

# Radioaktiivisten jätteiden kartoitus kiihdytinlaboratoriossa

Aki Puurunen



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
FYSIIKAN LAITOS

Pro Gradu -tutkielma  
Ohjaaja: Jaana Kumpulainen  
3. lokakuuta 2011

## Tiivistelmä

Kiihdytinlaboratoriossa syntyy radioaktiivista jätettä, joka on pääosin tutkimuksessa käytettävien laitteiden osia ja laitteiden huoltojätettä. Aktiivinen jäte tulee luokitella ja käsitellä Suomen lakien määrämällä tavalla.

Tässä työssä kartoitettiin jätteestä mahdollisesti löytyviä radioaktiivisia nuklideja ja nuklidien havaitsemiseen sopivaa mittauslaitteistoa. Jäteosia mitattiin  $\gamma$ -säteilyä havaitsevalla mittauslaitteistolla. Osista tunnistettiin radioaktiiviset nuklidit ja laskettiin niiden aktiivisuudet. Näiden määritysten pohjalta päätetään jäteosien jatkokäsittely yhteistyössä viranomaisten kanssa.



## Kiitokset

Haluan kiittää graduni ohjaajaa laboratorioinsinööri Jaana Kumpulaista asiantuntevasta ohjauksesta ja mielenkiintoisesta gradun aiheesta. Kiitokset tohtorille Steffen Ketelhut ja tutkijalle Panu Rahkila mittauslaitteiston ja -ohjelmien asennuksesta ja koulutuksesta. Lisäksi tahdon kiittää tohtorikoulutettavia Pauli Peuraa ja Panu Ruotsalaista pitkistä keskusteluista ja avunannosta analyysin ongelmakohtissa. Kiitokset sekä tutkimusjohtaja Ari Virtaselle, joka toimi tutkielman toisena tarkastajana, että koko laitoksen henkilökunnalle laadukkaasta opetuksesta ja erinomaisesta opiskeluympäristä.

Lopuksi kiitän Holvin poikia, jotka ovat tarjonneet piristävän ja rentouttavan työympäristön, sekä perhettäni että avopuolisoani Sini-Jattaa, jotka ovat toimineet loppumattoman tuen ja kannustuksen lähteenä.



# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Säteilylain määrittämät velvollisuudet radioaktiivisen jätteen huolehtimiseksi</b>	<b>2</b>
2.1	<i>Säteilyturvallisuusohje 6.2</i>	2
2.2	<i>Säteilyturvallisuusohje 1.5</i>	3
<b>3</b>	<b>Kiihdytinlaboratoriossa syntyvä radioaktiivinen jäte</b>	<b>4</b>
3.1	<i>Materiaaleja aktivoiva säteily</i>	5
3.2	<i>Säteilylle altistuneet materiaalit</i>	6
3.3	<i>Ydinreaktiot ja epästabiliin ytimien hajoaminen</i>	7
3.3.1	Ydinreaktiot ja reaktion Q-arvo	7
3.3.2	Ydinreaktion vaikutusala	8
3.3.3	Aktiivisuus	9
3.3.4	Ytimen stabiilius ja hajoamistavat	11
3.4	<i>Radioaktiivisten tuotteiden kartoitus ja luokittelu</i>	13
3.4.1	Raudan reaktiotuotteiden kartoitus	13
3.4.2	Syntyvät radioaktiiviset nuklidit materiaaleittain	19
3.4.3	Säteilyn asettamat vaatimukset mittauslaitteistolle	19
<b>4</b>	<b>Mittauslaitteisto ja -menetelmä</b>	<b>26</b>
4.1	<i>Mittauslaitteisto ja spektri</i>	26
4.2	<i>Aktiivisuuden määrittäminen</i>	29
4.2.1	Tehokkuus	31
4.3	<i>Pienin havaittava aktiivisuus</i>	31
4.4	<i>Optimaalinen mittauslaitteisto</i>	32
<b>5</b>	<b>Mittaukset</b>	<b>34</b>
5.1	<i>Energia- ja tehokkuuskalibrointimittaukset</i>	34
5.1.1	Energiakalibrointi	34
5.1.2	Tehokkuuskalibrointi	36
5.2	<i>Aktiivisuusmittaukset</i>	42
5.2.1	Taustaspektrin analyysi	44
5.2.2	Osan AKI-012 analyysi	51
5.2.3	Osan IG-092 analyysi	51
5.2.4	Osan IG-099 analyysi	52
5.2.5	Osan ACC-021 analyysi	54
5.2.6	Osan AKI-003 analyysi	55
<b>6</b>	<b>Päätelmät</b>	<b>55</b>

<b>A</b>	<b>Ruostumattomien teräslaatu- ja isotooppikoostumukset</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Alumiinilaatu- ja isotooppikoostumukset</b>	<b>64</b>
<b>C</b>	<b>Kiihdytinlaboratoriosta poistetut osat</b>	<b>67</b>
<b>D</b>	<b>Vuonna 2011 mitatut osat</b>	<b>71</b>
<b>E</b>	<b>Spektrit ja piikkien tunnistukset</b>	<b>73</b>
E.1	<i>Osa AKI-012</i> . . . . .	73
E.2	<i>Osa IG-092</i> . . . . .	76
E.3	<i>Osa IG-099</i> . . . . .	78
E.4	<i>Osa ACC-021</i> . . . . .	81
E.5	<i>Osa AKI-003</i> . . . . .	83

# 1 Johdanto

Säteilysuojelutyö on lain määräämä perusedellytys laitoksissa, joissa käytetään säteilyä. Säteilysuojelun tavoitteena on ihmisten ja ympäristön suojeleminen säteilyn haitallisilta vaikutuksilta [1]. Säteilysuojelukysymykset ulottuvat ajallisesti laitoksen koko elinkaarelle tilojen suunnittelusta aina säteilyn käytön lopettamiseen saakka. Jyväskylän yliopiston Kiihdytinlaboratoriossa suoritetaan ydinfysiikan ja kiihdytinpohjaisen fysiikan tutkimusta. Kiihdytinpohjaiseen soveltavaan tutkimukseen kuuluvat mm. säteilykestävyysmittaukset ja lääketieteellisten isotooppien valmistus [2].

Tutkimustyössä säteilylle altistuu säteilyn siirtävä välineistö ja säteilylle altistettavat materiaalit. Laboratorion välineistöä uusitaan tarpeen mukaan. Käytöstä poistetut osat ja materiaalit vaativat erityishuomiota säteilylle altistumisensa vuoksi. Materiaali, jota ei käytetä uudelleen, tulee hävittää säteilylain ja -asetuksen ja niiden pohjalta annettujen määräysten mukaisesti. Tämän toteuttamiseksi materiaalien sisältämät radioaktiiviset nuklidit on tunnistettava ja aktiivisuudet määritettävä.

Tutkielman tarkoituksena on kartoittaa käytöstä poistetuista osista mahdollisesti löydettävät aktiiviset nuklidit, määrittää aktiivisten nuklidien hajoamisesta syntyvän säteilyn tyyppi ja energiajakauma ja hahmotella optimaalinen mittausjärjestely ja -laitteisto radioaktiivisten nuklidien tunnistamiseksi ja niiden aktiivisuuksien määrittämiseksi. Lisäksi määritetään mitatuista osista aktiiviset nuklidit ja niiden aktiivisuudet, joiden perusteella selvitetään materiaalien hävityskelpoisuus ja loppusijoittamisen tarve.



## 2 Säteilylain määrittämät velvollisuudet radioaktiivisen jätteen huolehtimiseksi

Säteilylain (592/1991) pykälässä 50 säädetään toiminnan harjoittajan huolehtimisvelvollisuudesta:

Toiminnan harjoittaja on velvollinen huolehtimaan toiminnassa syntyvien radioaktiivisten jätteiden vaarattomiksi tekemiseksi tarpeellisista toimenpiteistä.

Säteilylakia täydentävän säteilyasetuksen (1512/1991) pykälässä 24 säädetään radioaktiivisista jätteistä:

Säteilyturvakeskus vahvistaa perusteet sekä asettaa tarvittavat pitoisuus- ja aktiivisuusrajat sen toteamiseksi, onko jätettä pidettävä radioaktiivisena jätteenä.

Säteilyturvakeskuksen (STUK) julkaisema ST-ohje 6.2 *Radioaktiiviset jätteet ja päästöt* määrittelee pitoisuus- ja aktiivisuusrajat jätteille ja ST-ohje 1.5 *Säteilyn käytön vapauttaminen turvallisuusluvasta ja ilmoitusvelvollisuudesta* ohjeistaa jätteiden loppusijoittamiseen tarvittavasta hyväksynnästä. [3], [4]

### 2.1 Säteilyturvallisuusohje 6.2

ST-ohjeen 6.2 ensimmäisessä luvussa määritellään radioaktiivinen jäte:

Radioaktiivisella jätteellä tarkoitetaan radioaktiivisia aineita ja radioaktiivisten aineiden saastuttamia laitteita, tavaroita ja materiaaleja, joilla ei ole käyttöä ja jotka radioaktiivisuutensa vuoksi on tehtävä vaarattomiksi.

Luvussa 3.1.1 *Kiinteä jäte* määritellään aktiivisuuden alaraja jätteelle:

Radioaktiiviseksi jätteeksi ei katsota kiinteää jätettä, jossa beeta- ja gamma-säteilyä lähettävien radionuklidien aktiivisuus on enintään 10 kBq kilogrammassa ja alfasäteilyä lähettävien radionuklidien aktiivisuus on enintään 1 kBq kilogrammassa. Aktiivisuus lasketaan keskiarvona jäte-erää kohti, jonka paino saa olla enintään 10 kg.

Aktiiviselle jätteelle määritellään myös vähäaktiivinen jäteluokka, jonka mukaiset jätteet voidaan toimittaa kaatopaikalle. ST-ohjeen luku 3.4 *Kiinteän vähäaktiivisen jätteen hävittäminen* sanoo:

Kiinteä vähäaktiivinen jäte voidaan radioaktiivisuutensa puolesta toimittaa kaatopaikalle tai jätteenpolttolaitokseen seuraavin edellytyksin: (1) Yhdessä jätepakkausessa oleva aktiivisuus saa olla enintään 2,5  $ALI_{min}$  ja annosnopeus pakkauksen pinnalla enintään 5  $\mu\text{Sv/h}$ . (2) Yhdestä säteilyn käyttöpaikasta kuukauden aikana kaatopaikalle tai jätteenpolttolaitokseen toimitetussa jätteessä aktiivisuus saa olla enintään

25  $ALI_{min}$ . Vuoden aikana hävitettävä aktiivisuus ei saa kuitenkaan olla suurempi kuin 100 GBq.

Jos jäte sisältää useita eri radionuklideja, on jätteessä olevan kokonaisaktiivisuuden täytettävä yhden jätepakkauksen osalta kohdassa 3.2 esitetty ehto (1) ja kuukaudessa hävitettäväksi toimitetun jätteen osalta kohdassa 3.2 esitetty ehto (2).

Luvussa 3.2 esitetyt, myös kiinteille jätteille pätevät, ehdot ovat:

Jos viemäriverkkoon päästetään useita eri radionuklideja on kokonaisaktiivisuuden täytettävä kertapäästön osalta ehto (1)

$$\sum_k \frac{A_k}{ALI_{min,k}} \leq 2,5$$

ja kuukausipäästön osalta ehto (2)

$$\sum_k \frac{A_k}{ALI_{min,k}} \leq 25.$$

Kaavoissa  $A_k$  tarkoittaa radionuklidin  $k$  aktiivisuutta ja  $ALI_{min,k}$  kyseisen radionuklidin pienintä vuosisaantorajaa.

ST-ohje 6.2 sisältää ohjeet myös jätteiden hävittämisen ilmoitusvelvollisuudesta STUK:lle sekä jätteiden käsittelyohjeita, jotka tulee hävityssuunnitelmaa tehdessä ottaa huomioon. Vuosisaantoraja  $ALI$  määritellään ST-ohjeen 7.2 liitteessä A.

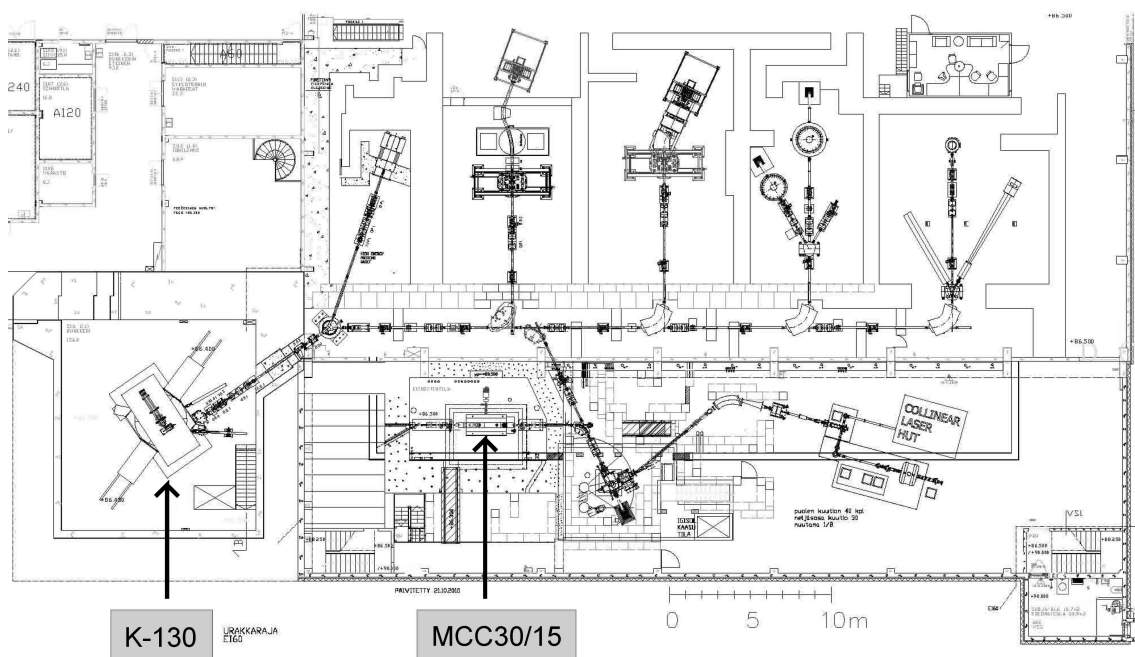
## 2.2 Säteilyturvallisuusohje 1.5

ST-ohjeen 1.5 luvussa 2.2 puhutaan jätteiden loppusijoitukseen tarvittavasta Säteilyturvakeskuksen hyväksynnästä ja jätteiden vapauttamisrajasta:

Vaparaajoja ei sovelleta silloin, kun kyseessä on ilmoitusvelvollisuuden tai turvallisuuslupamenettelyn alaisista toiminnoista peräisin olevien radioaktiivisten materiaalien loppusijoitus, kierrätys tai uudelleenkäyttö. Näitä toimintoja varten on oltava Säteilyturvakeskuksen hyväksyntä, jolla kyseiset aineet tai materiaalit vapautetaan säteilylainsäädännön vaatimuksista. Tällöin liitteessä C esitettyjen peruskriteerien on toteuduttava eivätkä vapautettavien materiaalien aktiivisuuspitoisuudet saa ylittää Euroopan yhteisön antamissa teknisissä ohjeissa esitettyjä ohjearvoja (vapauttamisrajat). Nämä ohjearvot voivat olla huomattavasti pienempiä kuin liitteessä A esitetyt turvallisuuslupa- ja ilmoitusmenettelyä koskevat vaparaajat.

### 3 Kiihdytinlaboratoriossa syntyvä radioaktiivinen jäte

Jyväskylän yliopiston Fysiikan laitoksen (JYFL) Kiihdytinlaboratorio koostuu kahdesta vierekkäisestä kiihdytinhallista. Laboratorion kiihdyttiminä toimivat K-130 ja MCC30/15 syklotronit omilla betonibunkkereissaan. Kiihdyttimillä tuotettava hiukkassuihku siirretään suihkulinjoja pitkin eri tutkimusryhmien tutkimusluoliin, joissa suihku törmätetään haluttuun kohtiomateriaaliin (ks. Kuva 1).



**Kuva 1** – Kiihdytinlaboratorion tilat. Syklotronit K-130 ja MCC30/15 ovat nuolilla merkityissä tiloissa.

Radioaktiivisia aineita on mahdollista syntyä paikoissa, joissa tuotettu suihku voi osua materiaaliin sekä suihkun ja kohtion ympäristössä neutronireaktioiden kautta. Tällaisia paikkoja ovat kiihdytin, suihkulinjan putket ja laitteet sekä tutkimusluolan laitteisto, joka on kosketuksissa suihkun kanssa ennen suihkun pysähtymistä sekä näiden lähiympäristö. Aktivoituvat materiaalit ovat siis materiaalit, joista itse laitteistot on tehty, sekä kohtiomateriaalit, joihin suihku törmätetään, että rakennusmateriaalit (esim. raudoitettu betoni).

### 3.1 Materiaaleja aktivoiva säteily

Eniten materiaaleja aktivoivat hiukkassuihkut ovat kevyet hiukkassuihkut, kuten protoni- (p), deuteroni- (d),  $^3\text{He}$ - ja  $\alpha$ -hiukkassuihkut. Jotta materiaali voi aktivoitua, siihen osuvalla hiukkassuihkulla tulee olla ydinreaktion mahdollistava määrä liike-energiaa (ks. kappale 3.3.1). Syklotronin hiukkaselle antama liike-energia  $T_{max}$  riippuu hiukkasten varaus-massa suhteesta  $Q/A$ , missä  $Qe$  on hiukkasen varaus ja  $A$  massaluku. Syklotronin antama liike-energia kiihdytettävälle hiukkaselle on [5, s. 13]

$$\frac{T_{max}}{A} = K \left( \frac{Q}{A} \right)^2,$$

missä  $K$  on syklotronia kuvaileva parametri. Kiihdytinlaboratoriossa K-130 kiihdyttimen  $K$ -arvo on 130 ja MCC30/15 kiihdyttimen  $K$ -arvo on 30.

Esimerkkinä  $^4\text{He}$ -atomin massaluku  $A = 4$  ja sillä on elektroneja kaksi kappaletta. Riistämällä joko yksi tai kaksi elektronia  $^4\text{He}$ -atomilta, tulee vastaavasti  $\alpha$ -hiukkaselle (riisuttu He-ydin) varaus  $+e$  tai  $+2e$  ja varaus-massasuhteeksi vastaavasti  $1/4$  tai  $2/4$ . Kiihdytinlaboratorion K-130 kiihdyttimellä teoreettinen maksimiliike-energia nukleonia kohti  $\alpha$ -hiukkaselle varaus-massasuhteella  $1/4$  on siis

$$\frac{T_{max}}{A} = 130 * \left( \frac{1}{4} \right)^2 \approx 8,1 \text{ MeV}$$

ja vastaavasti varaus-massasuhteella  $2/4$  maksimiliike-energia nukleonia kohti on 32,5 MeV. Yleisimpien p-, d-,  $^3\text{He}$ - ja  $\alpha$ -suihkujen maksimiliike-energiat ovat taulukossa 1. Käytännössä  $K$ -arvon mukaisiin maksimiliike-energioihin ei päästä johtuen mm. syklotronin aksiaalisen fokuosoinnin riittämättömyydestä. Esimerkiksi suurimmat mahdolliset energiat K-130 kiihdyttimellä protonisuihkulle ovat luokkaa 90 MeV.

**Taulukko 1** – Hiukkassuihkujen teoreettinen maksimiliike-energia nukleonia kohti ( $T_{max}/A$ ) protoni-, deuteroni-,  $^3\text{He}$ - ja  $\alpha$ -suihkuille. Varaus-massasuhte  $Q/A$  on tässä dimensioton suhdeluku.

hiukkanen	$Q/A$	$T_{max}/A$ (MeV)
p	1	130
d	$\frac{1}{2}$	32,5
$^3\text{He}$	$\frac{2}{3}$ ja $\frac{1}{3}$	57,8 ja 14,4
$\alpha$	$\frac{1}{2}$ ja $\frac{1}{4}$	32,5 ja 8,1

Toinen tärkeä materiaaleja aktivoiva tekijä on neutronireaktiot. Tuotetuissa ydinreaktioissa syntyy neutroneja, jotka varauksettomina ja heikosti vuorovaikuttavina

hiukkasina ovat läpätunkevia ja niiden vaikutus ulottuu paljon kohtioaluetta kauemmaksi. Koska neutroneihin ei vaikuta Coulombin sähköinen poistovoima, ne voivat hyvin pienilläkin energioilla ( $< 1$  eV) tunkeutua ytimen vaikutuspiiriin ja aiheuttaa ydinreaktion. Neutronien todennäköisimmät reaktiotyypit riippuvat neutronien energiasta. Neutronien luokittelu energian mukaan on esitetty taulukossa 2. Erityisesti termisten neutronien sieppausreaktioiden, joissa ydin sieppaa neutronin, todennäköisyydet voivat olla hyvin suuria. [6, s. 444-445]

**Taulukko 2** – Neutronien luokittelu energian  $E$  mukaan [6, s. 445].

nimitys	$E$
termiset neutronit	$\simeq 0,025$ eV
epitermiset neutronit	$\sim 1$ eV
hitaat neutronit	$\sim 1$ keV
nopeat neutronit	100 keV - 10 MeV

### 3.2 Säteilyle altistuneet materiaalit

Suihkulinjan putket ja erilaiset osat on valmistettu pääosin alumiinista ja ruostumattomasta teräksestä. Kuparia käytetään ohjausmagneeteissa, tiivisteissä ja joissakin mittalaitteissa (esim. Faraday-kupit). Lisäksi suihkulinjassa, kiihdyttimellä ja tutkimusluolissa säteilyle altistuu pieniä määriä muita materiaaleja. Myös kohtiomateriaaleista (esim. uraani ja torium) tulee kontaminaatiota kohtioalueen osiin. Kiihdytinlaboratoriosta poistetuista osista pidetään kirjaa ja ne on luetteloi-tu. Luetteloinnissa on ilmoitettu pääsääntöisesti osan materiaalit, suurin mitattu annosnopeus poiston jälkeen ja mahdollisesti myös muita tietoja mm. aktiivisuusmittauksen tuloksia. Osaluettelo on liitteenä C.

Ruostumattomasta teräksestä valmistetut osat on valmistettu pääosin ASTM-standardin/EN-standardin laaduista 304/1.4301, 304L/1.4307, 316/1.4401 ja 316L/1.4404 (316 ja 316L haponkestävää terästä). Johtavan valmistajan (Outokumpu) ilmoittamat kemialliset koostumukset on esitetty liitteessä A. Alumiinista valmistetut osat ovat IADS-luokkien 6082 ja 7075 alumiinia. Alumiinitoimittajan (Alumeco Finland Oy AB) ilmoittamat kemialliset koostumukset ovat liitteessä B.

Koostumusten pohjalta on laskettu materiaalin eri alkuaineiden isotooppien pitoisuus materiaalissa. Tämä tieto tarvitaan reaktiotuotteiden ennustamiseen, koska eri isotoopeilla on eri määrä neutroneja. Isotooppikoostumukset teräs- ja alumiini-laaduittain on esitetty liitteissä A ja B. Puhtaan alumiinin ja raudan ominaisuuksien muuttamiseen tarkoitettujen muiden alkuaineiden määrät on laskettu siten,

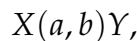
että seostealkuaineen osuudeksi on otettu valmistajan ilmoittama maksimipitoisuus kyseistä seostetta. Näin on saatu suurimmat mahdolliset seostealkuaineiden pitoisuudet materiaaleissa. Tällä valinnalla saatiin reaktiotuotetarkasteluun mukaan useampi isotooppi, koska isotooppipitoisuuden rajana reaktiotuotteiden tarkastelulle oli yksi promille.

### 3.3 Ydinreaktiot ja epästabiilien ytimien hajoaminen

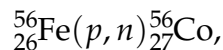
Syntyvien radioaktiivisten tuotteiden määrä ja siten tuotetun aktiivisuuden suuruus riippuu useista tekijöistä: kohtioytimien määrästä (osa/materiaali, johon säteily osuu), suihkun hiukkasten määrästä (kiihdytetyn hiukkasvirran tiheydestä), reaktion vaikutusalueesta, hiukkasten energioista ja säteilytysajasta.

#### 3.3.1 Ydinreaktiot ja reaktion $Q$ -arvo

Jos hiukkasella on tarpeeksi liike-energiaa, voi hiukkanen törmätessään materiaaliin aiheuttaa ydinreaktion. Ydinreaktio merkitään



missä  $X$  on kohtionuklidi,  $a$  on kiihdytetty hiukkanen ja  $b$  ja  $Y$  ovat reaktiotuotteita. Yleensä  $Y$  on raskaampi reaktiotuote ja  $b$  on kevyempi tuote, joka havaitaan mitauksilla. Merkintätapaa käytetään puhuttaessa ydinreaktityypeistä, esimerkiksi  $(n, \gamma)$ - tai  $(p, n)$ -reaktioista. [6, s. 379] Esimerkkinä ydinreaktiosta on



missä protonisuihku on osunut Fe-nuklidiin ja tuotteena on syntynyt Co-ydin ja vapaa neutroni.

Ydinreaktioita luokitellaan myös energian mukaan. Ydinreaktio on matalaenerginen, kun liike-energia nukleonia kohti ( $T_{\max}/A$ ) on kertaluokkaa 10 MeV tai vähemmän. Tällaisessa reaktiossa neutronien ja protonien lukumäärät säilyvät erikseen. [6, s. 378]

Energia säilyy ydinreaktiossa:

$$m_X c^2 + T_X + m_a c^2 + T_a = m_Y c^2 + T_Y + m_b c^2 + T_b,$$

missä  $T$  on hiukkasen liike-energia ja  $m$  on hiukkasen lepomassa. Yleensä koejärjestelyssä kohtio  $X$  on paikoillaan ( $T_X = 0$ ) ja kiihdytettävä hiukkanen  $a$  törmäytetään siihen. Reaktion  $Q$ -arvo määritellään lähtö- ja tuotepuolen massojen erotusta vastaavana energiana tai liike-energioiden erotuksena:

$$\begin{aligned} Q &= (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2 \\ &= (T_Y + T_b - T_X - T_a). \end{aligned} \tag{3.1}$$

Jos  $Q > 0$ , reaktio on eksoterminen ja nuklidien massaa tai sidosenergiaa vapautuu reaktiotuotteiden liike-energiaksi. Jos  $Q < 0$ , reaktio on endoterminen ja alkuperäinen (hiukkasen  $a$ ) liike-energia muuttuu nuklidien massaksi tai sidosenergiaksi. Endotermissessä reaktiossa kiihdytettävän hiukkasen liike-energian  $T_a$  täytyy ylittää ns. kynnsarvo; ilman kynnsarvon ylittävää energiaa ydinreaktiota ei tapahdu. Kynnsarvo  $T_{th}$  on

$$T_{th} = (-Q) \frac{m_Y + m_b}{m_Y + m_b - m_a} \approx -Q, \quad (3.2)$$

kun  $m_a \ll m_Y + m_b$ . Eksoteremiselle reaktiolle tällaista kynnystä ei ole. Molemissa tapauksissa ( $Q < 0$  tai  $Q > 0$ ) täytyy ylittää lisäksi Coulombin valli ydinreaktion tapahtumiseksi, jos hiukkanen  $a$  on varattu. [6, s. 380-384] Hiukkasen  $a$  ollessa neutroni tällaista ehtoa ei ole.

### 3.3.2 Ydinreaktion vaikutusala

Vaikutusala kuvailee reaktion  $X(a, b)Y$  todennäköisyyttä. Jos hiukkasten  $a$  hiukkasvirta aikayksikössä on  $I_a$ , kohtiassa on  $N$  hiukkasta pinta-alayksikköä kohden suihkun tulosuunnasta katsottuna ja kohtiosta ulos pääsevien hiukkasten  $b$  hiukkasvirta aikayksikössä on  $R_b$ , tällöin vaikutusala  $\sigma$  määritellään

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a N}. \quad (3.3)$$

Vaikutusalan yksikkö on barn (b), jolle pätee  $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$ . Reaktioiden vaikutusalat vaihtelevat yleensä välillä  $10^{-6} - 10^6 \text{ b}$ . Vertailukohtana keskikokoisen ytimen säde on noin 6 fm, jolloin sen projektiopinta-ala on  $\pi r^2 \approx 1 \text{ b}$ . [6, s. 392]

Reaktiossa syntyviä hiukkasia  $b$  ei yleensä havaita tasaisesti kaikissa suunnissa, vaan hiukkasilla on tietty jakauma  $r(\theta, \phi)$ , missä kulmat  $\theta$  ja  $\phi$  on määritetty poikkeamina suihkun tulosuunnasta. Tällöin hiukkasvirta  $dR_b$  suunnan  $(\theta, \phi)$  pienessä avaruuskulmassa  $d\Omega$  ( $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ ) on

$$dR_b = r(\theta, \phi) \frac{d\Omega}{4\pi},$$

ja tällöin osittainen vaikutusala  $d\sigma$  yhtälön (3.3) mukaisesti on

$$d\sigma = \frac{r(\theta, \phi)}{I_a N} \frac{d\Omega}{4\pi}.$$

Differentiaalinen vaikutusala määritellään

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_a N}$$

ja se kuvaa todennäköisyyttä löytää hiukkanen  $b$  millä tahansa energialla avaruus-  
kulman  $d\Omega$  sisästä. [6, s. 393]

Reaktion vaikutusala  $\sigma$  saadaan integroimalla differentiaalinen vaikutusala yli  
kaikkien kulmien  $\theta$  ja  $\phi$ :

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin\theta \frac{d\sigma}{d\Omega} d\phi d\theta.$$

Reaktion vaikutusala kertoo, kuinka todennäköistä on tuottaa reaktiossa  $X(a, b)Y$   
tuotetta  $Y$  eli toisin sanoen kuinka todennäköistä on havaita hiukkanen  $b$  millä  
tahansa energialla mistä tahansa suunnasta. [6, s. 393]

Kokonaisvaikutusala  $\sigma_t$  kuvailee todennäköisyyttä kaikille mahdollisille reaktioil-  
le, joissa hiukkaset  $a$  ja  $X$  törmäytetään ja lopputuloksena on erilaisia hiukkasia  
 $b$  (ja  $Y$ ) eri energioilla. Kokonaisvaikutusala on lähtöhiukkasten  $a$  ja  $X$  kaikkien  
reaktiovaikutusalojen  $\sigma_i$  summa [6, s. 394]:

$$\sigma_t = \sum \sigma_i.$$

Reaktion vaikutusala riippuu voimakkaasti törmäytettävän hiukkasen  $a$  ener-  
giasta. Reaktion vaikutusalan riippuvuutta energiasta ja kokonaisvaikutusalan  
riippuvuutta reaktiovaikutusaloista on havainnollistettu periaatekuvalla 2.

### 3.3.3 Aktiivisuus

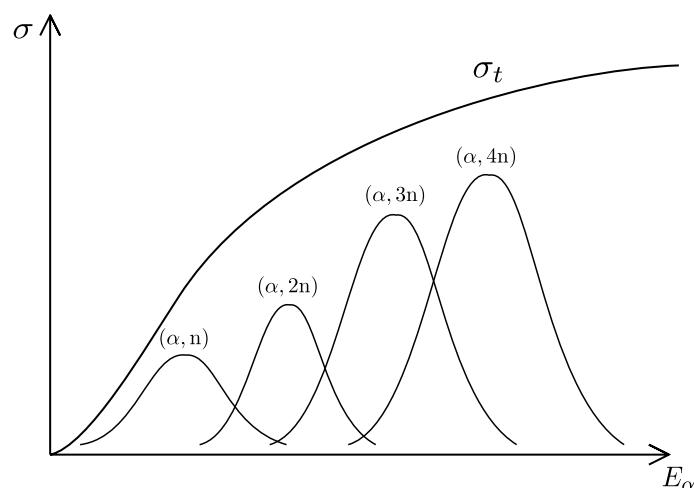
Atomin ydin on radioaktiivinen, jos se spontaanisti muuttaa tilaansa ja samalla lä-  
hettää säteilyä. Tällaisia ytimiä ovat esimerkiksi ytimet, jotka voivat pysyä pitkään  
viritystilallaan (metastabiilit ytimet) tai ytimet, jotka hajoavat kokonaan toisen  
alkuaineen ytimeksi. Yksittäisen ytimen hajoamisen ajankohtaa ei voi ennustaa  
ja radioaktiivinen hajoaminen onkin luonteeltaan tilastollinen suure. Kuvaavia  
suureita ovat hajoamisvakio  $\lambda$  ja puoliintumisaika  $t_{1/2}$ . Hajoamisvakio  $\lambda$  kertoo  
yhden ytimen hajoamisen todennäköisyyden aikayksikköä kohden ja puoliin-  
tumisaika  $t_{1/2}$  kertoo ajan, jossa puolet lähtöajankohdan ytimistä on hajonnut.  
Radioaktiiviselle hajoamiselle pätee [6, s. 161]

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (3.4)$$

missä  $t$  on aika ja  $N_0$  on ytimien määrä alussa ajanhetkellä  $t = 0$ . Hajoamista  
kuvaaville suureille pätee

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$





**Kuva 2** – Vaikutusalan  $\sigma$  riippuvuus törmäytettävän  $\alpha$ -hiukkasen kineettisestä energiasta  $E_\alpha$ . Kuvan esimerkitapauksessa  $\alpha$ -hiukkanen törmää johonkin keskiraskaaseen ytimeen. Energian kasvaessa ytimestä vapautuu useampia neutroneja  $n$ . Kunkin reaktion todennäköisyys (vaikutusala) on suurimmillaan tietyllä energialla ja kokonaisvaikutusala  $\sigma_t$  on reaktiovaikutusalojen summa. [6, s. 419]

Aktiivisuus  $A$  on hajoamisten määrä aikayksikköä kohden:

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (3.5)$$

missä  $A_0 = \lambda N_0$  on aktiivisuus ajanhetkellä  $t = 0$ . Aktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq), joka vastaa yhtä hajoamista sekunnissa. [6, s. 161]

Mittausteknisesti helpointa on mitata hajoamisten lukumäärä  $\Delta N$  tietyllä aikavälillä  $t \rightarrow t + \Delta t$ . Aktiivisuutta määritettäessä on hyvä muistaa, että hajoamisten lukumäärälle  $\Delta N$  ja näytteen aktiivisuudelle  $A$  pätee  $\Delta N = A \Delta t$  vain, jos mitausaika  $\Delta t \ll t_{1/2}$  [6, s. 162].

Aktiivisuuden muuttumista on havainnollistettu kuvassa 3 sivulla 12. Kuvaan on piirretty suhteellinen aktiivisuus  $A/A_0$  ajan  $t$  funktiona. Aktiivisuuden pieneminen kuvan osoittamalla tavalla on perusteluna sille, että tutkittavien materiaalien radioaktiivisia nuklideja kartoittaessa otettiin huomioon vain ytimet, joiden puoliintumisaika  $t_{1/2} > 30$  päivää. Materiaalit ovat olleet kuukaudesta seitsemään vuoteen suojatussa tilassa ja tässä ajassa aktiivisuus on pienentynyt monta kertaluokkaa. On kuitenkin huomattava, että kuvassa on piirretty suhteellinen aktiivisuus  $A/A_0$ , jolloin materiaalin absoluuttinen aktiivisuus  $A$  riippuu alkutilanteen absoluuttisesta aktiivisuudesta  $A_0$ . Tätä piirrettä on havainnollistettu taulukossa 3 eri lähtöaktiivisuuksien  $A_0$ , puoliintumisaikojen  $t_{1/2}$  ja hajoamisaikojen  $t$  avulla.

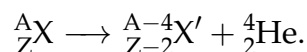
**Taulukko 3** – Aktiivisuuden  $A$  pieneneminen ajan  $t$  funktiona. Seuraamalla eri lähtöaktiivisuuksilla  $A_0$  saman puoliintumisajan  $t_{1/2}$  rivejä, saa kokonaiskuvan siitä, kuinka suuri tuotettu aktiivisuus  $A_0$  pitää olla, jotta aktiivisuus  $A$  on mitattavissa ajan  $t$  jälkeen säteilylle altistumisen loppumisesta. Ajan  $t$  yksikkönä on käytetty päivää (d) ja vuotta (a).

$A_0$	$t_{1/2}$	Aktiivisuus $A$ (Bq) ajan $t$ jälkeen				
		$t = 30$ d	$t = 180$ d	$t = 365$ d	$t = 5$ a	$t = 10$ a
1 kBq	15 d	250	0	0	0	0
1 kBq	30 d	500	16	0	0	0
1 kBq	365 d	945	710	500	31	1
1 kBq	5 a	989	934	871	500	250
1 MBq	15 d	$250 * 10^3$	244	0	0	0
1 MBq	30 d	$500 * 10^3$	$16 * 10^3$	218	0	0
1 MBq	365 d	$945 * 10^3$	$710 * 10^3$	$500 * 10^3$	$31 * 10^3$	977
1 MBq	5 a	$989 * 10^3$	$934 * 10^3$	$871 * 10^3$	$500 * 10^3$	$250 * 10^3$
1 GBq	15 d	$250 * 10^6$	$244 * 10^3$	47	0	0
1 GBq	30 d	$500 * 10^6$	$16 * 10^6$	$218 * 10^3$	0	0
1 GBq	365 d	$945 * 10^6$	$710 * 10^6$	$500 * 10^6$	$31 * 10^6$	$977 * 10^3$
1 GBq	5 a	$989 * 10^6$	$934 * 10^6$	$871 * 10^6$	$500 * 10^6$	$250 * 10^6$

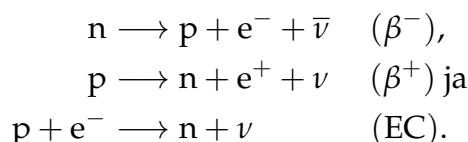
### 3.3.4 Ytimen stabiilius ja hajoamistavat

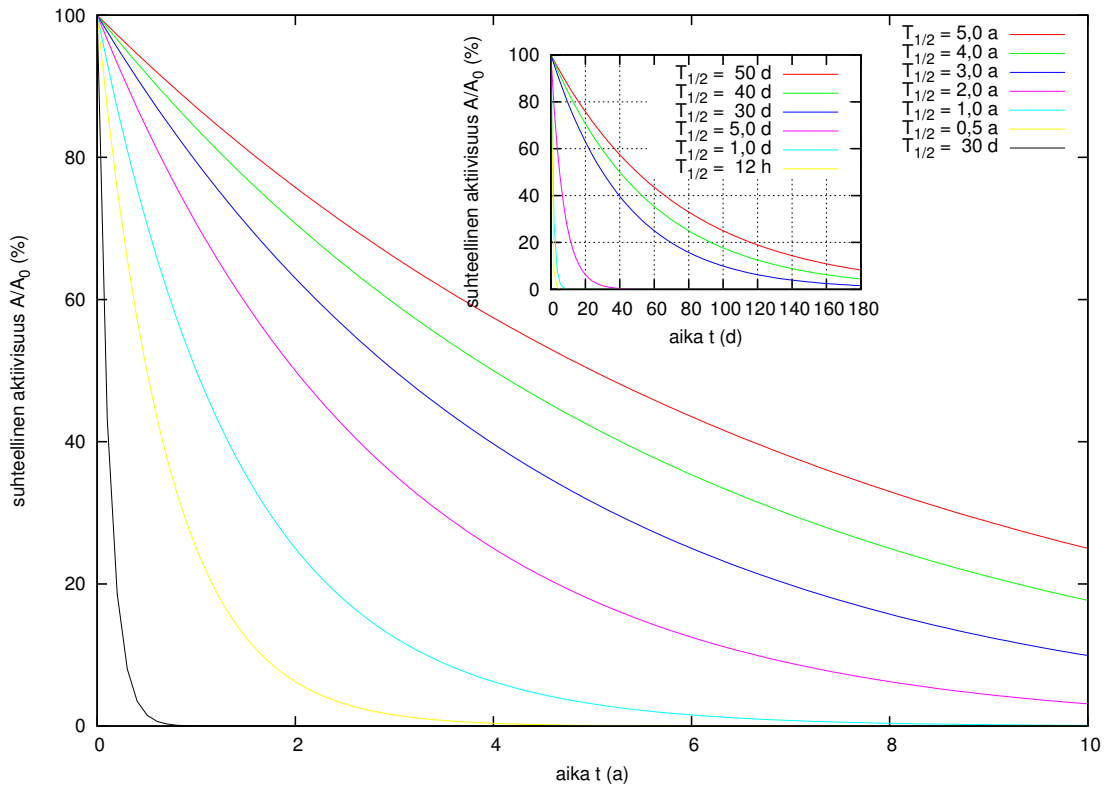
Ydinreaktioissa syntyvät nuklidit ovat radioaktiivisia. Yleisimmät hajoamistavat ovat  $\alpha$ -hajoaminen,  $\beta$ -hajoaminen ja  $\gamma$ -hajoaminen:  $\alpha$ - ja  $\beta$ -hajoamisessa epästabiili ydin lähettää  $\alpha$ - tai  $\beta$ -hiukkasen ulos ytimestä ja näin muuttuu stabiilimmaksi (eri alkuaineen) ytimeksi ja  $\gamma$ -hajoamisessa epästabiili ydin purkautuu viritystilalta kohti perustilaansa lähettämällä  $\gamma$ -säteilyä muuttumatta eri alkuaineen ytimeksi. [6, s. 173]

Aktiivinen ydin  ${}^A_ZX$  lähettää  $\alpha$ -hajoamisessa helium-ytimen  ${}^4_2\text{He}$ :



$\beta$ -hajoamisessa protoni (p) muuttuu neutroniksi (n) tai toisinpäin ja näin olleen ytimen massaluku  $A$  ei muutu. Hajoamisprosessit ovat  $\beta^-$ -hajoaminen,  $\beta^+$ -hajoaminen ja elektronisieppaus (EC):





**Kuva 3** – Suhteellinen aktiivisuus  $A/A_0$  ajan  $t$  funktiona. Funktion käyttö noudattaa yhtälöä (3.5). Eri väreit kuvaavat eri puoliintumisaikoja  $t_{1/2}$ . Mitä suurempi puoliintumisaika nuklidilla on, sitä hitaammin tuotettu aktiivisuus katoaa. Pienessä kuvaajassa ajan  $t$  yksikkönä on päivä (d) ja isossa kuvaajassa vuosi (a).

$\beta^-$ -hajoamisessa emittoituu elektroni  $e^-$  ja antineutriino  $\bar{\nu}$  ja  $\beta^+$ -hajoamisessa positroni  $e^+$  ja neutriino  $\nu$ . Elektronisieppauksessa ydin sieppaa elektronin joltakin alimmista elektronikuorista, jolloin atomi jää virittyneeseen tilaan. Atomin viritystila voi purkautua siten, että ylemmän kuoren elektroni täyttää tyhjän paikan lähettämällä samalla karakteristista röntgensäteilyä ja tämän elektronin tyhjän paikan täyttää joku toinen ylemmän kuoren elektroni jne. Röntgenkvanttien yhteenlaskettu energia vastaa siepatun elektronin sidosenergiaa. Atomin viritystila voi purkautua myös siten, että viritystilan energian saa suoraan joku ulomman kuoren elektroni, joka poistuu atomista (augerelektroni) [7, s. 5].  $\beta$ -hajoamisissa syntyvät elektroni ja positroni muodostuvat hajoamisprosessin aikana. Kun  $\beta^+$ -hajoamisessa syntyvä positroni  $e^+$  hidastuu, tapahtuu elektronin ja positronin annihilaatio, jossa elektroni ja positroni katoavat ja muodostuu kaksi fonia energialtaan 511 keV. [6, s. 276]

Yleensä  $\alpha$ - ja  $\beta$ -hajoamisen sekä useimpien ydinreaktioiden jälkeen ydin on vi-

ritystilassa. Viritystila purkautuu ytimen perustilalle ja samalla emittoituu yksi tai useampia  $\gamma$ -kvantteja, joiden energia on tyypillisesti 0,1-10 MeV [6, s. 327]. Sisäinen konversio (IC) kilpailee  $\gamma$ -hajoamisen kanssa. Sisäisessä konversiossa ytimen viritystilojen välinen energia  $\Delta E$  siirtyy elektronikuorella olevalle elektronille; elektronin kineettinen energia  $T_e$  on

$$T_e = \Delta E - B,$$

missä  $B$  on elektronin sidosenergia. Näin ollen tietyn siirtymän  $\Delta E$  sisäisessä konversiossa emittoituu elektroneja useilla eri energioilla riippuen lähtevän elektronin kuoresta (K, L, M, ...). Sisäisen konversion jälkeen atomi jää viritettyneeseen tilaan, jonka purkautuessa syntyy karakteristista röntgensäteilyä. Kun pitkäikäinen viritystila (metastabiili tila) purkautuu, puhutaan isomeerisesta transitiosta (IT), joka tapahtuu sisäisen konversion tai  $\gamma$ -hajoamisen avulla. [6, s. 342]

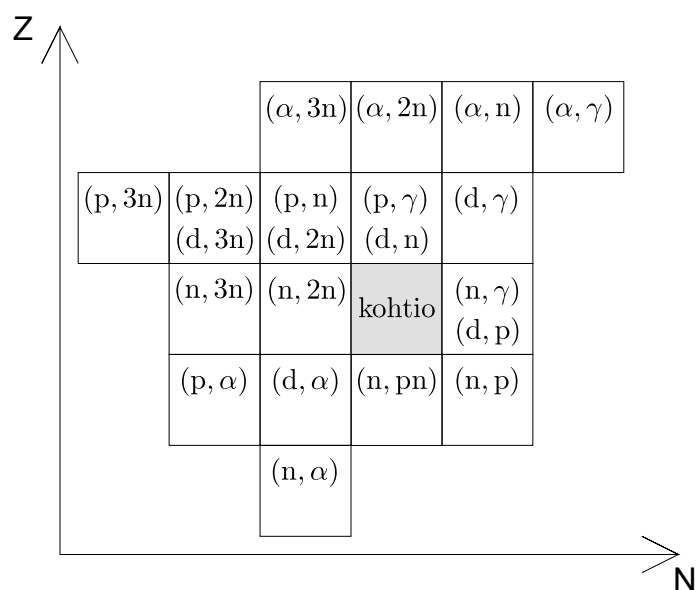
### 3.4 Radioaktiivisten tuotteiden kartoitus ja luokittelu

Kuparin, raudan, alumiinin ja seostealkuaineiden (Liite A ja Liite B) isotoopeille, joiden pitoisuus missä tahansa käytetyssä materiaalissa (esim. 316L-laadun ruostumaton teräs) ylitti promillen, käytiin läpi 21 todennäköistä reaktiota, jotka on esitetty kuvassa 4 sivulla 14. Jokaiselle reaktiolle laskettiin  $Q$ -arvo, jota verrattiin suihkun hiukkasen maksimiliike-energiaan nukleonia kohti  $T_{max}/A$ . Jos  $Q$ -arvo oli negatiivinen, liike-energian tuli reaktion tapahtumiseksi olla suurempi kuin  $Q$ -arvon itseisarvo yhtälön (3.2) mukaisesti. Reaktiotuotteet listattiin alkuaineittain. Jokaisen reaktiotuotteen hajoamisketju stabiiliin ytimeen saakka käytiin läpi. Jos hajoamisketju sisälsi epästabiilin ytimen, jonka puoliintumisaika  $t_{1/2}$  oli suurempi kuin 30 päivää, reaktiotuote listattiin mahdollisesti havaittavien ytimien listaan. Tätä kartoitusprosessia kuvataan tarkemmin raudan avulla kappaleessa 3.4.1. Tiettyssä materiaalipalassa tai osassa havaittavia aktiivisia nuklideja voi ennustaa tarkastelemalla osan sisältämien alkuaineiden listattuja radioaktiivisia tuotteita.

Kaiken kaikkiaan kartoitusprosessissa käytiin läpi 12 alkuainetta, joiden eri isotoopit huomioon ottaen tutkittiin 42 nuklidia. Jokaiselle nuklidille kartoitettiin 21 reaktion reaktiotuotteet ja  $Q$ -arvot. Jokaisen reaktiotuotteen hajoamisketju (nuklidin puoliintumisaika, hajoamistapa ja tytär) stabiiliin ytimeen saakka käytiin läpi ja pitkäikäisten epästabiilien ytimien hajoamisessa syntyvien  $\gamma$ -kvanttien energiat (366 kpl) ja intensiteetit kirjattiin ylös.

#### 3.4.1 Raudan reaktiotuotteiden kartoitus

Raudan stabiileja isotooppeja  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Fe}$  ja  $^{58}\text{Fe}$  löytyy yli promillen pitoisuus kaikista tarkastelluista teräslaaduista. Kuvan 4 mukaiset reaktiot tuottivat raudan

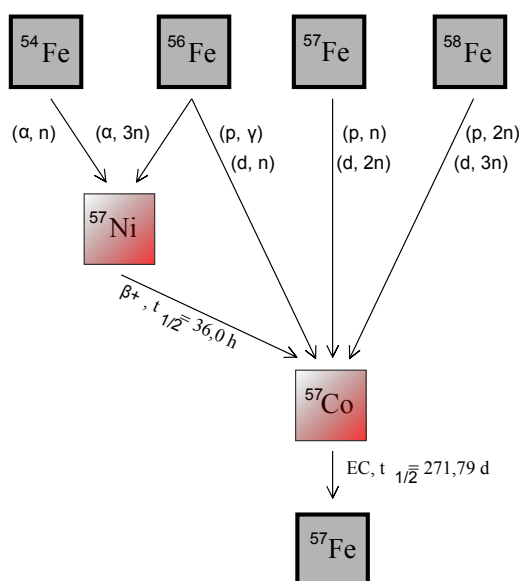


**Kuva 4** – Reaktiot ja reaktiotuotteen sijainti nuklidikartassa suhteessa kohtioyttimeen. Ruutuun on merkitty reaktio, jolla kohtioytimestä pääsee kyseisen ruudun tuotteeseen. Pystyaksellilla on protonien lukumäärä  $Z$  ja vaaka-akselilla neutronien lukumäärä  $N$ . Esimerkiksi  $(\alpha, n)$ -reaktio lisää kohtioyttimeen kaksi protonia ja yhden neutronin, jolloin tuote sijaitsee kuvassa ruudussa, joka on kaksi ruutua ylempänä ja ruudun oikealla kohtioytimestä.

isotoopeista yhteensä 37 eri nuklidia, jotka on esitetty kuvassa 5 sivulla 15. Esimerkkinä on raudan isotoopille  $^{56}\text{Fe}$  esitetty protonisuihkun aiheuttamat reaktiot, reaktioiden  $Q$ -arvot ja reaktiotuotteet taulukossa 4. Kaikkien isotooppien reaktiotuotteista 12 on stabiileja ja 25 epästabiileja. Epästabiili ydin pyrkii stabiilimmaksi hajoamalla kohti stabiilien ytimien laaksoa. Hajoamisten sarjaa kutsutaan nuklidin hajoamisketjuksi. Yksi tällainen hajoamisketju on esitetty kuvassa 6 sivulla 16.

Epästabiilien ytimien puoliintumisajan  $t_{1/2}$  avulla voitiin arvioida, kuinka nopeasti epästabiili ydin katoaa materiaalinäytteestä (ks. kappale 3.3.3). Lyhytikäiset epästabiilit ytimet katoavat nopeasti ja muuttuvat pitkäikäisemmiksi epästabiileiksi ytimiksi tai stabiileiksi ytimiksi. Taulukon 3 mukaisesti hajoamisketjuja tutkiessa otettiin huomioon epästabiilit ytimet, joiden puoliintumisaika  $t_{1/2} > 30$  päivää. Pitkäikäiset epästabiilit ytimet ovat säteilysuojelun kannalta merkittävimmät ongelmat, koska niiden aktiivisuus laskee hitaasti ja siten niiden ympäristöönsä lähettämän hiukkassäteilyn ja  $\gamma$ -säteilyn taso laskee hitaasti. Tällaisia ytimiä raudan tapauksessa löytyi 10 kappaletta. Taulukkoon 5 on listattu raudan reaktiotuotteiden pitkäikäiset epästabiilit ytimet, niiden puoliintumisaika  $t_{1/2}$ , hajoamistapa ja tuotteiden tyttäret. Jos hajoamisketjussa oli vain hyvin lyhytikäisiä nuklideja, oli





**Kuva 6** – Hajoamisketjut. Jokaisella kuvan 5 epästabiililla reaktiotuotteella on oma hajoamisketju. Kuvaan on piirretty nuklidin  $^{57}\text{Ni}$  hajoamisketju, joka kulkee ytimen  $^{57}\text{Co}$  kautta stabiiliksi rautaisotoopiksi  $^{57}\text{Fe}$ . Tässä hajoamisketjussa on paikallistettu pitkäikäinen epästabiili nuklidi  $^{57}\text{Co}$ , jonka hajotessa nuklidiksi  $^{57}\text{Fe}$  havaitaan  $\gamma$ -säteilyä ytimen  $^{57}\text{Fe}$  viritystilojen purkautuessa. Lisäksi kuvaan on piirretty molempia epästabiileja ytimiä tuottavat reaktiot. Puoliintumisajat  $t_{1/2}$  ovat lähteestä [9].

perusteltua olettaa, että kyseisiä nuklideja ei enää mittauksissa löydy.

Epästabiilien ytimien tunnistamiseksi täytyy tarkastella kyseisen nuklidin hajoamisprosessia stabiiliksi ytimeksi. Hajoamisprosessissa syntyy hiukkas- ja/tai sähkömagneettista säteilyä, joka on kyseiselle hajoamiselle karakteristista. Tämän säteilyn havaitsemalla voidaan materiaalinäytteestä tunnistaa epästabiili ydin ja säteilyn määrästä voidaan päätellä epästabiilien nuklidien hajoamisten määrä. Hajoamisten määrästä saadaan kyseisen nuklidin aktiivisuus näytteessä. Epästabiilien nuklidien aktiivisuudet ovat ratkaiseva tekijä materiaalin hävittämistapaa määritettäessä.

Esimerkkinä  $^{57}\text{Co}$  hajoaa elektronisieppauksella (EC) stabiilin raudan  $^{57}\text{Fe}$  viritystiloille ja viritystilojen purkautuessa syntyy  $\gamma$ -säteilyä. Hajoamisessa syntyy myös elektronisieppaukselle ominaisesti röntgensäteilyä (ks. kappale 3.3.4). Taulukossa 6 on listattu  $\gamma$ -säteilyn energiat ja intensiteetti. Intensiteetti  $I$  kertoo kyseisen  $\gamma$ -kvantin todennäköisyyden yhtä hajoamista kohden. Toisin sanoen sadassa nuklidin  $^{57}\text{Co}$  hajoamisessa nähdään keskimäärin 85,6 kappaletta 122 keV  $\gamma$ -kvanttia. Epästabiilin ytimen tunnistamisessa tärkeimpiä ovat intensiivisimmät  $\gamma$ -kvantit. Pienen intensiteetin  $\gamma$ -kvantit eivät todennäköisesti erotu mittausspektristä. Epä-

**Taulukko 5** – Raudan reaktiotuotteiden pitkäikäiset epästabiilit ytimet puoliintumisaikojen  $t_{1/2}$  mukaan järjestettynä. Taulukossa on epästabiilin nuklidin puoliintumisaika  $t_{1/2}$  päivinä (d) tai vuosina (a) ja hajoamistavat (EC = elektronisieppaus).  $^{51}\text{Cr}$  on otettu tarkasteluihin mukaan, vaikka  $t_{1/2} < 30$  päivää, koska puoliintumisaika on niin lähellä ehtoa ja muita vastaavia ytimiä ei tarkastelussa löydetty. Kaikki tyttäret ovat stabiileja. [9]

nuklidi	$t_{1/2}$	hajoamistapa	tytär
$^{53}\text{Mn}$	$3,7 * 10^6$ a	EC	$^{53}\text{Cr}$
$^{59}\text{Ni}$	$7,5 * 10^4$ a	$\beta^+$ , EC	$^{59}\text{Co}$
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	$\beta^-$	$^{60}\text{Ni}$
$^{55}\text{Fe}$	2,73 a	EC	$^{55}\text{Mn}$
$^{54}\text{Mn}$	312,2 d	EC, $\beta^+$	$^{54}\text{Cr}$
$^{57}\text{Co}$	271,79 d	EC	$^{57}\text{Fe}$
$^{56}\text{Co}$	77,26 d	$\beta^+$ , EC	$^{56}\text{Fe}$
$^{58}\text{Co}$	70,86 d	$\beta^+$ , EC	$^{58}\text{Fe}$
$^{59}\text{Fe}$	44,503 d	$\beta^-$	$^{59}\text{Co}$
$^{51}\text{Cr}$	27,70 d	EC	$^{51}\text{V}$

stabiili ydin tunnustetaan havaitsemalla intensiivisimmät  $\gamma$ -kvantit mittausspektristä intensiteettien suhteessa.

Raudan tapauksessa kymmenen epästabiilin ytimen (Taulukko 5) hajoamisessa havaittavan  $\gamma$ -säteilyn intensiivisimmät kvantit on listattu taulukkoon 7. Havaitaan, että tunnistamisen kannalta ongelmalliset epästabiilit ytimet ovat  $^{53}\text{Mn}$  ja  $^{59}\text{Ni}$ , jotka hajoavat stabiilin tyttärensä perustilalle, sekä  $^{55}\text{Fe}$ , jonka ainoa hajoamisessa syntyvä  $\gamma$ -kvantti on intensiteetiltään äärimmäisen heikko. Näiden ytimien hajoatessa elektronisieppauksella, syntyy röntgensäteilyä energia-alueella 5,4-7,4 keV. Tämän säteilyn käyttökelpoisuus nuklidien tunnistamisessa selviää käytännön mittauksissa.

Epästabiilien ytimien hajoamisketjuja voidaan käyttää myös ennaltaehkäisevässä säteilysuojelutyössä. Kuva 6 kertoo nuklidin  $^{57}\text{Co}$  tapauksessa mahdolliset ytimen alkuperät. Jos tuotteena syntyy jokin säteilysuojelun kannalta ikävä nuklidi, niin hajoamisketjua taaksepäin seuraamalla saadaan selville, mistä kohtioalkuaineesta tai -isotoopista se on peräisin. Mahdollisuuksien mukaan kyseistä alkuainetta tai isotooppia pyritään välttämään käytettävissä materiaaleissa tai edes pienentämään sen pitoisuutta.



**Taulukko 6** – Nuklidin  $^{57}\text{Co}$  hajoamisessa syntyvän  $\gamma$ -säteilyn energiat ja intensiteetit  $I$  [8].

$E_\gamma$ (keV)	$I$ (%)
14,4	9,16
122,1	85,60
136,5	10,68
230,4	$4 * 10^{-4}$
339,7	0,004
352,3	0,003
366,8	0,001
570,1	0,016
692,4	0,149
706,5	0,005

**Taulukko 7** – Raudan epästabiliin reaktiotuotteiden intensiivisimmät  $\gamma$ -kvantit. Sarakkeissa hajoava epästabili ydin, stabiilin tuotteen viritystilojen purkautuessa havaittavan  $\gamma$ -säteilyn energia  $E_\gamma$  ja  $\gamma$ -kvantin intensiteetti  $I$  [8]. Tähdellä (\*) merkityt nuklidit pyritään havaitsemaan elektronisieppauksen seurauksena syntyvän röntgensäteilyn avulla.

nuklidi	$E_\gamma$ (keV)	$I$ (%)
$^{53}\text{Mn}$	ei ole*	
$^{59}\text{Ni}$	ei ole*	
$^{60}\text{Co}$	1173,2	99,85
	1332,5	99,98
$^{55}\text{Fe}$	126,0*	$1,3 * 10^{-7}$
$^{54}\text{Mn}$	834,8	99,98
$^{57}\text{Co}$	122,1	85,60
	136,5	10,68
	14,4	9,16
$^{56}\text{Co}$	846,8	99,94
	1238,3	66,9
	2598,5	17,3
$^{58}\text{Co}$	810,8	99,45
$^{59}\text{Fe}$	1099,2	56,5
	1291,6	43,2
$^{51}\text{Cr}$	320,1	9,91

### 3.4.2 Syntyvät radioaktiiviset nuklidit materiaaleittain

Käytöstä poistetut osat ovat pääosin kupari-, teräs- ja alumiiniosia. Ruostumattoman teräksen ja alumiinin osalta on esitetty käytetyimmät laadut ja niiden isotooppikoostumukset liitteissä A ja B. Isotoopeille, joiden pitoisuus on yli promille, on tehty edellisen kappaleen mukainen käsittely (ks. 3.4.1 Raudan reaktiotuotteiden kartoitus).

Ruostumattoman teräksen laadut 304 ja 304L (ASTM-standardi) ovat promillen rajan ylittävien isotooppien koostumuksen osalta identtiset (nuklidin  $^{64}\text{Ni}$  pitoisuus laadussa 304 on 0,10% ja laadussa 304L 0,09%). Myös teräslaatu 316 ja 316L isotooppikoostumus on identtinen. Tämän vuoksi teräsosista mahdollisesti löytyvät radioaktiiviset nuklidit on taulukoitu kolmeen taulukkoon (Taulukot 8, 9 ja 10 sivuilla 20, 21 ja 22), joissa ensimmäisessä on yhdistetty laadut 304 ja 304L sekä toisessa ja kolmannessa laadut 316 ja 316L.

Alumiiniosista mahdollisesti löytyvät radioaktiiviset isotoopit on taulukoitu kahden taulukkoon (Taulukot 11 ja 12 sivuilla 23 ja 24), joissa toisessa on alumiinilaatu 6082 ja toisessa laatu 7075 (IADS-luokka). Kupariosien isotoopit on taulukoitu taulukkoon 13 sivulla 24.

### 3.4.3 Säteilyn asettamat vaatimukset mittauslaitteistolle

Kiihdytinlaboratorion käytöstä poistetuista osista mahdollisesti löydettäviä epästabiileja nuklideja on suurehko määrä (Taulukot 8-13). Liitteessä C olevan virallisen listauksen annosnopeuksien perusteella osat ovat olleet selvästi aktiivisia ja odotettavissa on helposti mitattavia aktiivisuuksia.

Lähtökohdaksi nuklidien tunnistamisessa on otettu  $\gamma$ -säteilyn havaitseminen ja sen energiaspektrin määrittäminen. Epästabiilien nuklidien hajoamisissa  $\gamma$ -energiat vaihtelevat välillä 14,4 keV - 3,3 MeV kaikki materiaalit huomioonottaen. Lisäksi erityisesti ruostumattoman teräksen ja alumiinin tapauksessa oletettavasti löydetään hyvin monia epästabiileja nuklideja näytteestä. Suuresta isotooppien kirjosta seuraa, että  $\gamma$ -energiat voivat olla hyvin lähellä toisiaan: esimerkiksi alumiiniosissa (7075) nuklidien  $^{65}\text{Zn}$  ja  $^{46}\text{Sc}$   $\gamma$ -kvanttien (1115,5 keV ja 1120,5 keV) energiaero on 5 keV ja teräsosissa nuklidin  $^{57}\text{Co}$  kahden  $\gamma$ -kvantin energia eroaa vain 14,4 keV. Jo nämä huomiot vaativat, että säteilyilmaisimen energia-alueen tulee olla laaja ( $\sim 0$ -3,3 MeV) ja energiarésoluution erinomainen. Vaihtoehtoina ovat tuikeilmaisimet ja puolijohdeilmaisimet. Ilmaisimien antama data esitetään siten, että  $x$ -akselilla on pulssin korkeus (energia) ja  $y$ -akselilla pulssien lukumäärä. Energiarésoluution ollessa suurempi kuin  $\gamma$ -kvanttien energioiden erotus, kvanttien antamat piikit spektrissä sulautuvat yhteen. Tuikeilmaisimilla energiarésoluutio on karkeasti kokoluokkaa 10-40 keV ja puolijohdeilmaisimista Ge-ilmaisimet

**Taulukko 8** – Ruostumattoman teräksen laaduista 304 ja 304L valmistetuista osista mahdollisesti löytyvät radioaktiiviset nuklidit. Taulukossa on epästabiilin nuklidin puoliintumisaika  $t_{1/2}$  päivinä (d) tai vuosina (a) [9], hajoamistavat  $H$  (EC = elektronisieppaus), nuklidin tytär, intensiivisimpien  $\gamma$ -kvanttien energiat  $E_\gamma$  ja niiden intensiteetit  $I$  [8]. Kaikki tyttäret ovat stabiileja. Tähdellä (\*) merkityt nuklidit pyritään havaitsemaan elektronisieppauksen seurauksena syntyvän röntgensäteilyn avulla.

nuklidi	$t_{1/2}$	$H$	tytär	$E_\gamma$ (keV)	$I$ (%)
$^{65}\text{Zn}$	244,3 d	$\beta^+$ , EC	$^{65}\text{Cu}$	1115,5	50,6
$^{63}\text{Ni}$	100 a	$\beta^-$	$^{63}\text{Cu}$	ei ole	
$^{59}\text{Ni}$	$7,5 * 10^4$ a	$\beta^+$ , EC	$^{59}\text{Co}$	ei ole*	
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	$\beta^-$	$^{60}\text{Ni}$	1332,5 1173,2	100,0 99,9
$^{58}\text{Co}$	70,86 d	$\beta^+$ , EC	$^{58}\text{Fe}$	810,8	99,5
$^{57}\text{Co}$	271,79 d	EC	$^{57}\text{Fe}$	136,5 122,1 14,4	10,7 85,6 9,2
$^{56}\text{Co}$	77,26 d	$\beta^+$ , EC	$^{56}\text{Fe}$	3253,4 2598,5 2034,8 1771,4 1238,3 1037,8 846,8	8,12 17,3 7,9 15,5 66,9 14,2 99,9
$^{59}\text{Fe}$	44,503 d	$\beta^-$	$^{59}\text{Co}$	1291,6 1099,2	43,2 56,5
$^{55}\text{Fe}$	2,73 a	EC	$^{55}\text{Mn}$	126,0*	$< 10^{-6}$
$^{54}\text{Mn}$	312,2 d	EC, $\beta^+$	$^{54}\text{Cr}$	834,8	100,0
$^{53}\text{Mn}$	$3,7 * 10^6$ a	EC	$^{53}\text{Cr}$	ei ole*	
$^{51}\text{Cr}$	27,70 d	EC	$^{51}\text{V}$	320,1	9,9
$^{50}\text{V}$	$1,4 * 10^{17}$ a	EC (83%) $\beta^-$ (17%)	$^{50}\text{Ti}$ $^{50}\text{Cr}$	1553,8 783,3	83,0 17,0
$^{49}\text{V}$	330 d	EC	$^{49}\text{Ti}$	ei ole*	
$^{26}\text{Al}$	$7,16 * 10^5$ a	$\beta^+$ , EC	$^{26}\text{Mg}$	1808,7 1129,7	99,8 2,5
$^{14}\text{C}$	5730 a	$\beta^-$	$^{14}\text{N}$	ei ole	

**Taulukko 9** – Ruostumattoman teräksen laaduista 316 ja 316L valmistetuista osista mahdollisesti löytyvät radioaktiiviset nuklidit taulukon 8 epästabiilien nuklidien lisäksi. Taulukossa on epästabiilin nuklidin puoliintumisaika  $t_{1/2}$  tunteina (h), päivinä (d) tai vuosina (a) [9], hajoamistavat  $H$  (EC = elektronisieppaus, IT = isomeerinen transito), epästabiilin nuklidin tytär, tyttären stabiilius  $S$ , intensiivisimpien  $\gamma$ -kvanttien energiat  $E_\gamma$  ja niiden intensiteetit [8]. Tähdellä (\*) merkityt nuklidit pyritään havaitsemaan elektronisieppauksen seurauksena syntyvän röntgensäteilyn avulla.

\*\*=Yksi ytimen  $^{103}\text{Rh}$  viritystiloista ( $E_\gamma = 39,8 \text{ keV}$ ) on metastabiili tila, jonka  $t_{1/2} = 56,1$  minuuttia.

nuklidi	$t_{1/2}$	$H$	tytär	$S$	$E_\gamma$ (keV)	$I$ (%)
$^{103}\text{Ru}$	39,35 d	$\beta^-$	$^{103}\text{Rh}$	stabiili**	39,7	0,1
					497,1	91,0
					610,3	5,8
$^{99}\text{Tc}$	$2,1 * 10^5$ a	$\beta^-$	$^{99}\text{Ru}$	stabiili	89,5	$< 10^{-3}$
$^{98}\text{Tc}$	$4,2 * 10^6$ a	$\beta^-$	$^{98}\text{Ru}$	stabiili	652,4	100
					745,4	102
$^{97}\text{Tc}$	92,2 d	IT (96,06%) EC (3,94%)	$^{97}\text{Tc}$	$4,0 * 10^6$ a	96,5	0,3
			$^{97}\text{Mo}$	stabiili	ei ole*	
$^{95}\text{Tc}$	$4,0 * 10^6$ a	EC	$^{97}\text{Mo}$	stabiili	ei ole*	
			$^{95}\text{Mo}$	stabiili	765,8	93,8
$^{95}\text{Tc}$	20 h	EC	$^{95}\text{Mo}$	stabiili	947,7	2,0
					1073,7	3,7
					38,9	$< 10^{-4}$
	60 d	IT (3,88%) EC (96,12%)	$^{95}\text{Tc}$	20 h	582,1	30,0
			$^{95}\text{Mo}$	stabiili	786,2	8,7
					820,6	4,7
				835,1	26,6	

**Taulukko 10** – Ruostumattoman teräksen laaduista 316 ja 316L valmistetuista osista mahdollisesti löytyvät radioaktiiviset nuklidit taulukoiden 8 ja 9 epästabiilien nuklidien lisäksi. Taulukossa on epästabiilin nuklidin puoliintumisaika  $t_{1/2}$  tunteina (h), päivinä (d) tai vuosina (a) [9], hajoamistavat  $H$  (EC = elektronisieppaus, IT = isomeerinen transitio), epästabiilin nuklidin tytär, tyttären stabiilius  $S$ , intensiivisimpien  $\gamma$ -kvanttien energiat  $E_\gamma$  ja niiden intensiteetit  $I$  [8]. Tähdellä (\*) merkityt nuklidit pyritään havaitsemaan elektronisieppauksen tai sisäisen konversion seurauksena syntävän röntgensäteilyn avulla.

\*\*=Ytimellä  $^{93}\text{Nb}$  on pitkäikäinen viritystila:  $E_\gamma = 30,8$  keV ja  $t_{1/2} = 16,13$  a.

nuklidi	$t_{1/2}$	$H$	tytär	$S$	$E_\gamma$ (keV)	$I$ (%)
$^{93}\text{Mo}$	$3,5 * 10^3$ a	EC	$^{93}\text{Nb}$	stabiili**	ei ole	
$^{95}\text{Nb}$	34,97 d 86,6 h	$\beta^-$	$^{95}\text{Mo}$	stabiili	765,8	99,8
		IT (94,40%)	$^{95}\text{Nb}$	34,97 d	235,7	24,8
		$\beta^-$ (5,60%)	$^{95}\text{Mo}$	stabiili	204,1	2,3
$^{94}\text{Nb}$	$2 * 10^4$ a	$\beta^-$	$^{94}\text{Mo}$	stabiili	582,1	0,05
					702,7	99,8
$^{93}\text{Nb}$	16,13 a	IT (100,00%)	$^{93}\text{Nb}$	stabiili	871,1	99,9
					30,8*	$< 10^{-3}$
$^{92}\text{Nb}$	$3,6 * 10^7$ a	EC (100,00%)	$^{92}\text{Zr}$	stabiili	561,1	134
$^{91}\text{Nb}$	60,9 d 680 a	IT (96,60%) EC (3,40%) $\beta^+$ , EC	$^{91}\text{Nb}$	680 a	934,5	100
			$^{91}\text{Zr}$	stabiili	104,6	0,6
			$^{91}\text{Zr}$	stabiili	1204,7	2,0
$^{95}\text{Zr}$	64,0 d	$\beta^-$	$^{95}\text{Nb}$	86,6 h	724,2	44,3
$^{93}\text{Zr}$	$1,5 * 10^6$ a	$\beta^-$	$^{93}\text{Nb}$	stabiili**	756,7	54,4
					ei ole	

**Taulukko 11** – Alumiinilaadusta 6082 valmistetuista osista mahdollisesti löytyvät radioaktiiviset nuklidit. Taulukossa on epästabiilin nuklidin puoliintumisaika  $t_{1/2}$  minuutteina (m), päivinä (d) tai vuosina (a) [9], hajoamistavat  $H$  (EC = elektronisieppaus), tyttären stabiilius  $S$ , intensiivisimpien  $\gamma$ -kvanttien energiat  $E_\gamma$  ja niiden intensiteetit  $I$  [8]. Tähdellä (\*) merkityt nuklidit pyritään havaitsemaan elektronisieppauksen seurauksena syntyvän röntgensäteilyn avulla.

nuklidi	$t_{1/2}$	$H$	tytär	$S$	$E_\gamma$	$I$
$^{68}\text{Ge}$	270,82 d	EC	$^{68}\text{Ga}$	67,63 m	ei ole*	
$^{68}\text{Ga}$	67,63 m	$\beta^+$ , EC	$^{68}\text{Zn}$	stabiili	1077,3	3,2
$^{65}\text{Zn}$	244,3 d	$\beta^+$ , EC	$^{65}\text{Cu}$	stabiili	1115,5	50,6
$^{59}\text{Ni}$	$7,5 * 10^4$ a	$\beta^+$ , EC	$^{59}\text{Co}$	stabiili	ei ole*	
$^{58}\text{Co}$	70,86 d	$\beta^+$ , EC	$^{58}\text{Fe}$	stabiili	810,8	99,5
$^{57}\text{Co}$	271,79 d	EC	$^{57}\text{Fe}$	stabiili	14,4	9,2
					122,1	85,6
					136,5	10,7
$^{56}\text{Co}$	77,26 d	$\beta^+$ , EC	$^{56}\text{Fe}$	stabiili	846,8	99,9
					1037,8	14,2
					1238,3	66,9
					1771,4	15,5
					2034,8	7,9
					2598,5	17,3
					3253,4	8,1
$^{55}\text{Fe}$	2,73 a	EC	$^{55}\text{Mn}$	stabiili	126,0*	$1,3 * 10^{-7}$
$^{54}\text{Mn}$	312,2 d	EC, $\beta^+$	$^{54}\text{Cr}$	stabiili	834,8	100,0
$^{53}\text{Mn}$	$3,7 * 10^6$ a	EC	$^{53}\text{Cr}$	stabiili	ei ole*	
$^{51}\text{Cr}$	27,70 d	EC	$^{51}\text{V}$	stabiili	320,1	9,9
$^{50}\text{V}$	$1,4 * 10^{17}$ a	$\beta^-$ (17%) EC (83%)	$^{50}\text{Cr}$	stabiili	783,3	17,0
			$^{50}\text{Ti}$	stabiili	1553,8	83,0
$^{49}\text{V}$	330 d	EC	$^{49}\text{Ti}$	stabiili	ei ole*	
$^{26}\text{Al}$	$7,16 * 10^5$ a	$\beta^+$ , EC	$^{26}\text{Mg}$	stabiili	1129,7	2,5
					1808,7	99,8
$^{22}\text{Na}$	2,603 a	EC, $\beta^+$	$^{22}\text{Ne}$	stabiili	1274,5	99,9

**Taulukko 12** – Alumiinilaadusta 7075 valmistetuista osista mahdollisesti löytyvät radioaktiiviset nuklidit taulukon 11 nuklidien lisäksi. Taulukossa on epästabiilin nuklidin puoliintumisaika  $t_{1/2}$  päivinä (d) tai vuosina (a) [9], hajoamistavat  $H$  (EC = elektronisieppaus), intensiivisimpien  $\gamma$ -kvanttien energiat  $E_\gamma$  ja niiden intensiteetit  $I$  [8]. Kaikki tyttäret ovat stabiileja.

nuklidi	$t_{1/2}$	$H$	tytär	$E_\gamma$ (keV)	$I$ (%)
$^{63}\text{Ni}$	100 a	$\beta^-$	$^{63}\text{Cu}$	ei ole	
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	$\beta^-$	$^{60}\text{Ni}$	1173,2 1332,5	99,9 100,0
$^{46}\text{Sc}$	83,82 d	$\beta^-$	$^{46}\text{Ti}$	889,3 1120,5	100,0 100,0
$^{45}\text{Ca}$	163 d	$\beta^-$	$^{45}\text{Sc}$	12,5	$< 10^{-5}$

**Taulukko 13** – Puhtaasta kuparista valmistetuista osista mahdollisesti löytyvät radioaktiiviset nuklidit. Taulukossa on epästabiilin nuklidin puoliintumisaika  $t_{1/2}$  päivinä (d) tai vuosina (a) [9], hajoamistavat  $H$  (EC = elektronisieppaus), intensiivisimpien  $\gamma$ -kvanttien energiat  $E_\gamma$  ja niiden intensiteetit  $I$  [8]. Kaikki tyttäret ovat stabiileja.

nuklidi	$t_{1/2}$	$H$	tytär	$E_\gamma$ (keV)	$I$ (%)
$^{63}\text{Ni}$	100 a	$\beta^-$	$^{63}\text{Cu}$	ei ole	
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	$\beta^-$	$^{60}\text{Ni}$	1173,2 1332,5	99,9 100,0
$^{65}\text{Zn}$	244,3 d	$\beta^+, \text{EC}$	$^{65}\text{Cu}$	1115,5	50,6

pääsevät 1-2 keV resoluutioon. Näin ollen energiaresoluutio on karsiva tekijä tuikeilmaisimien kohdalla.

Oman haasteensa luovat elektronisieppauksella hajoavat ytimet, jotka eivät jätä tyttären ydintä virittyneeseen tilaan. Tytäratomi sen sijaan on viritystilassa ja sen purkautuessa havaitaan karakteristista röntgensäteilyä energia-alueella 4-20 keV. Tämän säteilyn käyttökelpoisuus nuklidien tunnistamiseen on kyseenalainen suuren nuklidikirjon vuoksi: useat  $\beta^+$ -hajoavat nuklidit hajoavat myös elektronisieppauksella ja tytärtyimien viritystilat purkautuvat  $\gamma$ -hajoamisen lisäksi sisäinen konversion avulla, josta seuraa saman energia-alueen röntgensäteilyä. Siten fotonien määrä energia-alueella 4-20 keV voi olla hyvin suuri ja yksittäiset energiapiikit sulautuvat yhdeksi jatkumoksi.

Lisäksi on mahdollisesti tuotettu  $\beta^-$ -hajoavia ytimiä ( $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{45}\text{Ca}$  ja  $^{14}\text{C}$ ), joita ei voida havaita  $\gamma$ - tai röntgensäteilyn avulla (tytär perustilalla tai säteilyn intensiteetti mitätön). Yhteenvetona voidaan sanoa, että suurin osa epästabiileista ytimistä on havaittavissa, mutta muutaman ytimen kohdalla tarvittanee erikoismenetelmiä pitoisuuksien määrittämiseksi.

Näytteen mittausaika asettaa myös ehdon ilmaisimen tehokkuudelle. Näytteen mittausajan tulisi pysyä kohtuullisena ja yhdessä mittauksessa pitäisi havaita nuklidin tunnistamiseksi suurehko määrä ( $\sim 50000$ ) kyseiseen nuklidiin yhdistettävissä olevia tapahtumia. Jos tapahtumien määrä on  $N$ , niin

$$N = \frac{\Omega}{4\pi} * A * t * I * \epsilon,$$

missä tekijä  $\Omega/4\pi$  on näytteestä ilmaisimen suuntaan lähteneen säteilyn osuus kaikesta säteilystä,  $A$  on nuklidin aktiivisuus,  $t$  on mittausaika,  $I$  on havaitun  $\gamma$ -kvantin intensiteetti kyseisen nuklidin hajoamistapahtumassa ja  $\epsilon$  kertoo ilmaisimen tehokkuudesta. Ilmaisimen tehokkuus riippuu mm.  $\gamma$ -säteilyn energiasta ja ilmaisimen koosta ja se kertoo, kuinka suuren osan tapahtumista ilmaisimella rekisteröityä kaikista mahdollisista tapahtumista. Suuntaa antavana karkeana arviona voidaan olettaa avaruuskulmatekijäksi  $\Omega/4\pi = 0,000625$ , intensiteetiksi  $I = 5\%$ , tehokkuudeksi  $\epsilon = x\%$  ja aktiivisuudeksi  $A = 70 \text{ kBq}$  ( $= 0,1 * ALI_{min,k}$ ,  $k=^{60}\text{Co}$ , ks. kappale 2.1), jolloin

$$\begin{aligned} t &= \frac{N}{\frac{\Omega}{4\pi} * A * I} * \frac{1}{\epsilon} \\ &= \frac{50000}{0,000625 * 70 \text{ kBq} * 0,05} * \frac{1}{x * 0,01} \\ &\approx \frac{230000}{x} \text{ sekuntia} \end{aligned}$$



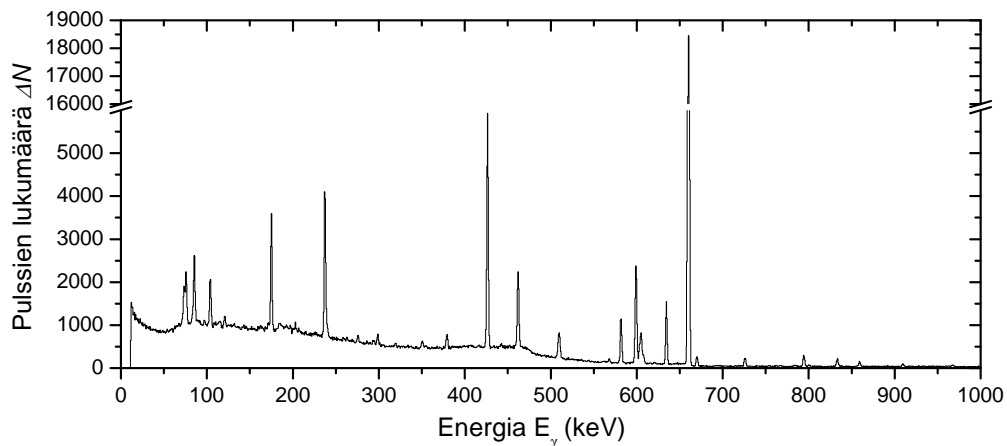
eli esimerkiksi tehokkuudella  $\epsilon = 10\%$  mittausajaksi tulisi noin 6,5 tuntia.

Optimaalisessa mittauslaitteistossa olisi yksi ilmaisimien, jolla voisi mitata ja tunnistaa kaikki radioaktiiviset nuklidit. Epästabiilien ytimien havaitsemiseen parhaalta vaihtoehdolta vaikuttaa Ge-puolijohdeilmaisimien, kun otetaan huomioon vaatimukset energia-alueesta, energiaresoluutiosta ja tehokkuudesta. Näitä tekijöitä punnitsemalla tulee valita optimaalinen ilmaisimen tyyppi, koko ja oheislaitteisto.

## 4 Mittauslaitteisto ja -menetelmä

### 4.1 Mittauslaitteisto ja spektri

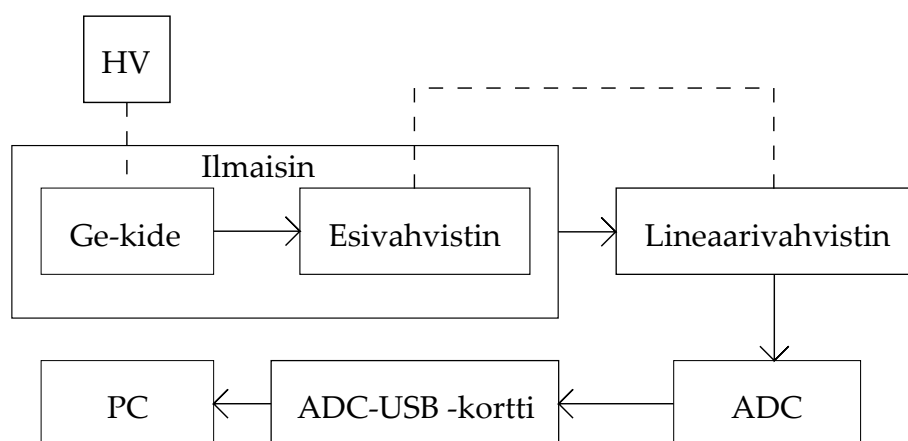
Mittauslaitteiston tehtävänä on havaita  $\gamma$ -säteilyä ja tallentaa säteilyn kvanttien energiajakauma eli spektri. Ilmaisimeen osuneen säteilyn aiheuttaman virtapulssin sisältämän varauksen määrä on suoraan verrannollinen säteilykvantin energiaan. Nämä virtapulssit muutetaan jännitepulssiksi, joiden amplitudit ovat suoraan verrannollisia säteilyn energiaan. Näiden jännitepulssien amplitudien tallentaminen ja suuruusjärjestykseen laittaminen on laitteiston muiden osien tehtävä. Näin saatu spektri analysoidaan eri ohjelmistoilla säteilevän näytteen nuklidien tunnistamiseksi ja niiden aktiivisuuden määrittämiseksi. Esimerkki mitatusta spektristä on kuvassa 7.



**Kuva 7** – Osasta IG-094 13.6.2011 mitattu spektri. Spektristä on esitetty energia-alue 0-1000 keV.

Spektrissä olevien piikkien muoto on pääosin symmetrinen (gaussinen), jonka lisäksi piikeissä voi olla pienemmän energian puolella häntämäinen jatke. Puoliarvoveveys (FWHM) on piikin leveyttä kuvaava parametri ja määritelmän mukaan se on piikin leveys korkeussuunnassa puolivälissä piikkiä [7, s. 116]. Puoliarvoveveyttä käytetään Ge-ilmaisimien resoluution arvona. Resoluutio kuvaa ilmaisimen kykyä erotella eri energian säteilyä. Mitä pienempi puoliarvoveveys on, sitä useampi lähes saman energian piikki erottuu toisistaan, ja siten sitä parempi on ilmaisimen resoluutio.

Tämän työn mittauksissa käytetty laitteisto koostui Ge-ilmaisimesta, sähköisestä jäädyttimestä, korkeajännitelähteestä (HV-lähde), lineaarivahvistimesta, ADC-muuntimesta, ADC-USB-kortista ja tietokoneesta. Laitteiston osat on esitelty kuvassa 8.



**Kuva 8** – Mittauslaitteiston kokoonpano. Yhtenäinen viiva kuvaa signaalin siirtymisreittiä ja katkonainen viiva näyttää ilmaisimen kiteen ja esivahvistimen käyttöjännitteen lähteen.

Ilmaisimena oli Ortec:n PopTop-ilmaisimien (tunniste: HEGe Coaxial Detector ilmaisimien, 2008-00887, 4527, YS150). Ge-ilmaisimien on puolijohdeilmaisimien, jonka toiminta perustuu eri puolijohdetyyppien rajapinnan ominaisuuksiin. Rajapintaan muodostuu tyhjennysalue, jota voidaan suurentaa kytkemällä kiteen yli estojännite. PopTop-ilmaisimella käyttöjännite oli +2700 volttia ja HV-lähteenä oli Ortec:n malli 459 (sarjanumero: 111·20851·1, 81312·8523). Kiteen tyhjennysalue on säteilyä havaitseva alue. Tämä tilavuus vastaa lähes sylinterimäisen kiteen tilavuutta lukuunottamatta keskelle porattua elektrodireikää sekä pinnoilla olevia kontakteja, joita kutsutaan kuolleiksi kerroksiksi. Lisäksi toimiakseen puolijohdeilmaisimien täytyy jäädyttää nestemäisen tyyppien lämpötilaan. Ilmaisimien jäädytyksestä vastasi Ortec:n X-Cooler II (tunniste: Jäähdytint / Detector, 2007-01264, 4527, YS150), joka oli sähkökäyttöinen jäädytint.

Gammasäteilyn pääasialliset vuorovaikutukset kiteen kanssa ovat fotosähköinen absorptio, Comptonin sironta ja parinmuodostus. Gammakvanttien energia siirtyy eri vuorovaikutuksien avulla elektroneille, jotka kerätään kiteen yli olevan estojännitteen avulla elektrodeille. Kerätty varaus on verrannollinen  $\gamma$ -kvantin energiaan ja tämä heikko virtapulssi muunnetaan esivahvistimessa jännitepulssiksi. Esivahvistin sijaitsi ilmaisimen kuoren sisällä.

Lineaarivahvistin oli Ortecin malli 572 (sarjanumero: 111·20851·1, 81312·8633). Lineaarivahvistimen tehtävänä oli muokata ja vahvistaa esivahvistimen signaalia. Esivahvistimesta tullut muutamien millivolttien signaali vahvistettiin noin tuhattaiseksi (välille 0-10 V). Lineaarivahvistimen käyttöparametrit ovat taulukossa 14.

**Taulukko 14** – Lineaarivahvistimen ja AD-muuntimen parametrit. AD-muuntimen etupaneelissa oli neljän parametrin säädöt kytkinsarjana. Kytkinten asento on ilmoitettu kirjaimella (l=vasen, r=oikea) ylhäältä alaspäin: esimerkiksi parametrin RTP kytkimet olivat etupaneelissa ylhäältä alaspäin vasemmalla, oikealla, oikealla, oikealla, vasemmalla ja vasemmalla (merkintä l/r/r/r/l/l).

laite	parametri	arvo
lineaarivahvistin	gain	5,80
	coarse gain	500
	shaping time	3 $\mu$ s
	BLR auto	päällä
	delay	pois päältä
	input	positiivinen
	output	unipolaarinen (DC-taso = 0 V)
AD-muunnin	output bits	12
	pulse	päällä
	range	r/r/r/r
	b.bias	r/r/r/r
	RTP	l/r/r/r/l/l = 7 $\mu$ s
	delay	l/l/l/l = 0 $\mu$ s
	window, low	0,04 V
	window, high	c.cc (> 10 V)

AD-muunnin oli Daresbury Laboratoryn EC643 4K Pulse Height ADC (tunniste: A-MP 202394-2, 79-19). AD-muuntimen päätehtävä on muuntaa analoginen signaali digitaaliseksi. Muunnin muuntaa analogisen pulssin korkeuden digitaaliseksi

tunnisteeksi (numeroksi); mitä suurempi on sisääntulevan pulssin jännite, sitä suurempi on numero. Sisääntulevan pulssin raja-arvoiksi oli säädetty 0,04 voltia ja ylärajaksi yli 10 voltia. Muuntimessa oli käytössä 3840 kanavaa eli lokeroa, johon lajitella pulssit (numerot). Lineaarivahvistimen vahvistus oli säädetty siten, että noin 2600 keV kvantin aiheuttama pulssi tallennettiin noin kanavaan 3830. Näin ollen ilmaisinsysteemillä pystyttiin mittaamaan spektrejä, joiden energiaskaala oli noin 0-2600 keV. AD-muuntimen käyttöparametrit ovat taulukossa 14.

ADC-USB -kortti muuntii AD-muuntimen signaalin siten, että tietokone ja datankeräysohjelma Grain pystyvät lukemaan ja tallentamaan sen. Mittausdatan analysointi suoritettiin RadWare-ohjelmistopakettien ohjelmilla (versio: 05.1, julkaisu: 1.JYU). Pakettiin kuuluu gf3-, source-, effit- ja encal-ohjelmat. Spektrin käsittely ja piikkien sovitukset tehtiin gf3-ohjelmalla, tehokkuuskalibrointi ohjelmilla source ja effit sekä energiakalibraatio encal-ohjelmalla. Nuklidien aktiivisuudet laskettiin lopulta Excel-ohjelmalla.

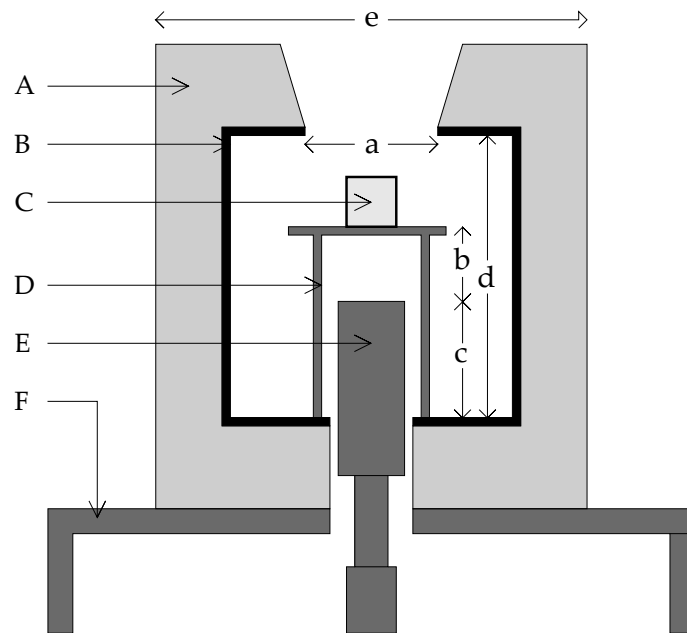
Mittaukset suoritettiin taustasäteilyltä suojaavassa suojassa, jonka rakenne on esitetty kuvassa 9 sivulla 30. Lyijykerroksen paksuus oli 10 cm ja sen päällä sisäpinnalla oli 3 mm tinakerros ja 0,5 mm kuparikerros. Tinakerroksen tarkoituksena oli vaimentaa lyijystä tulevaa röntgensäteilyä ja kuparikerroksen tarkoituksena oli vaimentaa tinakerroksesta tulevaa röntgensäteilyä.

## 4.2 Aktiivisuuden määrittäminen

Aktiivisuuden määrittämisessä tulee ottaa huomioon, että ilmaisinsysteemi ei pysty havaitsemaan kaikkea kohteesta lähtevää säteilyä. Tähän vaikuttavat useat eri tekijät ja niiden vaikutuksen suuruus tulee arvioida ja ottaa huomioon.

Nuklidien hajotessa syntyvä säteily on isotrooppista eli satunnaisesti jokaiseen avaruuden suuntaan lähtevää säteilyä. Koska ilmaisimet mittaa kohdetta yhdestä kiinteästä suunnasta ja paikasta, voi ilmaisimeen osua vain osa säteilystä. Tämä osuus on yhtä suuri kuin lähteestä päin määritetty ilmaisimen peittävä avaruus-kulma  $\Omega$  koko avaruudesta  $4\pi$ . Tämä pätee tilanteessa, jossa lähteen ja ilmaisimen säteilyä havaitsevan osan (puolijohdekide) välissä on tyhjiö. Mittaustilanteessa näin ei ole vaan säteily vaimenee eri materiaaleihin. Säteilylähteen ja kiteen välissä on useita säteilyä vaimentavia materiaaleja: itse mitattava osa, ilma, mittaustelimen muovilevy, ilmaisimen alumiinikuori ja kiteen kuollut kerros (kontaktipinta).

Radioaktiivinen hajoaminen on satunnainen tapahtuma ja siten peräkkäisten tapahtumien välinen aika on satunnainen [7, s. 121]. Jos  $\gamma$ -kvantit vuorovaikuttavat ilmaisimen Ge-kiteen kanssa samanaikaisesti tai aikaväli on erittäin lyhyt, tapahtumista ei synny kahta erillistä pulssia vaan summapulssi. Mitä suurempi on



**Kuva 9** – Mittaussuoja. Suojan seinät olivat 10 cm paksusta lyijystä (A), jonka päällä sisäpinnalla (B) oli 3 mm tinaa ja sisimpänä 0,5 mm kuparia. Lyijysuoja makasi jalustan (F) päällä ja ilmaisimen (E) työntyi suojaan alapäin. Koska mitattavat osat olivat painavia, ilmaisimen ympärillä oli muoviputkesta ja pleksistä (D) tehty kannatin, jonka päälle mitattavat osat (C) asetettiin. Mittaukset suoritettiin yläpinnassa oleva aukko auki. Mitat:  $a = 16$  cm,  $b = 6$  cm,  $c = 14$  cm,  $d = 34$  cm ja  $e = 56$  cm.

tapahtumien määrä aikayksikössä eli laskentataajuus, sitä enemmän rekisteröidään summapulsseja ja samalla menetetään tapahtumia oikeista piikeistä. Lisäksi jokaisella ilmaisinsysteemillä on sille ominainen aika, jonka täytyy erottaa peräkkäiset pulssit, jotta molemmat rekisteröidään. Tätä aikaa kutsutaan systeemin kuolleeksi ajaksi. Tämän mittauksen laitteistossa kuolleen ajan aiheuttaa käytetty elektroniikka (AD-muunnin). Kun pulssi saapuu AD-muunttimeen, muunnin ei ota vastaan uutta pulssia ennen kuin ensin saapunut on prosessoitu. Kuolleen ajan aikana muuntimelle saapunut pulssi menetetään. Jälleen mitä suurempi laskentataajuus, sitä enemmän pulsseja menetetään.

Mittausasetelman pysyessä samana joidenkin tekijöiden vaikutus (avaruuskulma, osin vaimeneminen) voidaan ottaa huomioon määrittämällä kokeellisesti ilmaisinsysteemin tehokkuus. Sen sijaan tehokkuudella ei voida huomioida säteilyn vaimenemista mitattavassa kohteessa itsessään (osat ovat eri kokoisia ja valmistettu eri materiaaleista) eikä elektroniikan kuollutta aikaa, joka riippuu elektroniikan käyttöparametreista ja näytteen laskentataajuudesta.

### 4.2.1 Tehokkuus

Gammasäteilyn luonteen vuoksi ilmaisim ei pysty havaitsemaan jokaista gammakvanttia. Tämän vuoksi ilmaisimelle tulee määrittää tehokkuus  $\epsilon$ , joka kertoo mitattujen pulssien ja säteilylähteestä lähteneiden gammakvanttien lukumäärien suhteesta.

Absoluuttinen piikkitehokkuus  $\epsilon_{\text{abs}}$  on piikin tapahtumien lukumäärän (piikkiin mitattujen pulssien lukumäärä) ja lähteen kyseisellä energialla lähettämien säteilykvanttien suhdeluku. Absoluuttinen piikkitehokkuus riippuu niin ilmaisimen ominaisuuksista kuin mittausgeometriasta. Määritelmän mukaisesti  $\epsilon_{\text{abs}}$  toimii verrannollisuuskertoimena, kun mitattujen spektrin piikkien pinta-aloista määritetään aktiivisuuksia.

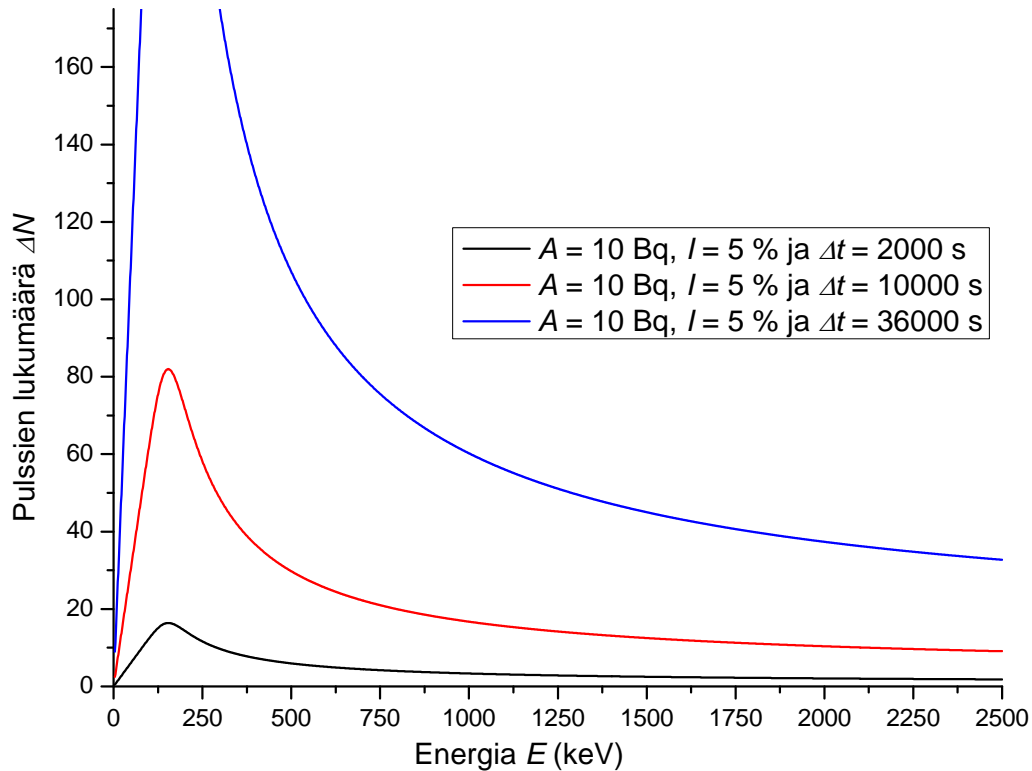
### 4.3 Pienin havaittava aktiivisuus

Mitatussa spektrissä kiinnostuksen kohteena ovat piikeistä tunnistetut nuklidit ja niiden aktiivisuudet. Toinen mielenkiintoinen kysymys on, mikä on kyseisessä mitatussa spektrissä pienin havaittava aktiivisuus eli toisin sanoen kuinka suuri aktiivisuus jää mittauksessa havaitsematta. Kysymys on säteilysuojelullisesti tarpeeton, jos spektrissä on tunnistettavia piikkejä (ja aktiivisuuksia). Tapauksessa, jossa spektrissä ei näy yhtään piikkiä, pienimmän havaittavan aktiivisuuden määrittäminen on oleellista.

Tässä työssä pienintä havaittavaa aktiivisuutta on lähestytty käytännöllisestä näkökulmasta; mittauksissa on tarkkailtu pienten tausta-aktiivisuuksien (1-100 Bq) havaitsemista aktiivisten osien spektreistä. Näiden piikkien havaitsemattomuus (ja siten mahdollisesti muiden pienten kontaminaatioaktiivisuuksien havaitsemattomuus) on johtunut osasta löydetyistä muista, suuremmista aktiivisuuksista, jolloin pienet aktiivisuudet (< 10 Bq) ovat hävinneet taustaan. Tällöin kuitenkin hyvin pienet havaitsemattomat aktiivisuudet ovat merkityksettömiä, koska suuret aktiivisuudet jo määrittelevät mitatun osan luokituksen ja käsittelyn aktiivisena jätteenä. Vähäaktiivisen jätteen mittauksessa taustan piikkien tulee näkyä ja niiden avulla voi arvioida pienintä havaittavaa aktiivisuutta. Jos esimerkiksi spektrissä näkyy vain taustasäteilystä johtuva pieni aktiivisuus ( $\sim 10$  Bq), kyseisellä energia-alueella pienin havaittava aktiivisuus on karkeasti samaa kertaluokkaa.

Havaittava aktiivisuus riippuu mm. taustan määrästä, säteilyn energiasta ja mitausajasta. Mitä enemmän taustatapahtumia spektrissä on (ja siten sitä suurempi taustan tapahtumien määrän vaihtelu kanavasta toiseen, ks. Kuva 7), sitä enemmän pitää olla havaittavassa piikissä tapahtumia. Toisin sanoen mitä vähemmän on taustaa, sitä tapahtumamääriltään pienemmät piikit erottuvat taustasta. Energian ja mittausajan vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 10. Energian vaikutus

johtuu Ge-ilmaisimen tehokkuuden energiariippuvuudesta. Mittausajan kasvattaminen kasvattaa kerättyjen pulssien määrää.



**Kuva 10** – Aktiivisuus, tapahtumien määrä spektrissä ja mittausaika. Mitattujen pulssien määrä  $\Delta N$  noudattaa yhtälöä (5.4). Mittauslaitteiston parametreilla havaitaan tietyllä energialla kuvan osoittama määrä tapahtumia nuklidista, jonka aktiivisuus  $A = 10$  Bq. Oletuksena on, että kyseisen  $\gamma$ -kvantin intensiteetti on 5 %. Kuvaan on piirretty kolmen eri mittausajan  $\Delta t$  tapahtumien teoreettiset määrät.

#### 4.4 Optimaalinen mittauslaitteisto

Projektin aikana kartoitettiin optimaalista mittauslaitteistoa erityisesti Kiihdytinlaboratorion säteilyturvallisuuteen liittyviin mittauksiin. Lähtökohtana oli  $\gamma$ -säteilyn havaitseminen energia-alueella 0-3000 keV. Vaatimuksina oli mm. mittauslaitteiston mahdollisimman suuri joustavuus ja muunneltavuus eri käyttötarkoituksiin, laitteiston pieni koko ja liikuteltavuus sekä ylläpidon helppous. Kartoituksen lähtökohdaksi otettiin laitteisto, jonka ilmaisinosana olisi Ge-ilmaisim.

Karkeasti jaoteltuna tarvittavat komponentit olivat ilmaisia, ilmaisimen jäähdytys, elektroniikka, ohjelmisto datan keräämiseen ja analysointiin ja muut oheistarpeet. Budjetointia varten pyydetty tarjous saatiin määräaikaan mennessä Ortec'in ja Canberran edustajilta. Eri tarjousten vertailu oli hyvin haastavaa, koska eri valmistajan vaihtoehdot eivät olleet täysin toisiaan vastaavia ja hintoihin sisältyi erilaisia komponenttilyhdistelmiä.

Esille nousi kaksi vaihtoehtoa: all-in-one ilmainen ja koaksiaalinen Ge-ilmainen. All-in-one ilmaisimessa oli kannettavassa kokoluokassa yhdessä paketissa ilmainen, jäähdytys ja elektroniikka. Koaksiaaliselle ilmaisimelle piti erikseen valita jäähdytystapa ja elektroniikka. Koska liikuteltavuus oli käytön kannalta oleellinen ominaisuus, luovuttiin perinteisestä analogisesta NIM-moduulipohjaisesta elektroniikasta ja kartoitettiin kokonsa puolesta ylivertaista digitaaliseen signaalinkäsittelyyn pohjautuvaa elektroniikkamoduulia, joka sisälsi kaiken elektroniikan (lineaarivahvistin, MCA, HV-lähde) yksissä kuorissa. Jäähdytyksen osalta vertailtiin tavanomaista nestetyyppijäähdytystä ja sähköistä jäähdytystä, jota puolsi ylläpidon vähyys.

Koaksiaalisia ilmaisimia oli sekä p- että n-tyyppiä. Koska n- ja p-tyypin ilmaisimilla ei ollut mainittavaa hintaeroa, valintana oli n-tyypin ilmainen paremman neutronivaurioiden sietokyvyn vuoksi, vaikkakaan suunnitellussa käyttötarkoituksessa kyseistä ominaisuutta ei tarvita. Koaksiaalisen ilmaisimen sisältävän laitteiston kokoonpanosta on esitetty taulukossa 15 vertailu kahden eri valmistajan välillä. Taulukon pakettiin on valittu nestetyyppijäähdytys sähköisen sijasta suunnitteluprosessin aikana heränneiden sähköisen jäähdytyksen liikuteltavuuteen ja pitkäaikaiseen vakautteen liittyvien kysymysten vuoksi. Vertailun vuoksi Ortec'in tarjoaman all-in-one ilmaisimen TRANS-SPEC-DX-100T hinta oli 80 089 €(alv. 0%).

Taulukossa 15 on esitetty ohjelmiston osalta toiset vaihtoehdot. Nämä ohjelmat ovat perusohjelmia monipuolisempia ja suunniteltu erityisesti gammaspektroskopiaan. Tässä työssä käytetyt useat eri ohjelmat analyysin teossa olivat toimivia, mutta hyvin työläitä käyttää. Erityisen paljon aikaa vaati nuklidien tunnistaminen nuklidikirjastoja selailemalla sekä eri ohjelmien välinen datan siirtäminen. Tästä selvänä päätelmänä kannattanee panostaa kaupalliseen ohjelmistoon, jolla on mahdollista suorittaa kaikki toiminnot: datankeruu, piikkien pinta-alamääritykset, energia- ja tehokkuuskalibroinnit sekä automaattinen piikkien tunnistus. Näin laitteiston nopea ja tehokas käytettävyyys sekä reaaliaikainen analyysi taataan.



**Taulukko 15** – Optimaalinen mittauslaitteisto. Alla on vertailtu kahden eri valmistajan tuotteista kasattua pakettia. Hinnat ovat maaliskuulta 2011 eivätkä sisällä arvonlisäveroa. Yhteenlaskettu hinta sisältää tummennetut hinnat.

\*=tulee DSPEC-jr-2.0:n mukana

\*\*=tulee vakiona ilmaisimen mukana

	Ortec	Canberra
ilmainen	GMX45P4	GR4520
-puolijohdetyyppi:	n	n
-energia-alue:	3 keV - 10 MeV	3 keV - 10 MeV
-suhteellinen tehokkuus:	45 %	45 %
hinta	<b>29749 €</b>	<b>34841 €</b>
elektroniikka	DSPEC-jr-2.0	DSA-1000
hinta	<b>12178 €</b>	<b>9000 €</b>
ohjelmisto		
1. vaihtoehto:	Maestro, <b>0 €*</b>	S502C, <b>1126 €</b>
2. vaihtoehto:	GammaVision, 6629 €	Gamma Option, 3713 €
jäähdytys		
-typpisäiliö:	5 litraa, <b>2480 €</b>	30 litraa, <b>0 €**</b> 7 litraa (1257 €)
yhteensä	<b>44407 €</b>	<b>44967 €</b>

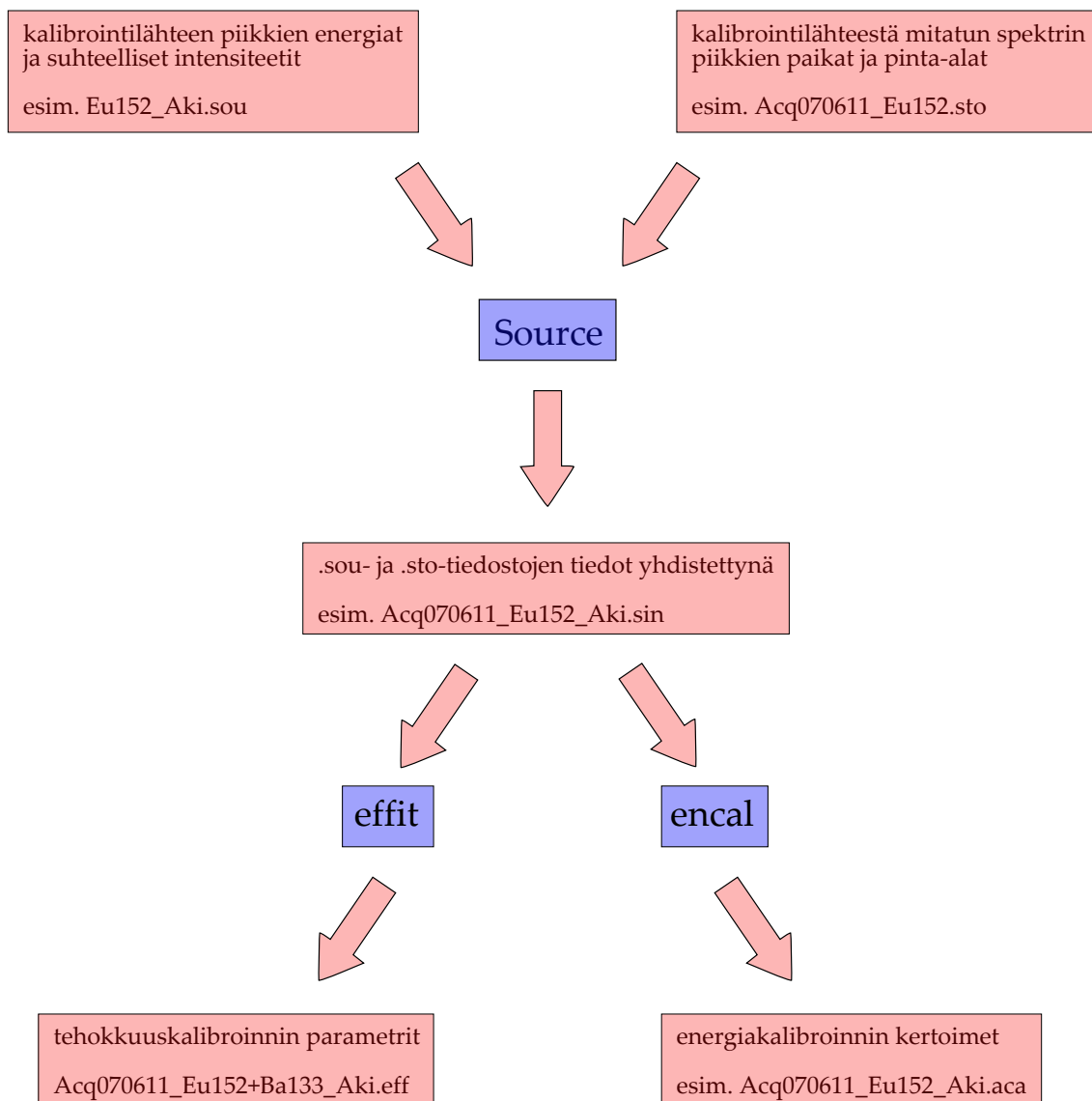
## 5 Mittaukset

### 5.1 Energia- ja tehokkuuskalibrointimittaukset

Kalibrointimittauksissa käytettiin kolmea lähdettä. Lähteiden nimet JYFL:n kirjainpidossa olivat JYFL-81 ( $^{152}\text{Eu}$ ), JYFL-82 ( $^{133}\text{Ba}$ ) ja JYFL-80 ( $^{60}\text{Co}$ ). Lähteiden sertifikaattien ilmoittamat aktiivisuudet 1.4.2003 klo 12:00 (GMT) mitattuna olivat  $^{152}\text{Eu}$ -lähteelle 40,1 kBq  $\pm 3\%$ ,  $^{133}\text{Ba}$ -lähteelle 42,4 kBq  $\pm 3\%$  ja  $^{60}\text{Co}$ -lähteelle 401 kBq  $\pm 3\%$ . Energia- ja tehokkuuskalibroinnin parametrien määrittäminen tapahtui RadWare-ohjelmistopakettien ohjelmilla. Kalibrointien tekoa on havainnollistettu kuvassa 11.

#### 5.1.1 Energiakalibrointi

Energiakalibroinnissa etsitään tunnettujen lähteiden piikit mitatusta spektristä, kirjataan ylös piikkien paikat ja etsitään piikkien paikkojen kanavaluvuille ja vastaaville energioille riippuvuusuhde. Yleensä riippuvuus on lineaarinen, mutta



**Kuva 11** – Energia- ja tehokkuuskalibrointi. Siniset laatikot ovat ohjelmia ja punertavat laatikot ohjelmien tarvitsemia ja tuottamia tiedostoja.

myös korkeampia kertalukuja on mahdollista sovittaa mitattuihin arvoihin. Energiakalibroinnin avulla pystytään määrittämään tuntemattomien piikkien energia kanavaluvusta. Mittauslaitteiston energiakalibrointi tehtiin  $^{152}\text{Eu}$ - ja  $^{133}\text{Ba}$ -lähteillä.

Kalibrointia varten tehtiin tiedosto (esim. Eu152\_Aki.sou), jossa oli listattuna kalibrointilähteen piikkien energiat virheineen ja piikkien suhteelliset intensiteetit virheineen (ks. Taulukko 16). Nopein tapa tehdä energiakalibrointi esimerkiksi  $^{152}\text{Eu}$ -lähteellä oli avata spektri xmgf3-ohjelmalla ja käyttää komentoa CA. Ohjelma

kysyi .sou-tiedoston nimeä ja sovitti automaattisesti spektrin piikit. Tuloksena oli toisen asteen energiakalibrointi, jonka kertoimet tallentuivat .aca-tiedostoon (esim. Acq070611\_Eu152.aca). Kalibrointikertoimet sai käyttöön komennolla EC, jolloin ohjelma kysyi .aca-tiedoston nimeä ja otti käyttöön annetun tiedoston kalibroinnin.

Koska mittauksissa laitteiston kaikki parametrit pidettiin vakiona, käytetty energiakalibrointi tehtiin useamman välivaiheen kautta ja kahdella lähteellä, jotta olisi päästy parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen. Tässä tapauksessa molempien lähteiden ( $^{152}\text{Eu}$  ja  $^{133}\text{Ba}$ ) jokainen piikki sovitettiin yksitellen käsin ja tallennettiin piikkien paikat ja pinta-alat .sto-tiedostoihin. Tämän jälkeen käytettiin RadWare-paketin ohjelmaa Source, joka käynnistyi terminaali-ikkunaan kirjoittamalla source. Ohjelma kysyi kummallekin lähteelle erikseen .sto- ja .sou-tiedostoja, joista ohjelma yhdistämällä loi .sin-tiedostot. Tämän jälkeen yhdistettiin manuaalisesti kopioimalla  $^{152}\text{Eu}$  ja  $^{133}\text{Ba}$  lähteiden .sin-tiedostot (esim. Acq070611\_Eu+Ba.sin). Saatu .sin-tiedosto syötettiin encal-ohjelmalle (terminaali-ikkunaan komento encal), joka talletti kalibrointikertoimet .aca-tiedostoon. Ohjelma antoi valita energiakalibroinnin kertaluvun väliltä 1-5 eli lineaarisesta sovituksesta jopa 5. asteen polynomiin. Tämän työn analyysissä käytettiin toisen asteen kalibrointia. Spektrinkäsittelyohjelmalle xmgf3 energiakalibroinnin sai käyttöön komennolla EC. Aina, kun xmgf3 ohjelma käynnistettiin tuntemattomien spektrien analyysia varten, otettiin ensimmäisenä käyttöön energiakalibrointi. Käytetty kalibrointi oli

$$E = 0,323 + 0,681x + 6,079 * 10^{-7}x^2,$$

missä  $E$  on energia ja  $x$  on kanavaluku. Toisen asteen termin kertoimesta havaitaan, että energian ja kanavaluvun riippuvuus on lähes täysin lineaarinen.

### 5.1.2 Tehokkuuskalibrointi

Tehokkuuskalibroinnissa tunnetusta lähteestä mitatusta spektristä kirjataan ylös piikkien pinta-alat ja sovitetaan funktio siten, että piikkien pinta-alat ovat samassa suhteessa kuin kyseisten piikkien tiedetyt intensiteetit. Sovitettu funktio on suhteellinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{suht}}$ . Jotta pinta-aloista voidaan päätellä aktiivisuus, tarvitaan mittausslaitteiston absoluuttinen tehokkuus.

Absoluuttinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{abs}}$  saadaan kalibrointilähteen tunnetun aktiivisuuden avulla. Absoluuttinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{abs}}$  on

$$\epsilon_{\text{abs}} = \frac{\Delta N}{A * \Delta t * I'} \quad (5.1)$$

missä  $\Delta N$  on piikin pinta-ala,  $A$  on kalibrointilähteen aktiivisuus,  $\Delta t$  on mittausaika ja  $I'$  on piikin gammakvantin intensiteetti.

Absoluuttiselle tehokkuudelle  $\epsilon_{\text{abs}}$  ja suhteelliselle tehokkuudelle  $\epsilon_{\text{suht}}$  pätee

$$\epsilon_{\text{abs}} = \alpha * \epsilon_{\text{suht}} \quad (5.2)$$

eli tehokkuuskertoimelle  $\alpha$  on

$$\alpha = \frac{\epsilon_{\text{abs}}}{\epsilon_{\text{suht}}}. \quad (5.3)$$

Näin ollen mitatuille tuntemattomille spektreille ja niiden pinta-aloille  $\Delta N$  pätee

$$\begin{aligned} \Delta N &= A * \Delta t * I * \epsilon_{\text{abs}} \\ &= A * \Delta t * I * \alpha * \epsilon_{\text{suht}}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

missä  $A$  on tuntematon aktiivisuus,  $\Delta t$  on mittausaika,  $I$  on piikin gammakvantin intensiteetti,  $\epsilon_{\text{abs}}$  on mittauskonfiguraation absoluuttinen tehokkuus,  $\alpha$  on tehokkuuskerroin ja  $\epsilon_{\text{suht}}$  on suhteellinen tehokkuus.

Kalibroinnissa käytettiin  $^{152}\text{Eu}$ - ja  $^{133}\text{Ba}$ -lähteitä. Piikeistä valittiin intensiivisimmät ja symmetrisimmät piikit. Jos pinta-alan määrittämisessä oli taustan vuoksi ongelmia, piikkiä ei käytetty kalibroinnissa. Sovituksen hyvyyttä tarkasteltiin myös puoliarvovaleyden arvoa tarkkailemalla. Käytetyt piikit on listattu taulukkoon 16. Kalibroitifunktio  $\epsilon_{\text{suht}}$  sovitettiin ohjelmalla `ffit` (terminaali-ikkunaan komento `ffit`). Ohjelmalle syötettiin kalibroitilähteiden  $^{152}\text{Eu}$  ja  $^{133}\text{Ba}$  .sintiedostot. Koska lähteillä oli eri aktiivisuudet, eri lähteistä kerätyille pinta-alojen ja intensiteettien suhdeluville tuli määrittää normitusvakio. Ohjelma laski itse näiden suhdelukujen suhteita piikkien kohdalla ja tässä kalibroinnissa käytettiin `ffit`in 344,28 keV piikille laskemaa kerrointa 0,974, jolloin eri lähteistä saadut pisteet asettuivat jatkuvalla käyrälle. Tämän normituksen hyvyyttä arvioitiin lisäksi silmämääräisesti siten, että verrattiin  $^{152}\text{Eu}$ -lähteen pistettä (344,28 keV) ja  $^{133}\text{Ba}$ -lähteen pistettä (356,01 keV) niiden energioiden läheisyyden vuoksi. Ohjelma sovitti mittauspisteisiin 6 parametrin funktion. Suhteellisen tehokkuuden  $\epsilon_{\text{suht}}$  yhtälö oli muotoa

$$\epsilon_{\text{suht}} = e^{\left( [A+B*\log(\frac{x}{100\text{keV}})]^{-G} + (D+E*\log(\frac{x}{1000\text{keV}})+F*[\log(\frac{x}{1000\text{keV}})]^2)^{-G} \right)^{-\frac{1}{G}}}, \quad (5.5)$$

missä  $x$  oli energia ja  $A$ ,  $B$  sekä  $D - G$  olivat sovitetut parametrit.

Tämän työn kalibroinnissa parametrit  $B$  ja  $G$  kiinnitettiin vakioiksi. Tämä johtui siitä, että kaikkien parametrien ollessa avoimia, sovituksesta tuli silmämääräisesti huono ja parametrien virheet olivat suuret (suhteellinen virhe jopa 55 %). Ohjelman `ffit` ohjeissa oli ilmoitettu koaksiaalisille Ge-ilmaisimille tyypillisinä arvoina  $B = 1$  ja  $G = 20$ . Näiden vakioarvojen käyttö antoi heti silmämääräisesti parempia

sovituksia pistejoukkoon. Sovitusta testattiin paljon kiinnittämällä eri parametreja useilla eri arvoilla ja varioimalla myös parametrejä  $B$  ja  $G$ . Parhaaseen tulokseen päästiin kiinnittämällä parametrit  $B = 1$  ja  $G = 15$ . Kalibroinnin tuloksena saadut sovituksen parametrit ovat taulukossa 17 sivulla 39 ja kuvaaja on kuvassa 12 sivulla 39.

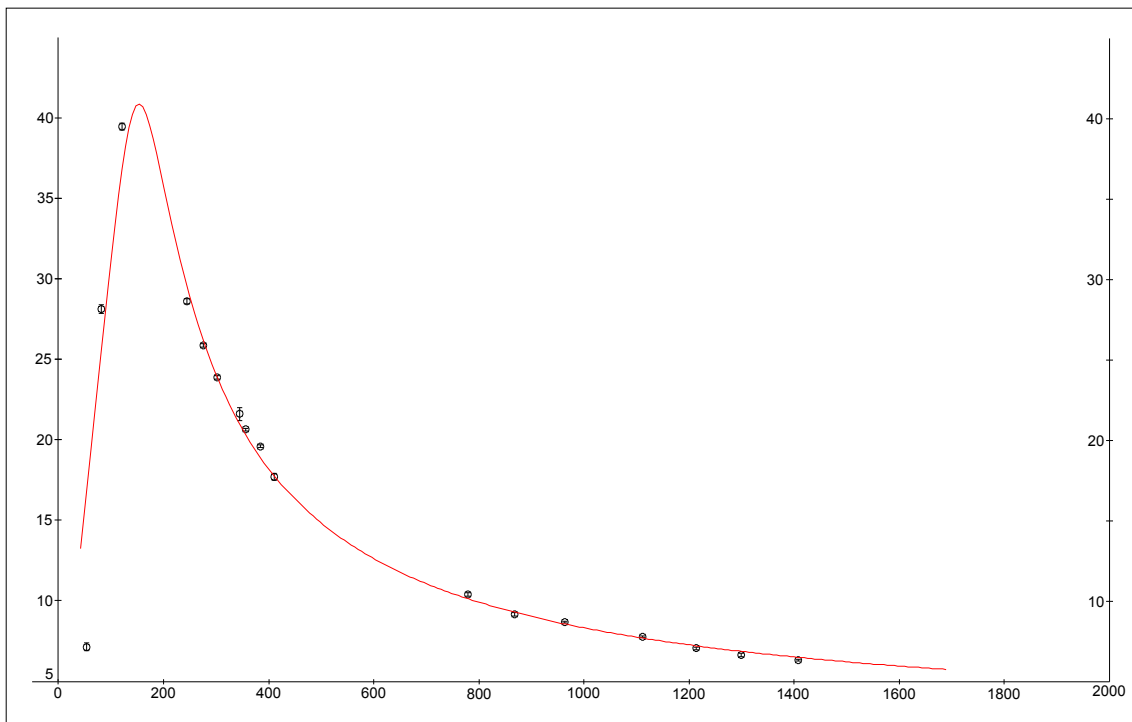
**Taulukko 16** – Tehokkuuskalibrointi. Kalibroinnissa käytettyjen piikkien energiat  $E$  ja absoluuttiset intensiteetit  $I$  sekä mitatuista spektreistä määritetyt pinta-alat  $\Delta N$ . Molempien lähteiden mittausaika  $\Delta t$  oli 10000 sekuntia. Näiden avulla on laskettu absoluuttinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{abs}}$ , sovitettu suhteellinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{suht}}$  ja laskettu tehokkuuskerroin  $\alpha$  taulukkoon 18. Piikit on numeroitu viittaamista varten. Piikkien energiat ja intensiteetit ovat lähteestä [8]. Määritettyjen pinta-alojen virhe on ohjelman xmgf3 piikin sovituksen yhteydessä ilmoittama pinta-alan virhe, joka on hieman suurempi kuin puhtaasti tilastollinen  $\sqrt{\Delta N}$ .

lähde	piikki	$E$ (keV)	$I$ (%)	$\Delta N$ (lkm)
$^{152}\text{Eu}$	1	$121,7817 \pm 0,0003$	$28,67 \pm 0,15$	$1162602 \pm 1146$
$^{152}\text{Eu}$	2	$244,6975 \pm 0,0008$	$7,61 \pm 0,04$	$223923 \pm 573$
$^{152}\text{Eu}$	3	$344,2785 \pm 0,0012$	$26,6 \pm 0,5$	$591384 \pm 807$
$^{152}\text{Eu}$	4	$411,1163 \pm 0,0011$	$2,237 \pm 0,025$	$40717 \pm 241$
$^{152}\text{Eu}$	5	$778,9040 \pm 0,0018$	$12,96 \pm 0,14$	$138962 \pm 399$
$^{152}\text{Eu}$	6	$867,3730 \pm 0,0030$	$4,26 \pm 0,03$	$40210 \pm 239$
$^{152}\text{Eu}$	7	$964,0790 \pm 0,0180$	$14,65 \pm 0,07$	$131157 \pm 381$
$^{152}\text{Eu}$	8	$1112,0690 \pm 0,0030$	$13,69 \pm 0,07$	$109326 \pm 348$
$^{152}\text{Eu}$	9	$1212,9480 \pm 0,0110$	$1,426 \pm 0,009$	$10354 \pm 125$
$^{152}\text{Eu}$	10	$1299,1400 \pm 0,0090$	$1,625 \pm 0,019$	$11103 \pm 115$
$^{152}\text{Eu}$	11	$1408,0060 \pm 0,0030$	$21,07 \pm 0,10$	$137288 \pm 379$
$^{133}\text{Ba}$	12	$53,1625 \pm 0,0006$	$2,199 \pm 0,022$	$15742 \pm 506$
$^{133}\text{Ba}$	13	$80,9971 \pm 0,0012$	$34,1 \pm 0,3$	$1029400 \pm 1105$
$^{133}\text{Ba}$	14	$276,3997 \pm 0,0013$	$7,164 \pm 0,022$	$185792 \pm 463$
$^{133}\text{Ba}$	15	$302,8510 \pm 0,0006$	$18,33 \pm 0,06$	$438500 \pm 703$
$^{133}\text{Ba}$	16	$356,0134 \pm 0,0006$	$62,05 \pm 0,19$	$1283449 \pm 1197$
$^{133}\text{Ba}$	17	$383,8480 \pm 0,0012$	$8,94 \pm 0,03$	$175545 \pm 431$

Absoluuttiset tehokkuudet laskettiin yhtälön (5.1) mukaisesti samoin kuin suhteelliset tehokkuudet yhtälön (5.5) mukaisesti kaikille energioille (ks. Taulukko 18). Näiden avulla laskettiin tehokkuuskerroin  $\alpha$  yhtälön (5.3) mukaisesti (Taulukko 18). Tehokkuuskertoimista laskettiin keskiarvo ja keskiarvolle sen keskivirhe (ks. Taulukko 17). Keskiarvolaskussa piikki 12 jätettiin huomiotta selvästi poikkeavan arvon vuoksi.

**Taulukko 17** – Tehokkuuskalibroinnin tuloksena saadut aktiivisuuksien määrittämisessä tarvittavat parametrit. Suhteellinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{suht}}$  lasketaan yhtälöllä (5.5) tuntemattoman piikin energialla. Tehokkuuskerroin  $\alpha$  on mittauslaitteiston vakio. Parametreille  $A - G$  on lisäksi taulukoitu tarkempi arvo; effit-ohjelma tulosti parametrien arvot virheineen terminaali-ikkunaan ja lisäksi kirjoitti .aef-tiedoston, jossa oli pelkästään parametrien arvot useammalla desimaalilla ilman virheitä.

parametri	arvo	tarkka arvo
$A$	$3,440 \pm 0,024$	3,4403892
$B$	$1,0 \pm 0,0$	1,0
$D$	$2,12 \pm 0,04$	2,122323
$E$	$-0,76 \pm 0,10$	-0,75980538
$F$	$0,10 \pm 0,07$	0,10268674
$G$	$15,0 \pm 0,0$	15,0
$\alpha$	$(401 \pm 6) * 10^{-6}$	$400,64001 * 10^{-6}$



**Kuva 12** – Suhteellinen tehokkuus. Kuvassa on yhtälön (5.5) mukainen sovitus taulukon 17 parametrien  $A-G$  arvoilla. Vaaka-akselilla on energia  $E_\gamma$  (keV) ja pystyakselilla suhteellinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{suht}}$ . Kuva on muokattu effit ohjelman tulosteesta.

**Taulukko 18** – Absoluuttinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{abs}}$ , sovitettu suhteellinen tehokkuus  $\epsilon_{\text{suht}}$  ja laskettu tehokkuuskerroin  $\alpha$ .

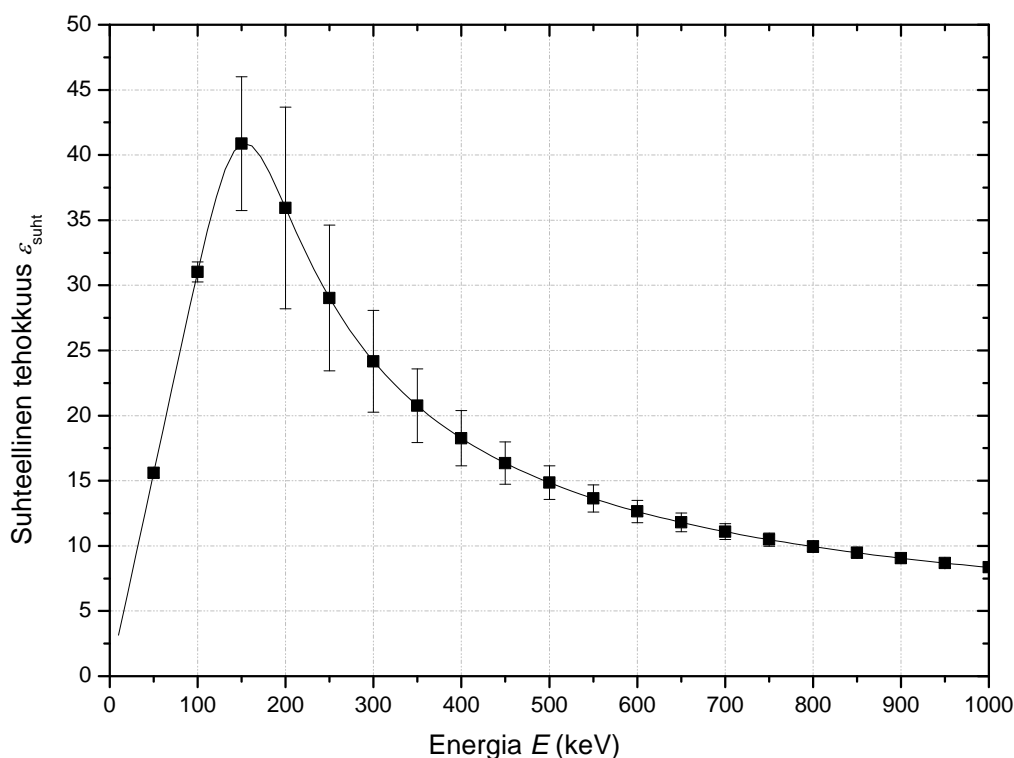
piikki	$\epsilon_{\text{abs}} (*10^{-4})$	$\epsilon_{\text{suht}}$	$\alpha (*10^{-6})$
1	155 ± 5	37 ± 2	421
2	112 ± 4	30 ± 6	377
3	85 ± 4	21 ± 3	401
4	69 ± 3	18 ± 2	389
5	40,9 ± 1,4	10,2 ± 0,5	402
6	36,0 ± 1,2	9,3 ± 0,4	386
7	34,2 ± 1,1	8,6 ± 0,4	397
8	30,5 ± 1,0	7,7 ± 0,4	395
9	27,7 ± 1,0	7,2 ± 0,4	382
10	26,1 ± 0,9	6,9 ± 0,4	378
11	24,9 ± 0,8	6,5 ± 0,4	381
12	29,2 ± 1,4	16,3 ± 0,4	179
13	115 ± 4	25,0 ± 0,6	459
14	106 ± 4	26 ± 5	402
15	97 ± 3	24 ± 4	406
16	84 ± 3	20 ± 3	412
17	80 ± 3	19 ± 3	420

Suhteellisen tehokkuuden  $\epsilon_{\text{suht}}$  sovituksen hyvyttä voi arvioida kuvasta 12 silmä määräisesti sovituksen osumisesta pisteisiin. Tämän lisäksi virhettä arvioitiin yleisellä virheenetenemislailalla. Koska parametrit  $B$  ja  $G$  olivat vakioita, virhettä aiheuttivat vain parametrien  $A$  ja  $D - F$  virheet:

$$\delta\epsilon_{\text{suht}} =: \epsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial\epsilon}{\partial A}\delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial D}\delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial E}\delta E\right)^2 + \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial F}\delta F\right)^2}. \quad (5.6)$$

Suhteellisen tehokkuuden  $\epsilon_{\text{suht}}$  virhettä  $\delta\epsilon_{\text{suht}}$  on havainnollistettu kuvassa 13 esittämällä tehokkuus virhepalkein ( $\epsilon_{\text{suht}} \pm \delta\epsilon_{\text{suht}}$ ) välillä 0-1000 keV. Virhe on suurimmillaan energioilla 150-440 keV, joilla suhteellinen virhe  $\delta\epsilon_{\text{suht}}/\epsilon_{\text{suht}}$  on yli 10 prosenttia. Tulos on ristiriitainen, kun sitä vertaa kuvan 12 hyvin kokeellisten pisteiden kautta kulkevan sovituksen kanssa. Perspektiiviä virhetulokselle antoi kokeilut erilaisilla tehokkuusfunktiosovituksilla, joiden arvot poikkesivat 5-10 prosenttia tehdystä kalibroinnista. Yli 10 % suhteellinen virhe on myös energioilla 2230 - 2650 keV. On muistettava, että tehokkuuskalibroinnissa käytetyt kokeelliset pisteet olivat väliltä 53,1 - 1408,0 keV, joten yli 1500 keV energioilla lasketut tehokkuudet eivät välttämättä ole luotettavia. Lisäksi kuvasta 12 voi havaita, että 50

keV kohdalla sovituksen arvot ovat kokeellista pistettä selvästi ylempänä. Lopullinen tehokkuuskalibroinnin luotettavuuden arviointi tapahtuu spektrien analyysin kautta, jossa päästään vertailemaan nuklidikohtaisesti eri energia-alueella olevien piikkien antamia aktiivisuuksia toisiinsa.



**Kuva 13** – Suhteellisen tehokkuuden virhe energia-alueella 0-1000 keV. Virhe on suurimmillaan (suhteellinen virhe > 10%) energiavälillä 150-440 keV. Virhepalkit on esitetty selkeyden vuoksi vain 50 keV välein.

Aktiivisuuksia laskettaessa on erittäin tärkeää havaita, että tehokkuuskalibroinnin tekotapa ei ollut mittausolosuhteisiin täysin sopiva. Tehokkuuskalibrointi tehtiin pistemäisellä lähteellä. Sen sijaan mitattavat osat vaihtelivat alle 1 mm paksuisesta kalvosta karkeasti noin 10cm\*10cm\*10cm kokosiin osiin. Tehokkuuskalibrointi kolmiulotteiselle osalle, joka ei ole homogeenisesti aktiivinen, on erittäin hankala tehdä (lähes mahdoton). Kolmiulotteisuuden tärkein vaikutus on tehokkuuden pieneneminen suhteessa pistemäiseen lähteeseen, mikä johtuu kappaleen jokaisen pisteen erisuuresta, pienemmästä avaruuskulmasta, verrattuna kalibrointilähteen



avaruuskulmaan (ks. mittausgeometria kuvasta 9) [10, s. 140]. Kalibrointilähteet olivat pleksin päällä ilmaisimen keskiakselilla ja kolmiulotteisten osien kauimmat osat olivat kappaleen dimensioista riippuen jopa 10 cm kauempana ilmaisimesta keskiakselilla mitattuna ja 5 cm pois päin keskiakselilta. Tätä kalibrointitapaa käytettiin, jotta mittauksia olisi voitu suorittaa suuri määrä sujuvasti vain yhdellä kalibroinnilla. Koska tuloksena saatavia aktiivisuuksia käytetään säteilysuojelutoimenpiteissä, kalibroinnista johtuva epätarkkuus aktiivisuudessa voidaan ottaa huomioon sopivalla turvallisuuskertoimella ( $> 1$ ).

## 5.2 Aktiivisuusmittaukset

Mitattavasta osasta määritettiin pinta, jossa oli suurin hetkellinen annosnopeus, ja aktiivisuusmittaukset suoritettiin siten, että kyseinen pinta oli ilmaisinta kohti. Jokaisesta osasta tehtiin muutaman minuutin testimittaus, josta arvioitiin tarvittava mittausaika. Pyrkimyksenä oli määrittää mittausaika siten, että heikoimpiin testimittauksissa nähtäviin piikkeihin kertyisi mittauksen aikana noin 10000 tapahtumaa. Aktiivisuusmittauksista pidettiin mittauspöytäkirjaa, jossa seurattiin ilmaisimen toimintakuntoa, laitteiston parametreja sekä kirjattiin mittaustapahtumat. Lisäksi aktiivisuusmittauksista tallentui Grain-datankeruuohjelman lokitiedostot.

Spektrien analysoinnissa käytettiin RadWare-ohjelmistopakettien ohjelman gf3 käyttäjävälisintä versiota xmgf3. Ohjelma käynnistyi terminaali-ikkunasta komennoilla `xmgf3 Acq070611\_Eu152 .spe`, missä ohjelman nimen perään annettiin analysoitavan spektrin nimi. Kappaleesta mitatusta ja analysoidusta spektristä tallennetut tiedostot on listattu taulukkoon 19.

Kappaleessa olevan nuklidin aktiivisuus  $A$  määritetään piikin pinta-alasta  $\Delta N$  yhtälön (5.4) mukaisesti yhtälöllä

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t * I * \epsilon_{\text{abs}}} = \frac{\Delta N}{\Delta t * I * \alpha * \epsilon_{\text{suht}}}, \quad (5.7)$$

missä  $\Delta t$  on mittausaika,  $I$  on kyseisen gammakvantin intensiteetti,  $\alpha$  on yhtälön (5.3) mukaisesti määritetty tehokkuuskerroin ja  $\epsilon_{\text{suht}}$  on yhtälön (5.5) suhteellinen tehokkuus. Koska yhtälön (5.7) muuttujat ovat toisistaan riippumattomia, saadaan yksittäisestä piikistä lasketulle aktiivisuudelle virhe virheen yleisen etenemislain

**Taulukko 19** – Mittauksista ja analyysista tallennetut tiedostot. Alkuperäinen spektri lokeineen, analysoidut pinta-alat, kuvat ja tunnistukset talletettiin. Tiedoston luonut ohjelma on tarvittaessa mainittu.

tiedosto	ohjelma	sisältö
*.aida	Grain	alkuperäinen spektri
*.log	Grain	mittauksen loki
*.dat	Grain	spektri ascii-muodossa
*.spe	Grain	spektri RadWare-muodossa
*.sto	gf3	sovitusten tiedot
*.txt		sovitusten tiedot, FWHM, analysoijan kommentit
*.xlsx	Excel	nuklidien tunnistukset, aktiivisuuksien laskut
*.opj	Origin	kuvat spektreistä

mukaisesti

$$\begin{aligned}
 \delta A &= \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial(\Delta N)} \delta(\Delta N) \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial(\Delta t)} \delta(\Delta t) \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial I} \delta I \right)^2 + \right. \\
 &\quad \left. \left( \frac{\partial A}{\partial \alpha} \delta \alpha \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial \epsilon_{\text{suht}}} \delta \epsilon_{\text{suht}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{\Delta N}{\Delta t * I * \alpha * \epsilon_{\text{suht}}} \left[ \left( \frac{\delta(\Delta N)}{\Delta N} \right)^2 + \left( \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t} \right)^2 + \left( \frac{\delta I}{I} \right)^2 + \right. \\
 &\quad \left. \left( \frac{\delta \alpha}{\alpha} \right)^2 + \left( \frac{\delta \epsilon_{\text{suht}}}{\epsilon_{\text{suht}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= A * \left[ \left( \frac{\delta(\Delta N)}{\Delta N} \right)^2 + \left( \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t} \right)^2 + \left( \frac{\delta I}{I} \right)^2 + \left( \frac{\delta \alpha}{\alpha} \right)^2 + \left( \frac{\delta \epsilon_{\text{suht}}}{\epsilon_{\text{suht}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Tätä yksittäisestä piikistä lasketun aktiivisuuden virhettä käytettiin kyseisen aktiivisuuden luotettavuuden arviointiin. Näytteestä löydetyn nuklidin aktiivisuus (ja sen virhe) määräytyi kaikkien kyseisen nuklidin piikkien avulla.

Kappaleen aktiivisuuspitoisuus  $C$  määritellään

$$C = \frac{A}{m'} \tag{5.9}$$

missä  $A$  on kappaleen aktiivisuus ja  $m$  on kappaleen massa. Koska muuttujat ovat toisistaan riippumattomia, aktiivisuuspitoisuuden virhe on virheen yleisen etenemislain mukaisesti

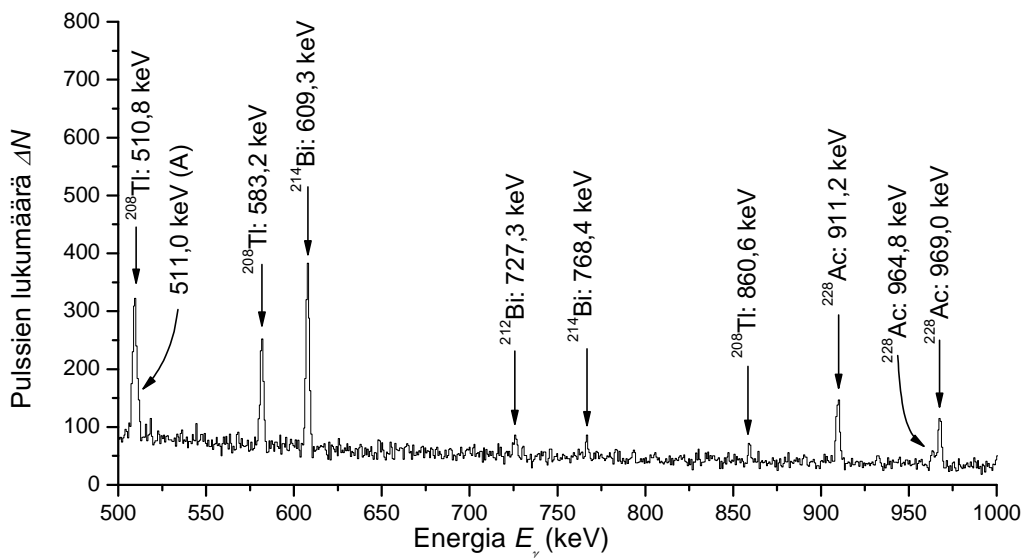
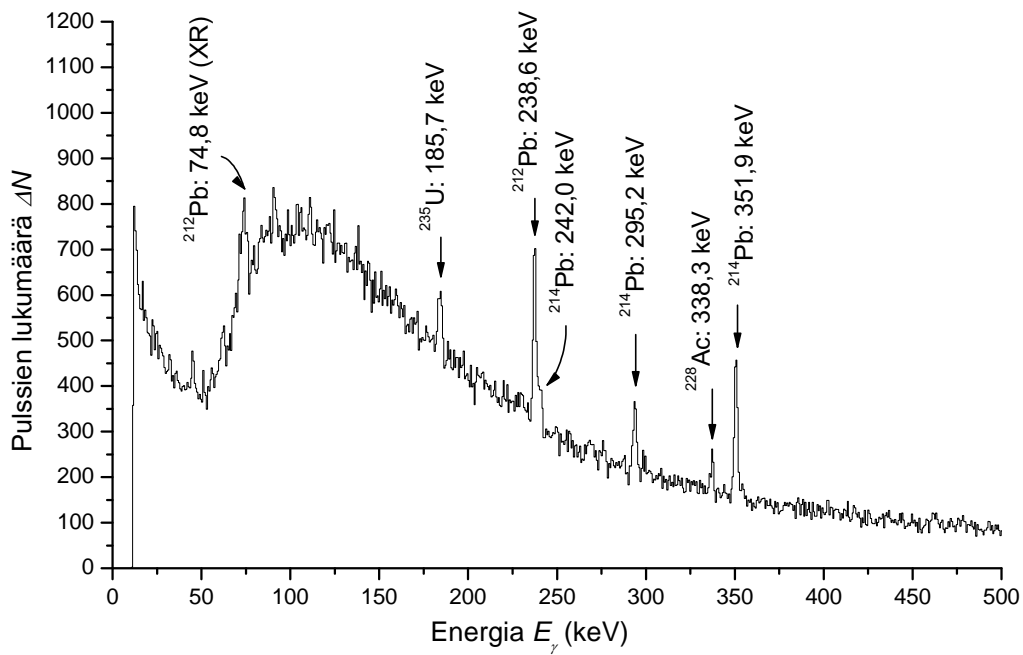
$$\delta C = C * \sqrt{\left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta m}{m}\right)^2}.$$

### 5.2.1 Taustaspektrin analyysi

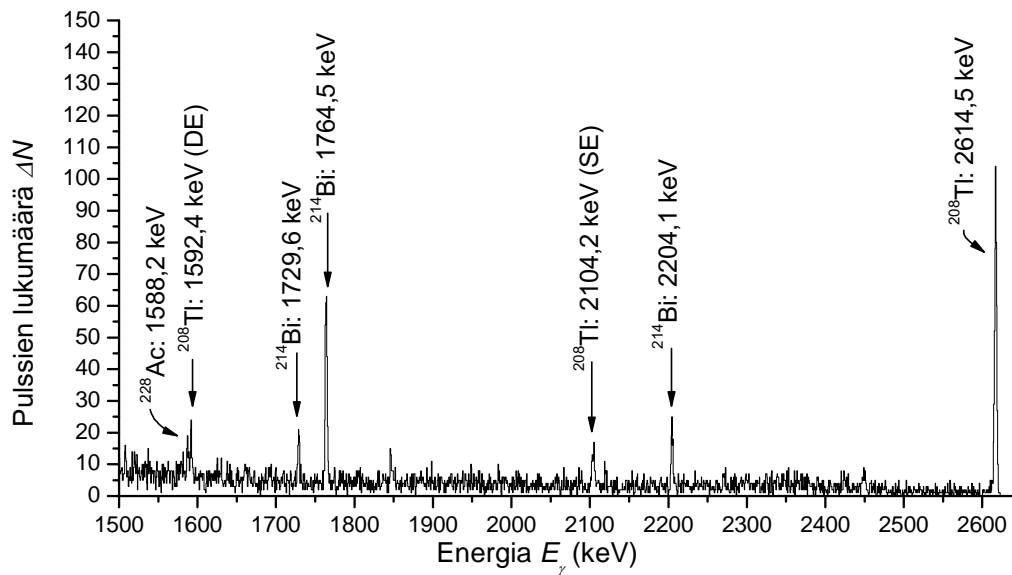
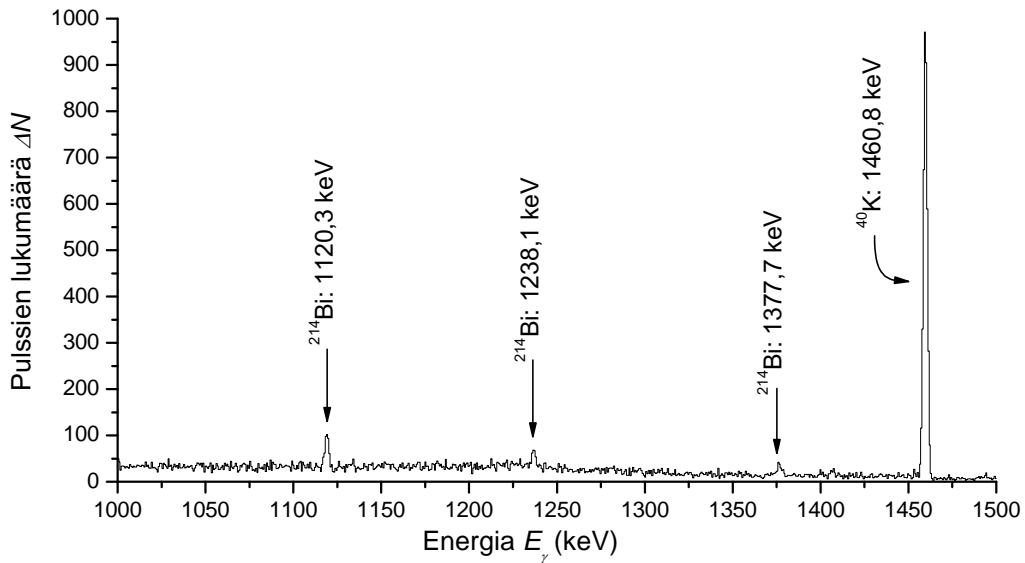
Taustan mittauksessa mittausasetelma oli täysin sama kuin muissa mittauksissa; myös osien mittauksessa käytetty kannatinteline oli paikoillaan. Tausta mitattiin, jotta tiedettiin mittauspaikan taustasäteilyn määrä ja siten osista mitatuista spektreistä osattiin vähentää taustaan kuuluvat piikit (aktiivisuudet). Mitattu taustaspektri on esitetty kuvissa 14 ja 15 (sivuilla 45 ja 46). Piikit nuklideittain on taulukoitu taulukkoon 20 sivulla 47 ja taustasta löydetyt nuklidit aktiivisuuksineen on listattu taulukkoon 21 sivulla 49. Taustasäteily on peräisin luonnossa esiintyvistä pitkäikäisistä nuklideista ja niiden hajoamissarjoista. Toriumin, uraanin ja aktiniumin hajoamissarjoja on havainnollistettu kuvassa 16 sivulla 48. Taustasäteilyn aktiivisuudesta puhuttaessa on muistettava, että mittauslaitteisto oli kalibroitu osien mittauspisteeseen, ja siten taustasta tunnistettujen nuklidien todellinen aktiivisuus (esim. ympäröivissä rakenteissa) ei ole tiedossa. Määritettyjä tausta-aktiivisuuksia käytettiin taustapiikkien eliminoimiseen osien spektreistä.

Nuklidin aktiivisuuden määrittämisessä eri piikeistä laskettuja aktiivisuuksia vertailtiin toisiinsa. Näistä aktiivisuuksista laskettiin intensiteeteillä painotettu keskiarvo, koska intensiivisimpien piikkien pinta-alat olivat suurimmat ja luotettavimmat. Jos jokin aktiivisuus poikkesi huomattavasti muista ja kyseiselle nuklidille oli käytössä useita piikkejä aktiivisuuden määrittämiseen, poikkeavaa aktiivisuutta ei otettu huomioon keskiarvon laskussa (eikä virhettä laskettaessa). Taulukossa 22 on esimerkkinä esitetty nuklidin  $^{228}\text{Ac}$  aktiivisuuden määrittäminen. Jos nuklidilla oli vain yksi piikki (esim.  $^{40}\text{K}$ ), aktiivisuus on kyseisestä piikistä laskettu aktiivisuus ja aktiivisuuden virheeksi on otettu yhtälön (5.8) mukainen virhe. Jos nuklidin aktiivisuus määritettiin useiden piikkien avulla, virheeksi on otettu maksimaalinen poikkeama keskiarvosta. Virherajoissa ei ole pyritty mahdollisimman pieneen virherajaan monimutkaisemmilla virhetarkastelumethodella tarkoituksellisesti, sillä mittausmenetelmällä ei ole mahdollisuutta selvittää todellisia tarkkoja aktiivisuuksia. Aktiivisuuden virheen avulla arvioidaan tuloksen järkevyyttä ja osien osalta tulosten pohjalta tehdään arviot siitä, ovatko nuklidien aktiivisuudet tarpeeksi pieniä viranomaisen määrittelemiä turvallisuusrajoihin nähden.

Mittausten luotettavuutta ja vertailukelpoisuutta arvioitiin vertailemalla nuklidin  $^{40}\text{K}$  aktiivisuutta mitatuissa spektreissä. Vertailuun otettiin taustaspektrin lisäksi



**Kuva 14** – 14.6.2011 mitattu taustaspektri (mittausaika 36000 sekuntia). Piikkien pinta-aloista lasketut aktiivisuudet löytyvät taulukosta 21. Lyhenteet: (XR) = röntgen, (A) = annihilaatio.



**Kuva 15** – 14.6.2011 mitattu taustaspektri (mittausaika 36000 sekuntia). Piikkien pinta-aloista lasketut aktiivisuudet löytyvät taulukosta 21. Lyhenteet: (SE) = yksinkertainen pakopiikki, (DE) = kaksinkertainen pakopiikki.

**Taulukko 20** – Taustaspektrin piikit nuklideittain. Listattuna on spektristä saatu energia  $E_\gamma$ , tunnistettu nuklidi energioineen [8], analysoitu piikin pinta-ala  $\Delta N$ , piikin intensiteetti  $I$  [8] ja laskettu aktiivisuus  $A$ . Jos piikin pinta-alaa ei ole pystytty määrittämään, aktiivisuutta ei ole voitu laskea. Lyhenteet: (XR) = röntgen, (DE) = kaksinkertainen pakopiikki, (SE) = yksinkertainen pakopiikki, (A) = annihilaatio.  
 \* = piikkiä ei ole käytetty nuklidin keskiarvoistetun aktiivisuuden määrittämisessä.  
 \*\* = 511 keV piikin pinta-ala on jaettu annihilaatiopiikin ja  $^{208}\text{Tl}$  510,77 keV piikin kesken siten, että talliumin piikin pinta-alasta laskettu aktiivisuus täsmää muiden talliumin piikkien aktiivisuuksiin.

$E_\gamma$ (keV)	nukl.	(keV)	$\Delta N$	$I$ (%)	$A$ (Bq)	
74,6	$^{212}\text{Pb}$	74,8 (XR)	-	$10,28 \pm 0,25$	-	
237,8		238,6	$1226 \pm 63$	$43,6 \pm 0,5$	$6,4 \pm 1,4$	
240,8	$^{214}\text{Pb}$	242,0	$313 \pm 50$	$7,251 \pm 0,016$	$10 \pm 3$	
294,1		295,2	$489 \pm 41$	$18,42 \pm 0,04$	$7,5 \pm 1,4$	
351,0		351,9	$1031 \pm 45$	$35,6 \pm 0,07$	$9,7 \pm 1,4$	
509,8	$^{235}\text{U}$	511,0 (A)	$630 \pm 26^{**}$	-	-	
184,5		185,7	$545 \pm 79$	$57,2 \pm 0,8$	$1,7 \pm 0,5$	
726,3		$^{212}\text{Bi}$	727,3	-	$6,67 \pm 0,09$	-
1460,0		$^{40}\text{K}$	1460,8	$3911 \pm 65$	$10,66 \pm 0,18$	$400 \pm 30$
337,5	$^{228}\text{Ac}$	338,3	$242 \pm 34$	$11,27 \pm 0,19$	$6,9 \pm 1,4^*$	
910,0		911,2	$399 \pm 25$	$25,8 \pm 0,4$	$11,9 \pm 1,0$	
964,1		964,8	$88 \pm 17$	$4,99 \pm 0,09$	$14 \pm 3$	
968,0		969,0	$291 \pm 23$	$15,8 \pm 0,3$	$14,9 \pm 1,4$	
1587,6		1588,2	-	$3,22 \pm 0,08$	-	
509,8	$^{208}\text{Tl}$	510,8	$339 \pm 14^{**}$	$22,6 \pm 0,2$	$7,1 \pm 0,7^*$	
582,1		583,2	$646 \pm 33$	$85 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,4$	
859,3		860,6	-	$12,5 \pm 0,1$	-	
1592,4		(DE)	-	-	-	
2104,2		(SE)	-	-	-	
2617,4		2614,5	$450 \pm 22$	$99,754 \pm 0,004$	$7,1 \pm 1$	
608,2	$^{214}\text{Bi}$	609,3	$1118 \pm 40$	$45,49 \pm 0,16$	$13,6 \pm 1,1$	
767,2		768,4	-	$4,894 \pm 0,011$	-	
1119,3		1120,3	$315 \pm 25$	$14,92 \pm 0,03$	$19 \pm 2$	
1237,0		1238,1	-	$5,834 \pm 0,015$	-	
1377,0		1377,7	-	$3,988 \pm 0,011$	-	
1729,8		1729,6	-	$2,878 \pm 0,008$	-	
1764,4		1764,5	$260 \pm 18$	$15,3 \pm 0,03$	$21 \pm 3$	
2205,6		2204,1	-	$4,924 \pm 0,018$	-	



**Taulukko 21** – Taustaspektristä tunnistetut nuklidit. Listattuna on nuklidi, puoliintumisaika  $t_{1/2}$  [9] ja laskettu aktiivisuus  $A$ . Nuklidista  $^{212}\text{Bi}$  löydettiin vain yksi hyvin pieni piikki (727,3 keV), jonka pohjalta ei voitu määrittää aktiivisuutta.

nuklidi	$t_{1/2}$	$A$ (Bq)
$^{212}\text{Pb}$	10,64 h	$6,4 \pm 1,4$
$^{235}\text{U}$	$7,038 * 10^8$ a	$1,7 \pm 0,5$
$^{212}\text{Bi}$	9 m/25 m/60,60m	-
$^{40}\text{K}$	$1,28 * 10^9$ a	$400 \pm 30$
$^{214}\text{Pb}$	26,8 m	$9 \pm 2$
$^{228}\text{Ac}$	6,13 h	$13 \pm 2$
$^{214}\text{Bi}$	19,9 m	$16 \pm 5$
$^{208}\text{Tl}$	3,053 m	$6 \pm 2$

23 spektriä aikaväliltä 7.6.-21.6.2011. Tänä aikana ilmaisimen HV-lähde oli pois päältä kaksi kertaa, mutta muuten mittausasetelma pysyi vakiona. Vertailu on taulukossa 23 sivulla 50. Mittauslaitteiston stabiilisuutta voi arvioida piikin paikasta  $x$ , jonka vaihteluväli kanavissa oli 2139,30-2141,74 (erotus: 2,44 kanavaa) eli energiakalibroituina 1459,94-1461,61 keV (erotus: 1,67 keV) ilmaisinsysteemin resoluution ollessa noin 2,5 keV. Laskettu aktiivisuus  $A$  on samaa kertaluokkaa kaikissa spektreissä; ainoastaan lyhyillä mittausajoilla  $T$  aktiivisuuden määrittämisessä oli ongelmia. Laskentataajuuden  $f$  kasvaessa mittausaikaa  $T$  on lyhennetty ja piikkiin on kertynyt vähemmän tapahtumia  $\Delta N$ . Nuklidin  $^{40}\text{K}$  vertailun pohjalta spektrit ja määritetyt aktiivisuudet ovat vertailukelpoisia.

**Taulukko 22** – Nuklidin  $^{228}\text{Ac}$  piikeistä lasketut aktiivisuudet  $A$ . Piikin 1588,2 keV pinta-ala oli niin pieni, että sitä ei voinut luotettavasti määrittää, joten kyseisen piikin avulla ei ole laskettu aktiivisuutta. Piikki 338,3 keV jätettiin keskiarvoa laskettaessa huomiotta muista selvästi poikkeavan aktiivisuuden vuoksi. Intensiteeteillä painotettu aktiivisuuden keskiarvo on 13 Bq ja maksimaalinen poikkeama keskiarvosta oli  $14,92 \text{ keV} - 13,20 \text{ keV} = 1,72 \text{ keV} \approx 2 \text{ keV}$ . Energiat ja intensiteetit ovat lähteestä [8].

nuklidi	$E$ (keV)	$I$ (%)	$A$ (Bq)
$^{228}\text{Ac}$	338,3	11,3	$6,9 \pm 1,4$
	911,2	25,8	$11,9 \pm 1,0$
	964,8	5,0	$14 \pm 3$
	969,0	15,8	$14,9 \pm 1,4$
	1588,2	3,2	-



**Taulukko 23** – Nuklidin  $^{40}\text{K}$  aktiivisuus spektreissä. Ensimmäisessä sarakkeessa on mitattu osa ja ensimmäisellä rivillä vertailukohtana taustaspektrin tiedot. Taulukoitu-  
na on mittausaika  $T$ , mittauksen laskentataajuus  $f$ , piikin paikka  $x$  spektrissä kanava-  
lukuna ilmaistuna, kanavalukua vastaava kalibroitu energia  $E_\gamma$ , piikin pinta-ala  $\Delta N$ ,  
laskettu aktiivisuus  $A$  ja aktiivisuuden suuruus  $S$  taustasta mitattuun aktiivisuuteen  
400 Bq nähden. Nuklidin  $^{40}\text{K}$  intensiivisimmän piikin energia on 1460,822 keV [8].

\* = ACC-021, osa nro 1, spektri Acq090611\_ACC-021\_nro1

\* = ACC-021, osa nro 2, spektri Acq100611\_ACC-021\_nro2

osa	$T$ (s)	$f$ (s $^{-1}$ )	$x$ (chn)	$E_\gamma$ (keV)	$\Delta N$	$A$	$S$ (%)
tausta	36000	9	2139,38	1459,99	3911	400 $\pm$ 30	100
AKI-002	20000	9	2139,3	1459,94	1863	340 $\pm$ 30	85
AKI-014	36000	10	2139,51	1460,08	3770	390 $\pm$ 30	98
HEN-001	36000	12	2139,37	1459,99	2304	240 $\pm$ 20	60
AKI-001	20000	16	2139,43	1460,03	1939	360 $\pm$ 30	90
IG-017	14000	34	2140,76	1460,94	1085	290 $\pm$ 20	73
IG-094	20000	37	2139,38	1460,00	2090	380 $\pm$ 30	95
IG-097	20000	41	2141,13	1461,19	1956	360 $\pm$ 30	90
IG-081	10000	62	2140,93	1461,05	1055	390 $\pm$ 30	98
AKI-003	10000	76	2139,53	1460,10	973	360 $\pm$ 30	90
IG-100	12000	84	2139,56	1460,12	1154	350 $\pm$ 30	88
IG-092	2000	356	2140,91	1461,04	129	240 $\pm$ 30	60
AKI-006	6000	356	2139,64	1460,17	613	380 $\pm$ 30	95
ACC-021*	2000	468	2141,74	1461,61	110	200 $\pm$ 30	50
AKI-008	2000	715	2139,65	1460,18	193	360 $\pm$ 40	90
IG-099	2000	767	2141,21	1461,25	172	320 $\pm$ 40	80
AKI-013	2000	1073	2139,94	1460,37	204	380 $\pm$ 40	95
AKI-009	2000	1501	2139,77	1460,26	186	340 $\pm$ 50	85
ACC-021**	2000	1853	2141	1461,10		– $\pm$ –	-
AKI-012	2000	3019	2139,59	1460,13	153	280 $\pm$ 40	70
AKI-004	3600	3073	2140	1460,42		– $\pm$ –	-
AKI-010	1000	4510	2140,2	1460,60	66	240 $\pm$ 70	60
AKI-005	3600	4849	2140	1460,42		– $\pm$ –	-
AKI-011	1000	9298	-			– $\pm$ –	-

### 5.2.2 Osan AKI-012 analyysi

Osa AKI-012 oli MAP-tiloissa (lääkeisotooppituotanto) käytössä ollut 25 µm paksuinen kohtiokalvo, joka oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Osan massa  $m = (0,0025 \pm 0,0025)$  kg ja se oli päivätty (poistettu käytöstä) 24.8.2004. Spekttrin mittausaika oli 2000 sekuntia ja laskentataajuus noin 3019 pulssia sekunnissa. Osasta löydetty nuklidit aktiivisuuksineen ja aktiivisuuspitoisuuksineen on listattu taulukkoon 24. Osan AKI-012 spektri on esitetty kuvissa 1 ja 2 (Liite E.1) ja piikit nuklideittain on taulukoitu taulukkoon 19 (Liite E.1).

Osan erikoisuutena oli löydetty  $^{44}\text{Ti}$  (puoliintumisaika  $t_{1/2} = 60,4$  a), joka hajoaa lyhytikäiseksi skandiumiksi  $^{44}\text{Sc}$  ( $t_{1/2} = 3,92$  h). Ruostumattoman teräksen tuotteiden esikartoituksessa (ks. Taulukko 8) listattuja nuklideja löytyi kolme:  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  ja  $^{54}\text{Mn}$ . Kyseisten nuklidien aktiivisuudet olivat myös suurimmat kaikista löydetyistä:  $(86 \pm 4)$  kBq mangaanilla  $^{54}\text{Mn}$ ,  $(56 \pm 5)$  kBq koboltilla  $^{57}\text{Co}$  ja  $(4,6 \pm 0,3)$  kBq koboltilla  $^{60}\text{Co}$ .

**Taulukko 24** – Osasta AKI-012 tunnistetut nuklidit. Listattuna on nuklidi, puoliintumisaika  $t_{1/2}$  [9], laskettu aktiivisuus  $A$  ja aktiivisuuspitoisuus  $C$ . Nuklidin  $^{60}\text{Co}$  aktiivisuuden virheenä ei ole käytetty maksimaalista poikkeamaa keskiarvosta, koska arvot olivat lähes samat ja virheen arviona olisi ollut epäluotettavan pieni luku. Virheenä on yksittäisen piikin aktiivisuuden virhe. Taustasäteilyistä johtuvat piikit:  $^{208}\text{Tl}$  ja  $^{40}\text{K}$ .

nuklidi	$t_{1/2}$	$A$ (Bq)	$C$ (kBq/kg)
$^{44}\text{Ti}$	60,4 a	$54 \pm 9$	$20 \pm 30$
$^{44}\text{Sc}$	3,92 h	$89 \pm 8$	$40 \pm 40$
$^{57}\text{Co}$	271,79 d	$56000 \pm 5000$	$(20 \pm 30) * 10^3$
$^{22}\text{Na}$	2,603 a	$300 \pm 20$	$120 \pm 130$
$^{54}\text{Mn}$	312,2 d	$86000 \pm 4000$	$(30 \pm 40) * 10^3$
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	$4600 \pm 300$	$(2 \pm 2) * 10^3$
$^{40}\text{K}$	$1,28 * 10^9$ a	$280 \pm 40$	
$^{208}\text{Tl}$	3,053 m	$6 \pm 2$	

### 5.2.3 Osan IG-092 analyysi

Osa IG-092 oli IGISOL-ryhmän käytössä ollut ruostumattomasta teräksestä valmistettu haitari (ja jäykistimet). Osan massa  $m = (1,970 \pm 0,005)$  kg ja se oli päivätty 29.7.2003. Spekttrin mittausaika oli 2000 sekuntia ja laskentataajuus noin 356

pulssia sekunnissa. Osasta löydetty nuklidit aktiivisuuksineen ja aktiivisuuspitoisuuksineen on listattu taulukkoon 25. Osan IG-092 spektri on esitetty kuvassa 3 (Liite E.2) ja piikit nuklideittain on taulukoitu taulukkoon 20 (Liite E.2).

**Taulukko 25** – Osasta IG-092 tunnistetut nuklidit. Listattuna on nuklidi, puoliintumisaika  $t_{1/2}$  [9], laskettu aktiivisuus  $A$  ja aktiivisuuspitoisuus  $C$ . Nuklidin  $^{60}\text{Co}$  aktiivisuuden virheenä ei ole käytetty maksimaalista poikkeamaa keskiarvosta, koska arvot olivat lähes samat ja virheen arviona olisi ollut epäluotettavan pieni luku. Virheenä on yksittäisen piikin aktiivisuuden virhe. Taustasäteilystä johtuvat piikit:  $^{208}\text{Tl}$  ja  $^{40}\text{K}$ .

nuklidi	$t_{1/2}$	$A$ (Bq)	$C$ (kBq/kg)
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	$6000 \pm 400$	$3,1 \pm 0,2$
$^{40}\text{K}$	$1,28 * 10^9$ a	$240 \pm 30$	
$^{208}\text{Tl}$	3,053 m	$7 \pm 3$	

Ruostumattoman teräksen tuotteiden esikartoituksesta (ks. Taulukko 8) löytyvä  $^{60}\text{Co}$  oli ainoa osasta löytynyt nuklidi ja sen aktiivisuus oli  $(6,0 \pm 0,4)$  kBq. Osasta IG-092 oli tehty aktiivisuusmäärittäksiä myös aikaisemmin (4.8.2003). Silloin oli löydetty taulukon 26 mukaiset aktiivisuudet. Taulukkoon on laskettu myös kyseisten määrittäysten aktiivisuudet tämän työn spektrin mittauspäivänä (7.6.2011) ja lisäksi taulukossa on 7.6.2011 mitatut aktiivisuudet vertailun vuoksi. 7.6.2011 mitattu aktiivisuus on vain alle neljäsosa aiemman mittauksen pohjalta lasketusta aktiivisuudesta 7.6.2011. Koska aikaisemmasta mittauksesta ei ole muuta dokumentaatiota kuin aktiivisuuslukemat, tulosten luotettavuuksien vertailu on hyvin vaikeaa. Aktiivisuuslukujen suhde voi kuitenkin antaa yhden karkean arvion tehokkuuskalibroinnin (ks. Kappale 5.1.2) yhteydessä puhutusta turvallisuuskertoimesta ( $> 1$ ), jolla aktiivisuuslukemat täytyy kertoa puutteellisen tehokkuuskalibroinnin (ja myös useiden muiden tekijöiden) vuoksi.

#### 5.2.4 Osan IG-099 analyysi

Osa IG-099 oli IGISOL-ryhmän käytössä ollut alumiinista valmistettu ioniohjaimen osa. Osan massa  $m = (0,2700 \pm 0,0025)$  kg ja se oli päivätty 31.7.2003. Spektrin mittausaika oli 2000 sekuntia ja laskentataajuus noin 767 pulssia sekunnissa. Osasta löydetty nuklidit aktiivisuuksineen ja aktiivisuuspitoisuuksineen on listattu taulukkoon 27. Osan IG-099 spektri on esitetty kuvissa 4 ja 5 (Liite E.3) ja piikit nuklideittain on taulukoitu taulukkoon 21 (Liite E.3).

Spektristä löytyi kaksi hyvin pientä piikkiä (885,3 keV ja 1063,5 keV), joiden pinta-alaa ei voinut luotettavasti määrittää ja joita ei tunnistettu. Tästä ei kuitenkaan

**Taulukko 26** – Osasta IG-092 mitatut aktiivisuudet. Listattuna on nuklidi, puoliintumisaika  $t_{1/2}$  [9], aktiivisuus  $A_{a1}$  4.8.2003, aktiivisuuden  $A_{a1}$  pohjalta laskettu aktiivisuus  $A_{a2}$  7.6.2011 ja 7.6.2011 mitattu aktiivisuus  $A$ .

nuklidi	$t_{1/2}$	$A_{a1}$ (Bq)	$A_{a2}$ (Bq)	$A$ (Bq)
$^{58}\text{Co}$	70,86 d	80000	< 1	-
$^{51}\text{Cr}$	27,70 d	80000	< 1	-
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	74400	26500	$6000 \pm 400$
$^{54}\text{Mn}$	312,2 d	50400	87	-
$^{59}\text{Fe}$	44,503 d	5600	< 1	-
$^{57}\text{Co}$	271,79 d	2400	2	-

**Taulukko 27** – Osasta IG-099 tunnistetut nuklidit. Listattuna on nuklidi, puoliintumisaika  $t_{1/2}$  [9], laskettu aktiivisuus  $A$  ja aktiivisuuspitoisuus  $C$ . Taustasäteilystä johtuvat piikit:  $^{208}\text{Tl}$  ja  $^{40}\text{K}$ .

nuklidi	$t_{1/2}$	$A$ (Bq)	$C$ (kBq/kg)
$^{125}\text{Sb}$	2,77 a	$6800 \pm 400$	$25,2 \pm 1,2$
$^{155}\text{Eu}$	4,761 a	$740 \pm 50$	$2,7 \pm 0,2$
$^{137}\text{Cs}$	30,17 a	$28000 \pm 2000$	$105 \pm 7$
$^{134}\text{Cs}$	2,06 a	$55 \pm 7$	$0,20 \pm 0,03$
$^{22}\text{Na}$	2,603 a	$81 \pm 6$	$0,30 \pm 0,03$
$^{26}\text{Al}$	$7,16 * 10^5$ a	$13 \pm 3$	$0,050 \pm 0,008$
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	-	-
$^{40}\text{K}$	$1,28 * 10^9$ a	$320 \pm 40$	-
$^{208}\text{Tl}$	3,053 m	-	-

ollut käytännöllistä haittaa, koska niin pieniä pinta-aloja vastaava aktiivisuus on oletettavasti alle 10 Bq (vrt. osasta löydetty  $^{26}\text{Al}$ :  $(13 \pm 3)$  Bq) ja osasta mitattiin suuria aktiivisuuksia, jotka määrittelevät osan jatkotoimenpiteet. Alumiinin tuotteiden esikartoituksessa (ks. Taulukot 11 ja 12) listattuja nuklideja löytyi kolme:  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{26}\text{Al}$  ja heikko viittaus nuklidin  $^{60}\text{Co}$  läsnäoloon. Suurimmat aktiivisuudet olivat kuitenkin peräisin käytön seurauksena kontaminoitumisesta: cesiumin  $^{137}\text{Cs}$  aktiivisuus oli  $(28 \pm 2)$  kBq ja antimonin  $^{125}\text{Sb}$   $(6,8 \pm 0,4)$  kBq.

Osasta IG-099 oli tehty aktiivisuusmäärittämiä myös aikaisemmin (4.8.2003). Silloin oli löydetty taulukon 28 mukaiset aktiivisuudet. Taulukkoon on laskettu myös kyseisten määrittysten aktiivisuudet tämän työn mittauspäivänä (8.6.2011) sekä 8.6.2011 mitattu aktiivisuus. Aikaisemman mittauksen mukaiset aktiivisuudet

8.6.2011 ovat noin 3-5 kertaa suurempia kuin tässä työssä mitatut. Kuten osan IG-092 kohdalla (ks. Kappale 5.2.3), aikaisemman tuloksen luotettavuutta ei voida arvioida, mutta tulosten epäsuhtaa voidaan käyttää karkeana viitteenä arvioitaessa turvallisuuskertoimen suuruutta.

**Taulukko 28** – Osasta IG-099 mitatut aktiivisuudet. Listattuna on nuklidi, puoliintumisaika  $t_{1/2}$  [9], aktiivisuus  $A_{a1}$  4.8.2003, aktiivisuuden  $A_{a1}$  pohjalta laskettu aktiivisuus  $A_{a2}$  8.6.2011 ja 8.6.2011 mitattu aktiivisuus  $A$ .

nuklidi	$t_{1/2}$	$A_{a1}$ (Bq)	$A_{a2}$ (Bq)	$A$ (Bq)
$^{125}\text{Sb}$	2,77 a	150000	21000	$6800 \pm 400$
$^{137}\text{Cs}$	30,17 a	103500	86400	$28000 \pm 2000$
$^{22}\text{Na}$	2,603 a	3000	370	$81 \pm 6$
$^{54}\text{Mn}$	312,2 d	1500	3	-

### 5.2.5 Osan ACC-021 analyysi

Osa ACC-021 (nro1) oli syklotronilla K-130 käytössä ollut D-elektrodin kärki (materiaalit: Cu, Ta, Mo). Osan massa  $m = (1,1700 \pm 0,0025)$  kg ja se oli poistettu käytöstä 21.1.2003. Spektrin mittausaika oli 2000 sekuntia ja laskentataajuus noin 468 pulssia sekunnissa. Osasta löydetty nuklidit aktiivisuuksiin ja aktiivisuuspitoisuuksiin on listattu taulukkoon 29. Osan ACC-021 (nro1) spektri on esitetty kuvassa 6 (Liite E.4) ja piikit nuklideittain on taulukoitu taulukkoon 22 (Liite E.4).

**Taulukko 29** – Osasta ACC-021 (nro1) tunnistetut nuklidit. Listattuna on nuklidi, puoliintumisaika  $t_{1/2}$  [9], laskettu aktiivisuus  $A$  ja aktiivisuuspitoisuus  $C$ . Nuklidin  $^{60}\text{Co}$  aktiivisuuden virheenä ei ole käytetty maksimaalista poikkeamaa keskiarvosta, koska arvot olivat lähes samat ja virheen arviona olisi ollut epäluotettavan pieni luku. Virheenä on yksittäisen piikin aktiivisuuden virhe. Taustasta peräisin olevia nuklideja näkyy spektrissä kaksi:  $^{40}\text{K}$  ja  $^{208}\text{Tl}$  (ks. Taulukko 21).

nuklidi	$t_{1/2}$	$A$ (Bq)	$C$ (kBq/kg)
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	$7600 \pm 400$	$6,5 \pm 0,4$
$^{40}\text{K}$	$1,28 * 10^9$ a	$200 \pm 30$	
$^{208}\text{Tl}$	3,053 m	$6 \pm 2$	

Puhtaan kuparin tuotteiden esikartoituksessa (ks. Taulukko 13) listattuja nuklideja löytyi yksi:  $^{60}\text{Co}$  aktiivisuudella ( $7,6 \pm 0,4$ ) kBq.

## 5.2.6 Osan AKI-003 analyysi

Paketti AKI-003 sisälsi enimmäkseen metallijätettä (ulkonäön perusteella ainakin kuparia), jonka massa  $m = (0,2400 \pm 0,0025)$  kg. Alkuperämerkintänä oli RF-1 (käyttöpaikka: syklotroni K-130) ja jätteet oli päivätty päivämäärällä 18.2.2007. Spektrin mittausaika oli 10000 sekuntia ja laskentataajuus noin 76 pulssia sekunnissa. Osasta löydetyt nuklidit aktiivisuuksineen ja aktiivisuuspitoisuuksineen on listattu taulukkoon 30. Osan AKI-003 spektri on esitetty kuvissa 7 ja 8 (Liite E.5) ja piikit nuklideittain on taulukoitu taulukoihin 23 ja 24 (Liite E.5).

**Taulukko 30** – Osasta AKI-003 tunnistetut nuklidit. Listattuna on nuklidi, puoliintumisaika  $t_{1/2}$  [9], laskettu aktiivisuus  $A$  ja aktiivisuuspitoisuus  $C$ . Nuklidin  $^{60}\text{Co}$  aktiivisuuden virheenä ei ole käytetty maksimaalista poikkeamaa keskiarvosta, koska arvot olivat lähes samat ja virheen arviona olisi ollut epäluotettavan pieni luku. Virheenä on yksittäisen piikin aktiivisuuden virhe. Taustasta peräisin olevia nuklideja näkyy spektrissä kolme:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  ja  $^{208}\text{Tl}$  (ks. Taulukko 21).

nuklidi	$t_{1/2}$	$A$ (Bq)	$C$ (kBq/kg)
$^{125}\text{Sb}$	2,77 a	$850 \pm 90$	$3,5 \pm 0,4$
$^{108}\text{Ag}$	418 a	$6,9 \pm 1,0$	$0,029 \pm 0,005$
$^{110}\text{Ag}$	2,77 a	$50 \pm 20$	$0,19 \pm 0,07$
$^{22}\text{Na}$	2,603 a	$7,8 \pm 0,9$	$0,032 \pm 0,004$
$^{65}\text{Zn}$	244,3 d	$850 \pm 40$	$3,5 \pm 0,2$
$^{60}\text{Co}$	5,272 a	$921 \pm 50$	$3,8 \pm 0,3$
$^{40}\text{K}$	$1,28 * 10^9$ a	$360 \pm 30$	
$^{214}\text{Bi}$	19,9 m	$14 \pm 8$	
$^{208}\text{Tl}$	3,053 m	$5 \pm 4$	

Puhtaan kuparin tuotteiden esikartoituksessa (ks. Taulukko 13) listattuja nuklideja löytyi kaksi:  $^{60}\text{Co}$  aktiivisuudella ( $921 \pm 50$ ) Bq ja  $^{65}\text{Zn}$  aktiivisuudella ( $850 \pm 40$ ) Bq. Kyseiset aktiivisuudet olivat myös suurimmat osasta löydetyt aktiivisuudet yhdessä antimonin  $^{125}\text{Sb}$  kanssa.

## 6 Päätelmät

Tutkielman alussa tehty kartoitus jäteosista mahdollisesti löytyvistä nuklideista oli hyödyllinen, vaikkakin osista löydettiin paljon muitakin aktiivisia nuklideja. Kartoitus helpotti ja ohjasi oikeaan suuntaan nuklidien tunnistustyötä, joka tapahtui nuklidikirjastoja selailemalla. Toinen puoli tunnistamisista oli työläämpi, koska

joukko aktiivisia nuklideja oli peräisin osan käyttöpaikkasta riippuen eri kontaminaatioista. Pääsääntöisesti osasta mitatusta spektristä löytyi kartoituksessa listattuja nuklideja, taustasta peräisin olevia nuklideja ja mahdollisesti kontaminaatiosta peräisin olevia nuklideja. Siten osien nuklidisisältö ei ollut yllätyksellinen.

Mitattujen spektrien siisteydestä ja piikkien symmetrisyydestä voi päätellä mitauslaitteiston toimineen optimaalisesti. Mittausten tulokset olivat laadukkaita ja keskenään vertailukelpoisia. Jos nuklidilla oli useita piikkejä aktiivisuuden määrittämisessä, piikeistä lasketut aktiivisuudet olivat yleensä samaa suuruusluokkaa ja näiden pohjalta laskettu keskiarvo virheineen luotettava. Määritetyt aktiivisuudet toimivat hyvin pohjana absoluuttisten aktiivisuuksien arvioinneille. Absoluuttisten aktiivisuuksien arvioinnissa määritetyt aktiivisuudet kerrotaan vielä turvallisuuskertoimella, jolla otetaan huomioon aktiivisuusmittauksessa tapahtuneiden alkuperäisten säteilytapahtumien häviöiden vaikutus.

Muutamista osista oli mitattu aktiivisuuksia vuonna 2003. Näistä mittauksista lasketut aktiivisuudet tämän työn mittauspäiville olivat noin 3-5 kertaa suurempia. Näistä mittauksista ei voi tehdä täsmällisiä johtopäätöksiä, koska vanhojen mittausten tekotavasta ja analyysistä ei ole mitään tietoa; aktiivisuudet voivat olla esimerkiksi karkeita arvioita. Joka tapauksessa lukemat antavat suuntaa turvallisuuskertoimelle, jolla tämän työn mitatut aktiivisuudet kerrotaan osien loppusijoitusta mietittäessä.

Tulosten perusteella osat voidaan luokitella vähä-, keski- tai korkea-aktiiviseksi jätteeksi. Jäteluokituksessa tulee huomioida, että aktiivisuuden lisäksi aktiivisuuspitoisuus (Bq/kg) on säteilysuojelussa käytetty suure. Mitatut osat vaihtelivat hyvin ohuista (ja kevyistä) metallikalvoista isompiin metalliosiin, joten saman aktiivisuuden omaavilla osilla voi olla usean kertaluokan ero aktiivisuuspitoisuudessa. Siksi luokituksessa on sekä aktiivisuus- että aktiivisuuspitoisuusraja kullekin luokalle. Nykyisen lainsäädännön vapaarajoihin ja päästörajoihin pohjautuen taulukossa 31 on esitetty luokitusperusteet.

**Taulukko 31** – Jätteiden luokitus. Luokassa on sekä aktiivisuudelle  $A$  että aktiivisuuspitoisuudelle  $C$  raja. Jäte kuuluu siihen luokkaan, kumpi ehdoista ( $A/C$ ) antaa korkeamman luokituksen (vähä < keski < korkea). Rajat pätevät kunkin jätepalan kaikkien nuklidien  $k$  summille.

jäteluokka	$A$ (kBq)	$C$ (kBq/kg)
vähäaktiivinen	$\sum A_k < 10$	$\sum C_k < 10$
keskiaktiivinen	$10 < \sum A_k < 100$	$10 < \sum C_k < 100$
korkea-aktiivinen	$100 < \sum A_k$	$100 < \sum C_k$

Yleisimmät osista mitatut säteilysuojelullisesti merkittävät nuklidit olivat  $^{60}\text{Co}$  ( $t_{1/2} = 5,272$  vuotta) ja  $^{137}\text{Cs}$  ( $t_{1/2} = 30,17$  vuotta). Kobolttin aktiivisuus oli enimillään 7,6 kBq ja cesiumin aktiivisuus 28 kBq. Jäteosista löytyy mitattuna analyysiosassa esiteltyjen osien lisäksi sekä hyvin matalan aktiivisuuden osia että juuri yleisimpiä nuklideja sisältäviä loppusijoitusta tarvitsevia osia. Kaikki kesän 2011 aikana mitatut osat on listattu liitteessä D.

Suurempien osien mittauksia (esim. putket) varten kannattanee tehokkuuskalibrointi tehdä useammassa pisteessä eri etäisyyksillä ja kulmilla. Näin saadaan kokeellista tietoa mittauksissa käytettävän ilmaisimen tehokkuuden muutoksista, kun säteilylähde ei ole ilmaisimen keskiakselilla. Mitattavan osan koosta ja aktiivisuuden jakautumisesta riippuen kalibroinneista voidaan laskea painotettu keskiarvo, joka on pistemäistä kalibrointia luotettavampi.

Tulevaisuudessa suoritettavia aktiivisuusmittauksia varten pohdittiin kappaleessa 4.4 vaihtoehtoisia mittausrakenteita. Tutkielman mittaustapa oli työläs ja selvästi oli löydettävissä parempia ratkaisuja. Hyvän mittausrakenteen tulee rakentua laadukkaasti Ge-ilmaisimen ympärille. Muiden osien valinnassa tulee painottaa helppokäyttöisyyttä, vaivatonta liikuteltavuutta ja erityisesti hyvää analyysiohjelmistoa. Suurin vaikutus nopeaan ja helppoon käytettävyyteen on juuri valitulla ohjelmistolla. Toinen erittäin tärkeä kriteeri on helppo liikuteltavuus, jotta koko mittausrakenne voidaan siirtää tarvittaessa vaikeakulkuisiin mittausrakenteisiin. Tällaisen rakenteen monipuolisuutta ja analyysitarkkuutta voisi jälkikäteen laajentaa itse tehtävällä 3D-kalibrointiohjelmalla, joka ottaisi huomioon säteilylähteen dimensiot. Kaupallisesti tällaisia ohjelmia on jo saatavilla. Lisäksi uudelle ilmaisimelle kannattaisi suunnitella testi- ja kalibrointiohjelma, jonka tulokset arkistoitaisiin ilmaisimen kunnon ja toimintakyvyn seuraamiseksi.

Jättemittauksen aikana tuli itse jätteiden tuottamiseen ja niiden hallintaan liittyvä parannusehdotus. Ryhmillä tai keskitetyllä toimijalla voisi olla inventaariolista käytettävistä laitteista ja osista. Listasta näkisi, mitkä osat ovat käytössä ja mitkä on poistettu käytöstä. Käyttöoikeus listaan olisi ryhmien laitteistoista vastaavilla ja listan muokkausoikeudet valituilla henkilöillä siten, että lista pysyisi ajantasaisena. Käytöstä poistetut osat mitattaisiin välittömästi ja luokiteltaisiin joko vähä-, keski- tai korkea-aktiiviseksi jätteeksi. Uudelleenkäytettävät osat varastoitaisiin asianmukaisesti luokituksen mukaan. Näin yhdestä paikasta voisi tarkistaa aikaisemmin sivuun siirretyt käyttökelpoiset osat ja mahdollisesti uusien hankinnalta välttyttäisiin.



## Viitteet

- [1] Säteilyturvakeskus. *ST 1.1: Säteilytoiminnan turvallisuusperusteet*. Edita Prima Oy, Helsinki, 2005.
- [2] Jyväskylän yliopisto. Fysiikan laitoksen tutkimus. <https://www.jyu.fi/fysiikka/tutkimus>. haettu 29.09.2010.
- [3] Säteilyturvakeskus. *ST 6.2: Radioaktiiviset jätteet ja päästöt*. Oy Edita Ab, Helsinki, 1999.
- [4] Säteilyturvakeskus. *ST 1.5: Säteilyn käytön vapauttaminen turvallisuusluvasta ja ilmoitusvelvollisuudesta*. Oy Edita Ab, Helsinki, 1999.
- [5] M. K. Craddock and K. R. Symon. Cyclotrons and fixed-field alternating-gradient accelerators. In *Reviews of accelerator science and technology*, volume 1. World Scientific Publishing Co., 2008.
- [6] Kenneth S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, first edition, 1988.
- [7] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, Inc., 4th edition, 2010.
- [8] National Nuclear Data Center. Q-value calculator. <http://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>. haettu syyskuu, 2010.
- [9] J. Magill, G. Pfennig, and J. Galy. *Karlsruher Nuklidkarte*. European Commission, 7th edition, 2006.
- [10] Gordon Gilmore and John Hemingway. *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. John Wiley & Sons, Ltd, first edition, 1995.
- [11] Outokumpu. Steel professional tool, grades, chemical composition. <http://www.outokumpu.com/applications/documents/start.asp>. haettu 7.10.2010.
- [12] Alumeco Finland Oy AB. Tekninen informaatio, kemiallinen koostumus. [http://www.alumeco.fi/Tekninen\\_informaatio/Kemiallinen\\_koostumus.aspx](http://www.alumeco.fi/Tekninen_informaatio/Kemiallinen_koostumus.aspx). haettu 8.10.2010.
- [13] Inc. Automation Creations. Matweb, material property data. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a2dc020d04fe4657a0441f3edc71630f>. haettu 24.01.2011.

## A Ruostumattomien teräslaatujaen alkuaine- ja isotooppikoostumukset

Outokumpu ilmoittaa kaikille seostealkuaineille suurimman pitoisuuden (max.), tärkeimmille seosteille myös vähimmäispitoisuuden (min.) ja tavoitepitoisuuden (aim.). Loppuosa materiaalista on rautaa. Teräslaatujaen isotooppikoostumukset

**Taulukko 1** – Teräslaadun 304 (ASTM-standardi) seostealkuaineiden pitoisuudet [11].

alkuaine	pitoisuus (%)		
	min.	max.	aim.
C		0,07	0,04
Si		1,0	
Mn		2,0	
P		0,045	
S		0,015	
Cr	17,0	21,0	18,1
Ni	8,0	10,5	8,1
N		0,11	

**Taulukko 2** – Teräslaadun 304L (ASTM-standardi) seostealkuaineiden pitoisuudet [11].

alkuaine	pitoisuus (%)		
	min.	max.	aim.
C		0,030	0,020
Si		1,0	
Mn		2,0	
P		0,045	
S		0,030	
Cr	17,5	21,0	18,3
Ni	8,0	10,0	9,2
N		0,11	0,06

**Taulukko 3** – Teräslaadun 316 (ASTM-standardi) seostealkuaineiden pitoisuudet [11].

alkuaine	pitoisuus (%)		
	min.	max.	aim.
C		0,07	0,04
Si		1,0	
Mn		2,0	
P		0,045	
S		0,015	
Cr	16,0	18,5	17,2
Ni	10,5	14,0	10,1
N		0,11	0,01
Mo	2,0	2,5	2,1

**Taulukko 4** – Teräslaadun 316L (ASTM-standardi) seostealkuaineiden pitoisuudet [11].

alkuaine	pitoisuus (%)		
	min.	max.	aim.
C		0,030	0,020
Si		1,0	
Mn		2,0	
P		0,045	
S		0,030	
Cr	16,0	20,0	17,2
Ni	10,0	14,0	10,1
N		0,11	0,04
Mo	2,0	2,5	2,1

on laskettu alkuainekoostumusten perusteella. Alkuaineen pysyvien isotooppien keskinäiset määräsuhteet on otettu nuklidikartasta [9]. Isotooppipitoisuudet on esitetty taulukoissa 5, 6, 7 ja 8.

**Taulukko 5** – Teräslaadun 304 (ASTM-standardi) isotooppipitoisuudet.

alkuaine	pitoisuus (%)	isotooppi	pitoisuus (%)
Fe	65,26	<sup>56</sup> Fe	59,88
		<sup>54</sup> Fe	3,81
		<sup>57</sup> Fe	1,38
		<sup>58</sup> Fe	0,18
Cr	21	<sup>52</sup> Cr	17,60
		<sup>53</sup> Cr	2,00
		<sup>50</sup> Cr	0,91
		<sup>54</sup> Cr	0,50
Ni	10,5	<sup>58</sup> Ni	7,15
		<sup>60</sup> Ni	2,75
		<sup>62</sup> Ni	0,38
		<sup>61</sup> Ni	0,12
		<sup>64</sup> Ni	0,10
Mn	2,0	<sup>55</sup> Mn	2,00
Si	1,0	<sup>28</sup> Si	0,92
		<sup>29</sup> Si	0,05
		<sup>30</sup> Si	0,03
N	0,11	<sup>14</sup> N	0,11
		<sup>15</sup> N	0,0004
C	0,07	<sup>12</sup> C	0,07
		<sup>13</sup> C	0,0007
P	0,045	<sup>31</sup> P	0,05
S	0,015	<sup>32</sup> S	0,01
		<sup>34</sup> S	0,0006
		<sup>33</sup> S	0,0001
		<sup>36</sup> S	0,000002

**Taulukko 6** – Teräslaadun 304L (ASTM-standardi) isotooppipitoisuudet.

alkuaine	pitoisuus (%)	isotooppi	pitoisuus (%)
Fe	65,785	<sup>56</sup> Fe	60,36
		<sup>54</sup> Fe	3,85
		<sup>57</sup> Fe	1,39
		<sup>58</sup> Fe	0,19
Cr	21	<sup>52</sup> Cr	17,60
		<sup>53</sup> Cr	2,00
		<sup>50</sup> Cr	0,91
		<sup>54</sup> Cr	0,50
Ni	10	<sup>58</sup> Ni	6,81
		<sup>60</sup> Ni	2,62
		<sup>62</sup> Ni	0,36
		<sup>61</sup> Ni	0,11
		<sup>64</sup> Ni	0,09
Mn	2,0	<sup>55</sup> Mn	2,00
Si	1,0	<sup>28</sup> Si	0,92
		<sup>29</sup> Si	0,05
		<sup>30</sup> Si	0,03
N	0,11	<sup>14</sup> N	0,11
		<sup>15</sup> N	0,0004
C	0,03	<sup>12</sup> C	0,03
		<sup>13</sup> C	0,0003
P	0,045	<sup>31</sup> P	0,05
S	0,03	<sup>32</sup> S	0,03
		<sup>34</sup> S	0,001
		<sup>33</sup> S	0,0002
		<sup>36</sup> S	0,000003

**Taulukko 7 – Teräslaadun 316 (ASTM-standardi) isotooppipitoisuudet.**

alkuaine	pitoisuus (%)	isotooppi	pitoisuus (%)
Fe	61,76	<sup>56</sup> Fe	56,67
		<sup>54</sup> Fe	3,61
		<sup>57</sup> Fe	1,31
		<sup>58</sup> Fe	0,17
Cr	18,5	<sup>52</sup> Cr	15,50
		<sup>53</sup> Cr	1,76
		<sup>50</sup> Cr	0,80
		<sup>54</sup> Cr	0,44
Ni	14	<sup>58</sup> Ni	9,53
		<sup>60</sup> Ni	3,67
		<sup>62</sup> Ni	0,51
		<sup>61</sup> Ni	0,16
		<sup>64</sup> Ni	0,13
Mn	2,0	<sup>55</sup> Mn	2,00
Si	1,0	<sup>28</sup> Si	0,92
		<sup>29</sup> Si	0,05
		<sup>30</sup> Si	0,03
N	0,11	<sup>14</sup> N	0,11
		<sup>15</sup> N	0,0004
C	0,07	<sup>12</sup> C	0,07
		<sup>13</sup> C	0,0007
P	0,045	<sup>31</sup> P	0,05
S	0,015	<sup>32</sup> S	0,01
		<sup>34</sup> S	0,0006
		<sup>33</sup> S	0,0001
		<sup>36</sup> S	0,000002
Mo	2,5	<sup>98</sup> Mo	0,60
		<sup>96</sup> Mo	0,42
		<sup>95</sup> Mo	0,40
		<sup>92</sup> Mo	0,37
		<sup>100</sup> Mo	0,24
		<sup>97</sup> Mo	0,24
		<sup>94</sup> Mo	0,23

**Taulukko 8** – Teräslaadun 316L (ASTM-standardi) isotooppipitoisuudet.

alkuaine	pitoisuus (%)	isotooppi	pitoisuus (%)
Fe	60,285	<sup>56</sup> Fe	55,31
		<sup>54</sup> Fe	3,52
		<sup>57</sup> Fe	1,28
		<sup>58</sup> Fe	0,17
Cr	20	<sup>52</sup> Cr	16,76
		<sup>53</sup> Cr	1,90
		<sup>50</sup> Cr	0,87
		<sup>54</sup> Cr	0,47
Ni	14	<sup>58</sup> Ni	9,53
		<sup>60</sup> Ni	3,67
		<sup>62</sup> Ni	0,51
		<sup>61</sup> Ni	0,16
		<sup>64</sup> Ni	0,13
Mn	2,0	<sup>55</sup> Mn	2,00
Si	1,0	<sup>28</sup> Si	0,92
		<sup>29</sup> Si	0,05
		<sup>30</sup> Si	0,03
N	0,11	<sup>14</sup> N	0,11
		<sup>15</sup> N	0,0004
C	0,03	<sup>12</sup> C	0,03
		<sup>13</sup> C	0,0003
P	0,045	<sup>31</sup> P	0,05
S	0,03	<sup>32</sup> S	0,03
		<sup>34</sup> S	0,001
		<sup>33</sup> S	0,0002
		<sup>36</sup> S	0,000003
Mo	2,5	<sup>98</sup> Mo	0,60
		<sup>96</sup> Mo	0,42
		<sup>95</sup> Mo	0,40
		<sup>92</sup> Mo	0,37
		<sup>100</sup> Mo	0,24
		<sup>97</sup> Mo	0,24
		<sup>94</sup> Mo	0,23

## B Alumiinilaatujen alkuaine- ja isotooppikoostumukset

Alumeco ilmoittaa seosteaineille pitoisuuden tai pitoisuusvälin. Lisäksi sivuilla ilmoitetaan alle puolen prosentin osuus muille alkuaineille. Tätä osuutta ei ole otettu huomioon, koska alkuaineita ei ilmoitettu ja pitoisuus on häviävän pieni. Loppupitoisuus materiaalista on alumiinia. Alkuainepitoisuudet IADS-luokan 6082 ja 7075 alumiineille on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Alumiinilaatujen isotooppipitoisuudet on esitetty taulukoissa 11 ja 12.

**Taulukko 9** – IADS-luokan 6082 alumiinin alkuainepitoisuudet [12]. Titaanin pitoisuus on lähteestä [13].

alkuaine	pitoisuus (%)
Si	0,7-1,3
Fe	0,50
Cu	0,10
Mn	0,40-1,0
Mg	0,60-1,2
Cr	0,25
Zn	0,2
Ti	0,1

**Taulukko 10** – IADS-luokan 7075 alumiinin alkuainepitoisuudet [12].

alkuaine	pitoisuus (%)
Si	0,40
Fe	0,50
Cu	1,2-2,0
Mn	0,30
Mg	2,1-2,9
Cr	0,18-0,28
Zn	5,1-6,1
Ti	0,2

**Taulukko 11** – IADS-luokan 6082 alumiinin isotooppipitoisuudet.

alkuaine	pitoisuus (%)	isotooppi	pitoisuus (%)
Al	95,35	<sup>27</sup> Al	95,35
Fe	0,5	<sup>56</sup> Fe	0,46
		<sup>54</sup> Fe	0,03
		<sup>57</sup> Fe	0,01
		<sup>58</sup> Fe	0,001
Cr	0,25	<sup>52</sup> Cr	0,21
		<sup>53</sup> Cr	0,02
		<sup>50</sup> Cr	0,01
		<sup>54</sup> Cr	0,006
Mn	1	<sup>55</sup> Mn	1,00
Si	1,3	<sup>28</sup> Si	1,20
		<sup>29</sup> Si	0,06
		<sup>30</sup> Si	0,04
Cu	0,1	<sup>63</sup> Cu	0,07
		<sup>65</sup> Cu	0,03
Mg	1,2	<sup>24</sup> Mg	0,95
		<sup>26</sup> Mg	0,13
		<sup>25</sup> Mg	0,12
Zn	0,2	<sup>64</sup> Zn	0,10
		<sup>66</sup> Zn	0,06
		<sup>68</sup> Zn	0,04
		<sup>67</sup> Zn	0,01
		<sup>70</sup> Zn	0,001
Ti	0,1	<sup>48</sup> Ti	0,07
		<sup>46</sup> Ti	0,008
		<sup>47</sup> Ti	0,007
		<sup>49</sup> Ti	0,005
		<sup>50</sup> Ti	0,005



**Taulukko 12** – IADS-luokan 7075 alumiinin isotooppipitoisuudet.

alkuaine	pitoisuus (%)	isotooppi	pitoisuus (%)
Al	89,04	<sup>27</sup> Al	89,04
Fe	0,5	<sup>56</sup> Fe	0,46
		<sup>54</sup> Fe	0,03
		<sup>57</sup> Fe	0,01
		<sup>58</sup> Fe	0,001
Cr	0,28	<sup>52</sup> Cr	0,23
		<sup>53</sup> Cr	0,03
		<sup>50</sup> Cr	0,01
		<sup>54</sup> Cr	0,007
Mn	0,3	<sup>55</sup> Mn	0,30
Si	0,4	<sup>28</sup> Si	0,37
		<sup>29</sup> Si	0,02
		<sup>30</sup> Si	0,01
Cu	0,28	<sup>63</sup> Cu	0,19
		<sup>65</sup> Cu	0,09
Mg	2,9	<sup>24</sup> Mg	2,29
		<sup>26</sup> Mg	0,32
		<sup>25</sup> Mg	0,29
Zn	6,1	<sup>64</sup> Zn	2,94
		<sup>66</sup> Zn	1,71
		<sup>68</sup> Zn	1,16
		<sup>67</sup> Zn	0,25
		<sup>70</sup> Zn	0,04
Ti	0,2	<sup>48</sup> Ti	0,15
		<sup>46</sup> Ti	0,02
		<sup>47</sup> Ti	0,01
		<sup>49</sup> Ti	0,01
		<sup>50</sup> Ti	0,01

## C Kiihdytinlaboratoriosta poistetut osat

Kiihdytinlaboratorio (JYFL) pitää kirjaa käytöstä poistetuista aktiivisista materiaaleista ja niiden varastoinnista. Kirjatut osat on esitetty taulukoissa 13, 14, 15 ja 16.

**Taulukko 13** – Varastoidut aktiiviset materiaalit I. Maksimiannosnopeuden  $D_{\max}$  yksikkö on  $\mu\text{Sv/h}$  ja tähdellä (\*) merkityissä kohdissa cps. ACC-osien annosnopeudet on mitattu 4.5.2000-29.4.2009 välisenä aikana ja IG-osien annosnopeudet 27.6.-19.11.2003 välisenä aikana. RST = ruostumaton teräs.

\*\* = mitattu kesällä 2011.

Tunniste	Laite/osa	Materiaalit	$D_{\max}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
ACC-031	K130 - RF2 huoltojätettä	RST, ...	n. 10
ACC-030	K130 Swagelog-liittimiä	RST	ei tiedossa
ACC-029	RF-2 hienosäätökondensaattori	Cu	n. 40
ACC-028	Teho FC:n kollimaattori	Al, ...	2400
ACC-027	Grav. venttiili	Al, RST	2
ACC-026	Grav. venttiili	Al, RST	2
ACC-025	TehoFC	Al	n. 10000
ACC-024	? (K130)	Al, Cu	1000
ACC-023	? (K130)	Al, Cu	500
ACC-021	D-elektrodien kärjet	Cu, ...	3/14**
ACC-020	EMC/syklotroni	Al, ...	n. 300
ACC-016	RF tehoputki (eristeestä poikki)	Cu, $\text{Al}_2\text{O}_3$	10
ACC-015	Vaiheproben tuki	Al, (Cu)	6000
ACC-014	Suihkuputki	Al	15
ACC-013	DN 100ISO?	RST	n. 3
ACC-011	Kammion tuki	Fe, ?	170 cps*
ACC-010	Kammion tuki	Fe, MS?	30 cps*
ACC-009	Ständin kansi	Fe	30 cps*
ACC-007	Syklotronin ulostulon sahausjäte	RST, ...	10-15
ACC-006	Syklotronin tyhjiötuubin ulostulosta	RST	1600
ACC-004	Syklotronin pumppuboksi?	RST	20
IG-101	Kohtiokammion (IG) pumppausputki	RST	n. 15
IG-100	Ioniohjaimen osia	Al	0,40**
IG-099	Ioniohjaimen osa	Al, ...	1,40**
IG-098	Kohtioita + muuta sekalaista	Al, ...	200
IG-097	Pöydän päällysmuovi	muovi, ...	0,20**
IG-096	Rautalevyjä	Fe	1,6

**Taulukko 14** – Varastoidut aktiiviset materiaalit II. Annosnopeudet on mitattu 27.6.-19.11.2003 välisenä aikana. Ruostumaton teräs on merkitty lyhenteellä RST.

\*\* = mitattu kesällä 2011.

Tunniste	Laite/osa	Materiaalit	$D_{\max}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
IG-095	Diffuusiopumpun tuki	Fe	2,5
IG-094	IGISOLin tarramatto	?	0,15**
IG-093	Eristeen tukirengas	RST	34
IG-092	Haitari + jäykistimet	RST	2**
IG-091	Einzel + poikkeutin	RST, muovi	2,0
IG-090	Venttiili	RST	75
IG-089	Kohtiokammio + kansi	Al, RST	20
IG-088	Kohtiokammion sivulaippa	RST, ...	15
IG-087	Einzel + poikkeuttimen kammio	RST	50
IG-086	Extraktiokammio	RST, messinki	200
IG-085	Skimmeri	Cu, muovi	46
IG-084	3*sokkolaippa	RST	13,0
IG-083	Kynsiä	?	15,5
IG-082	2kpl O-renkaan tukirengas	Al	11,0
IG-081	IGISOLin tarramatto	ei tiedossa	0,25**
IG-080	Vesiletku	muovi, RST	4,3
IG-079	2kpl Penning-anturi, venttiili 25	RST, ...	2,0
IG-078	O-rengas + tukirengas, länget	Al, ...	2,5
IG-077	Vesiletku	muovi, RST	1,0
IG-076	Länki	RST	10
IG-075	Haitariputki, 100cm pitkä	RST	3,0
IG-074	Beamidumpin putki	Al	1000
IG-073	Venttiili (2 sisään, 2 ulos)	RST, ...	3,0
IG-072	Säteilytyskammion beamidumppi	RST, C	5,5
IG-071	Säteilytyskammio	RST, Al	100
IG-070	Degrader, säteilytyskammiosta	Al	600
IG-069	Kollimaattori	Al, ...	280
IG-068	63 venttiili (63-100 muunnos)	RST, ...	40
IG-067	Putki	Al	2,0
IG-066	Ylimenolaippoja	RST	6,0

**Taulukko 15** – Varastoidut aktiiviset materiaalit III. Annosnopeudet on mitattu 27.6.-19.11.2003 välisenä aikana. Ruostumaton teräs on merkitty lyhenteellä RST.

Tunniste	Laite/osa	Materiaalit	$D_{\max}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
IG-065	Ylimenolaippa	RST	30
IG-064	Ylimenolaipan kiinnikerenkaita	RST	1,7
IG-063	Ruuveja	RST	2,0
IG-062	Putki	Al	2,0
IG-061	Haitari	RST	5,0
IG-060	G3 putki + sähkömoottorin runko	Al, ...	8,0
IG-059	Ruuveja	RST	2,0
IG-058	Kevytionohjaimen kääntötanko	RST	5,0
IG-057	2 kpl ylimenolaippa	RST	220
IG-056	Beamiputki	Al	250
IG-055	Pumppausbarrieri	Al	150
IG-054	Haitarin jäykistin	RST	28
IG-053	Virtamittari	Al, ...	3,0
IG-052	Svagelo-osia	RST, Cu	8
IG-051	Ruuveja	RST, ...	8
IG-050	Kynsiä	RST	11
IG-049	Beamiputki 59cm	Al	3,3
IG-048	Beamiputki 33cm pitkä	Al	100
IG-047	Eriste, pituus 50cm	muovi	3
IG-046	Haitari	RST	13
IG-045	Alumiiniputki	Al	35
IG-044	Haitariputki 50cm	RST	0,6
IG-043	2kpl Ylimenolaippa	RST	22
IG-042	2kpl ylimenolaippa	RST	14
IG-041	haitariputki	RST	1,3
IG-040	3kpl O-renkaan tukirengas	Al	1
IG-039	Ylimenolaippa	RST	3,5
IG-038	Kohtioita	Si, Ge, ...	3150
IG-037	Beami-ikkunoita	Havar, Al	9000

**Taulukko 16** – Varastoidut aktiiviset materiaalit IV. Annosnopeudet on mitattu 27.6.-19.11.2003 välisenä aikana. Ruostumaton teräs on merkitty lyhenteellä RST.

\*\* = mitattu kesällä 2011.

Tunniste	Laite/osa	Materiaalit	$D_{\max}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
IG-036	beamilinjan putki	Al	80
IG-035	Ylimenolaippa	RST	6,4
IG-034	Ylimenolaippa	RST	4,6
IG-033	Ylimenolaippa	RST	3,3
IG-032	O-renkaan tukirengas	Al	1,9
IG-031	Kevytioniohjaimen runko	Al, Cu	10
IG-030	Skimmeri	messinki	100
IG-029	Sekalaista romua	?	2500
IG-028	Ioniohjain runko	Al	400
IG-027	Beamihaitari	RST?	4000
IG-026	Fissio-ohjaimen uraanitargetti	U, Al	15000
IG-025	Fissioioniohjain, kohtio-osa	U, Al	12000
IG-024	Beamistopin ruuvit	RST?	40
IG-023	Fuusioioniohjain	Al, ?	1000
IG-022	Ioniohjaimen tuki	Al, ...	1000
IG-021	Beamidumpin jäähdytysvesiputki	RST	100
IG-020	Suihkun pysäytin / beam stop	Al, ...	10000
IG-019	Tyhjiöhaitari, beamierotin	RST	23000
IG-018	Ioniohjaimen fissiokuppi	Al, ...	10000
IG-017	Ioniohjaimen (fissio) kantaosa	Al	0,35**
IG-016	fissioioniohjaimen tangenttipaketti	Al, ...	5000
IG-015	Ylimenolaippa	RST	1,7
IG-014	Ylimenolaippa	RST	3,5
IG-013	2kpl Ylimenolaippa	RST	1,6
IG-012	100mm T-haara + 50mm oksa	Al	3,5
IG-011	Turbopumppu + venttiili	RST	7,5
IG-010	Ylimenolaippa	RST	0,8
IG-009	IGISOLin ovensuutarramatto	muovi, liima	1,1
IG-007	O-renkaan tuki	Al	2,5

## D Vuonna 2011 mitatut osat

Liitteen C listauksen tähdellä merkittyjen osien lisäksi kesällä 2011 listattiin ja mitattiin muita osia. Osat on listattu taulukoihin 17 ja 18.

**Taulukko 17** – Vuonna 2011 mitatut osat I. Annosnopeudet  $D_{\max}$  on mitattu 15.6.-19.8.2011 välisenä aikana. Taustan annosnopeus oli noin 0,10  $\mu\text{Sv/h}$ . Ruostumaton teräs on merkitty lyhenteellä RST.

\* = Osa on mitattu vähemmän aktiiviselta puolelta. Toisella puolella annosnopeus oli 0,35-0,98 mSv/h.

Tunniste	Laite/osa	Materiaalit	$D_{\max}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
AKI-001	?		0,18
AKI-002	?		0,10
AKI-003	RF-1 jätettä	Cu?, ...	0,30
AKI-004	MAP-ikkuna	RST	34,0
AKI-005	MAP-ikkuna	RST	65
AKI-006	työosastolta?		2,25
AKI-007	MAP, palje	teräs	0,12
AKI-008	MAP, Ag-tiivisteet	Ag	18,2
AKI-009	MAP, Ag-tiivisteet	Ag	34,5
AKI-010	MAP, kohtiokalvo	Havar	43
AKI-011	MAP, kohtiokalvo	Havar	113
AKI-012	MAP, kohtiokalvo	RST	25
AKI-013	MAP, kohtiokalvo	RST	13,5
AKI-014	MAP, O-renkaat		0,14
AKI-015	MAP, kalvojen palasia		120
AKI-016	MAP, Ta-levy	Ta	145*
AKI-017	lasiampulli		0,10
AKI-018	MAP, O-renkaat		0,20
AKI-019	63-ylimeno+lukkorengas 2kpl	RST?	0,16
AKI-020	63-O-rengas 2 kpl	viton, Al	0,10
AKI-021	spacerit	RST	0,10
AKI-022	pultteja	RST	0,14
AKI-023	ruuveja	RST?	0,29
AKI-024	metallilevypalasia	Al?	0,21
AKI-025	ruuveja 2kpl	RST?	0,12

**Taulukko 18** – Vuonna 2011 mitatut osat II. Annosnopeudet  $D_{\max}$  on mitattu 15.6.-19.8.2011 välisenä aikana. Taustan annosnopeus oli noin 0,10  $\mu\text{Sv/h}$ . Ruostumaton teräs on merkitty lyhenteellä RST.

\* = 0,57  $\mu\text{Sv/h}$  Al-puolelta, 0,33  $\mu\text{Sv/h}$  C-puolelta.

Tunniste	Laite/osa	Materiaalit	$D_{\max}$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )
AKI-026	Hendes beam dump	RST?	0,17
AKI-027	EMC:n sulanut Al-tukirakenne	Al	0,22
AKI-028	ruuveja	RST?	0,19
AKI-029	?	Al?	0,13
AKI-030	?	Cu	0,15
AKI-031	palkeen tiivisteet	kumi, Al?	0,13
AKI-032	MC-20 RF-reson., muttereita	RST?	0,22
AKI-033	MC-20 RF-reson., pultteja	RST?	0,15
AKI-034	EMC:n sulanutta Al	Al+paperia	0,40
AKI-035	virranmittausverkoston lankoja	Cu	0,14
AKI-036	MC-20 RF-reson., pultteja	RST?	0,10
AKI-037	MAP, kohtioputken kiinnikkeet	Al, RST	0,29
AKI-038	moottori		0,39
AKI-039	?	muovia?	0,11
AKI-040	MC-20 RF-reson., metalliosia	RST?	0,10
AKI-041	MC-20 RF-reson., ruuveja	RST?	0,09
AKI-046	IGISOL?, osa	Cu?, RST?	0,30
AKI-047	Radiokemia, pyyhintänäyte		0,20
AKI-048	Keskusalue, ylälevy	Cu	0,39
AKI-049	Keskusalue, alalevy	Cu	0,47
AKI-050	97/95 C+Al-kollimaattori, QP1	C, Al	0,57*
AKI-051	?	Al?	1,97
AKI-052	IGISOL, Ni-kalvo	Ni	0,20
ACC-008	levy	Cu?	0,65
ACC-030	metalliosia	RST?	0,40
HEN-001	Hendes, ?	Fe, C	0,10

## E Spektrit ja piikkien tunnistukset

Liitteessä on esitetty jokaisesta osasta ensin spektrissä näkyvät piikit nuklideittain taulukoituna ja sen jälkeen itse spektrit.

### E.1 Osa AKI-012

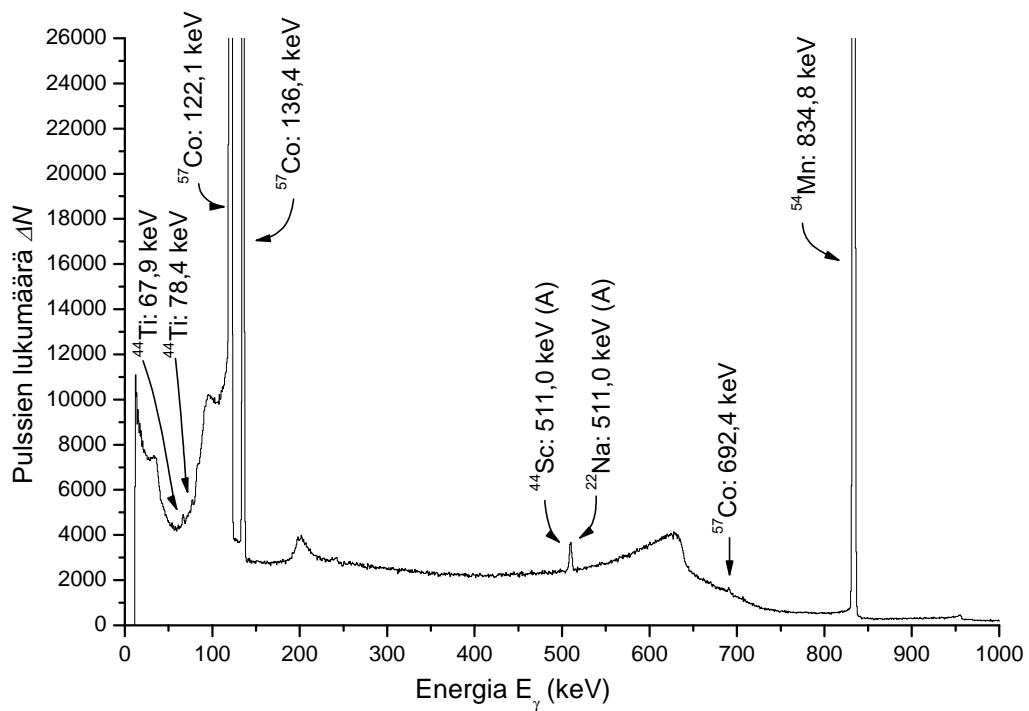
**Taulukko 19** – Osan AKI-012 piikit nuklideittain. Listattuna on spektristä saatu energia  $E_\gamma$ , tunnistettu nuklidi energioineen [8], analysoitu piikin pinta-ala  $\Delta N$ , piikin intensiteetti  $I$  [8] ja laskettu aktiivisuus  $A$ . Taustasta peräisin olevia nuklideja näkyy spektrissä kaksi:  $^{40}\text{K}$  ja  $^{208}\text{Tl}$ . Lyhenteet: (A) = annihilaatio, (SP) = summapiikki.

\* = piikkiä ei ole käytetty nuklidin keskiarvoistetun aktiivisuuden määrittämisessä.

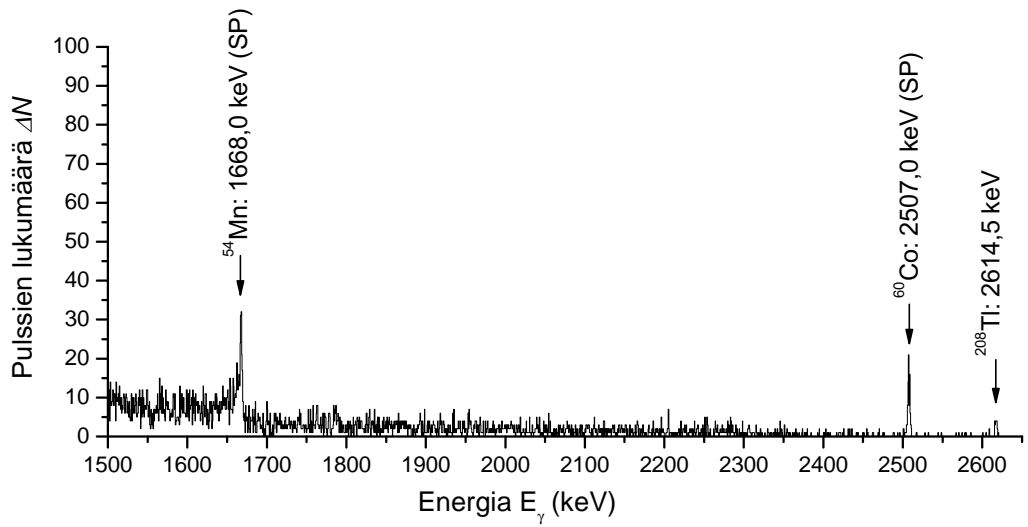
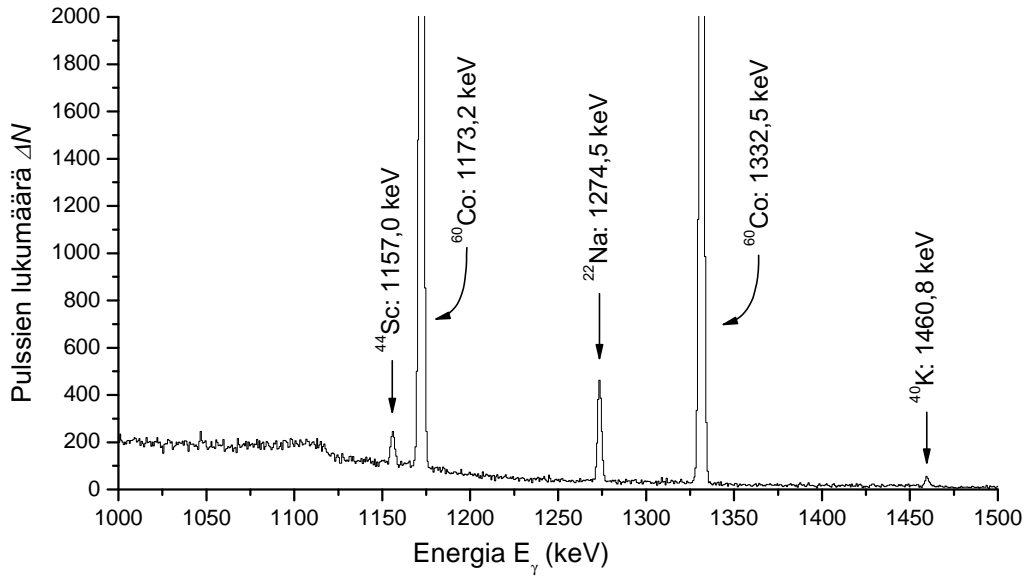
\*\* = 511 keV piikin pinta-ala on jaettu tähdillä merkittyjen piikkien kesken siten, että pinta-alaosuudesta laskettu aktiivisuus on samaa kertaluokkaa toisista kyseisen nuklidin piikeistä lasketun aktiivisuuden kanssa.

$E_\gamma$ (keV)	nukl.	(keV)	$\Delta N$	$I$ (%)	$A$ (Bq)
67,1	$^{44}\text{Ti}$	67,9	$978 \pm 151$	$93 \pm 2$	$60 \pm 10$
77,4		78,4	$862 \pm 174$	$96,4 \pm 1,7$	$50 \pm 10$
510,2	$^{44}\text{Sc}$	511,0 (A)	$1948 \pm 54^{**}$	$188,54 \pm 0,1$	$88 \pm 8^*$
1156,3		1157,0	$535 \pm 36$	$99,9 \pm 0,4$	$89 \pm 8$
121,2	$^{57}\text{Co}$	122,1	$1429464 \pm 1257$	$85,6 \pm 0,17$	$57 \pm 3$ kBq
135,6		136,4	$177923 \pm 467$	$10,68 \pm 0,08$	$53 \pm 5$ kBq
691,1		692,4	$810 \pm 105$	$0,149 \pm 0,01$	$60 \pm 10$ kBq
510,2	$^{22}\text{Na}$	511,0 (A)	$4546 \pm 125^{**}$	$180,76 \pm 0,04$	$220 \pm 20^*$
1273,9		1274,5	$1679 \pm 44$	$99,941 \pm 0,014$	$300 \pm 20$
834,0	$^{54}\text{Mn}$	834,8	$659896 \pm 832$	$99,976 \pm 0,001$	$86 \pm 4$ kBq
1668,0		(SP)	$103 \pm 16$		
1172,6	$^{60}\text{Co}$	1173,2	$27729 \pm 172$	$99,85 \pm 0,03$	$4700 \pm 300$
1331,9		1332,5	$25023 \pm 162$	$99,9826 \pm 0,0006$	$4600 \pm 300$
2507,9		(SP)	$82 \pm 10$		
1460,1	$^{40}\text{K}$	1460,8	$153 \pm 17$	$10,66 \pm 0,18$	$280 \pm 40$
2617,7	$^{208}\text{Tl}$	2614,5	$22 \pm 5$	$99,754 \pm 0,004$	$6 \pm 2$





**Kuva 1** – 21.6.2011 mitattu spektri osasta AKI-012 (mittausaika 2000 sekuntia). Piikkien pinta-aloista lasketut aktiivisuudet löytyvät taulukosta 19. Lyhenteet: (A) = annihilaatio.

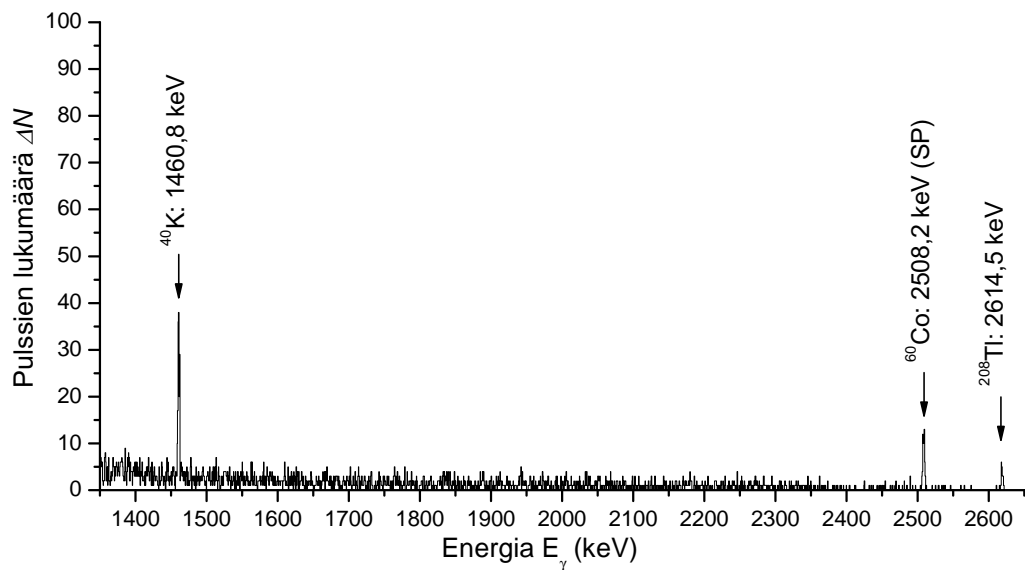
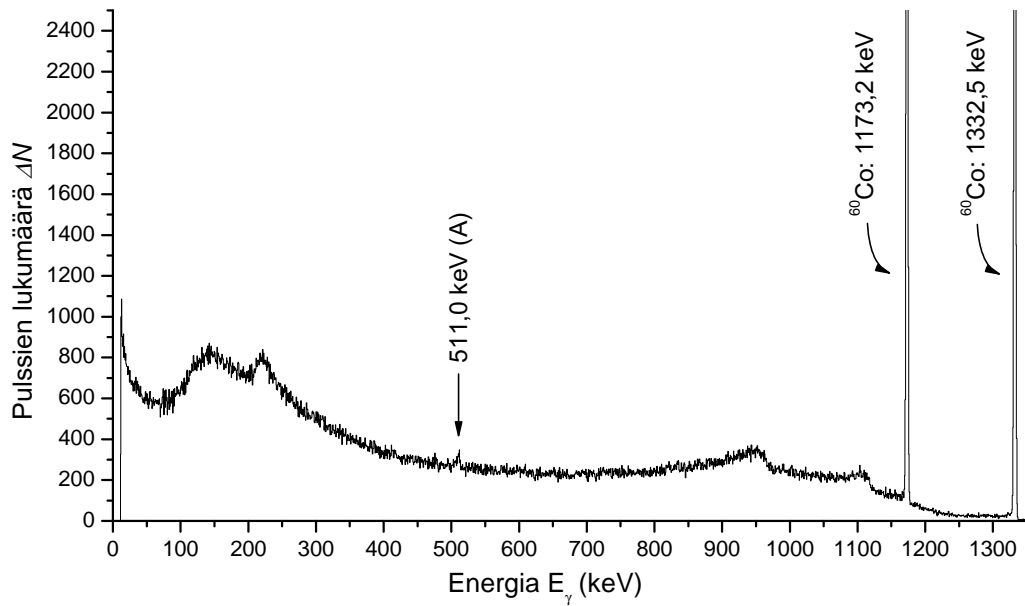


**Kuva 2** – 21.6.2011 mitattu spektri osasta AKI-012 (mittausaika 2000 sekuntia). Piikkien pinta-aloista lasketut aktiivisuudet löytyvät taulukosta 19. Lyhenteet: (SP) = summapiikki.

## E.2 Osa IG-092

**Taulukko 20** – Osan IG-092 piikit nuklideittain. Listattuna on spektristä saatu energia  $E_\gamma$ , tunnistettu nuklidi energioineen [8], analysoitu piikin pinta-ala  $\Delta N$ , piikin intensiteetti  $I$  [8] ja laskettu aktiivisuus  $A$ . Taustasta peräisin olevia nuklideja näkyy spektrissä kaksi:  $^{40}\text{K}$  ja  $^{208}\text{Tl}$ . Lyhenteet: (A) = annihilaatio, (SP) = summapiikki.

$E_\gamma$ (keV)	nukl.	(keV)	$\Delta N$	$I$ (%)	$A$ (keV)
512,1		511,0 (A)			
1173,3	$^{60}\text{Co}$	1173,2	$35887 \pm 196$	$99,85 \pm 0,03$	$6000 \pm 300$
1332,6	$^{60}\text{Co}$	1332,5	$32758 \pm 185$	$99,9826 \pm 0,0006$	$6000 \pm 400$
2508,8	$^{60}\text{Co}$	(SP)	$62 \pm 10$		
1461	$^{40}\text{K}$	1460,8	$129 \pm 13$	$10,66 \pm 0,18$	$240 \pm 30$
2619,1	$^{208}\text{Tl}$	2614,5	$24 \pm 7$	$99,754 \pm 0,004$	$7 \pm 3$



**Kuva 3** – 7.6.2011 mitattu spektri osasta IG-092 (mittausaika 2000 sekuntia). Piikkien pinta-aloista lasketut aktiivisuudet löytyvät taulukosta 20. Lyhenteet: (A) = annihilaatio, (SP) = summapiikki.

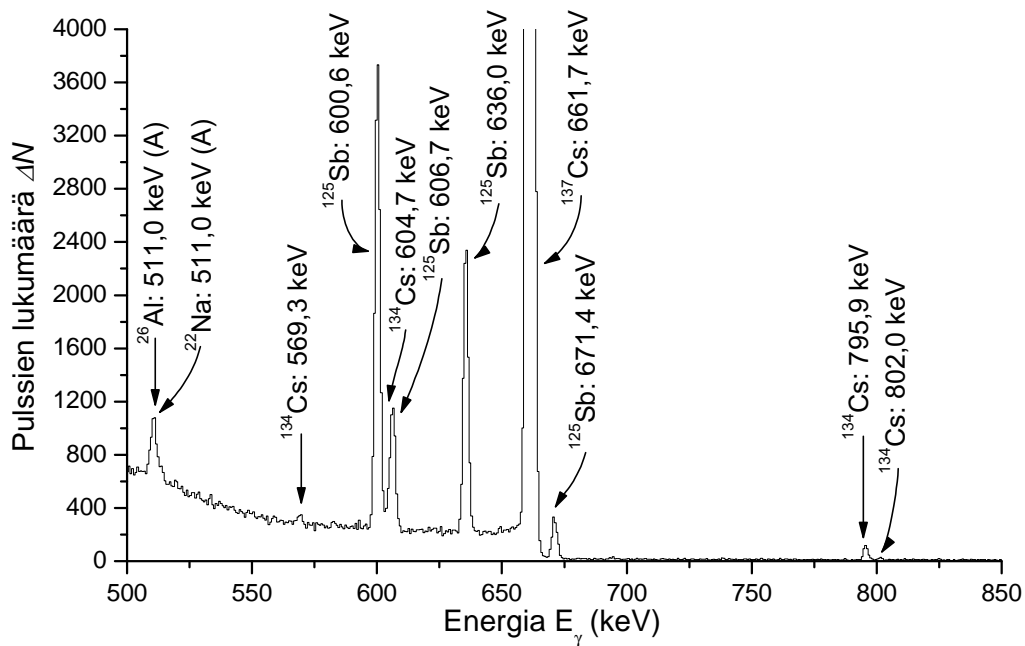
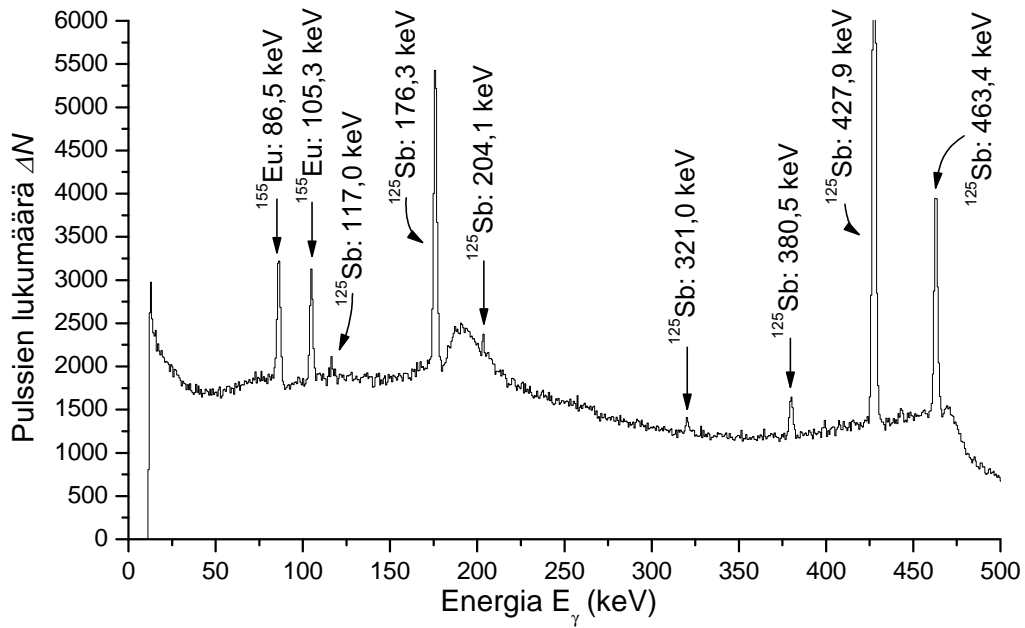
### E.3 Osa IG-099

**Taulukko 21** – Osan IG-099 piikit nuklideittain. Listattuna on spektristä saatu energia  $E_\gamma$ , tunnistettu nuklidi energioineen [8], analysoitu piikin pinta-ala  $\Delta N$ , piikin intensiteetti  $I$  [8] ja laskettu aktiivisuus  $A$ . Spektristä oli kaksi hyvin pientä piikkiä (885,3 keV ja 1063,5 keV), joiden pinta-alaa ei voinut luotettavasti määrittää ja joita ei tunnistettu. Taustasta peräisin olevia nuklideja näkyy spektrissä kaksi:  $^{40}\text{K}$  ja  $^{208}\text{Tl}$ . Lyhenteet: (A) = annihilaatio.

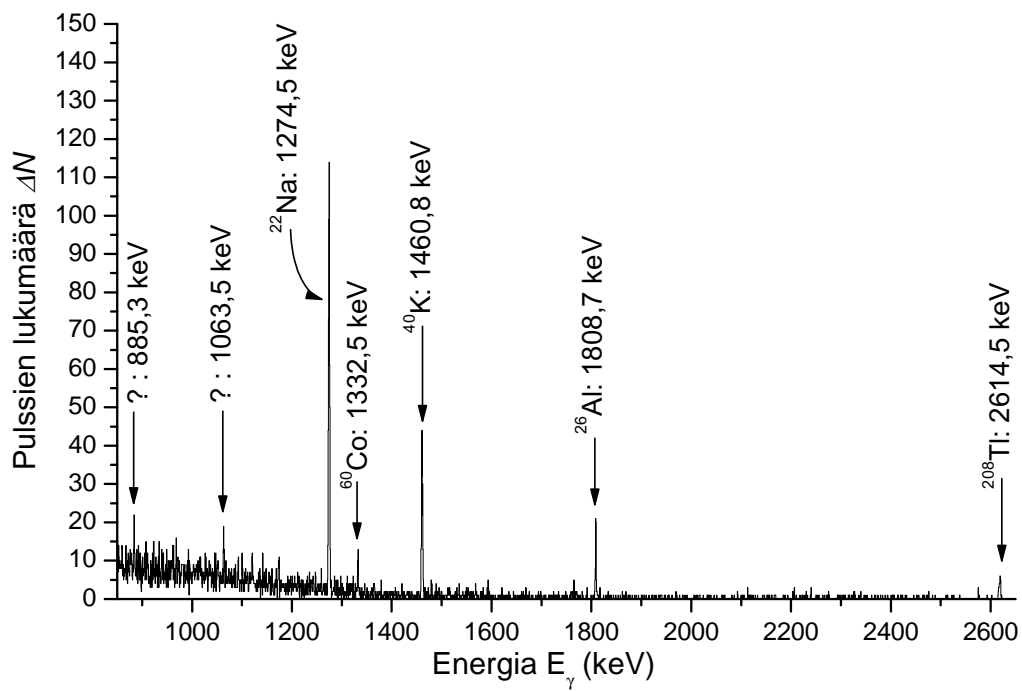
\* = piikkiä ei ole käytetty nuklidin keskiarvoistetun aktiivisuuden määrittämisessä.

\*\* = 511 keV piikin pinta-ala on jaettu tähdillä merkittyjen piikkien kesken siten, että pinta-alaosuudesta laskettu aktiivisuus on samaa kertaluokkaa toisista kyseisen nuklidin piikeistä lasketun aktiivisuuden kanssa.

$E_\gamma$ (keV)	nukl.	(keV)	$\Delta N$	$I$ (%)	$A$ (Bq)
116,8	$^{125}\text{Sb}$	117,0		$0,264 \pm 0,004$	
176,3		176,3	$11596 \pm 178$	$6,89 \pm 0,07$	$5300 \pm 1100^*$
203,3		204,1		$0,319 \pm 0,007$	
320,5		321,0		$0,418 \pm 0,005$	
380,4		380,5	$1569 \pm 91$	$1,527 \pm 0,016$	$6700 \pm 1000$
427,9		427,9	$27170 \pm 190$	29,8	$6600 \pm 800$
463,4		463,4	$9085 \pm 141$	$10,56 \pm 0,11$	$6700 \pm 700$
600,6		600,6	$12521 \pm 129$	$17,77 \pm 0,19$	$7000 \pm 500$
606,8		606,7	$3336 \pm 110$	$5,02 \pm 0,05$	$6600 \pm 600$
635,9		636,0	$7736 \pm 100$	$11,29 \pm 0,14$	$7100 \pm 500$
671,5		671,4	$1147 \pm 40$	$1,803 \pm 0,019$	$6900 \pm 500$
86,5	$^{155}\text{Eu}$	86,5	$5098 \pm 158$	$30,7 \pm$	$770 \pm 40$
105,3		105,3	$3800 \pm 145$	$21,1 \pm 0,5$	$690 \pm 40$
661,7	$^{137}\text{Cs}$	661,7	$224328 \pm 485$	$85,1 \pm 0,2$	$28000 \pm 2000$
569,4	$^{134}\text{Cs}$	569,3		$15,373 \pm 0,017$	
604,8		604,7	$597 \pm 92$	$97,62 \pm 0,11$	$61 \pm 11$
796,0		795,9	$334 \pm 24$	$85,46 \pm 0,06$	$49 \pm 5$
801,3		802,0		$8,688 \pm 0,016$	
511,1	$^{22}\text{Na}$	511,0 (A)	$1706 \pm 74^{**}$	$180,76 \pm 0,04$	$81 \pm 8^*$
1274,9		1274,5	$455 \pm 22$	$99,941 \pm 0,014$	$81 \pm 6$
511,1	$^{26}\text{Al}$	511,0 (A)	$374 \pm 16^{**}$	$163,5 \pm 0,4$	$20 \pm 2^*$
1809,4		1808,7	$59 \pm 8$	$99,76 \pm 0,04$	$13 \pm 3$
1332,6	$^{60}\text{Co}$	1332,5		$99,9826 \pm 0,0006$	
1461,3	$^{40}\text{K}$	1460,8	$172 \pm 14$	$10,66 \pm 0,18$	$320 \pm 40$
2619,5	$^{208}\text{Tl}$	2614,5		$99,754 \pm 0,004$	



**Kuva 4** – 8.6.2011 mitattu spektri osasta IG-099 (mittausaika 2000 sekuntia). Piikkien pinta-aloista lasketut aktiivisuudet löytyvät taulukosta 21. Lyhenteet: (A) = annihilaatio.



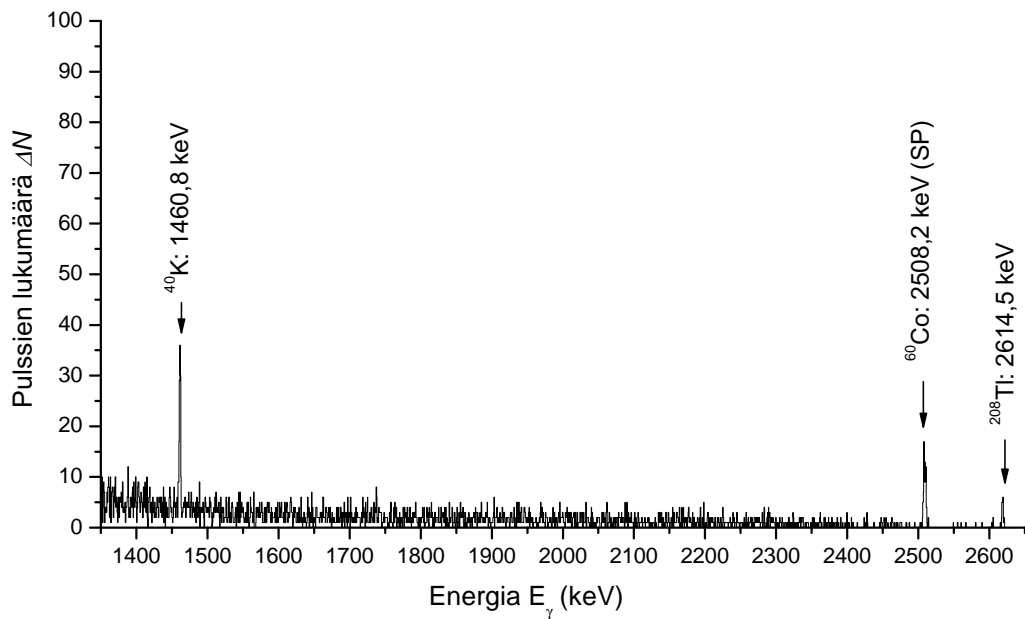
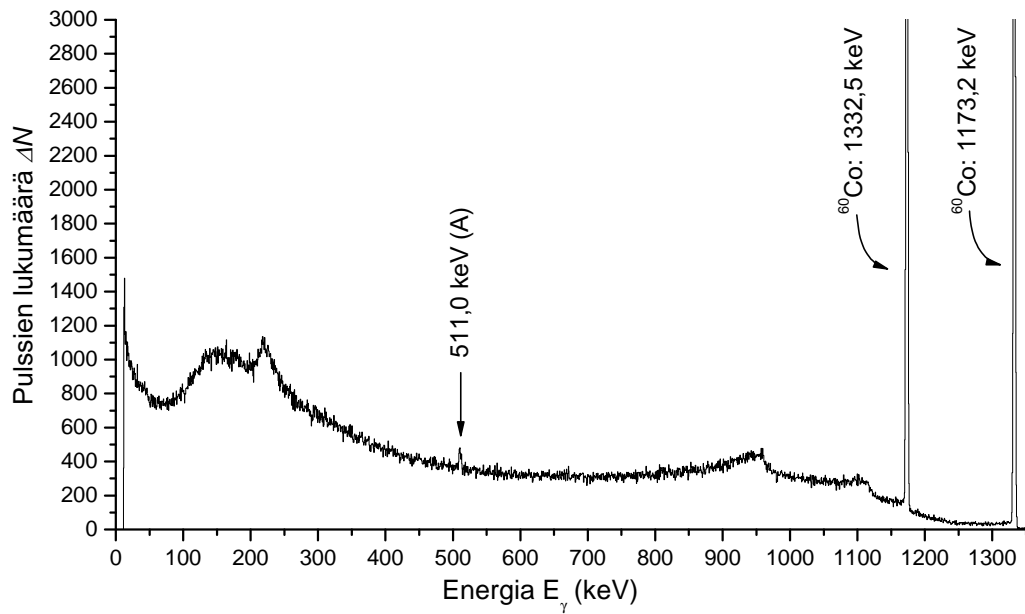
**Kuva 5** – 8.6.2011 mitattu spektri osasta IG-099 (mittausaika 2000 sekuntia). Piikkien pinta-aloista lasketut aktiivisuudet löytyvät taulukosta 21.

#### E.4 Osa ACC-021

**Taulukko 22** – Osan ACC-021 (nro1) piikit nuklideittain. Listattuna on spektristä saatu energia  $E_\gamma$ , tunnistettu nuklidi energioineen [8], analysoitu piikin pinta-ala  $\Delta N$ , piikin intensiteetti  $I$  [8] ja laskettu aktiivisuus  $A$ . Taustasta peräisin olevia nuklideja näkyy spektrissä kaksi:  $^{40}\text{K}$  ja  $^{208}\text{Tl}$ . Lyhenteet: (A) = annihilaatio, (SP) = summapiikki.

$E_\gamma$ (keV)	nukl.	(keV)	$\Delta N$	$I$ (%)	$A$ (Bq)
510,7		511,0 (A)			
1173,5	$^{60}\text{Co}$	1173,2	$44635 \pm 218$	$99,85 \pm 0,03$	$7500 \pm 400$
1332,9	$^{60}\text{Co}$	1332,5	$41604 \pm 209$	$99,9826 \pm 0,0006$	$7700 \pm 400$
2509,4	$^{60}\text{Co}$	(SP)	$79 \pm 9$		
1461,6	$^{40}\text{K}$	1460,8	$110 \pm 12$	$10,66 \pm 0,18$	$200 \pm 30$
2619	$^{208}\text{Tl}$	2614,5	$22 \pm 5$	$99,754 \pm 0,004$	$6 \pm 2$





**Kuva 6** – 9.6.2011 mitattu spektri osasta ACC-021, nro1 (mittausaika 2000 sekuntia). Piikkien pinta-aloista lasketut aktiivisuudet löytyvät taulukosta 22. Lyhenteet: (A) = annihilaatio, (SP) = summapiikki.

## E.5 Osa AKI-003

**Taulukko 23** – Osan AKI-003 piikit nuklideittain I. Listattuna on spektristä saatu energia  $E_\gamma$ , tunnistettu nuklidi energioineen [8], analysoitu piikin pinta-ala  $\Delta N$ , piikin intensiteetti  $I$  [8] ja laskettu aktiivisuus  $A$ . Lyhenteet: (SP) = summapiikki.

\* = piikkiä ei ole käytetty nuklidin keskiarvoistetun aktiivisuuden määrittämisessä.

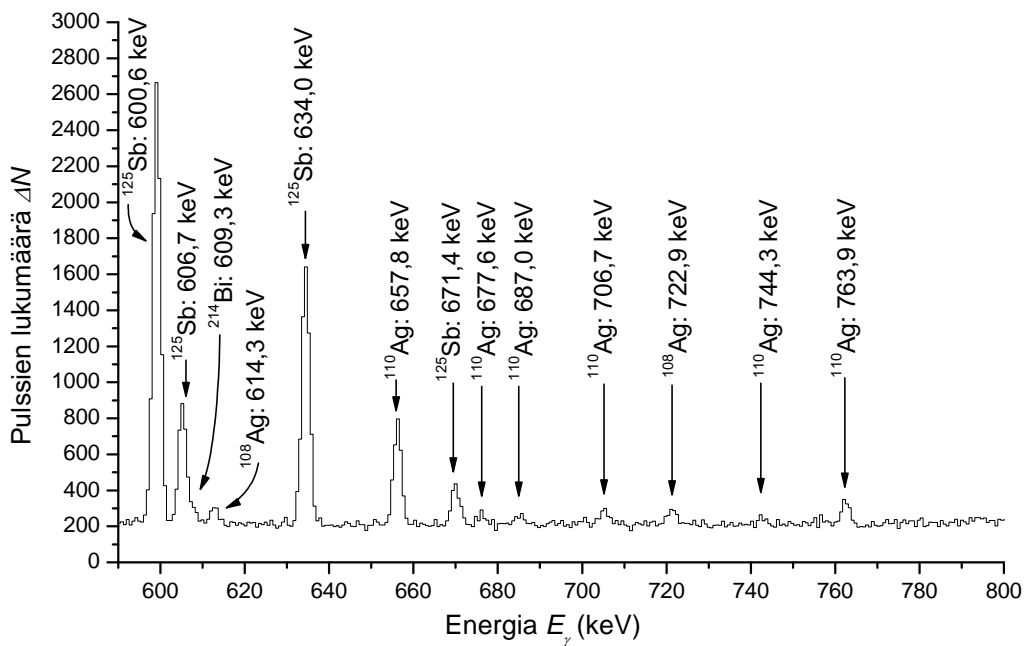
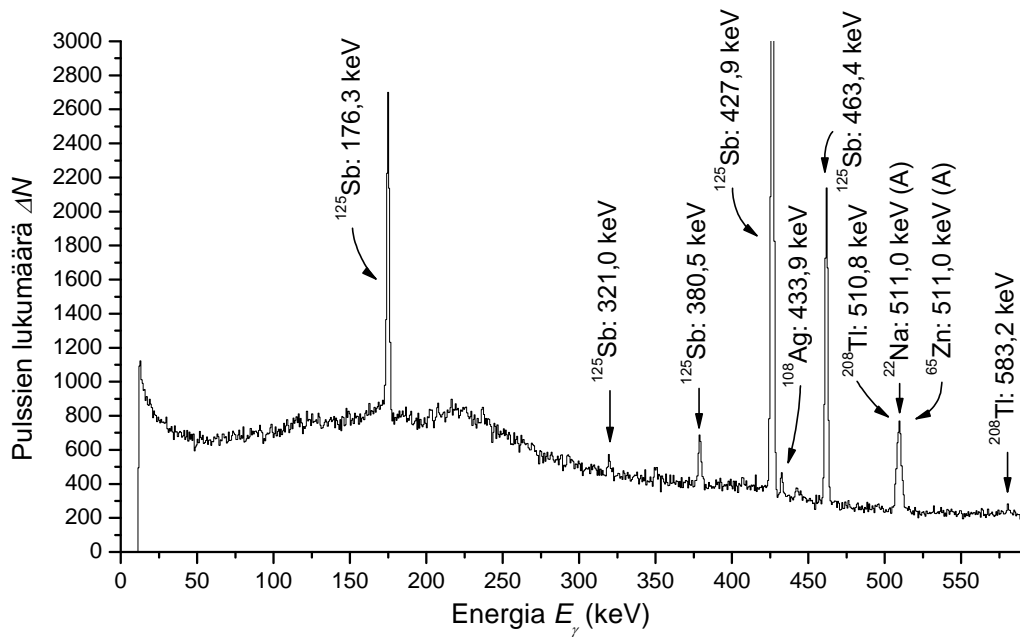
$E_\gamma$ (keV)	nukl.	(keV)	$\Delta N$	$I$ (%)	$A$ (Bq)
175,3	$^{125}\text{Sb}$	176,3	$5696 \pm 106$	$6,89 \pm 0,07$	$520 \pm 110^*$
319,8		321,0		$0,418 \pm 0,005$	
379,4		380,5	$917 \pm 55$	$1,527 \pm 0,016$	$780 \pm 110$
426,8		427,9	$17424 \pm 141$	$29,8 \pm$	$850 \pm 100$
462,3		463,4	$5971 \pm 89$	$10,56 \pm 0,11$	$880 \pm 90$
599,5		600,6	$8072 \pm 105$	$17,77 \pm 0,19$	$900 \pm 70$
605,6		606,7	$2193 \pm 73$	$5,02 \pm 0,05$	$870 \pm 70$
634,8		634,0	$4906 \pm 79$	$11,29 \pm 0,14$	$900 \pm 70$
670,3		671,4	$770 \pm 44$	$1,803 \pm 0,019$	$930 \pm 80$
433,0		$^{108}\text{Ag}$	433,9	$365 \pm 45$	90,5
613,1	614,3		$308 \pm 38$	$89,8 \pm 1,9$	$6,9 \pm 1,0$
721,7	722,9		$309 \pm 38$	$90,8 \pm 1,9$	$7,9 \pm 1,1$
656,6	$^{110}\text{Ag}$	657,8	$1948 \pm 57$	94,3	$44 \pm 3$
676,5		677,6	$195 \pm 36$	$10,56 \pm 0,04$	$40 \pm 8$
685,6		687,0	$182 \pm 36$	$6,44 \pm 0,05$	$62 \pm 13$
705,6		706,7	$295 \pm 38$	$16,33 \pm 0,07$	$41 \pm 6$
743,0		744,3	$125 \pm 35$	$4,77 \pm 0,09$	$60 \pm 20$
762,8		763,9	$460 \pm 41$	$22,62 \pm 0,21$	$49 \pm 6$
883,6		884,7	$1319 \pm 56$	$72,7 \pm 0,4$	$49 \pm 4$
936,5		937,5	$577 \pm 48$	$34,2 \pm 0,6$	$48 \pm 5$
1383,5		1384,3	$268 \pm 18$	$24,9 \pm 0,8$	$41 \pm 4$
1475,5		1475,8		$4,17 \pm 0,07$	
1504,4		1505,0	$159 \pm 14$	$13,6 \pm 0,18$	$47 \pm 6$
1172,4	$^{60}\text{Co}$	1173,2	$27558 \pm 170$	$99,85 \pm 0,03$	$930 \pm 50$
1331,7		1332,5	$24811 \pm 161$	$99,9826 \pm 0,0006$	$910 \pm 50$
2508,2		(SP)	$39 \pm 7$		

**Taulukko 24** – Osan AKI-003 piikit nuklideittain II. Listattuna on spektristä saatu energia  $E_\gamma$ , tunnistettu nuklidi energioineen [8], analysoitu piikin pinta-ala  $\Delta N$ , piikin intensiteetti  $I$  [8] ja laskettu aktiivisuus  $A$ . Taustasta peräisin olevia nuklideja näkyy spektrissä kaksi:  $^{40}\text{K}$  ja  $^{208}\text{Tl}$ . Lyhenteet: (A) = annihilaatio, (SE) = yksinkertainen pakopiikki.

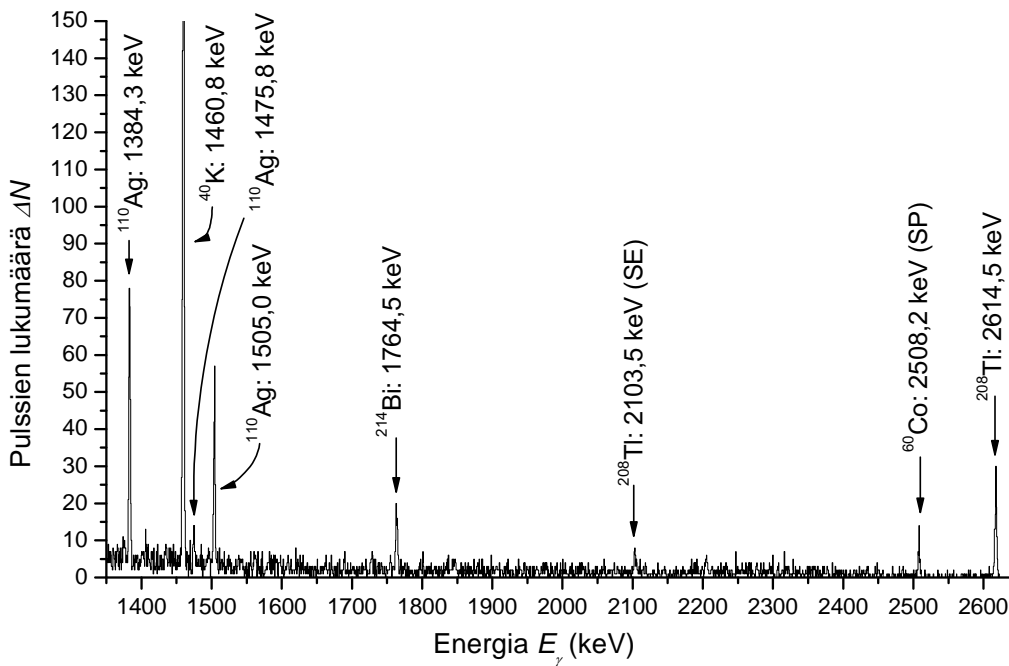
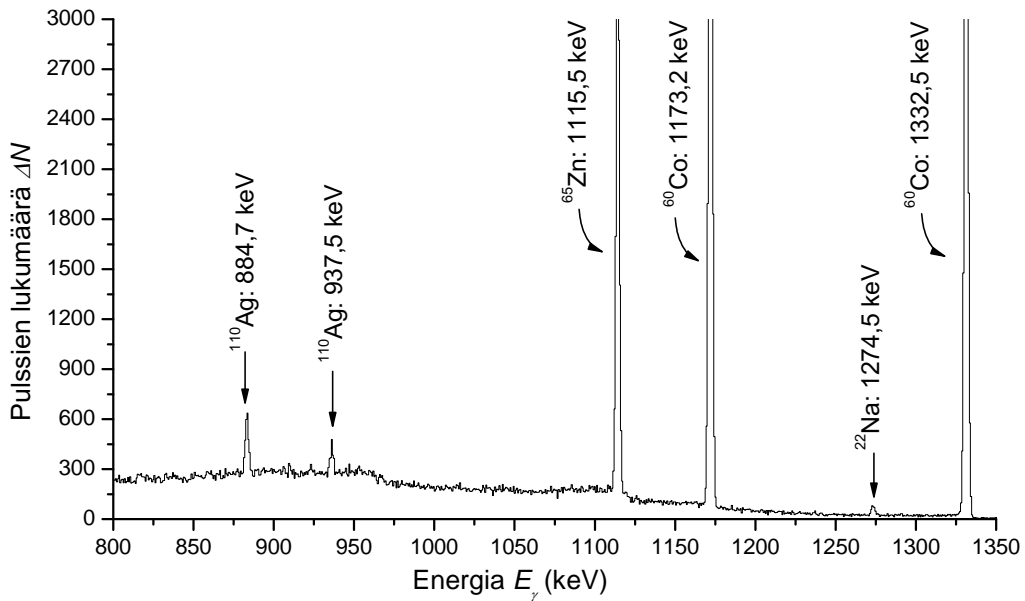
\* = piikkiä ei ole käytetty nuklidin keskiarvoistetun aktiivisuuden määrittämisessä.

\*\* = 511 keV piikin pinta-ala on jaettu tähdillä merkittyjen piikkien kesken siten, että pinta-alaosuudesta laskettu aktiivisuus on samaa kertaluokkaa toisista kyseisen nuklidin piikeistä lasketun aktiivisuuden kanssa.

$E_\gamma$ (keV)	nukl.	(keV)	$\Delta N$	I (%)	A (Bq)	
509,8	$^{22}\text{Na}$	511,0 (A)	$795 \pm 22^{**}$	$180,76 \pm 0,04$	$7,5 \pm 0,7^*$	
1273,7		1274,5	$218 \pm 20$	$99,941 \pm 0,014$	$7,8 \pm 0,9$	
510,8	$^{65}\text{Zn}$	511,0 (A)	$1348 \pm 37^{**}$	$2,842 \pm 0,014$	$810 \pm 80^*$	
1114,6		1115,5	$13138 \pm 120$	$50,04 \pm 0,1$	$850 \pm 40$	
510,8	$^{208}\text{Tl}$	510,8	$66 \pm 2^{**}$	$22,6 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,5^*$	
581,2		583,2	$144 \pm 36$	$85 \pm 0,3$	$3,3 \pm 0,9$	
2103,5		(SE)				
2617,8		2614,5	$116 \pm 11$	$99,754 \pm 0,004$	$6,6 \pm 1,1$	
608,2	$^{214}\text{Bi}$	609,3	$252 \pm 52$	$45,49 \pm 0,16$	$11 \pm 3$	
1764,1		1764,5	$74 \pm 10$	$15,3 \pm 0,03$	$22 \pm 4$	
1460,1	$^{40}\text{K}$	1460,8	$973 \pm 32$	$10,66 \pm 0,18$	$360 \pm 30$	



**Kuva 7** – 16.6.2011 mitattu osan AKI-003 spektri (mittausaika 10000 sekuntia). Lyhenneet: (A) = annihilaatio.



**Kuva 8** – 16.6.2011 mitattu osan AKI-003 spektri (mittausaika 10000 sekuntia). Lyhenneet: (SE) = yksinkertainen pakopiikki, (SP) = summapiikki.