä vain radionuklideille, joilla on enemmän kuin yksi havaittava gammakvantti. Näin esimerkiksi Cs-137:ää sisältävän jätteen aktiivisuusjakauman tasaisuutta ei voida arvioida tällä menetelmällä. Co-60:n gammakvanttien energiat ovat puolestaan niin lähellä toisiaan, että varsinkaan kevyemmällä jätteellä energiakohtaisissa aktiivisuustuloksissa ei saateta havaita merkittäviä eroja. Työkalun laskemaan soviteyhtälöön ei voi myöskään luottaa, sillä työkalu käyttää sen

laskemiseen kaikkia nuklidikirjastoon kirjattuja energioita, vaikka käyttäjä olisi halunnut poistaa osan niistä laskentakäytöstä esimerkiksi liian pienen intensiteetin tai interferenssiongelmiensa takia.

LACE-työkalua voidaan pitää heikkouksistaan huolimatta kuitenkin hyvänä lisäyksenä käytettävään analysointiprosessiin, sillä sen avulla aktiivisuuden määrittämisen kannalta keskeiset ISOCS-tehokkuuskalibrointimallit saadaan laaduntarkkailun piiriin ja saatavien aktiivisuustulosten luotettavuutta on helpompi arvioida. Aktiivisen purkujätteen pakkaus ei tule onnistumaan aina homogeenisesti, tällöin LACE-analyysi voi toimia hyvänä varmentavana tarkasteluna. LACE-työkalun käyttökelpoisuutta ja tarkkuutta voidaan arvioida kattavammin kuitenkin vasta käyttökokemusten kertyessä.

Yhtenä vaihtoehtona mahdollisten epähomogeenisuuksien vaikutusten arviointiin on mahdollista käyttää myös kappaleessa 7.2 lyhyesti esiteltyä IUE:ta, jonka potentiaalia ei tämän työn yhteydessä ehditty tutkimaan kovin tarkasti. Ohjelma mahdollistaa aiemmin esiteltyjen mallien herkkyysanalyysien lisäksi muun muassa useiden pistelähteiden mallintamisen geometriaan. Ohjelman avulla on mahdollista arvioida tehokkuus myös esimerkiksi pyöritettävälle tynnyrille, joka sisältää pistelähteen radiaalikeskuksesta $r = 0$ mm poikkeavasta positiossa. (Canberra Industries 2012a, 141)

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittujen HPGe-detektorien ja ISOCS-tehokkuuskalibroinnin soveltuvuuden arvioiminen suunnitelluille käyttötarkoituksille osoittautui huomattavasti haastavammaksi tehtäväksi, kuin mitä diplomityön alussa oli ajateltu. Monet ongelmat liittyivät analysointiohjelma Genie2k:n analysointiprosessin ja käytetyn nuklidikirjaston laskenta-asetusten kehittämiseen, joka vaati lukuisia gammaspektrien uudelleenanalysointeja eri havaintojen perusteella tehtyjen muutosten johdosta. ISOCS-tehokkuuskalibrointi osoittautui myös huomattavasti ennakoitua herkemmäksi virhettä aiheuttaville tekijöille. Iso haaste työssä oli myös kehittää luotettavat tutkimusmenetelmät, joilla aktiivisuuden määrittämisessä toisiinsa kiinteästi liittyvien tekijöiden vaikutusta voitiin tarkastella tekijäkohtaisesti. Tämä näkyi muun muassa siinä, että erilaisia mittauskokeita tehtiin huomattavasti tässä työssä esiteltyjä tapauksia enemmän. Monet työn aikaisemmassa vaiheessa suoritettavat mittauskokeet päätettiin myös suorittaa uudestaan tutkimuksen kannalta paremmalla tavalla, pääosin työn aikana kertyneisiin kokemuksiin perustuen. Suurin osa työstä karsituksi tulleista mittauksista tuki tässä työssä esitettyjä havaintoja, mutta monesti niissä muun muassa tekijäkohtaisen vaikutuksen arvioiminen oli epäluotettavampaa. Erityisesti erittäin matala-aktiivisten jätteiden tapauksessa tehokkuuskalibroinnista ja heikosta pulssistatistiikasta aiheutuvaa mittaus tuloksen epätarkkuutta on vaikeaa arvioida tekijäkohtaisesti. Yleisesti työn perusteella voidaan todeta, että aktiivisuuden määrittäminen ISOCS-tehokkuuskalibroinnilla vaatii käyttäjältä kokonaisvaltaista gammaspektrometrian teorian, käytetyn laitteiston suorituskyvyn, analysointiohjelmiston, sekä oman gammaspektrometrin käyttäytymisen ymmärrystä.

Yksi merkittävimmistä tämän työn aikana tehdyistä havainnoista oli detektorin b10158 karakterisoinnin vanhentumisen toteaminen. Tämän seurauksena detektori päätettiin sulkea VTT:n virallisesta ISOCS-mittausjärjestelmästä siksi ajaksi, kunnes karakterisointi on korjattu valmistaja Mirion Technologiesin toimesta. Koska detektorin tehokkuuden voidaan katsoa heikentyvän oikein käytettynä lähinnä pitkällä aikavälillä, työn aikana detektorilla b10158 mitattuja gammaspektrejä voidaan uudelleenanalysoida sen jälkeen, kun valmistaja on saanut päivitettyä tehokkuuskalibrointilaskentatiedoston. Tämän jälkeen uudelleenanalysoituja mittaus tuloksia on mahdollista käyttää detektorin b10158 soveltuvuusarviointiin ja liittämiseen mukaan VTT:n ISOCS-mittausjärjestelmään.

Tutkituista detektoreista b21015:n ja b19116:n karakterisointien todettiin olevan kunnossa, ja niiden mittaamille gammaspektreille sovellettavan ISOCS-tehokkuuskalibroinnin tarkkuutta voitiin näin arvioida luotettavammin mittauskokeiden avulla. Detektoreilla suoritettujen mittauskokeiden perusteella ISOCS-tehokkuuskalibroinnilla päästään melko haastavillakin mittaustapauksilla purkuprojektien jätteet vastaanottavan Fortumin $\pm 30\%$ tarkkuusvaatimukseen silloin, kun mitattavan kohteen geometria, sekä tiheys- ja aktiivisuuskalibroinnit voidaan mallintaa tarkasti.

Työn aikana suoritetuissa mittauskokeissa havaittiin, että korkeaenergistien gammasäteilijöiden aktiivisuuksien arvioiminen on luotettavampaa kuin matalaenergistien, varsinkin tiheydeltään suuremmilla jätteillä. Kappaleessa 4.3 esitetyn Eu-152:n 121,8 keV aktiivisuuslaskennasta sulkemispäätöksen myötä ISOCS-tehokkuuskalibroinnin luotettavuutta ei lopulta testattu kokonaisvaltaisesti kuin alimmillaan noin 300 keV suuruisille energioille. Tämä ei ole kuitenkaan vakava asia, sillä nuklidikirjastoon kirjatusta arvioidun aktiivisuusinventaarin ETM-nuklideista käytännössä kaikki nuklidit Eu-155:tä lukuun ottamatta voidaan mitata yli 300 keV energioiden perusteella. Tämä energia voitaisiin asettaa näin toistaiseksi voimassa olevaksi energian alarajaksi ISOCS-tehokkuuskalibroinnille. Tästä voidaan poiketa hyvin kevyiden jätteiden tapauksissa, sillä detektorilla b21015 pystyttiin mittaamaan tiheydeltään matalasta NPL-tyynyristä ($m = 28,2 \text{ kg}$, $\rho_{\text{sis}} = 0,13 \text{ g/cm}^3$) hyväksyttävällä tarkkuudella myös huomattavan matalaenergistä Am-241:tä (59,5 keV).

Tämän työn aikana mittauskokeita tehdessä huomattiin myös, että gammaspektristä havaitut fotopiikit alkavat olemaan monesti melko hyvänmuotoisia jo noin 1500–2000 nettopulssin kokoisina ja tällöin niistä saatavat aktiivisuustuloksetkin olivat hyvin suoritetuilla ISOCS-tehokkuuskalibroinneilla melko tarkkoja. Tällöin Mirion Technologiesin suosittamaan 10 000 nettopulssin kertymään ei olisi välttämätöntä päästä kaikissa mittauksissa, ja varsinkaan matala-aktiivisempien jätteiden osalta tämä ei olisi käytetyn mittausajan puolesta mielekäästä, saati aina edes mahdollista. Tässä työssä ei tehty päätöksiä esimerkiksi purkuprojektien jätetyyppi- tai aktiivisuusluokkakohtaisiin mittausaikoihin liittyen, mutta toisaalta osoitettiin esimerkiksi käsikäyttöisellä annosnopeusmittarilla havaittavien, selvästi gammasäteilevien (useita $\mu\text{Sv/h}$) mittauskohteiden tapauksissa mittausajaksi riittävän pääsääntöisesti pari tuntia. Aktiivisemmilla mittauskohteilla, kuten esimerkiksi I-131 -vesitynnyrillä, luotettavaan mittaukseen tarvittiin vain muutamia minuutteja.

Tiheydeltään suuremmilla mittauskohteilla mittausajan tarve suurenee. Yleisesti voidaan todeta, että riittävä pulssikertymä on vakioitua mittausaikaa tärkeämpi tekijä mittauksen onnistumiselle.

Detektorien väliset aktiivisuustulokset eivät poikenneet merkittävästi toisistaan, sillä Geometry Composerissa tehokkuuslaskentaan käytetään molemmille detektorimalleille samaa materiaalikirjastoa ja sinne kirjattuja laskentaparametreja. Kidekooltaan suurimmalla detektorilla b19116 havaittiin käytetyn 90 asteen kollimaattorilevyn vaikuttavan saataviin aktiivisuustuloksiin sen detektorin paljasta päätyypinta-alaa merkittävästi rajoittavan vaikutuksen johdosta. Havainnon johdosta tultiin päätökseen, että detektorilla tulisi harkita siirtymistä 180 asteen kollimoinnilla mittaamiseen, mikäli mittauksia voidaan suorittaa luotettavissa taustasäteilyolosuhteissa.

Työn aikana tärkeimmäksi tutkittavaksi ISOCS-tehokkuuskalibroinnin tutkittavaksi malliksi valittiin aktiivisuus- ja tiheysjakaumiltaan homogeeniseksi mallinnettava tynnyri. Tässä työssä homogeenisen ISOCS-tehokkuuskalibrointimallin osoitettiin toimivan erinomaisesti aktiivisuusjakaumaltaan homogeenisen I-131 -vesitynnyrin tapauksessa, $\pm 30\%$ tarkkuusvaatimus täyttyi molemmilla detektoreilla selvästi tavallisimmilla mittauskonfiguraatioilla. Työn aikana valittiin tynnyrimittausten ja tutkittavien ISOCS-mallien ensisijaiseksi vakioetäisyydeksi $SD = 440$ mm, jota tullaan käyttämään jatkossakin kaikille mittauksille, liian korkea kuollutta aikaa aiheuttavia mittauskohteita lukuun ottamatta. Toisaalta I-131 -vesitynnyrin mittaustuloksista todettiin, että mittausetäisyyden muuttaminen ei juurikaan vaikuta saatavien tuloksien tarkkuuteen, kunhan ISOCS-tehokkuuskalibrointi on suoritettu oikein.

Homogeenisen ISOCS-mallinnustavan kelpoisuutta arvioitiin työn aikana myös todellisen käytöstäpoistojätteen osalta tutkimalla vuosina 2016-17 detektorilla b10158 mitattuja, OK3-laboratorion esipurkutöistä syntyneiden jätetynnyrien gammaspektrejä (Lappalainen et al. 2017). Kyseiset tynnyrit vertailumitattiin Loviisan voimalaitoksella mittaustekniikaltaan huomattavasti edistyneemmällä TCSGS-tynnyrimittauslaitteistolla (Transmission Corrected Segmental Gamma Scanner) (Hostikka 2022). Ne tynnyrit, jotka oli mitattu pyöritysmittauksina 90 asteen kollimoinnilla, lähellä tässä työssä käytettyä vakiomittausetäisyyttä ($SD = 456-465$ mm) ja hyväksytysti tässä työssä määritellyillä taustasäteilykriteereillä, saivat tässä työssä tutkittavilla homogeenisilla ISOCS-malleilla tärkeimmän nuklidin Co-60:n aktiivisuustuloksista keskimäärin ainoastaan noin -10 %

Loviisan tynnyrimittauslaitteiston tuloksista poikkeavia arvoja. Näiden redundanttisesti varmistettujen mittaustulosten perusteella homogeenisen ISOCS-tehokkuuskalibroinnin voidaan olettaa pystyvän toimimaan vaaditulla tarkkuudella täysin homogeenisen I-131 -vesitynnyrin lisäksi myös todellisten, asianmukaisesti pakattujen käytöstäpoistoprojekteista syntyvien jätteiden mittauksissa.

Homogeenisen ISOCS-tehokkuuskalibrointitavassa osoitettiin olevan kuitenkin merkittäviä riskejä etenkin mittaustapauksissa, joissa aktiivisuus on jakautunut pistemäisesti erittäin pieneen tilavuuteen. Tilanne on vakava varsinkin, mikäli pistemäinen aktiivisuus sijaitsee syvällä vaimentavassa tilavuudessa, etenkin raskaammilla jätteillä aktiivisuustulos voi tällöin aliarvioitua pahimmillaan monikymmenkertaisesti. Tämänkaltaisten tilanteiden välttäminen purkuprojektien aikana on ensiarvoisen tärkeää, ja siihen pyritään huolellisella, jätteiden pakkausta edeltävällä aktiivisuusperusteisella esilajittelulla, sekä järkevällä pakkaustavalla. Kaikki valvonnasta vapautusmittauksiin menevät jätteet mitataan myös käsikäyttöisillä säteilymittareilla, jolla varmistetaan jätepakkauksen aktiivisuusjakauman homogeenisuus myös näille erittäin matala-aktiivisille jätteille. Mahdollisia epähomogeenisuustilanteita todettiin olevan mahdollista havaita myös jälkikäteen tehtävillä, tässä työssä luotuun laaduntarkkailuohjelmaan sisällytettävillä LACE-analyysillä.

Työn kappaleessa 7.1 todettiin myös, että käytettävää homogeenista mallinnustapaa on mahdollista kehittää realistisemmaksi esimerkiksi sellaisten jätteiden osalta, joiden tiheys painottuu pakkauksen alaosiin, tai mikäli pakkauksen yläosiin jää suurempia ilmatilavuuksia. Työssä todettiin, että usein näillä realistisemmilla mallinnustavoilla saavutetaan myös konservatiivisia vaikutuksia saataviin aktiivisuustuloksiin. Jatkotutkimusta ja viranomaiselle toimitettavaa soveltuvuusarviota ajatellen olisi hyvä tehdä laajempi selvitys vaihtoehtoisista tavoista asettaa tynnyrimallin tiheys- ja aktiivisuusjakaumia, jossa arvioidaan niiden vaikutusta aktiivisuustuloksiin. Kappaleessa 7.1 tutkitun täyttöasteen *FH* muuttamisen lisäksi voitaisiin tutkia esimerkiksi tynnyrimallin jakamista useampaan tiheyssegmenttiin, ja suorittaa vastaavaa tutkimusta useille eri tiheysluokille luoduille malleille, tässä työssä vain yhden tutkitun mallin sijasta. Käytettävien mallien kehityspotentiaali päätettiin ottaa huomioon määräämällä purkuprojekteista syntyvistä jätepakkauksista kerättäväksi huomattavasti aiemmin suunniteltua enemmän esitietoja muun muassa aktiivisuus- ja tiheysjakaumiin, sekä

täyttökorkeuteen liittyen. Näin ISOCS-malleja olisi helpompaa optimoida todellista jätettä vastaavammaksi.

Tynnyrimittausten osalta suurin jatkotutkimusta vaativa asia on valvonnasta vapautukseen liittyvät tarkemmat tutkimukset muun muassa mittaustarkkuuden ja saavutettavien MDA-arvojen osalta. Lisäksi erityisesti pidempien mittausaikojen tutkimiseen vaaditaan lisähuomiota, sillä valvonnasta vapautuksessa tulee ottaa huomioon myös jätteiden logistiikka ja projektiaikataulu. Tutkimukseen voidaan käyttää tämän työn mittauskokeissa käytettyä I-131 -vesitynnyriä, kunhan I-131:n aktiivisuuspitoisuus on laskenut lähelle ohjeen *YVL D.4* (STUK 2019b) määrittämiä, käyttöympäristön kannalta tärkeimpien nuklidien enimmäisaktiivisuuspitoisuuksia. Valvonnasta vapautusmittausten osalta työssä saatiin kuitenkin tutkittua mittauspaikkana toimivassa Miiluhallissa havaittavan Co-60 -taustasäteilytason vaikutusta saataviin aktiivisuustuloksiin. Lisäksi saatiin valittua alustavat kriteerit vapautusmittauksista vähintään saavutettaville MDC-arvoille, jotka perustuvat viranomaisen määrittämiin enimmäisaktiivisuuspitoisuuksiin ja joiden käytöstä on kokemusta myös ulkomaisilla käytöstä poistettavilla ydinvoimalaitoksilla. Tynnyreistä tehtyjen tutkimuksien toisena merkittävänä puutteena voidaan pitää sitä, purkuprojekteissa syntyy myös jonkin verran I-131 -vesitynnyriä painavampia tynnyrijätteitä muun muassa aktivoituneen tai kontaminoituneen betonimurskan muodossa. Tämän tyyppisille jätteille ISOCS-tehokkuuskalibroinnin toimivuutta ei pystytty testaamaan tässä työssä kuin pistelähteen luoman epähomogeenisen aktiivisuusjakauman osalta. Näin ollen homogeenista ISOCS-tehokkuuskalibrointia voidaan käyttää työn perusteella nettomassaltaan enintään $m = 210$ kg painaville tynnyreille, mutta toisaalta I-131:tä korkeaenergisempien Co-60:n ja Eu-152:n mittaamisen pitäisi onnistua myös hieman tätä painavammilla jätteillä.

Gammaspektrien analysointiin käytettävässä Genie2k-analysointiohjelmasta huomattiin työn aikana useita analysointia hankaloittavia piirteitä. Näistä haastavimpana voitiin pitää nuklidikirjaston vakioina pysyviä aktiivisuuslaskenta-asetuksia. FiR 1- ja OK3-purkuprojekteissa voi tulla eteen useita tilanteita, jossa nuklidi voi jäädä tunnistamatta tai sen aktiivisuus laskettua epäluotettavasti yksittäistapauksessa epäsojivien laskenta-asetusten takia. Nämä tilanteet vaativat laskenta-asetusten muutoksia. Tämän työn aikana näille vaikutuksille kannalta riskialttiimmaksi jätetyypiksi katsottiin erittäin tiheät jätteet, niihin tulee kiinnittää erityishuomiota käyttökokemusta kerätessä. Yhtenä ratkaisuvaihtoehtona tähän ongelmaan voitaisiin luoda erillinen nuklidikirjasto tiheämmille

jätteille. Myös Genie2k:n MDA- ja LACE-laskentatavoissa huomattiin heikkouksia muun muassa interferenssitilanteiden osalta, joiden vaikutus tulee huomioida suoritettavien analysointien yhteydessä. Yleisesti voidaan todeta, että Genie2k:lla on hyvät edellytykset luotettavien aktiivisuustulosten määrittämiseen, mutta käyttäjän tulee ymmärtää analysointiprosessin ja nuklidikirjaston toimintaperiaate, sekä pystyä tarvittaessa muuttamaan yksittäistapauksissa laskenta-asetuksia parhaan mahdollisen lopputuloksen saavuttamiseksi. Työn aikana kehitettyyn nuklidikirjastoon ja sinne asetettuihin laskenta-asetuksiin voidaan olla tässä vaiheessa tyytyväisiä, sillä ne ovat merkittävästi paremmat aiempiin työtä edeltäneisiin versioihin verrattuna. Kehitetty kirjasto tulee olemaan jatkuvassa käytössä myös purkuprojekteissa syntyvien jätteiden aktiivisuusanalyseissa.

Tämän työn aikana Genie2k:lle kehitettyyn, liitteessä E olevaan analysointiprosessiin voidaan olla pääsääntöisesti erittäin tyytyväisiä. Merkittävin työn aikana prosessiin tehty ratkaisu oli taustavähennyksestä luopuminen, jonka katsottiin toimivan monesti aktiivisuustulosten kannalta epäkonservatiivisena ja virheellisesti suoritettuna myös melko epätarkkana toimenpiteenä. Työn aikana taustasäteilyolosuhteiden merkitys aktiivisuustuloksille todettiin kuitenkin erittäin tärkeäksi tekijäksi, varsinkin kun ISOCS-mittauksia suoritetaan monesti haastavissa kenttäolosuhteissa. Työn yhtenä johtopäätöksenä määritettiin useita kriteerejä mittauspaikkojen taustasäteilyolosuhteille ja mitattavien kohteiden aktiivisuustasojen suhteessa taustasäteilytasoon, joiden tulee täytyä, jotta mittauksen voidaan katsoa olevan suoritettu hyväksyttävissä taustasäteilyolosuhteissa.

FiR 1 -purkuprojektin näkökulmasta työn suurimmaksi jatkotutkimuksen kohteeksi ja jäivät muut purkuprojektissa käytettävät pakkaustyytit kuin tynnyrit, jotka on alustavasti suunniteltu karakterisoitavan ISOCS-mittauksien avulla. Esimerkiksi FiR 1 -purkuprojektin aikana suoritettavasta biologisen suojan aktivoituneen betonin purkamisesta syntyy erittäin suuria, aktiivisuusjakaumaltaan epähomogeenisia betonisuorakulmioita. Samantapaisia tutkimustarpeita liittyy myös purkuprojektin aikana syntyviin, aktivoituneella ja kontaminoituneella metallijätteellä täytettäviin 5 tonnin jätekontteihin. Näihin mittauskohteisiin liittyy arvioitavaa muun Geometry Composerin suorakulmiomallinteiden tarkkuudesta, huomattavan suuresta vaimentavasta tiheydestä, sekä epäsymmetrisyyden johdosta myös kohteen usealta sivulta mittaamisesta. (Seitoma 2022, 44-46)

FiR 1 -purkuprojektin aikana puretaan myös erittäin aktivoituneita reaktorin sisäosia (säteilytysrengas, grafiittiheijastin, teräksiset pienosat), joita ei käsitelty tässä työssä lyhyitä

mainintoja lukuun ottamatta tarkemmin. Purun yhteydessä ne pakataan erittäin vaimentaviin säteilysuojapakkauksiin, jonka jälkeen niille suoritetaan ISOCS-mittaukset. (Seitomaa 2021b, 46-47) Näiden kappaleiden kannalta tärkeimmät jatkotutkimuksen kohteet ovat selvittää mittauksiin käytettäväksi suunnitellun ISOCS-laitteiston b21015 suorituskyky toimia kappaleiden synnyttämissä säteilykuormituksissa, arvioida syntyvän kuolleen ajan suuruus, sekä suunnitella näihin mittauksiin parhaiten soveltuvat mittausten menetelmät muun muassa kollimoinnin osalta. Syntyvien säteilyolosuhteiden arviointiin voidaan käyttää tukena näille mittaushetkille MCNP-laskennalla laskettuja alustavia annosnopeusarvioita eri etäisyyksiltä (Nieminen 2022). Lisäksi kappaleiden osalta tulisi arvioida käytettävää ISOCS-tehokkuuskalibrintimenetelmää, sekä säteilysuojapakkauksien vaimentavien kerrosten vaikutusta aktiivisuustulokseen. Tässä työssä I-131 -vesitynnyrillä saatiin melko tarkkoja tuloksia mitattaessa sitä 50 mm lyijykerroksen läpi, mikä on reaktorin sisäosien mittausta ajatellen lupaava tieto, sillä niiden dimensiot tunnetaan tarkasti ISOCS-mallinnusta ajatellen ja niiden säteilevät nuklidit Co-60 ja Eu-152 ovat huomattavasti korkeaan energian puolella mainitussa mittauskokeessa tutkittuun I-131:en nähden.

Työn yhdeksi tavoitteeksi asetettiin käytettävien detektorien suorituskyvyn varmistavan ja niillä suoritettavien mittausten järjestelyjä varmentavan laaduntarkkailuohjelman luominen. Työn aikana luodun laaduntarkkailuohjelman seurattaviksi asioiksi valittiin standardin ISO 19017:2017 ja detektorivalmistajan suosituksiin perustuen detektorien karakterisoinnin tarkkuuden, energioresoluution ja energiakalibroinnin kunnossa oleminen, sekä mittaustilalla havaittavien taustasäteilytasojen aktiivinen tarkastaminen. Luotua laaduntarkkailuohjelmaa alettiin testaamaan jo tämän työn aikana, jotta alustavasti valittuja hälytys- ja toimenpiderajoja voidaan testata ja mahdollisesti optimoida siten, että mahdolliset virhetilanteet voitaisiin havaita, mutta raja-arvot eivät aiheuttaisi aiheettomia hälytyksiä. Lisäksi työn aikana tunnistettiin useita tarpeellisia mittaushetken asettelemaan liittyviä toimenpiteitä, joilla varmistetaan mittaustilanteen ja siitä luotavan mallinnuksen yhteneväisyys kohteen sijainnin suhteen. Laaduntarkkailuohjelman mittausten tarkat ohjeet, niiden hyväksymiskriteerit, mahdolliset korjaavat toimenpiteet ja suoritusasteet, sekä ISOCS-laitteistojen yleiset käyttöohjeet koostetaan myöhemmin kirjoitettavaan mittaajan ohjeeseen, joka on ohjeessa YVL C.6 (STUK 2019a) esitetty viranomaisvaatimus. Käytetyn ISOCS-tehokkuuskalibrintimallin pätevyyden tarkastelemista varten työn aikana luotua analysointiprosessiin lisättiin mukaan LACE-analyysi, mutta sitä todettiin voivan käytettävän lähinnä suuntaa antavana analysointimenetelmänä. Luotua, kehitettävään, sekä

myöhemmin purkuprojekteissa sovellettavaan laaduntarkkailuohjelmaan kohdistuvat viranomaisvaatimukset kasvattavat merkittävästi tässä työssä tutkittujen ja kehitettyjen menetelmien merkityksellisyyttä projektien jatkoa ajatellen. Laaduntarkkailuohjelman osalta asetetut työn tavoitteet voidaan näin katsoa saavutetuiksi.

Vaikka työn tavoitteet muuttuivatkin hyvin paljon alun perin ajatellusta, työstä saatiin merkittävä määrä tietoa ISOCS-tehokkuuskalibroinnin toiminnasta ja luotiin useita jatkotutkimuksen tarpeita. Työn tärkeimmät tavoitteet saavutettiin; ISOCS-tehokkuuskalibroinnin potentiaali ja mahdolliset heikkoudet tunnistettiin, kehitettiin alustavat mittausmenetelmät tärkeimmille jätepakkauksille, toimiva analysointiprosessi ja käyttöympäristölle räätälöity nuklidikirjasto Genie2k-ohjelmalle, sekä mittauksia varten ylläpidettävä laaduntarkkailuohjelma. Kehitettyjä prosesseja ja mittausmenetelmiä aletaan käyttöönottamaan hyvin pikaisella aikataululla myös purkuprojekteissa syntyvän jätteen kanssa, joten työn tuloksia päästään hyödyntämään erittäin nopeasti. Ylipäätensä työn voidaan nähdä olevan merkittävässä roolissa Suomen ensimmäisissä käytöstäpoistoprojekteissa, sekä myös yhtenä osana ydinvoiman elinkaaren loppupään vastuullisuuden kehittämistä.

LÄHTEET

Andreotti, E., Hult, M., Marissens, G., Lutter, G., Garfagnini, A., Hemmer, S. & von Sturm, K. 2013. *Determination of dead-layer variation in HPGe detectors*. Applied radiation and Isotopes, Vol 87, 2014. [Viitattu 17.10.2022]. Saatavilla.

https://www.researchgate.net/publication/259317056_Determination_of_dead-layer_variation_in_HPGe_detectors

Bé, M-M., Chisté, V., Dulieu, C., Browne, E., Chechev, V.P., Kuzmenko, N., Helmer, R., Nichols, A.L., Schönfeld, E., Dersch, R., Baglin, C., Mougeot, X., Kondev, F.G., MacMahon, D., Lee, K.B., Luca, A., Galán, M., Pearce, A. Huang, X., Arinc, A., Wang, B. Kellett, M.A. & Kibédi, T. 2004-2016. *Tables of Radionuclides, Vols 1-8*. Bureau International des Poids et Mesures. [pdf]. [Viitattu 28.1.2022]. Saatavilla:

<http://www.lnhb.fr/nuclear-data/nuclear-data-table/>

Bruce, A. 2017. *Gamma-ray Spectroscopy*. University of Brighton. [pdf]. [Viitattu 27.8.2021]. Saatavilla: <https://stfc.ukri.org/files/a-bruce-gamma-spectroscopy/>

Burnham, J.U. 2001. *Radiation Protection*. New Brunswick Power Corporation, Point Lepreau Generating Station. [pdf]. [Viitattu 9.2.2022]. Saatavilla:

<https://canteach.candu.org/Pages/CLibraryHome.aspx>

Canberra Industries, Inc. 2017a. *Cryo-Pulse 5 Plus Electrically Refrigerated Cryostat: User's Manual*. [pdf]. [Viitattu 6.10.2022]. Canberra Document No. 7073995E.

Canberra Industries, Inc. 2017b. *Model 2101 Transistor Reset Preamplifier: User's Manual*. [pdf]. [Viitattu 20.4.2022]. Canberra Document No. 9231794E.

Canberra Industries, Inc. 2013. *Genie™ 2000 Spectroscopy Software: Customization Tools Manual*. Versio 3.0. [pdf]. [Viitattu 26.11.2021]. Canberra Document No. 9233653J.

Canberra Industries, Inc. 2012a. *Geometry Composer: User's Manual*. Versio 4.3. [pdf]. [Viitattu 4.10.2021]. Canberra Document No. 7066653B.

Canberra Industries, Inc. 2012b. *ISOCS/LabSOCS Detector Characterization Report: Detector Model BE2020 S/N b10158*. [Viitattu 8.11.2022].

Canberra Industries, Inc. 2012c. *Model S573 ISOCS Calibration Software: Technical Reference Manual*. Versio 4.3. [pdf]. [Viitattu 4.10.2021]. Canberra Document No. 9231013F.

Canberra Industries, Inc. 2010. *Model 1300 InSpector 2000: Hardware Manual*. [pdf]. [Viitattu 20.4.2022]. Canberra Document No. 9231618G.

Currie, L.A. 1968. *Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry*. Analytical Chemistry, Vol. 40, 1968. [pdf]. [Viitattu 28.12.2021]. Saatavilla: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ac60259a007>

Gilmore, G.R. 2008. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2nd Edition. [Viitattu 15.9.2021]. John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7 [pdf].

Hostikka, K. 2022. *Low Level Maintenance Waste Characterization in Loviisa NPP*. Fortum Power and Heat Oy. [pdf]. [Viitattu 15.11.2022].

Ikäheimonen T., Klemola S., Vesterbacka P. & Rahola T. 2008. *Aktiivisuuden määrittäminen*. Teoksessa: Ikäheimonen T. (toim.), *Säteily ja sen havaitseminen*. Säteilyturvakeskus (STUK). [Viitattu 25.11.2021]. ISBN: 951-712-503-8 [pdf].

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2009. *Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants*. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.18. [Viitattu 17.2022]. ISBN: 978-92-0-110808-1 [pdf].

International Organization for Standardization (ISO). 2017. *ISO 19017:2017: Guidance for Gamma Spectrometry Measurement of Radioactive Waste*. [pdf]. [Viitattu 15.10.2021].

Jensen, P.H., Lauridsen, B., Silva, J., Søgård-Hansen, J. & Warming, L. 2005. *Clearance Laboratory: Capability and measurement sensitivity*. Dansk Dekommissionering. [Viitattu 4.1.2022]. ISBN: 87-7666-020-4 [pdf]. Saatavilla:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/108/36108697.pdf

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). 2008. *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 1st Edition. [pdf]. [Viitattu 18.10.2022]. Saatavilla:
https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6

Knoll, G.F. 2010. *Radiation Detection and Measurement*. 4th Edition. John Wiley and Sons Inc. [Viitattu 15.9.2021]. ISBN: 978-0-470-13148-0 [pdf].

Kotiluoto, P. & Rätty A. 2016. *FiR 1 Activity Inventories for Decommissioning Planning*. Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy. [Viitattu 18.11.2021]. VTT-R-03599-16.

Lappalainen, P. Tanhua-Tyrkkö, M., Kekki, T., Koivuranta, S. & Siivinen, J. 2017. *Jätetynnyreiden palautus Loviisaan 31.1.2017*. Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy. [pdf]. [Viitattu 15.11.2022].

Markovic, N. 2022. Free-Release Engineer / Friklassningsingenjör. Barsebäck Kraft AB. Sähköpostikeskustelu 24.2.2022. [Viitattu 24.2.2022].

Markovic, N. 2021. *Kvalitetssäkring: Bakgrunds- och konstanskontroll av HPGe detektor*. Versio 1. Barsebäck Kraft AB. [Viitattu 3.1.2022]. IDUN 1038868.

Markovic, N. 2020. *A basis for free release measurements with HPGe detector*. Versio 0. Barsebäck Kraft AB. [Viitattu 31.12.2021]. IDUN 1039102.

Mirion Technologies, Inc. 2021a. *Data Sheet: SEGe™ Standard Electrode Coaxial Ge Detectors*. [pdf]. Päivitetty 08/2021. [Viitattu 14.11.2022]. Mirion Document No. SPC-120-EN-A_DMD-08/2021. Saatavilla: https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/spc-120-en-a_sege.pdf?1645551222

Mirion Technologies, Inc. 2021b. *ISOCS/LabSOCS Detector Characterization Report: Detector Model GX1518 S/N b21015*. [Viitattu 8.11.2022].

Mirion Technologies, Inc. 2020a. *Data Sheet: BEGe™ Broad Energy Germanium Detectors*. [pdf]. Päivitetty 01/2020. [Viitattu 14.11.2022]. Mirion Document No. OPS-1424. Saatavilla: https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/ops-1424_bege_spec_sheet.pdf?1579456901

Mirion Technologies, Inc. 2020b. *Data Sheet: XtRa™ Extended Range Coaxial Ge Detectors*. [pdf]. Päivitetty 01/2020. [Viitattu 27.10.2021]. Mirion Document No. OPS-1448. Saatavilla: https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/ops-1448_xtra_spec_sheet.pdf?1579448774

Mirion Technologies, Inc. 2020c. *SU-470-4 Genie 2000 – Basic Operations Training Course*. [pdf]. [Viitattu 28.1.2022].

Mirion Technologies, Inc. 2018a. *ISOCS/LabSOCS Detector Characterization Report: Detector Model GC4018 S/N b19116*. [Viitattu 8.11.2022].

Mirion Technologies, Inc. 2018b. *Maximize your gamma spectroscopy productivity: Techniques for minimizing background in HPGe-based counting systems*. Mirion Technologies Online Course, 14.11.2018. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.7.2022]. Saatavilla: <https://vimeo.com/300988790>

Mirion Technologies, Inc. 2017a. *Model S573 ISOCS Calibration Software*. [pdf]. [Viitattu 7.2.2022]. Mirion Document No. C40166. Saatavilla: https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/c40166s573-isocs-calibration-software.pdf?1562764105

Mirion Technologies, Inc. 2017b. *ISOXSRCE Check Source Fixture: User's Manual*. [Viitattu 4.1.2022]. Mirion Document No. 9231598B.

Mirion Technologies, Inc. 2017c. *Spectrum Analysis*. [pdf]. [Viitattu 8.3.2022]. Saatavilla: <https://www.canberra.com/literature/fundamental-principles/pdf/Spectrum-Analysis.pdf>

Nieminen, P. 2022. *FiR 1 käytöstäpoisto: MCNP-laskenta*. Versio 1.0. Fortum Power and Heat Oy. [Viitattu 17.11.2022]. LO1-T354-00056.

Persson, M. 2021. Free-Release Engineer / Friklassningsingenjör, Barsebäck Kraft AB. Sähköpostiviesti 13.12.2021. [Viitattu 13.12.2021].

Rad Pro Calculator. 2009. *Online Calculators: Decay Calculations*. [Verkkoaineisto]. Päivitetty 3.10.2009. [Viitattu 4.3.2022]. Saatavilla: <http://radprocalculator.com/Decay.aspx>

Räty, A. 2022. *Otakaari 3 laboratorion nuklidivektori*. Versio 28.6.2022. Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy. [Viitattu 16.11.2022]. VTT-R-00307-22.

Räty A., Häkkinen S. & Kotiluoto P. 2020. *Nuclide Inventory of FiR 1 TRIGA Research Reactor Fuel*. *Annals of Nuclear Energy*, Volume 141, 2020. [Viitattu 18.11.2021]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107352>

Seitoma T. 2022. *FiR 1-käytöstäpoisto - Purkujätteen karakterisointisuunnitelma*. Versio 1.0. Fortum Power and Heat Oy. [Viitattu 5.10.2022]. LO1-T354-00032.

Seitoma T. 2021. *FiR 1-käytöstäpoisto - Purkujätteen valvonnasta vapautus*. Versio 1.0. Fortum Power and Heat Oy. [Viitattu 14.4.2022]. LO1-T354-00026.

Säteilyturvakeskus (STUK). 2019a. *Ohje YVL C.6: Ydinlaitoksen säteilymittaukset*. Päivitetty 15.3.2019. [Viitattu 14.12.2021]. Saatavilla: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLC-6>

Säteilyturvakeskus (STUK). 2019b. *Ohje YVL D.4: Matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden käsittely ja ydinlaitoksen käytöstäpoisto*. Päivitetty 15.12.2019. [Viitattu 14.10.2021]. Saatavilla: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLD-4>

Tommila A., Seitomaa T. 2021a. *FiR 1-käytöstäpoisto, esivaiheen jätehuoltosuunnitelma*. Versio 2.0. Fortum Power and Heat Oy. [Viitattu 8.11.2022]. LO1- T354-00022.

Tommila A., Seitomaa T. 2021b. *FiR 1-käytöstäpoisto, purkujätteen pakkaussuunnitelma*. Versio 1.0. Fortum Power and Heat Oy. [Viitattu 16.12.2021]. LO1-T354-00027.

van Es, E.M. & Pearce, A.K. 2022. *Nuclear Industry Proficiency Test Exercise 2021*. National Physical Laboratory. [Viitattu 15.4.2022]. NPL Report IR 60. Saatavilla: <https://eprintspublications.npl.co.uk/9453/1/IR%2060.pdf>

Wallbrink P.J., Walling D.E. & He Q. 2007. *Radionuclide Measurement Using HPGe Gamma Spectrometry*. Teoksessa: Zapata F., *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*. [Viitattu 14.2.2022]. ISBN: 978-1-4020-1041-5 [pdf]. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/226715736_Radionuclide_Measurement_Using_HPGe_Gamma_Spectrometry

LIITE A. TUTKITTUJEN NUKLIDIEN TÄRKEIMMÄT GAMMASÄTEILYOMINAISUUDET

Taulukko A.1. Tämän työn aikana tutkittuja ja mittauskokeissa käytettyjä nuklideja, sekä niiden puoliintumisajat, tärkeimpien gammakvanttien energiat ja niiden intensiteetit (Bé et al. 2004-2016).

Nuklidi	Puoliintumis- aika	Gamma- kvantin energia [keV]	Gamma- kvantin intensiteetti [%]
Na-22	2,603 a	511,0 1274,5	180,70 99,94
Co-60	5,271 a	1173,2 1332,5	99,85 100,00
I-131	8,023 d	284,3 364,5 637,0 722,9	6,14 81,20 7,12 1,79
Cs-137	30,050 a	661,7	84,99
Eu-152	13,522 a	121,8 244,7 344,3 411,1 444,0 778,9 867,4 964,1 1085,8 1112,1 1408,0	28,41 7,55 26,59 2,24 3,12 12,97 4,24 14,50 10,13 13,41 20,85
Eu-155	4,753 a	45,3 60,0 86,5 105,3	1,31 1,21 30,70 21,10
Am-241	432,6 a	59,5	35,92

Työssä esiintyy lyhyesti myös seuraavia etenkin matala-aktiivisissa mittauksissa havaittavia luonnonnuklideja ja niiden mahdollisesti aktiivisuustuloksiin vaikuttavia gammakvantteja: K-40 (1460,8 keV), Bi-214 (Eu-152:n kanssa interferoiva gammakvantti 1408,0 keV) ja Ac-228 (Eu-152:n kanssa interferoiva gammakvantti 964,8 keV). Näiden nuklidien nuklididataan voi tutustua lähteessä (Bé et al. 2004-2016).

LIITE B. GAMMASÄTEILYN VAIMENEMINEN ERI MATERIAALEISSA

Gammasäteilyn väliaineessa vaimenemisen kuvaamiseen käytetään usein puoliintumispaksuutta (Half-Value Layer), joka tarkoittaa väliaineen paksuutta, jonka läpi mentyään alkuperäisen gammasäteilyn intensiteetti on pudonnut puoleen alkuperäisestä. (Burnham 2001, 189-190) Gammasäteilyn vaimenemista ja puoliintumispaksuutta kuvataan yhtälöillä B.1 ja B.2 (Gilmore 2008, 35):

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{B.1})$$

$$x = HVL = \frac{\ln(2)}{\mu}, \text{ kun } \frac{I}{I_0} = 0,5 \quad (\text{B.2})$$

Missä I on gammasäteilyn intensiteetti väliaineen jälkeen [-]

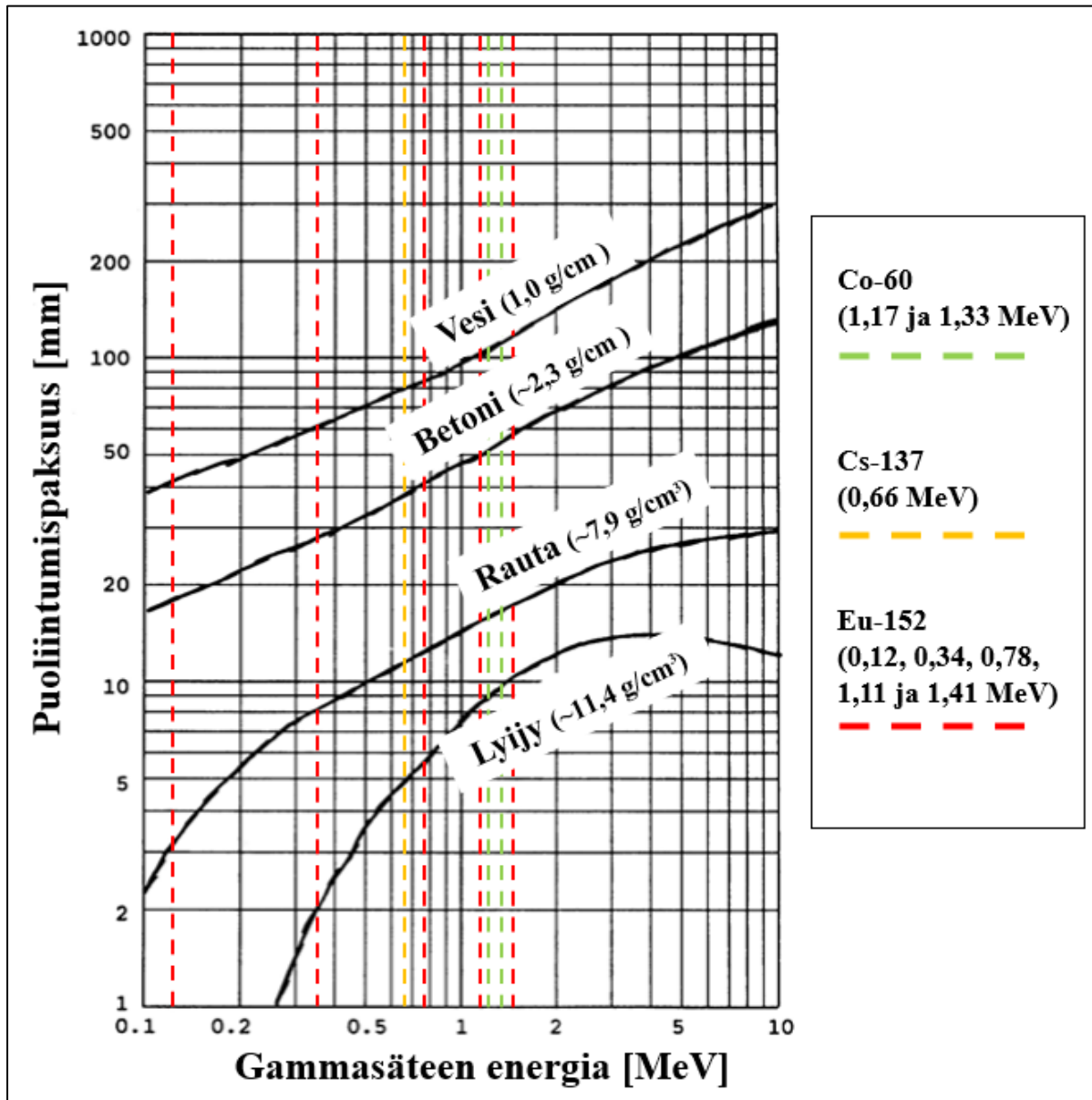
I_0 on gammasäteilyn intensiteetti ennen väliainetta [-]

μ on matkavaimennuskerroin [1/mm]

x on väliaineen paksuus [mm]

HVL on puoliintumispaksuus [mm]

Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa B.1 on eri materiaalien puoliintumispaksuuksia gammasäteen energian funktiona. Kuvaajaan on merkattu katkoviivoilla tämän työn kannalta tärkeimpiä gammaenergioita.



Kuva B.1. Eri materiaalien puoliintumispaksuuksia gammasäteen energian funktiona. Kuvaajaan on merkattu katkoviivoilla tämän työn kannalta tärkeimpien nuklidien Co-60, Cs-137 ja Eu-152 gammaenergioita. (Muokattu lähteestä Burnham 2001, 190)

LIITE C. TUTKITTUJEN GAMMASPEKTROMETRILAITTEISTOJEN TÄRKEIMMÄT SPESIFIKAATIOT JA MUUT TIEDOT

Taulukko C.1. Tutkittujen ISOCS-laitteistojen tärkeimmät spesifikaatiotiedot detektorin osalta, sekä laitteistojen muiden komponenttien tiedot. Lähteenä detektorien spesifikaatiolomakkeet, sekä Mirion Technologiesin lähteet (2021a; 2020a; 2020b).

Detektori	b21015	b19116	b10158
Valmistaja	Mirion Technologies	Mirion Technologies	Canberra Industries
Detektorin malli	GX1518	GC4018	BE2020
Hankintavuosi	2021	2018	2012
Detektorikiteen koko (halkaisija d ; pituus l)	$d = 54,2$ mm $l = 30,3$ mm	$d = 60,7$ mm $l = 63,5$ mm	$d = 51$ mm $l = 21,5$ mm
Suhteellinen tehokkuus (valmistajan määrittämä)	15,7 %	44,1 %	9,0 %
Energiaresoluutio energialla 1,33 MeV, valmistajan takuu	1,8 keV (FWHM)	1,8 keV (FWHM)	2,0 keV (FWHM)
Energiaresoluutio energialla 0,12 MeV, valmistajan takuu	0,825 keV (FWHM)	0,875 keV (FWHM)	0,7 keV (FWHM)
Peak-to-Compton -suhde	48:1	72:1	ei tiedossa
Detektorikapselin ikkunamateriaali	Hiiliepoksi	Alumiini	Hiiliepoksi
Käyttökorkeajännite	4000 V	2500 V	3000 V
Esivahvistin (valmistaja)	2101P, Transistor Reset Preamplifier (Canberra Industries)	iPA, Resistive Feedback Preamplifier (Canberra Industries)	2101P, Transistor Reset Preamplifier (Canberra Industries)
Signaalianalysointilaite (valmistaja)	InSpector 2000, Digital Signal Analyzer (Canberra Industries)	DSA-LX, Digital Signal Analyzer (Canberra Industries)	InSpector 2000, Digital Signal Analyzer (Canberra Industries)
Jäähdytin (valmistaja)	Cryo-Pulse 5 Plus, sähköinen jäähdytin (Canberra Industries)	Cryo-Pulse 5 Plus, sähköinen jäähdytin (Canberra Industries)	7935-7F Big MAC, nestetyypitankki (Canberra Industries)
Laitteiston ensisijainen käyttötarkoitus	Aktiivisen käytöstäpoistojätteen mittaukset	Matala-aktiivisen, potentiaalisesti valvonnasta vapautettavan käytöstäpoistojätteen mittaus	Varalaite

LIITE D. KÄYTETYT OHJELMISTOT

Taulukko D.1. Työtä varten asennetut Mirion Technologiesin ohjelmistot ja niiden versiot.

Asennettu ohjelmisto	Versio
Genie™ 2000 Basic Spectroscopy	3.4
Genie™ 2000 Gamma Analysis	3.4
Genie™ 2000 Interactive Peak Fit	1.4
ISOCS™ Calibration Software	4.3

Taulukko D.2. Työssä gammaspektrien analysointeihin ja aktiivisuuden määrittämiseen käytetyt tietokoneohjelmat ja niiden versiot. Taulukossa D.1 listatut asennetut ohjelmistot vaikuttavat etenkin Gamma Acquisition & Analysis -ohjelman ominaisuuksiin. Esimerkiksi ISOCS™ Calibration Software -ohjelmistoon kuuluvalla Geometry Composer -ohjelmalla luodut ISOCS-tehokkuuskalibroinnit asetetaan käytettäväksi Gamma Acquisition & Analysis -ohjelmassa analysointien yhteydessä.

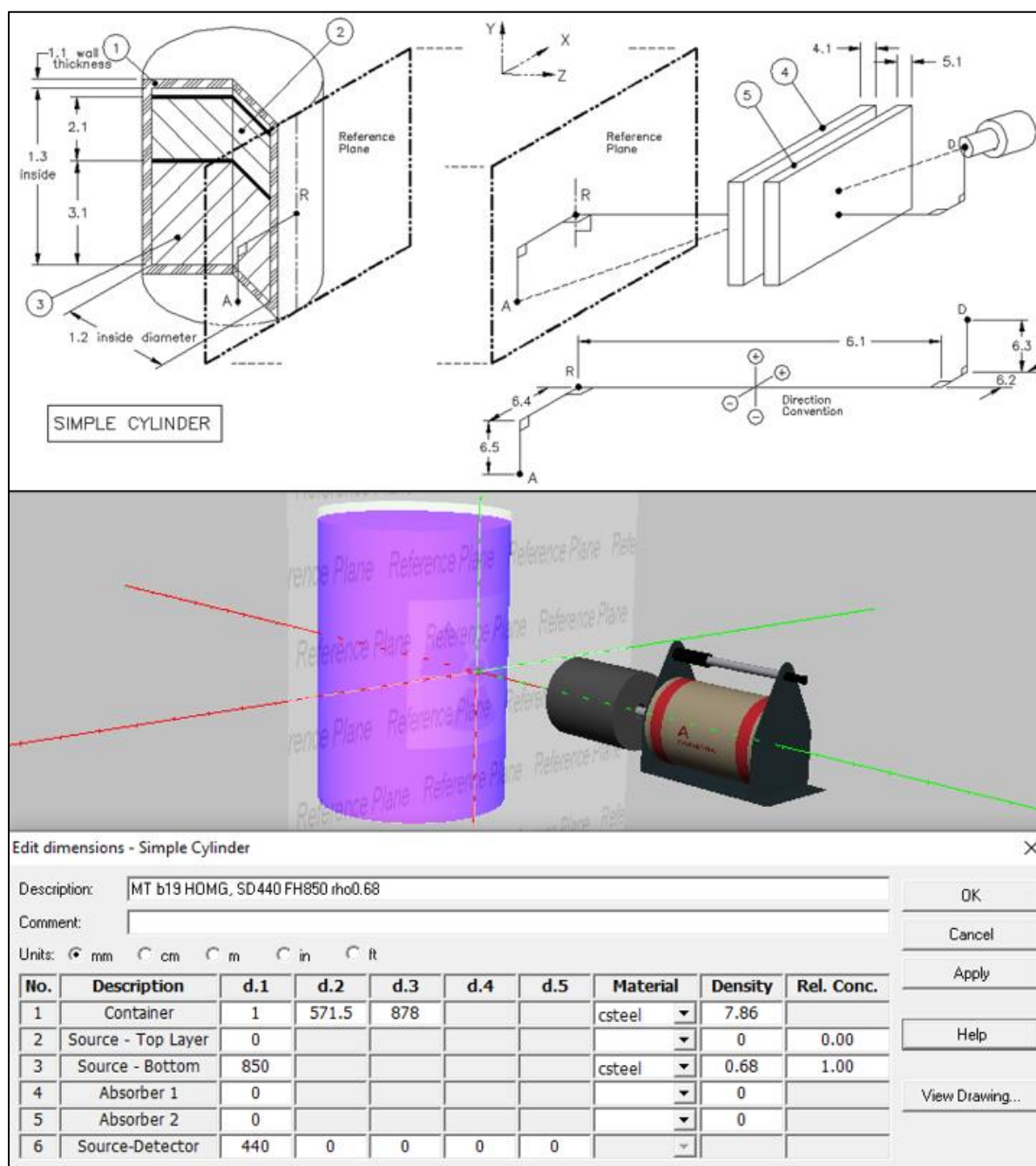
Ohjelma	Versio
Genie™ 2000 Gamma Acquisition & Analysis	3.4
Genie™ 2000 Nuclide Library Editor	3.4
Genie™ 2000 Interactive Peak Fit	1.4
Geometry Composer	4.4

LIITE E. KÄYTETTY GENIE2K -ANALYSOINTIPROSESSI

Taulukko E.1. Tämän työn aikana luotu ja työn mittauskokeissa käytetty. Genie2k-analysointiprosessi, siihen valitut analysointialgoritmit, sekä valitut ajoparametrit. Analysointiprosessi ja parametrien suuruudet perustuvat pitkälti Mirion Technologiesin suositusarvoihin HPGe-detektoreille (Mirion Technologies 2020c), sekä työn aikana kerätyn kokemuksen perusteella tehtyihin valintoihin. Toisinaan analysoidaan gammaspektriä, josta on tarve määrittää ainoastaan fotopiikkeihin ja niiden nettopinta-aloihin liittyviä asioita (esimerkiksi laaduntarkkailumittaus säteilylähteellä tai taustamittaus). Tällöin käytetty analysointiprosessi parametreineen on sama, mutta siitä poistetaan tehokkuuskalibrointi- nuklidintunnistus, aktiivisuuslaskenta- ja MDA-vaiheet.

Analysointivaihe (käytetty algoritmi)	Valitun algoritmin ajoparametrit
Peak Locate (Unidentified 2nd Difference)	Significance Threshold: 2,70 Tolerance: 1,00 keV
Peak Area (Sum/Non-Linear LSQ Fit)	95 % Critical level test käytössä Fixed FWHM: ei käytössä Fixed tail parameter: ei käytössä Fit singlets: ei käytössä Reject zero area peaks: käytössä Continuum: 4 channels Residual Search Threshold: 3.00 Residual Search Minimum Separation: 1,00 FWHM ROI Limits max. between peaks: 5,00 FWHM ROI right/left limit: 2,00 FWHM
Interactive Peak Fit (Standard)	Käytössä lisätyökaluna
Area Correction (Standard Background Subtract)	Tolerance: 1,00 keV 95 % Critical level test: käytössä Taustavähennys voidaan perustelluista syistä jättää tekemättä
Efficiency Correction (Standard Dna/Interpolated)	Käytössä ISOCS-tehokkuuskalibrointi, sovitusmenetelmän valinta tapauskohtaisella harkinnalla
Nuclide Identification (NID with Interference Correction)	Tolerance: 1,00 keV Perform MDA test: käytössä NID Confidence Threshold: 0,6 MDA Confidence Factor: 5,00 % Cascade correction (koinsidenssikorjaus): ei käytössä Käytetty nuklidikirjasto luotu ja muokattu oman käyttöympäristön vaatimusten mukaan Nuclide Library Editor -ohjelmassa (.NLB-tiedosto)
Detection Limits (Currie MDA)	Confidence Factor: 5,00 %
Post NID Processing (LACE)	Energiakohtaiset aktiivisuustulokset suhteutettu painotetun keskiarvoaktiivisuuden WM (Weighted Mean) mukaan

LIITE F. ESIMERKKI GEOMETRY COMPOSER -MALLINTEESTA



Kuva F.1. Ylempänä Geometry Composerin ”Simple Cylinder” -mallinteen kaavakuva. Kaavakuvasta nähdään mallinteen muokattavia dimensioita, kuten pakkauksen ulkokuoren paksuus, pakkauksen sisällön täyttökorkuus ja detektorin sijainti pakkauksen suhteen. Kuvassa alimpana on samasta mallinteesta tehtävän geometriamallin dimensionmuokkausnäkyvä, jossa voidaan asettaa edellä mainittujen asioiden lisäksi myös mallin materiaalit ja niiden tiheydet, sekä eri tilavuuksien suhteelliset aktiivisuusosuudet (Relative Concentration).

LIITE G. ESIMERKKI GENIE2K -ANALYSOINTIRAPORTISTA

Tähän liitteeseen on koottu tärkeimmät tässä työssä käytettävän analysointiohjelma Genie2k:n raportointivaiheet analysointiprosessista. Esimerkkitapauksessa on mitattu Co-60 ja Eu-152 säteilylähteitä ilman suojaa lyhyeltä etäisyydeltä 10 minuutin ajan.

```

*****
*****      G A M M A   S P E C T R U M   A N A L Y S I S      *****
*****

Filename: C:\GENIE2K\CAMFILES\Esimerkki.CNF

Report Generated On           : 1.11.2022   9.36.10

Sample Title                   : Esimerkki
Sample Description              : Co-60 ja Eu-152 säteilylähteet
Sample Identification          :
Sample Type                    :
Sample Geometry                :

Peak Locate Threshold         : 2.70
Peak Locate Range (in channels) : 1 - 65535
Peak Area Range (in channels)  : 100 - 8192
Identification Energy Tolerance : 1.000 keV

Sample Size                   : 1.000E+000 Unit

Sample Taken On               :
Acquisition Started          : 21.10.2022 12.08.56

Live Time                     : 600.0 seconds
▲Real Time                    : 687.2 seconds

Dead Time                     : 12.69 %

Energy Calibration Used Done On : 21.10.2022
Efficiency Calibration Used Done On : 1.11.2022
Efficiency ID                  : ESIMERKKI

```

Kuva G.1. Raportin ensimmäisellä sivulla on analysoidun gammaspektrin otsikkotiedot. Niihin on mahdollista syöttää muun muassa näytteeseen liittyviä tietoja kuvauksen (Sample Description) ja näytteen koko (Sample Size) esimerkiksi kilogrammoina. Tässä raportointivaiheessa ilmoitetaan myös mittausaikatiedot ja gammaspektrometrilaitteiston kuollut aika (Dead Time) mittauksen aikana.

```

***** STANDARD VMS PEAK ANALYSIS REPORT *****
*****
Configuration Title:
Spectrum Title:      Esimerkki
Peak Analysis Performed on: 1.11.22  9.36.10
Peak Analysis From Channel: 100      To Channel: 8192
Peak Search Sensitivity: 2.70      Gaussian Sensitivity: 10.00
Max Iterations: 10      Fit Singlets: No      Critical Level Test: Yes
Use Fixed FWHM: No      FWHM Reject: No      FWHM Reject Ratio: 0.00
Peak Fit Engine Name: PANOLIN1      Continuum Type: STEP

```

Pk	IT	Energy	Area	Bkgnd	FWHM	Channel	Left	PW	Cts/Sec	%err	Fit
M	1	32	32.23	718	18596	1.11	104.52	102	55 1.2E+000	16.4	21.2
m	2	32	35.61	3508	32182	1.11	115.42	102	55 5.8E+000	3.8	21.2
m	3	32	37.09	2914	31935	1.12	120.21	102	55 4.9E+000	4.4	21.2
m	4	32	39.98	90086	30902	1.12	129.54	102	55 1.5E+002	0.9	21.2
m	5	32	42.72	1397	29634	1.13	138.36	102	55 2.3E+000	8.0	21.2
m	6	32	45.43	18882	29101	1.14	147.12	102	55 3.1E+001	1.3	21.2
m	7	32	46.73	3642	28846	1.14	151.30	102	55 6.1E+000	4.0	21.2
M	8	5	72.79	8972	24982	0.95	235.32	229	20 1.5E+001	4.0	1.0
m	9	5	74.97	16486	27550	0.95	242.37	229	20 2.7E+001	3.6	1.0
M	10	7	84.79	8125	30867	1.15	274.05	267	22 1.4E+001	6.3	1.4
m	11	7	87.29	2761	33451	1.15	282.11	267	22 4.6E+000	7.4	1.4
	12	0	121.80	40987	31300	1.00	393.40	386	14 6.8E+001	0.9	0.0
	13	0	172.33	568	18885	1.08	556.34	553	10 9.5E-001	36.6	0.0
	14	0	244.63	6229	25418	1.20	789.52	782	15 1.0E+001	4.5	0.0
	15	0	310.41	1128	16255	1.06	1001.65	996	13 1.9E+000	18.6	0.0
	16	0	344.15	13818	18286	1.15	1110.46	1102	16 2.3E+001	1.9	0.0
	17	0	410.98	1302	14317	1.56	1325.98	1317	15 2.2E+000	15.8	0.0
	18	0	443.72	1209	11894	1.35	1431.59	1427	13 2.0E+000	14.9	0.0
	19	0	510.93	1923	14867	2.76	1648.33	1639	18 3.2E+000	11.7	0.0
	20	0	661.50	2022	10456	1.45	2133.92	2126	14 3.4E+000	8.7	0.0
	21	0	778.72	2390	10142	1.48	2511.94	2506	13 4.0E+000	7.1	0.0
	22	0	821.48	617	14588	1.80	2649.84	2641	18 1.0E+000	35.6	0.0
	23	0	867.21	429	11001	1.53	2797.31	2791	12 7.2E-001	39.0	0.0
	24	0	963.99	2373	17842	1.49	3109.44	3103	17 4.0E+000	10.2	0.0
	25	0	1085.76	1526	11433	1.70	3502.12	3496	15 2.5E+000	12.2	0.0
	26	0	1112.07	2303	14500	1.53	3587.00	3578	19 3.8E+000	9.8	0.0
	27	0	1173.19	233653	7210	1.66	3784.11	3773	22 3.9E+002	0.2	0.0
	28	0	1212.79	143	1980	0.71	3911.81	3907	15 2.4E-001	53.5	0.0
	29	0	1299.20	173	712	1.56	4190.46	4185	17 2.9E-001	28.5	0.0
M	30	24	1328.48	109	795	1.73	4284.89	4279	31 1.8E-001	24.2	1.3
m	31	24	1332.58	206014	943	1.73	4298.13	4279	31 3.4E+002	0.2	1.3
	32	0	1408.19	2385	155	1.80	4541.95	4533	18 4.0E+000	2.3	0.0
M	33	11	1457.71	67	73	1.86	4701.67	4696	60 1.1E-001	16.9	1.5
m	34	11	1460.84	95	96	1.86	4711.76	4696	60 1.6E-001	13.3	1.5
	35	0	2346.93	42	12	1.18	7569.38	7562	16 7.0E-002	21.3	0.0
	36	0	2506.75	137	5	1.97	8084.77	8075	19 2.3E-001	9.0	0.0

M = First peak in a multiplet region
m = Other peak in a multiplet region
F = Fitted singlet

Kuva G.2. Genie2k-analysointiraportin piikkianalyytitulokset. Raportista näkee muun muassa havaitun piikin energian, netto-pinta-alan (Area) ja sen epävarmuuden (%err), sekä FWHM-arvon.

```

*****
****  E F F I C I E N C Y   C A L I B R A T I O N   R E P O R T   ****
*****

Detector Name:  GX1518
Sample Title:   Esimerkki

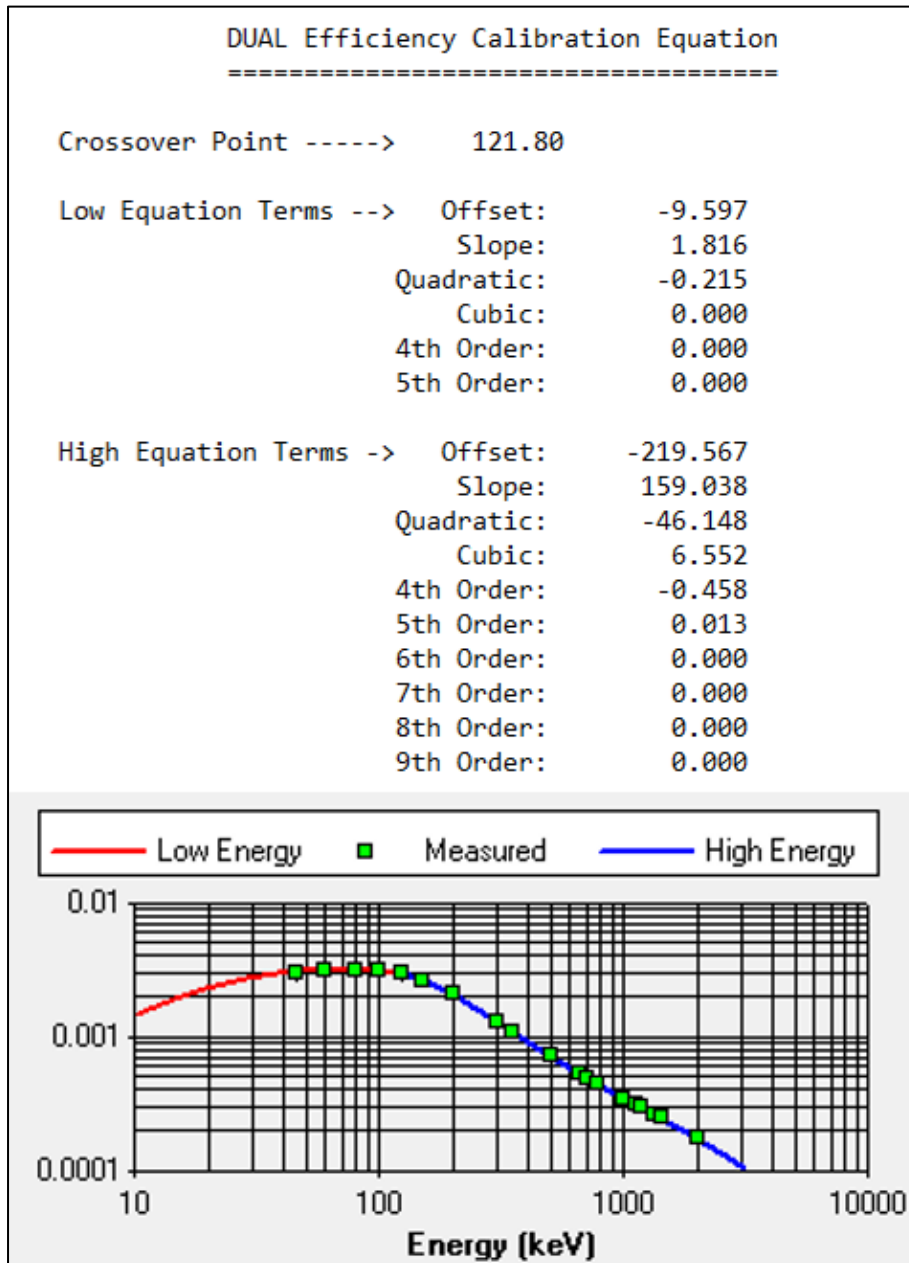
Geometry Description:  ESIMERKKI
Efficiency Calibration Performed on:  1.11.2022   9.23.23
                                     by:
Geometry Type Used:   DUAL

                               Efficiency Triplets
                               =====

Energy      Efficiency      Error
-----
45.00       3.02E-003      4.54E-004
60.00       3.10E-003      3.10E-004
80.00       3.10E-003      3.10E-004
100.00      3.04E-003      3.04E-004
121.80      2.89E-003      2.89E-004
150.00      2.59E-003      2.59E-004
200.00      2.04E-003      1.63E-004
300.00      1.29E-003      1.03E-004
344.30      1.09E-003      8.68E-005
500.00      7.04E-004      4.22E-005
661.70      5.19E-004      3.11E-005
700.00      4.89E-004      2.94E-005
778.90      4.37E-004      2.62E-005
1000.00     3.41E-004      1.36E-005
1112.10     3.07E-004      1.23E-005
1173.20     2.92E-004      1.17E-005
1332.50     2.58E-004      1.03E-005
1408.00     2.43E-004      9.71E-006
2000.00     1.70E-004      6.81E-006

```

Kuva G.3. Geometry Composerilla mallinnetulle ISOCS-mallille lasketut tehokkuudet valituille energiadatapisteille. Valitut datapisteet ja niille asetetut virheprosentit on lueteltu työn taulukossa 3.2.



Kuva G.4. Genie2k:n laskemat tehokkuuskäyrän yhtälöt edellisessä kuvassa G.3 näkyville Geometry Composerin pistetehokkuusarvoille ”Standard Dual” -sovitusmenetelmällä. Matalalle ja korkealle energia-alueelle on laskettu omat tehokkuuskäyränsä, sovitusten väliseksi jatkuvuuspisteeksi (Cross-over Point) on valittu tässä tapauksessa 121,8 keV. Kuvan alaosassa on esitetty Genie2k-ohjelman tehokkuuskäyränäkymässä näkyvä kuvaaja näistä sovitteista. Kuvaajassa Geometry Composerin pistetehokkuusdatapisteet näkyvät vihreinä neliöinä, niiden mukaan sovitettu matalan energia-alueen tehokkuussovite punaisena viivana ja korkean energia-alueen tehokkuussovite sinisenä viivana.


```

*****
****  N U C L I D E  I D E N T I F I C A T I O N  R E P O R T  ****
*****

```

Sample Title: Esimerkki
Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CAMFILES\Esimerkki.NLB

..... IDENTIFIED NUCLIDES

Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /Unit)	Activity Uncertainty
K-40	1.000	1460.82*	10.55	7.33109E+003	1.02203E+003
CO-60	0.999	1173.24*	99.85	1.53283E+006	6.14063E+004
		1332.51*	100.00	1.52892E+006	6.12488E+004
CS-137	0.996	661.66*	84.99	8.75203E+003	9.23728E+002
EU-152	0.998	121.78* @	28.41	9.54514E+004	9.59112E+003
		244.70* @	7.55	9.65708E+004	8.89039E+003
		344.28*	26.59	9.09378E+004	7.48794E+003
		411.12* @	2.24	1.25672E+005	2.18427E+004
		443.96* @	3.12	9.15046E+004	1.49887E+004
		778.90*	12.97	8.03099E+004	7.49917E+003
		867.38* @	4.24	4.91697E+004	1.93570E+004
		964.08* @	14.50	8.84140E+004	9.78766E+003
1085.84*	10.13	9.14739E+004	1.17382E+004		
1112.08*	13.41	1.06740E+005	1.13470E+004		
1408.01* @	20.86	8.95796E+004	4.13128E+003		

* = Energy line found in the spectrum.
@ = Energy line not used for Weighted Mean Activity
Energy Tolerance : 1.000 keV
Nuclide confidence index threshold = 0.60
Errors quoted at 1.000 sigma

Kuva G.5. Genie2k-analysointiraportin nuklidien tunnistustiedot, sekä energiakohtaiset aktiivisuustulokset käytetyllä ISOCS-tehokkuuskalibroinnilla ja nuklidikirjastolla (.NLB-tiedosto). Eu-152:n aktiivisuustuloksista voidaan huomioida eri gammakvanteille Nuclide Library Editor -ohjelmassa asetetut @-lippumerkinnät, jotka kertovat, ettei kyseisen energian aktiivisuustulosta käytetä painotetun keskiarvoaktiivisuuden laskennassa.

```

*****
****  I N T E R F E R E N C E  C O R R E C T E D  R E P O R T  ****
*****

```

Nuclide Name	Nuclide Id Confidence	Wt mean Activity (Bq /Unit)	Wt mean Activity Uncertainty
K-40	1.000	7.331089E+003	1.022034E+003
CO-60	0.999	1.530869E+006	4.336500E+004
CS-137	0.996	8.752032E+003	9.237283E+002
EU-152 @	0.998	9.072172E+004	4.031997E+003

? = Nuclide is part of an undetermined solution
 X = Nuclide rejected by the interference analysis
 @ = Nuclide contains energy lines not used in Weighted Mean Activity

Errors quoted at 1.000 sigma

Kuva G.6. Genie2k-analysointiraportin painotetun keskiarvoaktiivisuuden *WM* (kuvassa ”Wt mean”) laskentatulokset gammaspektristä tunnistetuille nuklideille. Nämä nuklidikohtaiset aktiivisuustulokset ilmoitetaan jätepakkauksen jatkokäsittelykirjanpitoon menevinä aktiivisuustuloksina, lukuun ottamatta luonnollisesti esiintyvää ja lähes kaikissa mittauksissa havaittavaa luonnonnuklidi K-40:tä.

***** UNIDENTIFIED PEAKS *****					
		Peak Locate Performed on:	1.11.2022	9.36.10	
		Peak Locate From Channel:	100		
		Peak Locate To Channel:	8192		
Peak No.	Energy (keV)	Peak Size in Counts per Second	Peak CPS % Uncertainty	Peak Type	Tol. Nuclide
M 1	32.23	1.1967E+000	16.44		
m 2	35.61	5.8467E+000	3.76		
m 3	37.09	4.8567E+000	4.38		
m 4	39.98	1.5014E+002	0.85		
m 5	42.72	2.3283E+000	8.02		
m 6	45.43	3.1470E+001	1.27		
m 7	46.73	6.0700E+003	4.04		
M 8	72.79	1.4953E+001	3.96		
m 9	74.97	2.7477E+001	3.61		
M 10	84.79	1.3542E+001	6.33		
m 11	87.29	4.6017E+000	7.45		
13	172.33	9.4667E-001	36.59		
15	310.41	1.8800E+000	18.59	D-Esc.	
19	510.93	3.2050E+000	11.66		
22	821.48	1.0283E+000	35.56	S-Esc.	
28	1212.79	2.3833E-001	53.46		
29	1299.20	2.8833E-001	28.45		
M 30	1328.48	1.8167E-001	24.23		
M 33	1457.71	1.1167E-001	16.92		
35	2346.93	7.0000E-002	21.27	Sum	
36	2506.75	2.2833E-001	9.02	Sum	
M = First peak in a multiplet region					
m = Other peak in a multiplet region					
F = Fitted singlet					
Errors quoted at 1.000 sigma					

Kuva G.7. Genie2k-analysointiraportin tunnistamattomien piikkien raportointivaihe, johon listataan kaikki havaitut fotopiikit, joille ei kyetty tunnistamaan isäntänuklidia. Alla olevassa esimerkkiraportissa osioon on kertynyt piikkejä muun muassa Eu-152:n karakteristisista röntgensäteistä, mittauksessa käytetyn lyijysuojan aiheuttamista karakteristisista röntgensäteistä, Eu-152:n harvinaisempien ja nuklidikirjastoon kirjaamattomien energioiden havainnoista, sekä Co-60:n parinmuodostusilmiöön liittyvien pakopiikkien havainnoista.

```

*****
*****              N U C L I D E   M D A   R E P O R T              *****
*****
Detector Name:      GX1518
Sample Geometry:
Sample Title:      Esimerkki
Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CAMFILES\Esimerkki.NLB

```

	Nuclide Name	Energy (keV)	Yield (%)	Line MDA (Bq /Unit)	Nuclide MDA (Bq /Unit)	Activity (Bq /Unit)	Dec. Level (Bq /Unit)
	MN-54	834.85	99.98	3.702E+003	3.70E+003	-3.736E+003	1.845E+003
+	CO-60	1173.24*	99.85	3.567E+003	1.08E+003	1.533E+006	1.775E+003
		1332.51*	100.00	1.080E+003		1.529E+006	5.301E+002
	ZN-65	1115.54	50.22	9.732E+003	9.73E+003	1.253E+003	4.849E+003
	NB-94	702.63	100.00	2.760E+003	2.76E+003	-2.111E+003	1.375E+003
		871.10	100.00	4.127E+003		-7.992E+002	2.057E+003
	AG-108M	433.94	90.90	1.956E+003	1.96E+003	1.166E+003	9.745E+002
		614.31	90.80	2.683E+003		-1.035E+003	1.337E+003
		722.91	90.80	3.240E+003		-3.023E+003	1.614E+003
	AG-110M	446.81	3.65	5.052E+004	2.57E+003	-1.966E+003	2.517E+004
		620.35	2.72	9.028E+004		-8.775E+004	4.497E+004
		657.76	94.38	2.869E+003		-9.063E+002	1.429E+003
		677.62	10.56	2.546E+004		2.116E+004	1.268E+004
		687.01	6.45	4.171E+004		-2.376E+004	2.077E+004
		706.68	16.48	1.689E+004		1.642E+004	8.414E+003
		744.28	4.71	6.476E+004		3.718E+004	3.226E+004
		763.94	22.31	1.411E+004		-9.119E+003	7.031E+003
		818.02	7.33	4.951E+004		5.752E+003	2.467E+004
		884.68	74.00	5.711E+003		-4.191E+003	2.846E+003
		937.48	34.51	1.448E+004		6.281E+003	7.221E+003
		1384.29	24.70	2.569E+003		2.162E+002	1.242E+003
		1475.78	4.03	1.309E+004		-4.070E+003	6.269E+003
		1505.03	13.16	4.143E+003		-2.261E+003	1.985E+003
		1562.29	1.21	4.246E+004		-3.025E+004	2.026E+004

```

+ = Nuclide identified during the nuclide identification
* = Energy line found in the spectrum
> = Calculated MDA is zero due to zero counts in the region, or
    the region is outside the spectrum, or MDA has not been calculated
@ = Half-life too short to be able to perform the decay correction

```

Kuva G.8. Genie2k-analysointiraportin MDA-raportti hieman lyhennetyssä muodossa. Genie2k laskee MDA-arvon jokaiselle nuklidikirjaston nuklidille, jolle käyttäjä on määrittänyt sen laskettavan. MDA-arvot lasketaan ensin energiakohtaisesti, jonka jälkeen energiakohtaisista MDA-arvoista matalin määräytyy nuklidin MDA-arvoksi.

LIITE H. KÄYTETTY NUKLIDIKIRJASTO

Taulukko H.1. FiR 1 -karakterisointisuunnitelmassa (Seitomaa 2022, 43) listatut nuklidit.

Nuklidi	Puoliintumisaika
Mn-54	0,855 a
Co-60	5,271 a
Zn-65	0,668 a
Nb-94	20 300 a
Ag-110m	0,684 a
Sb-125	2,759 a
Ba-133	10,50 a
Cs-134	2,064 a
Cs-137	30,05 a
Eu-152	13,52 a
Eu-154	8,601 a
Eu-155	4,753 a
Ho-166m	1 133 a

Taulukko H.2. Muita OK3- ja FiR 1 -käyttöympäristöissä havaittuja, , nuklidikirjastoon jälkikäteen lisättyjä nuklideja, joita ei ole listattu karakterisointisuunnitelmassa.

Nuklidi	Puoliintumisaika
Ag-108m	438,0 a
Am-241	432,6 a

Taulukko H.3. Nuklidikirjastoon lisätyt luonnonnuklidit.

Nuklidi	Puoliintumisaika
K-40	1 250 400 000 a
Tl-208	3,058 min
Pb-210	22,23 a
Bi-212	60,54 min
Pb-212	10,64 h
Bi-214	19,80 min
Pb-214	26,91 min
Ra-226	1 600 a
Ac-228	6,150 h
Th-234	24,10 d

Lisäksi I-131 lisättiin nuklidikirjastoon väliaikaisesti työssä kappaleessa 6.3 esitettyjä, radioaktiivisella jodiliuoksella kontaminoidulla vesitynnyrillä suoritettuja mittauksia varten.

LIITE I. MDA-ARVOJEN MÄÄRITTÄMINEN GENIE2K-OHJELMALLA

Tässä työssä käytettävällä Currien menetelmällä MDA- ja MDC-arvot lasketaan yksittäiselle nuklidille energiakohtaisesti alla olevan yhtälön I.1 mukaisesti (Mirion Technologies 2018b, 6).

$$MDC_i = \frac{MDA_i}{m} = \frac{k^2 + 2 \cdot k \cdot \sqrt{2 \cdot BCR_i \cdot LT}}{\varepsilon_i \cdot LT \cdot \gamma_i \cdot m} \quad (I.1)$$

Missä MDC_i on pienin havaittava aktiivisuuspitoisuus nuklidin gammakvantilla i [Bq/g; Bq/kg]

MDA_i on pienin havaittava aktiivisuus nuklidin gammakvantilla i [Bq]

m on mitattavan jätteen nettomassa (jäteastian massa vähennetty) [g; kg]

k on asetettuun 95 %:n luottamusväliin liittyvä todennäköisyyskerroin [-]

BCR_i on piikin i tausta-alueen pulssinkeräysnopeus (Background Count Rate) [1/s]

LT on detektorin aktiivinen toiminta-aika mittauksen aikana (Live Time) [s]

ε_i on tehokkuuskerroin havaitun fotopiikin i energialle [-; %]

γ_i on nuklidin gammakvantin i intensiteetti [-; %]




Yhtälöstä I.1 nähdään, että MDC-arvoa voidaan saada matalammaksi seuraavilla tavoilla:

- Parantamalla havaintotehokkuutta ε (esimerkiksi mittaamalla kevyempää jätettä, mittaamalla lyhyemmältä etäisyydeltä, käyttämällä tehokkaampaa detektoria)
- Minimoimalla ympäristöstä tulevan taustasäteilyn vaikutuksen
- Kasvattamalla mittausaikaa LT , MDC alenee neliöjuuriperusteisesti
- Kasvattamalla kohteen massaa m , MDC alenee lineaarisesti (Mirion Technologies 2018b, 6).

LIITE J. MITTAUSKOKEISSA KÄYTETYT SÄTEILYLÄHTEET

Tähän liitteeseen on koottu tässä työssä mittauskokeisiin käytetyt säteilylähteet, sekä niiden tärkeimmät tiedot muun muassa nuklidien, aktiivisuuden ja referenssipäivämäärän osalta. Ensimmäisessä taulukossa J.1 ovat työn mittauskokeessa 1 tutkitut ISOXSRCE-testilähteet, toisessa taulukossa J.2 tutkitut standardipistelähteet ja kolmannessa taulukossa J.3 muut tässä työssä tutkitut säteilylähteet ja mittauskohteet. Kaikkien käytettyjen säteilylähteiden aktiivisuutta ei ole kalibroitu valmistajan toimesta.




Taulukko J.1. Mittauskokeessa 1 käytetyt ISOXSRCE-testilähteet ja niiden tärkeimmät tiedot.

Lähteen tunnus (detektori)	Tärkeimmät tiedot
ISOXSRCE-testilähde 90820-28 (b21015) 	Nuklidit: Na-22 ja Eu-155 Valmistaja: Spectrum Techniques LLC. Tyyppi: Detektorikohtainen testilähde detektorin suorituskyvyn tarkastamiseen, detektorille b21015 Valmistuspäivämäärä: 8.9.2020 Valmistushetkinen aktiivisuus: -Na-22: 37 E+03 Bq ($\pm 20\%$), ei kalibroitu -Eu-155: 37 E+03 Bq ($\pm 20\%$), ei kalibroitu
ISOXSRCE-testilähde 103017-15 (b19116) 	Nuklidit: Na-22 ja Eu-155 Valmistaja: Spectrum Techniques LLC. Tyyppi: Detektorikohtainen testilähde detektorin suorituskyvyn tarkastamiseen, detektorille b19116 Valmistuspäivämäärä: 30.10.2017 Valmistushetkinen aktiivisuus: -Na-22: 37 E+03 Bq ($\pm 20\%$), ei kalibroitu -Eu-155: 37 E+03 Bq ($\pm 20\%$), ei kalibroitu
ISOXSRCE-testilähde 77F24-27 (b10158) 	Nuklidit: Na-22 ja Eu-155 Valmistaja: Canberra Industries Inc. Tyyppi: Detektorikohtainen testilähde detektorin suorituskyvyn tarkastamiseen, detektorille b10158 Valmistuspäivämäärä: 22.6.2011 Valmistushetkinen aktiivisuus: -Na-22: 37 E+03 Bq ($\pm 20\%$), ei kalibroitu -Eu-155: 37 E+03 Bq ($\pm 20\%$), ei kalibroitu

Taulukko J.2. Tässä työssä mittauksissa tutkitut standardipistelähteet, sekä niiden tärkeimmät tiedot.

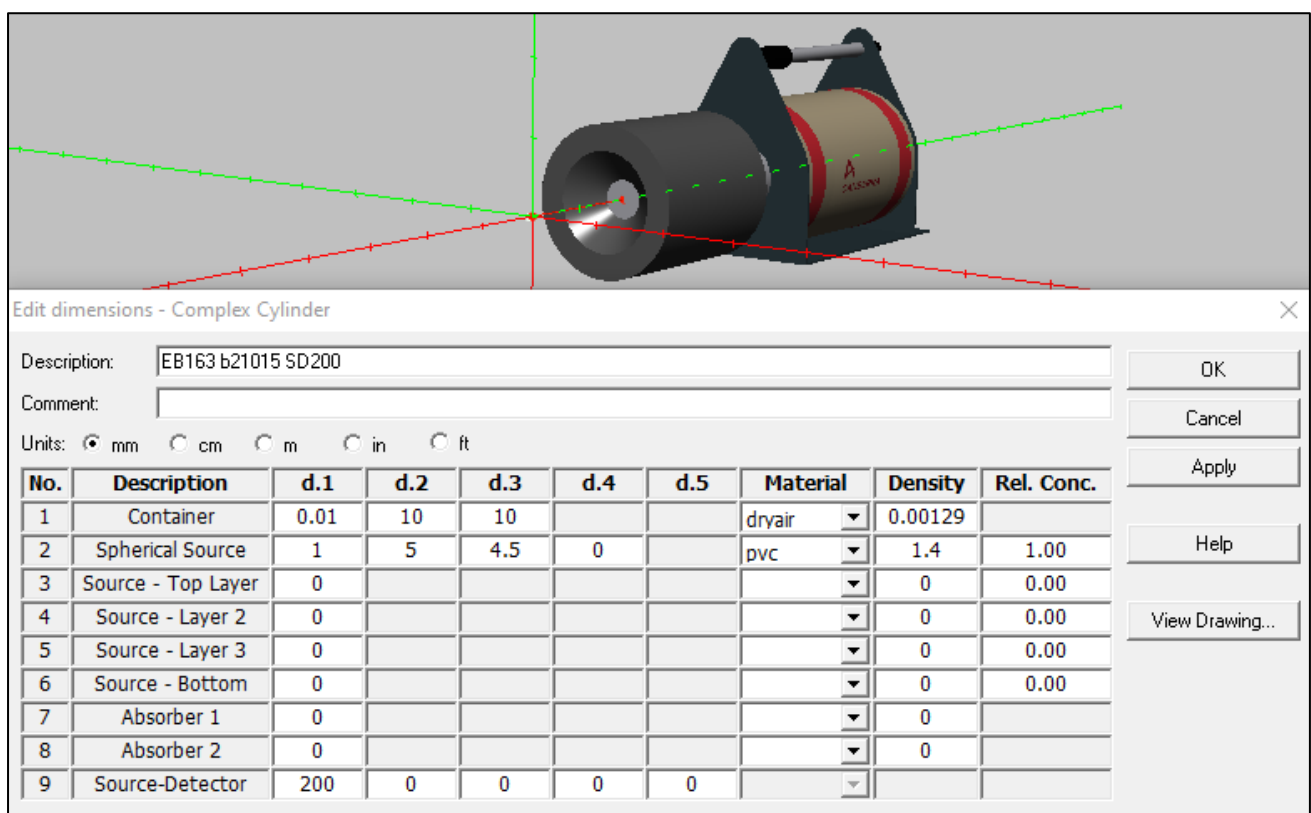
Lähteen tunnus ja kuva	Tärkeimmät tiedot
<p>AE2716</p> 	<p>Nuklidi: Co-60 Valmistaja: Amersham Buchler GmbH & Co KG Tyyppi: Standardipistelähde, aktiivisuus kalibroitu Referenssipäivämäärä: 1.8.2014 Referenssiaktiivisuus: 389 E+03 Bq Aktiivisuuden epävarmuus: ±3 % Aktiivisuus 1.1.2022: 146,54 E+03 Bq</p>
<p>CV195</p> 	<p>Nuklidi: Eu-152 Valmistaja: Amersham Buchler GmbH & Co KG Tyyppi: Standardipistelähde, aktiivisuus ei kalibroitu Referenssipäivämäärä: 1.1.1992 Referenssiaktiivisuus : 370 E+03 Bq Aktiivisuuden epävarmuus: ei ilmoitettu Aktiivisuus 1.1.2022: 79,54 E+03 Bq</p>
<p>EB163</p> 	<p>Nuklidi: Eu-152 Valmistaja: Amersham Buchler GmbH & Co KG Tyyppi: Standardipistelähde, aktiivisuus kalibroitu Referenssipäivämäärä: 1.10.1994 Referenssiaktiivisuus: 419 E+03 Bq Aktiivisuuden epävarmuus: ±5 % Aktiivisuus 1.1.2022: 103,54 E+03 Bq</p>

Taulukko J.3. Muut tässä työssä käytetyt säteilylähteet ja mittauskohteet, sekä niiden tärkeimmät tiedot.

Lähde ja kuva	Tärkeimmät tiedot
<p>I-131 -terapiakapseli</p> 	<p>Nuklidi: I-131 Valmistaja: GE Healthcare Buchler GmbH & Co KG Tyyppi: Lääketieteelliseen hoitoon tarkoitettu I-131 -liuos (1 ml) Referenssipäivämäärä: 19.9.2022 Referenssiaktiivisuus (epävarmuus): 111,75 E+06 Bq Aktiivisuuden epävarmuus: ±10 %</p>
<p>NPL-tynnyri</p> 	<p>Nuklidit: Co-60, Cs-137 ja Am-241 Valmistaja: National Physical Laboratory (NPL) Tyyppi: Radioaktiivinen standardiliuos imeytettynä 20 ml ampulleissa oleviin ioninvaihtohartseihin, ampullit piilotettu 200 l tynnyriin, vermikuliittisavea sisältävän tynnyrin sisällön massaksi oli ilmoitettu 28,166 kg. Referenssipäivämäärä: 1.6.2021 Referenssiaktiivisuudet (epävarmuus): - Co-60: 5,903 Bq/g (±0,73 %) - Cs-137: 11,890 Bq/g (±1,51 %) - Am-241: 18,910 Bq/g (±0,79 %)</p>
<p>TEF6</p> 	<p>Nuklidi: Co-60 Valmistaja: Tuntematon Tyyppi: CoCl₂-liuos (~1 ml, aktiivisuus ei kalibroitu) Referenssipäivämäärä: 21.10.1978 Referenssiaktiivisuus: 370 E+06 Bq Aktiivisuuden epävarmuus: ei ilmoitettu Aktiivisuus 1.1.2022: 1,26 E+06 Bq</p>

LIITE K. MITTAUSKOE 2 (EU-152 -PISTELÄHDE): TAULUKOIDUT MITTAUSTULOKSET

Kuvassa K.1 on esimerkkinä Eu-152 -standardipistelähteestä EB163 detektorille b21015 tehty ISOCS-malli Geometry Composer -ohjelman dimensionmuokkausnäkymässä, detektorien b19116 ja b10158 mallit olivat asetettujen dimensioiden osalta samat. Seuraavan sivun taulukkoon K.1 on koostettu EB163 -lähteellä suoritettujen mittausten tulokset eri detektoreille.



Kuva K.1. Geometry Composerin ”Complex Cylinder” -mallinteella detektorille b21015 tehty malli sellaisenaan etäisyydeltä $SD = 200$ mm mitattavasta säteilylähteestä EB163. Mittauksessa käytettiin 90 asteen kollimointia. Mallinteen sylinterin seinämä mallinnettiin ohueksi ilmakerrokseksi, ja seinämän lähinnä detektoria olevaan kohtaan mallinnettiin kiinni halkaisijaltaan $d = 1$ mm suuruinen pallo pistemäiseksi aktiiviseksi tilavuudeksi. Pistelähteen tiheydeksi asetettiin $1,4 \text{ g/cm}^3$.

Taulukko K.1. Yksityiskohtaisemmat taulukoidut mittaustulokset mittauskokeesta 3 (sellaisenaan etäisyydeltä $SD = 200$ mm mitattu Eu-152 -säteilylähde EB163).

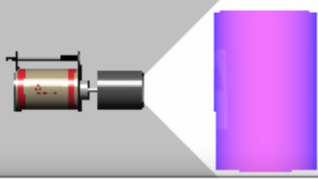
Eu-152:n tarkasteltava energia/aktiivisuus	Suure	Detektori b21015	Detektori b19116	Detektori b10158
	Mittauspäivä	2.11.2022	2.11.2022	2.11.2022
	Mittausaika	1800 s	1800 s	7200 s
	Lähteen aktiivisuus mittauspäivänä [Bq]	99,2 E+04	99,2 E+04	99,2 E+04
344,3 keV	Nettopulssit S [-]	53 201	99 596	143 573
	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,20 E+04	9,67 E+04	8,57 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	7,38 E+03	1,24 E+04	6,87 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	8,03	12,82	8,02
	Epäv. U_{Comb} [%]	9,46	13,76	9,45
	Suht. virhe RE [%]	-7,29	-2,50	-13,59
778,9 keV	Nettopulssit S [-]	10 397	26 618	24 823
	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,27 E+04	9,81 E+04	8,57 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	5,68 E+03	1,15 E+04	5,20 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	6,13	11,69	6,07
	Epäv. U_{Comb} [%]	7,91	12,72	7,86
	Suht. virhe RE [%]	-6,55	-1,09	-13,58
1112,1 keV	Nettopulssit S [-]	7675	21 529	17 202
	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,48 E+04	9,87 E+04	8,45 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	3,96 E+03	1,08 E+04	3,47 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	4,18	10,94	4,10
	Epäv. U_{Comb} [%]	6,52	12,03	6,47
	Suht. virhe RE [%]	-4,38	-0,47	-14,82
1408,0 keV	Nettopulssit S [-]	9082	27 968	20 448
	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,13 E+04	9,77 E+04	8,27 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	3,80 E+03	1,05 E+04	3,38 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	4,16	10,80	4,09
	Epäv. U_{Comb} [%]	6,51	11,90	6,46
	Suht. virhe RE [%]	-8,01	-1,49	-16,66
<i>WM</i> (Weighted Mean)	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,29 E+04	9,82 E+04	8,47 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	2,29 E+03	1,01 E+04	2,05 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	2,46	10,31	2,42
	Epäv. U_{Comb} [%]	5,57	11,46	5,56
	Suht. virhe RE [%]	-6,35	-0,99	-14,63

LIITE L. MITTAUSKOE 3 (HOMOGEENINEN I-131 -VESITYNNYRI): TAULUKOIDUT MITTAUSTULOKSET

Taulukkoon L.1 (sama kuin työn taulukko 6.4) on listattu I-131 -vesitynnyrin eri mittaustapausten tunnusten osat ja niiden selitteet. Alempana kuvassa L.1 esimerkkinä yhden tehdyn ISOCS-mallin dimensiot, vesitynnyrille käytettiin samoja dimensioparametreja joka mallille.

Taulukko L.1. I-131 -vesitynnyrin eri mittaustapausten tunnusten osat ja niiden selitteet. Esimerkiksi tunnus *SD440 rota k90d 50mmPb* tarkoittaa etäisyydeltä $SD = 440$ mm tehtyä pyöritysmittausta 90 asteen kollimaattorilla, mitaten tynnyriä 50 mm lyijykerroksen läpi.

Mittaustapaoksen tunnuksen osa	Tunnuksen osan selite
SD440, SD880, SD1640	Mittauskohteen etäisyys SD 440, 880 tai 1640 mm
stat 0deg, stat 90deg, stat 180deg, stat 270deg	Staattinen mittausta ilman pyöritystä, tynnyrin asento 0, 90, 180 tai 270 astetta
rota	Pyöritysmittaus
k30d, k90d, k180d	Kollimaattori 30, 90 tai 180 astetta
29mmSteel	Detektorin edessä 29 mm paksu teräslevy
50mmPb	Detektorin edessä 50 mm paksu lyijykerros



Edit dimensions - Simple Cylinder

Description: JODI 200L b21 SD440

Comment:

Units: mm cm m in ft

No.	Description	d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	Material	Density	Rel. Conc.
1	Container	2	565	876			pvc	1.4	
2	Source - Top Layer	0						0	0.00
3	Source - Bottom	860					water	1	1.00
4	Absorber 1	0						0	
5	Absorber 2	0						0	
6	Source-Detector	440	0	0	0	0			

Kuva L.1. Esimerkki ”Simple Cylinder” -mallinteesta tehdystä ISOCS-mallista I-131 tynnyrille. Esimerkkimalli on tehty detektorille b21015 90 asteen kollimoinnilla, dimensioparametreina muun muassa $SD = 440$ mm, $FH = 860$ mm ja $\rho_{sis} = 1,00$ g/cm³.

Kaikki aktiivisuustulokset korjattu Genie2k:lla ajanhetkelle 19.9.2022 klo 14:00, jolloin käytetyn I-131 -lähteen nimellisaktiivisuus oli 111,75 MBq. Lähteen valmistajan ilmoittama aktiivisuuden epävarmuus $U_{Lähde}$ on $\pm 10\%$, joka on huomioitu yhdistetyn epävarmuuden U_{Comb} laskennassa.

Taulukko L.2. I-131 -vesitynnyrin mittaustulokset: Laitteisto b21015, 210 litran vesitäyttö ($FH = 860$ mm). Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvassa 6.5.

Mittaustapaus	Mittaus-aika LT [s]	Kuollut aika [%]	Aktiivisuus WM [Bq]	Epäv. U_{Genie} [Bq]	Epäv. U_{Genie} [%]	Suht. virhe RE [%]	Yhdistetty epävarmuus U_{Comb} [%]
SD440 stat 0deg k90d	1000	8,55	1,08 E+08	4,13 E+06	3,80	-2,95	10,70
SD440 stat 90deg k90d	1000	8,65	1,07 E+08	4,14 E+06	3,81	-2,72	10,70
SD440 stat 180deg k90d	1000	8,59	1,08 E+08	4,14 E+06	3,80	-2,62	10,70
SD440 stat 270deg k90d	1000	8,59	1,08 E+08	4,13 E+06	3,80	-2,95	10,70
SD440 rota k90d*	1000	8,64	1,10 E+08	4,17 E+06	3,80	-1,83	10,70
SD880 rota k90d	1800	4,08	1,10 E+08	4,22 E+06	3,82	-1,13	10,70
SD1640 rota k90d	3600	1,69	1,09 E+08	4,18 E+06	3,84	-2,66	10,71
SD1640 rota k30d	7200	0,14	1,24 E+08	4,97 E+06	3,99	+11,36	10,77

* = Mittaus suoritettu kahdesti, tuloksesta otettu keskiarvo

Taulukko L.3. I-131 -vesitynnyrin mittaustulokset: Laitteisto b19116, 210 litran vesitäyttö ($FH = 860$ mm).

Taulukossa on sekä 90 ja 180 asteen kollimoinnilla saadut mittaustulokset. Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvissa 6.6 ja 6.7.

Mittaustapaus	Mittausaika LT [s]	Kuollut aika [%]	Aktiivisuus WM [Bq]	Epäv. U_{Genie} [Bq]	Epäv. U_{Genie} [%]	Suht. virhe RE [%]	Yhdistetty epävarmuus U_{Comb} [%]
SD440 stat 0deg k90d	500	12,74	1,19 E+08	1,28 E+07	10,73	+6,60	14,67
SD440 stat 90deg k90d	500	12,78	1,21 E+08	1,29 E+07	10,71	+7,87	14,65
SD440 stat 180deg k90d	500	12,67	1,18 E+08	1,27 E+07	10,71	+5,82	14,65
SD440 stat 270deg k90d	500	12,73	1,21 E+08	1,29 E+07	10,70	+8,27	14,65
SD440 rota k90d*	500	12,79	1,20 E+08	1,28 E+07	10,69	+7,51	14,64
SD880 rota k90d	1000	4,84	1,17 E+08	1,26 E+07	10,70	+5,06	14,65
SD440 stat 0deg k180d	500	19,91	1,11 E+08	1,31 E+07	11,82	+0,07	14,65
SD440 stat 90deg k180d	500	19,93	1,14 E+08	1,35 E+07	11,82	+1,31	14,65
SD440 stat 180deg k180d	500	19,84	1,11 E+08	1,30 E+07	11,75	-0,36	14,64
SD440 stat 270deg k180d	500	19,93	1,13 E+08	1,32 E+07	11,75	+0,90	14,64
SD440 rota k180d*	500	19,99	1,13 E+08	1,16 E+07	10,28	+1,07	14,65
SD880 rota k180d*	1000	4,84	1,13 E+08	1,35 E+07	11,89	+0,28	14,66

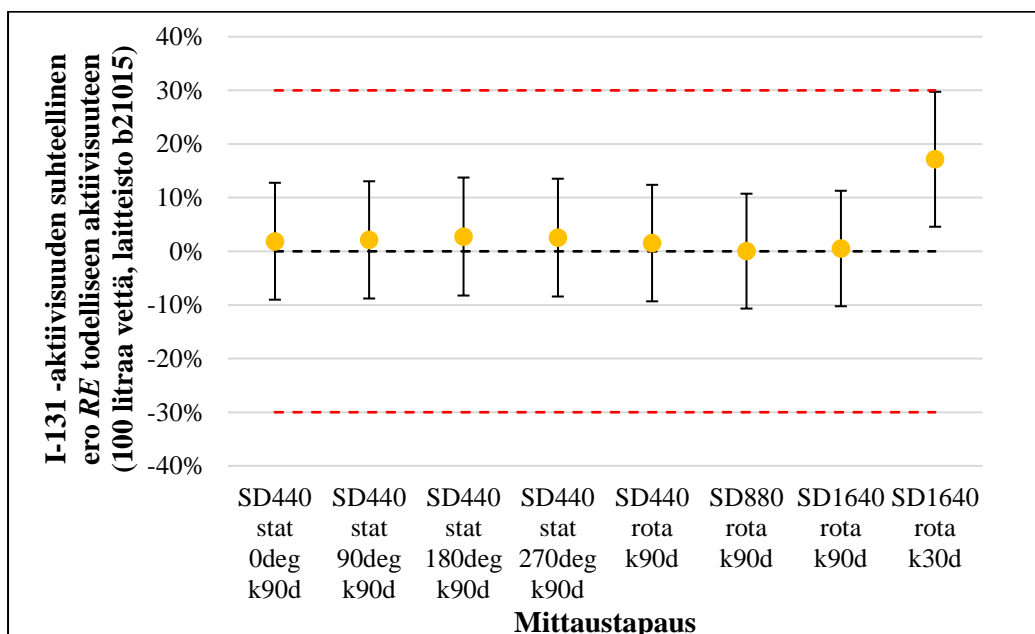
* = Mittaus suoritettu kahdesti, tuloksesta otettu keskiarvo

Taulukko L.4. I-131 -vesitynnyrin mittaustulokset: Laitteisto b21015, 100 litran vesitäyttö ($FH = 425$ mm).

Taulukon tulokset on esitetty graafisesti alempana olevassa kuvassa L.2.

Mittaustapaus	Mittausaika LT [s]	Kuollut aika [%]	Aktiivisuus WM [Bq]	Epäv. U_{Genie} [Bq]	Epäv. U_{Genie} [%]	Suht. virhe RE [%]	Yhdistetty epävarmuus U_{Comb} [%]
SD440 stat 0deg k90d	500	19,01	1,14 E+08	4,32 E+06	3,79	+1,88	10,70
SD440 stat 90deg k90d	500	19,10	1,14 E+08	4,34 E+06	3,80	+2,13	10,70
SD440 stat 180deg k90d	500	19,01	1,15 E+08	4,39 E+06	3,82	+2,75	10,71
SD440 stat 270deg k90d	500	19,01	1,15 E+08	4,39 E+06	3,82	+2,56	10,71
SD440 rota k90d*	500	19,04	1,13 E+08	4,31 E+06	3,80	+1,54	10,70
SD880 rota k90d*	1000	11,70	1,12 E+08	4,27 E+06	3,82	+0,03	10,70
SD1640 rota k90d*	1800	4,94	1,12 E+08	4,30 E+06	3,83	+0,52	10,71
SD1640 rota k30d*	3600	0,40	1,31 E+08	5,12 E+06	3,91	+17,16	10,74

* = Mittaus suoritettu kahdesti, tuloksesta otettu keskiarvo



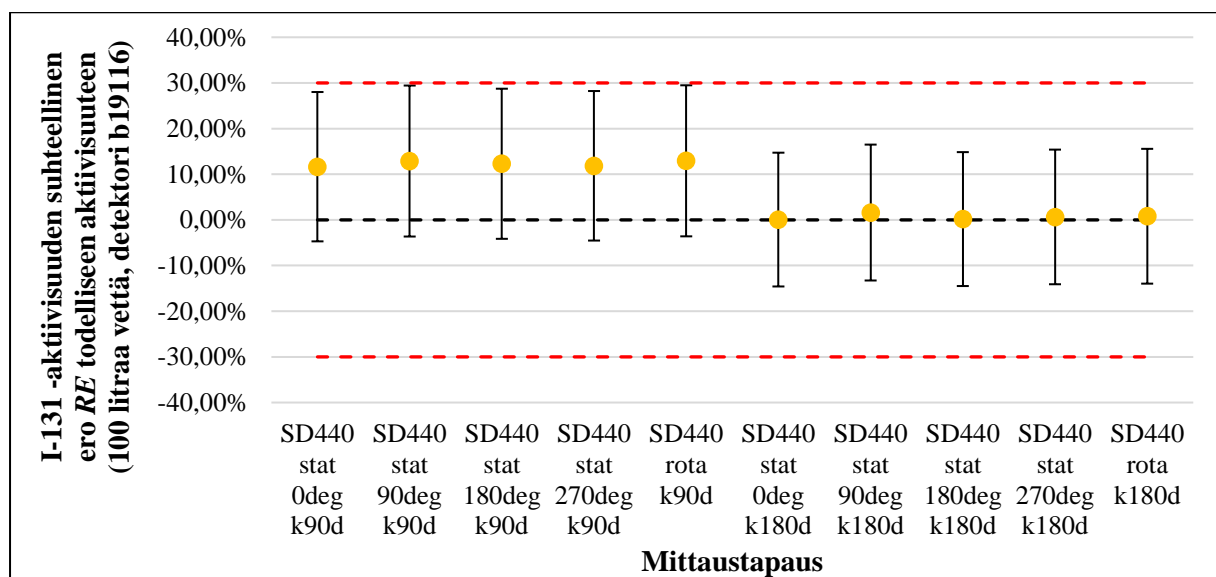
Kuva L.2. Eri mittaustapausten tuloksia detektorilla b21015 100 litraan asti täytetyllä tynnyrillä, käyttäen homogeenista ISOCS-tehokkuuskalibrointimallia.

Taulukko L.5. I-131 -vesitynnyrin mittaustulokset: Laitteisto b19116, 100 litran vesitäyttö ($FH = 425$ mm).

Taulukon tulokset on esitetty graafisesti alempana olevassa kuvassa L.3.

Mittaustapaus	Mittausaika LT [s]	Kuollut aika [%]	Aktiivisuus WM [Bq]	Epäv. U_{Genie} [Bq]	Epäv. U_{Genie} [%]	Suht. virhe RE [%]	Yhdistetty epävarmuus U_{Comb} [%]
SD440 stat 0deg k90d	500	16,29	1,25 E+08	1,34 E+07	10,70	+11,66	14,65
SD440 stat 90deg k90d	500	16,47	1,26 E+08	1,35 E+07	10,70	+12,90	14,65
SD440 stat 180deg k90d	500	16,33	1,25 E+08	1,34 E+07	10,69	+12,30	14,64
SD440 stat 270deg k90d	500	16,38	1,25 E+08	1,34E+07	10,69	+11,85	14,64
SD440 rota k90d*	500	16,34	1,26 E+08	1,35 E+07	10,70	+12,94	14,64
SD440 stat 0deg k180d	500	19,82	1,12 E+08	1,20 E+07	10,69	+0,07	14,64
SD440 stat 90deg k180d	500	19,97	1,14 E+08	1,22 E+07	10,70	+1,61	14,65
SD440 stat 180deg k180d	500	19,90	1,12 E+08	1,20 E+07	10,69	+0,18	14,64
SD440 stat 270deg k180d	500	19,97	1,12 E+08	1,20 E+07	10,70	+0,65	14,65
SD440 rota k180d*	500	19,92	1,13 E+08	1,21 E+07	10,70	+0,80	14,64

* = Mittaus suoritettu kahdesti, tuloksesta otettu keskiarvo



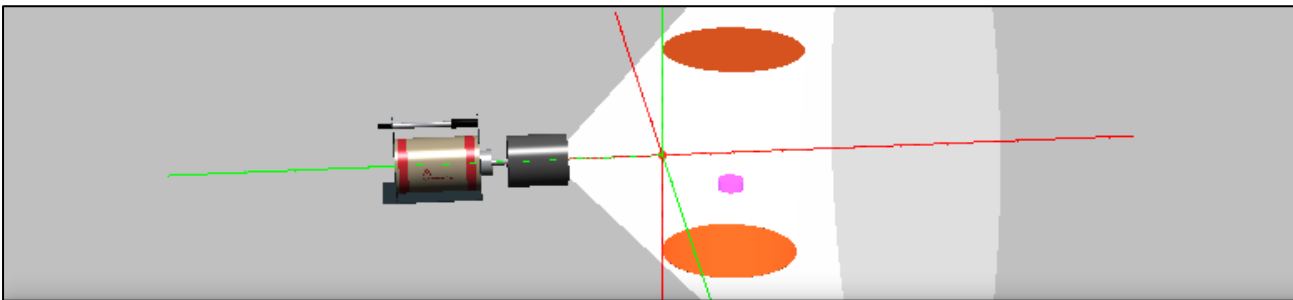
Kuva L.3. Eri mittaustapausten tuloksia detektorilla b19116 100 litraan asti täytetyllä tynnyrillä 90 ja 180 asteen kollimoineilla, käyttäen homogeenista ISOCS-tehokkuuskalibroitimallia.

Taulukko L.6. I-131 -vesitynnyrin mittaustulokset detektorilla b21015 suoritetuille vaimennuskokeille. Tynnyrissä 210 litran vesitäyttö ($FH = 860$ mm). Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvassa 6.8.

I-131:n tarkasteltava energia/aktiivisuus	Suure	SD1640 rota k90d 29mmSteel	SD1640 rota k30d 29mmSteel	SD1640 rota k90d 50mmPb	SD1640 rota k30d 50mmPb
	Mittauspäivä Mittausaika	4.10.2022 4 h	4.1.2022 12 h	5.10.2022 24 h	6.10.2022 100 h
364,5 keV	Nettopulssit S [-]	121 316	38 463	ei hav.	ei hav.
	Akt. A_{Genie} [Bq]	1,11 E+08	1,25 E+08		
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	8,66 E+06	9,72 E+06		
	Epäv. U_{Genie} [%]	7,77	7,79		
	Epäv. U_{Comb} [%]	12,67	12,67		
	Suht. virhe RE [%]	-0,31	+11,75		
637,0 keV	Nettopulssit S [-]	11 316	26 618	3720	314
	Akt. A_{Genie} [Bq]	1,11 E+08	1,34 E+08	1,44 E+08	1,08 E+08
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	6,85 E+06	8,34 E+06	9,15 E+06	3,71 E+07
	Epäv. U_{Genie} [%]	6,16	6,25	6,34	34,17
	Epäv. U_{Comb} [%]	11,74	11,79	11,84	35,61
	Suht. virhe RE [%]	-0,42	+19,51	+29,13	-2,90
722,9 keV	Nettopulssit S [-]	2863	1362	1916	265
	Akt. A_{Genie} [Bq]	1,11 E+08	1,22 E+08	1,35 E+08	1,58 E+08
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	7,22 E+06	8,95 E+06	9,41 E+06	2,76 E+07
	Epäv. U_{Genie} [%]	6,50	7,36	6,98	17,48
	Epäv. U_{Comb} [%]	11,93	12,42	12,19	20,14
	Suht. virhe RE [%]	-0,72	+8,87	+20,71	+41,13
WM (Weighted Mean)	Akt. A_{Genie} [Bq]	1,11 E+08	1,27 E+08	1,40 E+08	1,40 E+08
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	4,31 E+06	5,17 E+06	6,56 E+06	2,21 E+07
	Epäv. U_{Genie} [%]	3,88	4,07	4,70	15,78
	Epäv. U_{Comb} [%]	10,72	10,80	11,05	18,68
	Suht. virhe RE [%]	-0,50	+13,77	+25,03	+25,46

LIITE M. MITTAUSKOE 4 (NPL-TYNNYRI): TAULUKOIDUT MITTAUSTULOKSET

Kuvassa M.1 on esimerkkinä NPL-tynnyristä tehty ISOCS-malli *b19 HETGv2* (mallien tunnukset selitetty työn taulukossa 6.5) Geometry Composer -ohjelman dimensionmuokkausnäkymässä. Seuraavan sivun taulukkoon M.1 on koostettu NPL-tynnyrillä suoritettujen mittausten tulokset eri mittaustapauksille.



The screenshot shows the 'Edit dimensions - Complex Pipe' dialog box in the Geometry Composer software. The dialog includes a description field with the value 'NPL b19 HETGv2', a comment field, and a units selection menu set to 'mm'. Below the input fields is a table with 14 rows and 10 columns, detailing the geometry and material properties of the pipe and its sources.

No.	Description	d.1	d.2	d.3	d.4	d.5	Material	Density	Rel. Conc.
1	Pipe	1	285.75	440	-440		csteel	7.86	
2	Source 1	285.75	0	-439	-440		csteel	7.86	0.00
3	Source 2	285.75	0	-159	-439		sand	0.13	0.00
4	Source 3	55	0	-119	-159		sand	0.13	1.00
5	Source 4	230.75	55	-119	-159		sand	0.13	0.00
6	Source 5	285.75	0	410	-119		sand	0.13	0.00
7	Source 6	285.75	0	440	439		csteel	7.86	0.00
8	Source 7	0	0	0	0		(none)	0	0.00
9	Source 8	0	0	0	0			0	0.00
10	Source 9	0	0	0	0			0	0.00
11	Source 10	0	0	0	0	0		0	0.00
12	Absorber 1	0						0	
13	Absorber 2	0						0	
14	Source-Detector	440	0	0	0	0			

Kuva M.1. Esimerkkinä NPL-tynnyristä Geometry Composer -ohjelman ”Complex Pipe” -mallinteella tehty heterogeeninen ISOCS-malli *b19 HETGv2*. Esimerkkimalli on tehty detektorille b19116 90 asteen kollimoinnilla, mittausetäisyys on asetettu arvoon $SD = 440$ mm ja sisällön tiheys arvoon $\rho_{sis} = 0,13$ g/cm³. ”Complex Pipe” -mallinteessa muokattavia dimensioita on erittäin paljon, jolloin niiden asetuksissa tulee olla huomattavan tarkkana. Kuvassa violetina näkyvä, aktiiviseksi tilavuudeksi asetettu kiekko (halkaisija $d = 110$ mm, mallinnettu korkeudelle $h = 280-320$ mm) on mallinnettu dimensioon ”Source 3”.

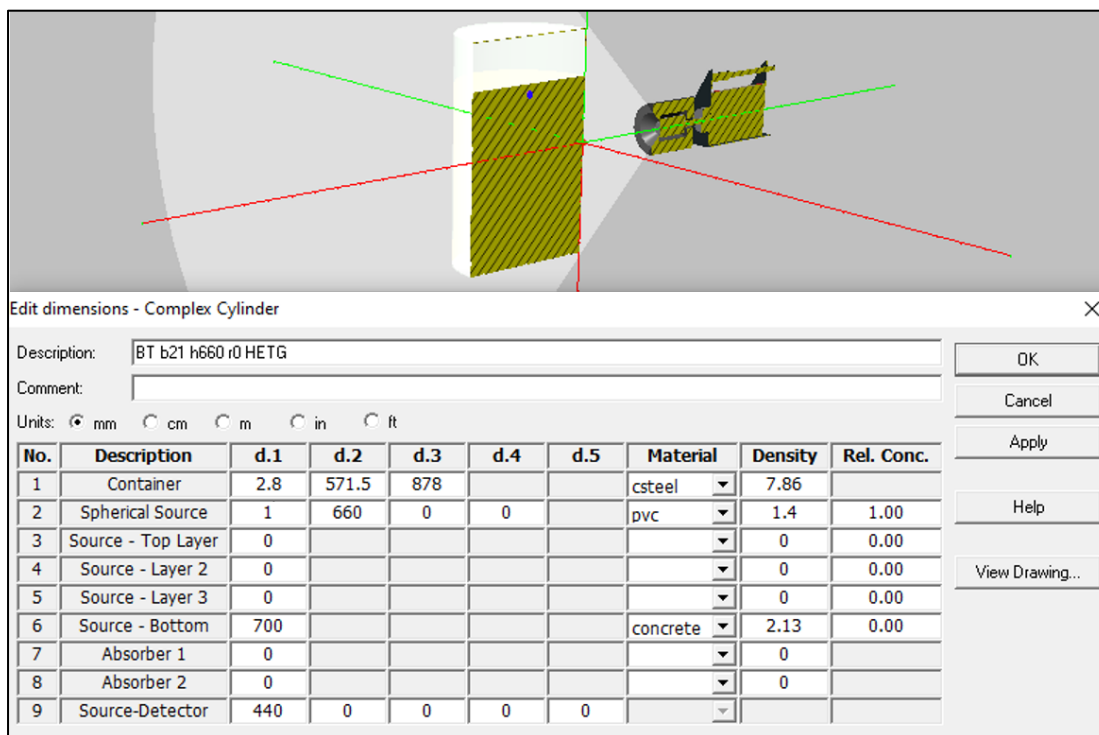
Taulukko M.1. NPL-tynnyrin mittaustulokset eri detektoreille ja käytetyille tehokkuuskalibrointimalleille. Aktiivisuuspitoisuudet C_{Genie} ja niiden epävarmuudet U_{Genie} on laskettu jakamalla Genie2k:n laskemat aktiivisuudet A_{Genie} NPL-tynnyrin nettomassalla $m = 28\,166$ g. Kaikki aktiivisuuspitoisuustulokset on korjattu NPL:n pyytämään referenssipäivämäärään 1.6.2021. Nuklidien NPL:n ilmoittamat aktiivisuuspitoisuudet referenssipäivämääränä löytyvät säteilylähdeluettelosta liitteestä J. Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvissa 6.11 ja 6.12.

Nuklidi	Suure	b21 HOMG	b19 HOMG	b21 HETGv1	b19 HETGv1	b21 HETGv2	b19 HETGv2
	Mittauspäivä Mittausaika	20.10.-21 4 h	19.10.-21 4 h	20.10.-21 4 h	19.10.-21 4 h	20.10.-21 4 h	19.10.-21 4 h
Co-60	Akt.pit. C_{Genie} [Bq/g]	5,741	6,761	4,937	5,558	5,408	5,873
	Epäv. U_{Genie} [Bq/g]	0,164	0,703	0,141	0,578	0,154	0,610
	Epäv. U_{Genie} [%]	2,85	10,39	2,85	10,39	2,85	10,39
	Epäv. U_{Comb} [%]	2,95	10,42	2,95	10,42	2,95	10,42
	Suht. virhe RE [%]	-2,74	+14,54	-16,36	-5,85	-8,39	-0,51
Cs-137	Akt.pit. C_{Genie} [Bq/g]	11,420	13,133	9,640	10,647	10,600	11,255
	Epäv. U_{Genie} [Bq/g]	0,687	1,532	0,580	1,242	0,637	1,313
	Epäv. U_{Genie} [%]	6,01	11,67	6,01	11,67	6,01	11,67
	Epäv. U_{Comb} [%]	6,20 %	11,76	6,20	11,76	6,20	11,76
	Suht. virhe RE [%]	-3,95 %	+10,46	-18,93	-10,46	-10,85	-5,34
Am-241	Akt.pit. C_{Genie} [Bq/g]	22,372	21,944	18,053	17,330	20,181	19,505
	Epäv. U_{Genie} [Bq/g]	2,269	3,113	1,831	2,459	2,047	2,767
	Epäv. U_{Genie} [%]	10,14	14,19	10,14	14,19	10,14	14,19
	Epäv. U_{Comb} [%]	10,18	14,21	10,18	14,21	10,18	14,21
	Suht. virhe RE [%]	+18,31	+16,04	-4,53	-8,36	+6,72	+3,14

LIITE N. MITTAUSKOE 5 (PISTELÄHDE TYNNYRISSÄ): TAULUKOIDUT MITTAUSTULOKSET

Kuvassa N.1 on esimerkkinä mallibetonitynnyristä BT tehty ISOCS-malli mittaustapaukselle *BT b19 h660 r0 HETG* (mallien ja mittaustapausten tunnukset selitetty työn kappaleessa 6.5) Geometry Composer -ohjelman dimensionmuokkausnäkyssä. Esimerkki mallimetallitynnyrin MT mittaauksille käytetystä homogeenisesta ISOCS-mallista *b19 HOMG* on esitetty aiemmin liitteessä F.

Mallitynnyreille BT ja MT suoritetuista mittauksista saadut mittaustulokset on taulukoitu tämän liitteen seuraaville sivuille.



Kuva N.1. Esimerkkinä mallibetonitynnyristä BT Geometry Composer -ohjelman ”Complex Cylinder” -mallinteella tehty heterogeeninen ISOCS-malli *BT b21 h660 r0 HETG*. Esimerkkimalli on tehty detektorille b21015 90 asteen kollimoinnilla, mittausetäisyys on asetettu arvoon $SD = 440$ mm. Betonitynnyrin seinämä oli hieman tavanomaista tynnyriä paksumpi 2,8 mm. Tynnyrin täyttökorkeus asetettiin arvoon $FH = 700$ mm ja tynnyriin mallinnettiin kuvassa sinisellä näkyvä aktiivinen pistelähde (halkaisija $d = 1$ mm, suurennettu kuvaa varten) korkeudelle $h = 660$ mm, dimensioon ”Spherical Source”. Koska pistelähteen tässä sijainnissa tynnyrin ilmatila (katso työn kuva 6.14) ei vaikuta säteilyn vaimenemiseen, sisällön tiheys asetettiin mallissa geometrialaskujen perusteella hieman korkeampaan arvoon $\rho_{sis} = 2,13$ g/cm³ (HOMG mallissa $\rho_{sis} = 2,09$ g/cm³).

Taulukko N.1. Detektorilla b21015 mitatun betonitynnyrin BT aktiivisuustulokset, kun tynnyriin asetettiin Eu-152 -lähde CV195 kolmeen eri positioon ja tynnyriä mitattiin 20 tunnin ajan. Mittaustapausten tunnuksat ja niihin käytettyjen ISOCS-tehokkuuskalibrointimallien tiedot on kerrottu työn kappaleessa 6.5. Pyörähdyssymmetrisestä mittaustapauksesta *BT b21 h660 r0* tehtiin myös heterogeeninen ISOCS-malli. Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvassa 6.15.

		Mittaustapaus			
Eu-152:n tarkasteltava energia [keV]	Suure	BT b21 h440 r190 HOMG	BT b21 h440 r250 HOMG	BT b21 h660 r0 HOMG	BT b21 h660 r0 HETG
	Mittauspäivä	2.2.2022	1.2.2022	31.1.2022	31.1.2022
	Mittausaika	20 h	20 h	20 h	20 h
	Lähteen aktiivisuus mittauspäivänä [Bq]	7,92 E+04	7,92 E+04	7,92 E+04	7,92 E+04
344,3 keV	Nettopulssit S [-]	10 047	28 175	Ei havaittu	Ei havaittu
	Akt. A_{Genie} [Bq]	6,86 E+04	1,92 E+05	-	-
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	5,71 E+03	1,55 E+04	-	-
	Epäv. U_{Genie} [%]	8,32	8,07	-	-
	Suht. virhe RE [%]	-13,15	+143,50	-	-
778,9 keV	Nettopulssit S [-]	3953	7937	235	235
	Akt. A_{Genie} [Bq]	8,57 E+04	1,72 E+05	5,10 E+03	8,11 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	5,45 E+03	1,09 E+04	9,85 E+02	1,57 E+04
	Epäv. U_{Genie} [%]	6,36	6,34	19,31	19,31
	Suht. virhe RE [%]	+8,50	+117,75	-93,56	+2,37
1112,1 keV	Nettopulssit S [-]	3550	6869	346	346
	Akt. A_{Genie} [Bq]	8,62 E+04	1,67 E+05	1,05 E+04	9,14 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	4,35 E+03	7,40 E+04	1,60 E+03	1,39 E+04
	Epäv. U_{Genie} [%]	5,05	4,43	15,24	15,24
	Suht. virhe RE [%]	+9,15	+111,12	-86,38	+15,71

Taulukko N.2. Detektorilla b19116 mitatun betonitynnyrin BT aktiivisuustulokset, kun tynnyriin asetettiin Eu-152 -lähde CV195 kolmeen eri positioon ja tynnyriä mitattiin 20 tunnin ajan. Mittaustapausten tunnuksot ja niihin käytettyjen ISOCS-tehokkuuskalibrointimallien tiedot on kerrottu työn kappaleessa 6.5. Pyörähdyssymmetrisestä mittaustapauksesta *BT b19 h660 r0* tehtiin myös heterogeeninen ISOCS-malli. Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvassa 6.15.

		Mittaustapaus			
Eu-152:n tarkasteltava energia [keV]	Suure	BT b19 h440 r190 HOMG	BT b19 h440 r250 HOMG	BT b19 h660 r0 HOMG	BT b19 h660 r0 HETG
	Mittauspäivä	21.2.2022	18.2.2022	17.2.2022	17.2.2022
	Mittausaika	20 h	20 h	20 h	20 h
	Lähteen aktiivisuus mittauspäivänä [Bq]	7,90 E+04	7,90 E+04	7,90 E+04	7,90 E+04
344,3 keV	Nettopulssit S [-]	17 687	51 931	Ei havaittu	Ei havaittu
	Akt. A_{Genie} [Bq]	7,87 E+04	2,31 E+05	-	-
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	1,01 E+03	2,96 E+04	-	-
	Epäv. U_{Genie} [%]	12,89	12,83	-	-
	Suht. virhe RE [%]	-0,33	+192,49	-	-
778,9 keV	Nettopulssit S [-]	9395	20 639	725	725
	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,37 E+04	2,06 E+05	7,23 E+03	1,09 E+05
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	1,10 E+03	2,41 E+04	1,03 E+03	1,59 E+04
	Epäv. U_{Genie} [%]	11,74	11,70	14,27	14,22
	Suht. virhe RE [%]	+18,67	+160,57	-90,85	+37,79
1112,1 keV	Nettopulssit S [-]	10 403	19 944	1064	1064
	Akt. A_{Genie} [Bq]	1,03 E+05	1,97 E+05	1,05 E+04	9,14 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	1,18 E+04	2,24 E+04	1,60 E+03	1,39 E+04
	Epäv. U_{Genie} [%]	11,46	11,38	15,24	15,24
	Suht. virhe RE [%]	+30,33	+149,76	-86,38	+15,71

Taulukko N.3. Detektorilla b21015 mitatun mallimetallitynnyrin MT aktiivisuustulokset, kun tynnyriin asetettiin Eu-152 -lähde CV195 kolmeen eri positioon ja tynnyriä mitattiin 4 tunnin ajan. Mittaustapausten tunnuksiset ja niihin käytettyjen ISOCS-tehokkuuskalibrointimallien tiedot on kerrottu työn kappaleessa 6.5. Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvassa 6.16.

Eu-152:n tarkasteltava energia [keV]	Suure	Mittaustapausta				
		MT b21 h440 r0 HOMG	MT b21 h440 r190 HOMG	MT b21 h440 r250 HOMG	MT b21 h220 r0 HOMG	MT b21 h660 r0 HOMG
	Mittauspäivä	16.2.2022	16.2.2022	15.2.2022	14.2.2022	16.2.2022
	Mittausaika	4 h	4 h	4 h	4 h	4 h
	Lähteen aktiivisuus mittauspäivänä [Bq]	7,89 E+04	7,89 E+04	7,89 E+04	7,89 E+04	7,89 E+04
344,3 keV	Nettopulssit S [-]	3833	13 773	19 474	5328	6466
	Akt. A_{Genie} [Bq]	4,06 E+04	1,46 E+05	2,06 E+05	5,65 E+04	6,86 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	3,49 E+03	1,18 E+04	1,68 E+04	4,74 E+03	5,66 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	8,59	8,10	8,12	8,38	8,25
	Suht. virhe RE [%]	-48,49	+85,10	+161,69	-28,41	-13,10
778,9 keV	Nettopulssit S [-]	1435	3120	4245	1440	1951
	Akt. A_{Genie} [Bq]	5,40 E+04	1,17 E+05	1,60 E+05	5,42 E+04	7,34 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	4,12 E+03	7,65 E+03	1,02 E+04	4,08 E+03	5,17 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	7,63	6,52	6,39	7,53	7,04
	Suht. virhe RE [%]	-31,58	+48,73	+102,35	-31,37	-6,97
1112,1 keV	Nettopulssit S [-]	1269	2616	3317	1380	1743
	Akt. A_{Genie} [Bq]	5,72 E+04	1,18 E+05	1,49 E+05	6,22 E+04	7,86 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	3,42 E+03	5,69 E+03	6,88 E+03	3,56 E+03	4,18 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	5,98	4,83	4,60	5,72	5,32
	Suht. virhe RE [%]	-31,87	+42,21	+80,70	-25,69	-5,70

Taulukko N.4. Detektorilla b19116 mitatun mallimetallitynnyrin MT aktiivisuustulokset, kun tynnyriin asetettiin Eu-152 -lähde CV195 kolmeen eri positioon ja tynnyriä mitattiin 2 tunnin ajan. Mittaustapausten tunnuksat ja niihin käytettyjen ISOCS-tehokkuuskalibrointimallien tiedot on kerrottu työn kappaleessa 6.5. Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvassa 6.17.

Eu-152:n tarkasteltava energia [keV]	Suure	Mittaustapaus				
		MT b19 h440 r0 HOMG	MT b19 h440 r190 HOMG	MT b19 h440 r250 HOMG	MT b19 h220 r0 HOMG	MT b19 h660 r0 HOMG
	Mittauspäivä	10.2.2022	10.2.2022	10.2.2022	10.2.2022	10.2.2022
	Mittausaika	2 h	2 h	2 h	2 h	2 h
	Lähteen aktiivisuus mittauspäivänä [Bq]	7,91 E+04	7,91 E+04	7,91 E+04	7,91 E+04	7,91 E+04
344,3 keV	Nettopulssit S [-]	4207	13 759	16 713	4528	4763
	Akt. A_{Genie} [Bq]	5,86 E+04	1,92 E+05	2,33 E+05	6,31 E+04	6,64 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	7,63 E+03	2,46 E+04	2,99 E+04	8,19 E+03	8,61 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	13,02	12,85	12,84	12,99	12,98
	Suht. virhe RE [%]	-25,91	+142,31	+194,34	-20,24	-16,11
778,9 keV	Nettopulssit S [-]	1902	4473	5185	1825	1900
	Akt. A_{Genie} [Bq]	9,37 E+04	1,56 E+05	1,81 E+05	6,37 E+04	6,63 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	1,10 E+03	1,85 E+04	2,14 E+04	7,81 E+03	8,09 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	11,74	11,84	11,81	12,26	12,20
	Suht. virhe RE [%]	+18,67	+97,33	+128,76	-19,47	-16,16
1112,1 keV	Nettopulssit S [-]	1857	4137	4575	1875	1969
	Akt. A_{Genie} [Bq]	1,03 E+05	1,53 E+05	1,69 E+05	6,94 E+04	7,28 E+04
	Epäv. U_{Genie} [Bq]	1,18 E+04	1,68 E+04	1,85 E+04	7,67 E+03	8,72 E+03
	Epäv. U_{Genie} [%]	11,46	10,95	10,94	11,06	11,98
	Suht. virhe RE [%]	+30,33	+93,44	+113,97	-12,30	-7,93

LIITE O. TAUSTASÄTEILYN LASKENNALLINEN VAIKUTUS AKTIIVISUUSTULOKSEEN: TULOKSET

Miiluhallin taustamittauksissa havaittavien 1332,5 keV pulssinkeräysnopeuksien avulla arvioitiin Co-60 -taustasäteilyn vaikutusta Miiluhallissa mitattavien matala-aktiivisten ja valvonnasta vapautettavien jätteiden aktiivisuustuloksiin. Tutkimusta varten Miiluhallissa mitattiin detektorilla b19116 taustamittaus tyhjälle näkymälle 90 ja 180 asteen kollimoinneilla ja niistä analysoitiin pulssinkeräysnopeus fotopiikille 1332,5 keV. Seuraavaksi luotiin 8 massoiltaan ja tiheyksiltään eroavaa tynnyrimallia, joiden täyttö on mallinnettu korkeuteen $FH = 850$ mm ja mittausetäisyys $SD = 440$ mm, mallit luotiin molemmille kollimoinneille. Tynnyrimallien mallinnettuja materiaaleja vaihdeltiin tynnyrin massan mukaan.

Mallien tehokkuus energialla 1332,5 keV otettiin talteen. Tämän jälkeen laskettiin työssä esitetyn yhtälön 3.1 avulla taustamittausten gammaspektreistä havaittujen pulssinkeräysnopeuksien avulla eri ISOCS-mallien antamat aktiivisuustulokset Co-60:n energialle 1332,5 keV. Vastaavat aktiivisuuspitoisuustulokset saatiin jakamalla aktiivisuudet mallinnettujen tynnyrien sisältöjen massoilla. Näitä tuloksia verrattiin STUK:n yleisen rajoittamattoman materiaalimäärän valvonnasta vapautusmenettelylle asetettuun Co-60:n enimmäisaktiivisuuspitoisuuteen 0,1 Bq/g (100 Bq/kg), sekä rajoitetun materiaalimäärän vapautusmenettelyn vastaavaan rajaan 1,0 Bq/g (1000 Bq/kg). (STUK 2019b, 30).

Selvityksen laskentatulokset on koottu 90 asteen kollimaattorimallilla taulukkoon O.1, 180 asteen kollimointimallilla saadut tulokset on koottu taulukkoon O.2.

Taulukko O.1. Miiluhallin Co-60 -taustasäteilyn laskennallinen vaikutus tiheydeltään erilaisilla homogeenisilla ISOCS-tynnyrimalleilla saataviin aktiivisuuspitoisuuksiin detektorilla b19116. Taulukon tuloksissa tutkittavan taustaspektrin mittauksessa ja siihen sovelletuissa ISOCS-malleissa on käytetty 90 asteen kollimointia. Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvassa 7.1.

Co-60 1332,5 keV pulssinkeräys- nopeus	Mallin tiheys [g/cm ³]	Mallia vastaava nettomassa [kg]	Mallin materiaali	Tehokkuus 1332,5 keV	Vaikutus aktiivisuuteen [Bq]	Vaikutus aktiivisuus- pitoisuuteen [Bq/kg]
12 cph (mitattu Miiluhallissa)	0,03	6,6	pvc	5,11 E-05	65,25	9,85
	0,07	15,5	pvc	4,85 E-05	68,78	4,45
	0,10	22,1	pvc	4,66 E-05	71,49	3,24
	0,20	44,1	aluminium	4,18 E-05	79,80	1,81
	0,50	110,4	aluminium	3,05 E-05	109,41	0,99
	0,68	146,4	csteel	2,63 E-05	126,83	0,87
	1,00	220,7	csteel	2,04 E-05	163,15	0,74
	1,50	331,1	csteel	1,49 E-05	224,22	0,68
	1,72	374,0	concrete	1,12 E-05	298,47	0,80
20 cph (1. skenaario Miiluhallin nousseesta Co-60 -tausta- säteilytasosta)	0,03	6,6	pvc	5,11 E-05	108,75	16,42
	0,07	15,5	pvc	4,85 E-05	114,63	7,42
	0,10	22,1	pvc	4,66 E-05	119,15	5,40
	0,20	44,1	aluminium	4,18 E-05	132,99	3,01
	0,50	110,4	aluminium	3,05 E-05	182,36	1,65
	0,68	146,4	csteel	2,63 E-05	211,39	1,44
	1,00	220,7	csteel	2,04 E-05	271,91	1,23
	1,50	331,1	csteel	1,49 E-05	373,69	1,13
	1,72	374,0	concrete	1,12 E-05	497,44	1,33
30 cph (2. skenaario Miiluhallin nousseesta Co-60 -tausta- säteilytasosta)	0,03	6,6	pvc	5,11 E-05	163,12	24,63
	0,07	15,5	pvc	4,85 E-05	171,94	11,13
	0,10	22,1	pvc	4,66 E-05	178,72	8,10
	0,20	44,1	aluminium	4,18 E-05	199,49	4,52
	0,50	110,4	aluminium	3,05 E-05	273,54	2,48
	0,68	146,4	csteel	2,63 E-05	317,08	2,17
	1,00	220,7	csteel	2,04 E-05	407,87	1,85
	1,50	331,1	csteel	1,49 E-05	560,54	1,69
	1,72	374,0	concrete	1,12 E-05	746,17	2,00

Taulukko O.2. Miiluhallin Co-60 -taustasäteilyn laskennallinen vaikutus tiheydeltään erilaisilla homogeenisilla ISOCS-tynnyrimalleilla saataviin aktiivisuuspitoisuuksiin detektorilla b19116. Taulukon tuloksissa tutkittavan taustaspektrin mittauksessa ja siihen sovelletuissa ISOCS-malleissa on käytetty 180 asteen kollimointia. Taulukon tulokset on esitetty graafisesti työn kuvassa 7.1.

Co-60 1332,5 keV pulsinkeräys- nopeus	Mallin tiheys [g/cm ³]	Mallia vastaava nettomassa [kg]	Mallin materiaali	Tehokkuus 1332,5 keV	Vaikutus aktiivisuuteen [Bq]	Vaikutus aktiivisuus- pitoisuuteen [Bq/kg]
24 cph (mitattu Miiluhallissa)	0,03	6,6	pvc	6,52 E-05	102,21	15,44
	0,07	15,5	pvc	6,20 E-05	107,53	6,96
	0,10	22,1	pvc	5,97 E-05	111,62	5,06
	0,20	44,1	aluminium	5,37 E-05	124,09	2,81
	0,50	110,4	aluminium	3,97 E-05	168,11	1,52
	0,68	146,4	csteel	3,44 E-05	193,73	1,32
	1,00	220,7	csteel	2,70 E-05	246,82	1,12
	1,50	331,1	csteel	1,99 E-05	335,55	1,01
	1,72	374,0	concrete	1,67 E-05	399,48	1,07
40 cph (1. skenaario Miiluhallin nousseesta Co-60 -tausta- säteilytasosta)	0,03	6,6	pvc	6,52 E-05	170,36	25,73
	0,07	15,5	pvc	6,20 E-05	179,22	11,60
	0,10	22,1	pvc	5,97 E-05	186,03	8,43
	0,20	44,1	aluminium	5,37 E-05	206,82	4,68
	0,50	110,4	aluminium	3,97 E-05	280,18	2,54
	0,68	146,4	csteel	3,44 E-05	322,88	2,21
	1,00	220,7	csteel	2,70 E-05	411,36	1,86
	1,50	331,1	csteel	1,99 E-05	559,25	1,69
	1,72	374,0	concrete	1,67 E-05	665,80	1,78
60 cph (2. skenaario Miiluhallin nousseesta Co-60 -tausta- säteilytasosta)	0,03	6,6	pvc	6,52 E-05	255,53	38,59
	0,07	15,5	pvc	6,20 E-05	268,83	17,40
	0,10	22,1	pvc	5,97 E-05	279,05	12,64
	0,20	44,1	aluminium	5,37 E-05	310,22	7,03
	0,50	110,4	aluminium	3,97 E-05	420,27	3,81
	0,68	146,4	csteel	3,44 E-05	484,32	3,31
	1,00	220,7	csteel	2,70 E-05	617,05	2,80
	1,50	331,1	csteel	1,99 E-05	838,87	2,53
	1,72	374,0	concrete	1,67 E-05	998,70	2,67