

Säteilyturvakeskuksen Dosimetrialaboratorion röntgensäteilyn vakiolaatujen spektrit

Tero Tapiovaara, Markku Tapiovaara, Teemu Siiskonen, Arvi Hakanen

ISBN 978-952-478-291-3 (nid.) Edita Prima Oy, Helsinki 2008
ISBN 978-952-478-292-0 (pdf)
ISSN 1796-7171

TAPIOVAARA Tero, TAPIOVAARA Markku, SIISKONEN Teemu, HAKANEN Arvi.
Säteilyturvakeskuksen Dosimetrialaboratorion röntgensäteilyn vakiolaatujen spektrit. STUK-TR 2.
Helsinki 2008. 16 s. + liitteet 15 s.

Avainsanat: röntgensäteily, spektri, kalibrointi, laadunvalvonta

Tiivistelmä

Tässä raportissa esitetään Säteilyturvakeskuksen (STUK) kalibrointilaboratoriossa käytössä olevien röntgensäteilyn vakiolaatujen fotonikertymäspektrit, jotka mitattiin elokuussa 2007. Mitattuja säteilylaatuja olivat ISO Narrow-spektrisarja (ISO N10–N200, ISO 4037-1:1996) sekä molemmat IEC:n määrittelemät RQR-spektrisarjat (IEC 1267:1994 ja IEC 61267:2005). Mittaukset tehtiin HPGe-ilmaisimella ja mitatut pulssinkorkeusspektrit korjattiin ohjelmallisesti fotonikertymän energiaspektreiksi. Fotonikertymäspektreistä laskettuja tunnuslukuja verrattiin sekä standardien vaatimukseen että Dosimetrialaboratorion laatukäsikirjassa annettuihin arvoihin.

TAPIOVAARA Tero, TAPIOVAARA Markku, SIISKONEN Teemu, HAKANEN Arvi. The spectra of the standard x-ray qualities used in STUK's Radiation Metrology Laboratory. STUK-TR 2. Helsinki 2008. 16 pp.+ apps. 15 pp. (In Finnish)

Key words: X-radiation, spectrum, calibration, quality assurance

Abstract

This report presents the fluence spectra of the standard x-radiation qualities used in the Radiation Dosimetry Laboratory of Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK). The spectra were measured in August 2007. The radiation qualities characterised in the report are the ISO Narrow spectrum series (ISO N10–N200, ISO 4037-1:1996) and both of the RQR-spectrum series specified by the IEC (IEC 1267:1994 and IEC 61267:2005). The measurements were made using a high purity Ge-detector and the measured pulse height spectra were corrected to fluence spectra. Spectral characteristics were computed from the spectral data and compared to the requirements in the standards and to the values given in the quality manual of the laboratory.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	7
2 LAITTEET JA MENETELMÄT	8
3 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	11
4 JOHTOPÄÄTÖKSET	15
KIRJALLISUUSVIITTEET	16
LIITE MITATUT SPEKTRIT	17

1 Johdanto

Säteilyturvakeskuksen (STUK) kalibrointilaboratoriossa käytössä olevien röntgensäteilyn vakiolaatujen spektrit mitattiin elokuussa 2007. Mitattuja säteilylaatuja olivat ISO Narrow -spektrisarja (ISO N -sarja, ISO 4037-1:1996) sekä molemmat IEC:n määrittelemät RQR-spektrisarjat (IEC 1267:1994 ja IEC 61267:2005).

Mittaukset tehtiin HPGe-ilmaisimella. Suuren laskentataajuuden vuoksi ilmaisimeen kohdistuvien fotonien määrää rajoitettiin lyijystä tehdyillä kollimaattoreilla ja käyttämällä röntgengeneraattorin sallimaa pienintä putkivirtaa (0,1 mA). Mitattu pulssinkorkeusspektri korjattiin oh-

jelmallisesti fotonikertymän energiaspektriksi. Fotonikertymäspektreistä laskettuja tunnuslukuja verrattiin sekä standardin vaatimuksiin että kalibrointilaboratorion laatukäsikirjassa annettuihin arvoihin.

Mitattuja ISO N -sarjan spektrejä verrattiin myös kolme vuotta aikaisemmin (21.6.2004) STUKissa tehtyihin mittauksiin (ISO N15–N60). Suurienergisiä spektrejä ISO N250 ja N300 ei tässä raportissa esitetä, koska käytetyn spektrometrin energiavasteen korjausdatan tiedetään olevan epätarkka näiden spektrien energioilla (Tapiovaara ja Tapiovaara 2008).

2 Laitteet ja menetelmät

Mittaukset tehtiin käyttämällä nestetyyppellä jäähdytettyä, planaaria germanium-puolijohdeilmainta (EG&G Ortec GLP-16195/10, ilmaisimen paksuus 10 mm ja halkaisija 16 mm) ja monikanava-analysaattoria (Canberra InSpector 2000) ohjelmistoineen (Canberra Genie 2000). Analysaattorin digitaalisessa suodattimessa käytettiin aluksi arvoja rise time (RT) 6,4 μ s, flat top 0,8 μ s. RT-valinta muutettiin*) kuitenkin arvoon 1 μ s, kun havaittiin että aiempi RT-arvo ei ollut soveltuva mittauksiin suurilla pulssien laskentataajuuksilla, vaan aiheutti näissä mittauksissa merkittävän energiaresoluution heikkenemisen ja pitkän hännän spektrissä olevan piikin yläpuolisille energioille. Tämä näkyy selvästi kuvassa 1, missä on esitetty saman spektrin kuvaaja molemmilla digitaalisen suodattimen asetusarvoilla mitattuna. Pienemmillä laskentataajuuksilla spektrometrin resoluution heikkenemisilmiötä ei esiintynyt, vaan resoluutio oli päinvastoin parempi pitkällä RT-asetuksella mitattuna (^{57}Co 122 keV piikin puoliarvoleveys (FWHM) oli 580 eV kun RT=6,4 μ s, ja 680 eV kun RT=1 μ s). Ne mittauksista, joiden arveltiin oleellisesti kärsineen tästä ilmiöstä (IEC RQR 8–RQR 10), uusittiin tämän havainnon jälkeen.

Ilmaisimen energiakalibrointi tehtiin käyttäen pistemäisen ^{57}Co lähteen gammaenergioita 14,4 keV ja 136,5 keV. Pulssinkorkeusspektrin fotopiikit etsittiin ja sovitettiin Genie-ohjelmiston avulla. Energiakalibroinnin virhettä arvioitiin näiden gammaenergioiden lisäksi myös tämän kalibrointilähteen 122 keV gammaenergian avulla sekä volframin K- ja L-piikkien energioiden avulla spektreistä, joissa ne olivat näkyvissä. Virhe oli suurimmillaan 0,3 keV ja tyypillisesti tätä pie-

nempi. Putkijännitteillä 250 kV ja 300 kV kalibrointi varmistettiin pistemäisellä ^{133}Ba lähteellä (gammaenergiat 81 keV, 276,4 keV ja 302,9 keV). Energiakalibroinnin virhe pysyi näissäkin mittauksissa samana.

Germaniumilmaisimen suojakuoren ympärille asetettiin 7 mm paksu lyijysylinteri, joka suojasi ilmaisinta sironneelta säteilyltä. Sylinterin etuseinänä käytettiin 2 mm paksuista lyijylevyä, jonka keskellä oli halkaisijaltaan 8 mm reikä. Tämän etulevyn eteen asetettiin lisäsuojaksi sylinterimäinen (20 mm paksu, ulkohalkaisija 27 mm) lyijytulppa, jonka keskellä oli 8 mm reikä. Tämä tulppa antoi ilmaisimelle lisäsuojaa edestäpäin tulevaa sekundäärisäteilyä vastaan.

Röntgensäteily tuotettiin STUKin kalibrointilaboratorion röntgenlaitteilla. ISO N10–ISO N60 -spektrit ja IEC RQR -spektrit tuotettiin käyttämällä Seifert Isovolt 160 HS -generaattoria ja AEG MB 161/4 -röntgenputkea. ISO N -sarjan suurempia jännitteitä vastaavat spektrit tuotettiin Seifert Isovolt 320 HS -generaattorilla ja AEG MB 350/1 -röntgenputkella. Laitteistossa normaalistikin käytettävä monitorikammio (PTW 786/K1, seinämateriaali $3 \cdot 0,025$ mm polyimidi, yhteispaksuus 10,7 mg/cm²) sekä kunkin säteilylaadun tuottamiseen tarvittava lisäsuodatin sijaitsivat säteilykeilassa. Röntgenlaitteesta saadun säteilykeilan koko määräytyi röntgenputken edessä (etäisyydellä 71,5 cm fokuksesta) olevan 20 mm paksuisen lyijykollimaattorin (reiän halkaisija 13 mm) mukaisesti. Mittaukset tehtiin käyttämällä pientä putkivirtaa (yleensä 0,1 mA), jotta pulssien summautumisilmiöltä vältyttäisiin mahdollisimman hyvin.

Noin 2 m etäisyydellä röntgenputken fokuksesta

) Sähköisessä muodossa olevien pulssinkorkeusspektrien (.IEC) luontipäivämäärästä näkee, onko spektri mitattu ennen vai jälkeen tämän muutoksen, joka tehtiin 13.8.2007.

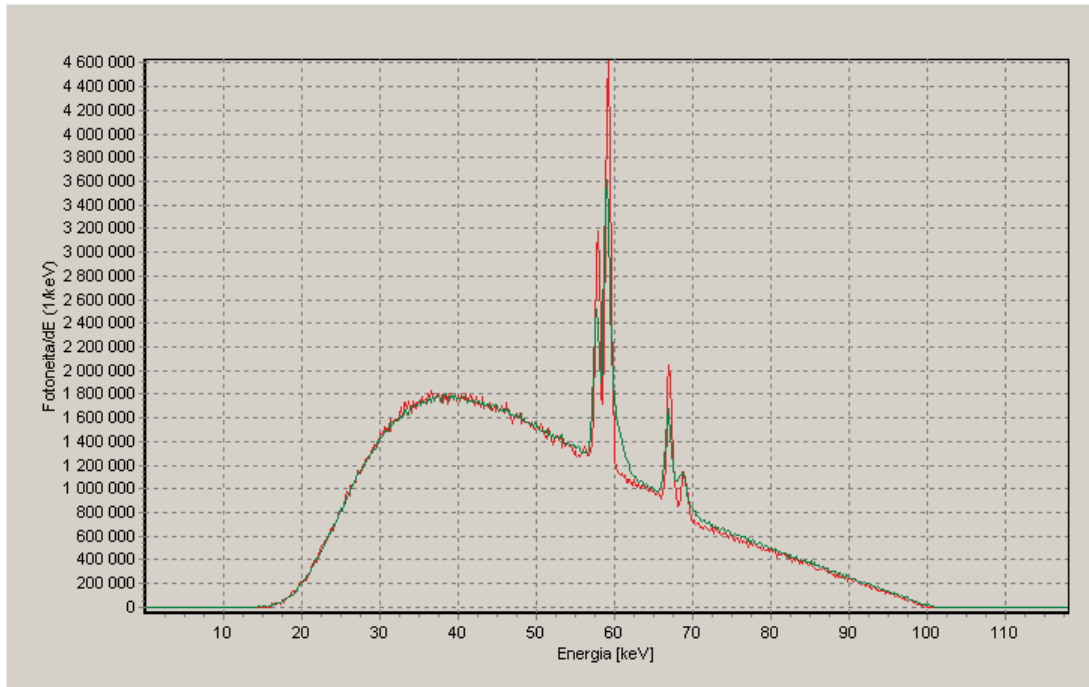
oli 20 mm paksu lyijykollimaattori, johon oli porattu halkaisijaltaan 1,5 mm reikä. Sen eteen oli asetettu toinen lyijykollimaattori, jossa oli 1 mm halkaisijainen reikä 4 mm paksussa levyssä ja 0,5 mm halkaisijainen reikä 2 mm paksussa levyssä. Tämä kollimaattorisysteemi rajoitti ilmaisimelle pääsevän primäärisäteilyn keilakoon ja pulssien laskentataajuuden hyväksyttävälle tasolle. Ilmaisimien sijoitettiin – STUKin säteilysuojelumittareiden kalibrointikäytäntöä vastaavasti – 3 m etäisyydelle röntgenputken fokuksesta siten, että edellä mainitun kollimaattorin pienestä reiästä tuleva säteily osui ilmaisimelle mahdollisimman tarkasti lyijytulpassa olevan reiän keskeltä. Tällä järjestelyllä välttyttiin hyvin havaitsemasta kollimaattoreissa syntynyttä sekundäärisäteilyä. Kollimaattorien ja ilmaisimen asettelu tehtiin kalibrointihallin takaseinässä olevan laserosoittimen avulla. Asettelyn tarkkuus varmistettiin fluoresoivaa levyä käyttäen. Spektrin mittauksen jälkeen varmistettiin, että spektrissä ei näy lyijykollimaattoreista aiheutunutta lyijyn K-absorptioreunaa (energian arvolla 88 keV) eikä lyijyn karakteristisia L- tai K-piikkejä. RQR 8, RQR 9 ja RQR 10 -spektrien mittauksissa säteilyn intensiteettiä pienennettiin viemällä 1,5 mm reikäkollimaattori noin 7 m etäisyydelle ja ilmaisimien 8 m etäisyydelle röntgenputken fokuksesta. Ilman aiheuttama suodatus korjattiin Spektripaja-ohjelmalla (versio 2.0, Tapiovaara ja Tapiovaara 2008) laskennallisesti siten, että nämäkin spektrit vastaavat 3 m etäisyydellä mitattuja spektrejä. Näissä mittauksissa ei käytetty 1 mm/0,5 mm lisäkollimaattoria. Mittausjärjestely on esitetty kuvassa 2.

Pulssinkorkeusspektrit korjattiin fotonikeritymän energiaspektreiksi Spektripaja-ohjelman avulla. Spektrit nollattiin visuaalisesti määritettyä alarajaa pienemmällä energian arvoilla. Tämä alaraja valittiin niin, että spektrin arvo sen kohdalla on vielä lähes nolla, mutta alkaa kasvaa energian kasvaessa (ks. esimerkiksi kuva 1). Fotonikertymäspektreistä laskettiin spektreihin liittyvät tunnusluvut:

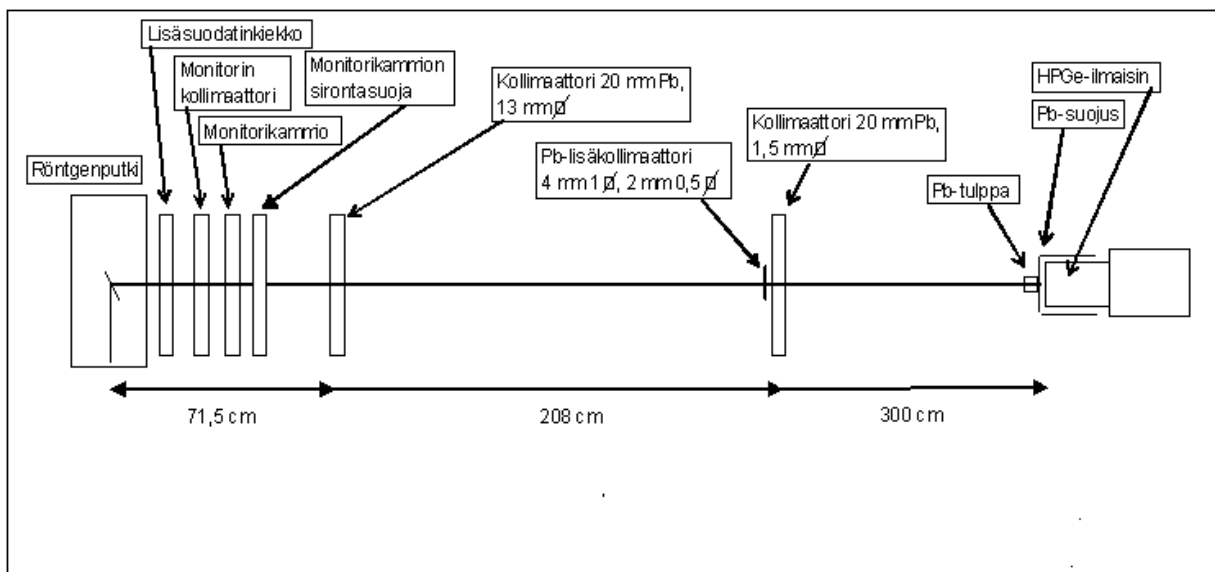
- ensimmäinen ja toinen puoliintumispaksuus*⁾ (HVL_1 ja HVL_2) 3 m etäisyydellä röntgenputken fokuksesta
- ensimmäinen ja toinen puoliintumispaksuus 1 m etäisyydellä röntgenputken fokuksesta (ilman vaimennuksen suhteen laskennallisesti korjatulle spektrille)
- fotonien keskimääräinen energia
- spektrin suhteellinen leveys [spektrin puolivoleveyden (FWHM) suhde spektrin keskimääräiseen fotonenergiaan]
- röntgenputken jännite määritettiin generoimalla Spektripaja-ohjelmalla spektrin tuottamiseen käytettyjen tunnettujen parametrien (20° anodikulma, 3 m mittausetäisyys, säteilykeilan suodatus) mukaisia laskennallisia spektrejä. Jännite arvioitiin sinä jännitteenä, jolla laskennallisen spektrin yhteensopivuus mitatun spektrin kanssa oli parhaimmillaan.

Tämän raportin kuvissa ISO N15–N60 esitetään myös aiemmin (21.6.2004) mitattuja spektrejä (Hakanen ym. 2006). Ne on mitattu jonkin verran edellä olevasta poikkeavalla tavalla. Mittauksissa käytettiin samaa germaniumilmaisinta, mutta eri monikanava-analysaattoria (Nuclear Data 62). Toinen ero oli röntgensäteilykeilan kollimoinnissa. Sitä ei tehty samalla tavalla kuin yllä: keilan rajauksessa käytettiin vain röntgenlaitteen tavanomaisen kalibrointikäytännön mukaista kollimointia. Sironneen säteilyn varalta käytettiin ilmaisimen ympärillä samaa 7 mm paksuista lyijysylinteriä kuin uusissakin mittauksissa. Ilmaisimelle pääsevää primäärisäteilyä rajattiin ainoastaan ilmaisimen eteen asetetulla 2 mm paksuisella lyijylevyllä, jossa oli halkaisijaltaan 4 mm aukko: kuvassa 2 näkyvää, noin 2 m etäisyydellä röntgenputken fokuksesta sijaitsevaa kollimaattoria ja ilmaisimen edessä olevaa lyijytulppaa ei näissä mittauksissa käytetty.

*⁾ Ensimmäinen HVL on se materiaalipaksuus, joka pienentää säteilyn ilmakermanopeuden puoleen alkuperäisestä arvostaan, kun mittaus tehdään ns. kapean keilan geometriassa. Toinen HVL puolittaa edelleen tämän kertaalleen puolittuneen ilmakermanopeuden.



Kuva 1. IEC RQR8(2005) -spektri mitattuna monikanava-analysaattorin kahdella eri digitaalisen suodattimen rise time-asetusarvolla. Punainen kuvaaja: rise time 1 μ s, vihreä käyrä: rise time 6,4 μ s. Tässä suurella pulssinopeudella mitatussa spektrissä näkyy selvästi siinä olevien volframin K-piikkien leveneminen kasvavan energian suuntaan, kun rise time-arvo on suuri.



Kuva 2. Spektrien mittausjärjestely. Katso tarkempi selitys tekstistä. Osa mittauksista (RQR8–RQR10) tehtiin 8 m etäisyydellä fokuksesta, jolloin 1,5 mm-aukkoisen Pb-kollimaattorin etäisyys fokuksesta oli noin 7 m. Osien sijoittelu ja koko eivät kuvassa ole oikeassa mittakaavassa.

3 Tulokset ja niiden tarkastelu

Fotonikertymäspektrien kuvaajat 3 m etäisyydellä röntgenputken fokuksesta on esitetty raportin lopussa olevassa liitteessä^{*)}. Vuonna 2007 mitattujen spektrien kuvaajat on piirretty kuviin punaisella värillä. Kuviin ISO N15–N60 on piirretty vihreällä vuonna 2004 mitatut spektrit. Kuvien alla on kustakin nyt mitatusta spektristä arvioitu putkijännite ja spektristä laskettu ensimmäinen ja toinen puoliintumispaksuus (HVL_1 ja HVL_2) sekä 3 m mittausetäisyydellä että 1 m etäisyydelle korjattuna. Näiden lisäksi ISO N -spektreistä on mitattu keskimääräinen energia, spektrin puoliarvoleveys (FWHM) sekä spektrin suhteellinen leveys (puoliarvoleveyden suhde keskimääräiseen energiaan: nämä kuvien yhteydessä ilmaistut tunnusluvut koskevat spektridataa mittausetäisyydellä 3 m röntgenputken fokuksesta). ISO N10 -spektrille ei laskettu puoliintumispaksuutta 1 m etäisyydellä, koska ilman aiheuttaman suodatuksen poiston vaikutus oli suuri ja aiheutti spektrin pienienergisien osien muuttumisen epävarmaksi^{**)}. Kuten aiemmin on jo mainittu, ISO N250- ja ISO N300 -spektrejä ei tässä ole esitetty niiden energiavastekorjauksen epätasaisuuden takia.

Taulukossa I on esitetty 1 m etäisyydelle korjattuja ISO N -spektreistä laskettuja tunnuslukuja ja verrattu niitä ISO 4037-1:1996 -standardissa

esitettyihin vaatimuksiin^{***)}. STUKin kalibrointilaboratorion spektrit täyttivät standardin vaatimukset 1 m etäisyydellä. Spektrit ISO N10–N20 eivät kuitenkaan täytä standardin spektrin leveys-spesifikaatiota 3 m etäisyydellä: spektrit ovat tällä etäisyydellä standardin spesifikaatioita kapeampia ilman aiheuttaman suodatuksen takia.

Spektrimittauksesta poiketen standardi vaatii selvästi, että HVL-mittaukset tehdään 1 m etäisyydellä röntgenputken fokuksesta. Sekä ensimmäisen että toisen HVL:n tulisi olla standardissa annetun arvon mukainen 5 % tarkkuudella. STUKin spektrit täyttävät nämä HVL-vaatimukset sekä ionisaatiokammio- ja absorbaattorimittauksien että spektreistä laskettujen HVL-arvojen perusteella.

Spektreistä lasketut HVL-arvot

Mitattujen, Ge-ilmaisimen vasteella korjattujen spektrien todenmukaisuutta on varmistettu vertaamalla spektreistä laskettuja säteilyn puoliintumispaksuuksia (HVL_1 ja HVL_2) ionisaatiokammion ja absorbaattorien avulla mitattuihin arvoihin. Ionisaatiokammion avulla tehdyt HVL-mittaukset on tehty aiemmin ja ne on dokumentoitu Dosimetrialaboratorion laatukäsikirjassa.

Vertailutulokset (Tapiovaara ja Tapiovaara 2008) on esitetty taulukoissa II ja III. Taulukossa II on HVL-vertailu ISO N15–N200 -spektreille ja taulukossa III IEC:n määrittelemille RQR-

^{*)} Mitatut pulssinkorkeusspektrit ja niistä detektorin energia-vasteella korjatut fotonikertymän energiaspektrit ovat myös saatavilla digitaalisessa muodossa, esimerkiksi DOS-yksikön kansiossa O:\Spektripaja20\Spektrit\Kalibrointihalli.

^{***)} Pehmeimpien säteilylaatuojen tarkoissa HVL- ja spektrimittauksissa tulisi mittaustataan sisällyttää myös ilman tiheys. Kuuden prosentin ilmanpaineen vaihtelu aiheuttaisi esimerkiksi ISO N15-spektrin HVL-arvon muuttumisen noin kahdella prosentilla, kun spektri muunnetaan vastaamaan 1 m etäisyyttä 3 m mittausetäisyydestä. Ionisaatiokammio- ja absorbaattorimittaukseen aiheutuva virhe olisi jonkun verran pienempi.

^{***)} ISO 4037-1:1996 ei selvästi ilmaise, tulisiko spektrien keskimääräisen energian ja leveyden vastata spektrien käyttöetäisyyttä vai 1 m etäisyyttä. Nämä tunnusluvut on kuitenkin ilmaistu samassa taulukossa kuin spektrejä koskevat HVL-vaatimukset, joille puolestaan on spesifioitu 1 m mittausetäisyys. Tämän vuoksi tässä on tulkittu, että myös spektrien tunnuslukuvaatimukset koskevat tätä samaa etäisyyttä. On kuitenkin syytä huomata, että spektrien käyttöetäisyydellä (STUKissa suojelumittareille 3 m) pehmeimpien säteilylaatuojen keskimääräinen energia ja spektrin leveys ovat erilaiset.

spektreille (IEC 61267:2005).

STUKin kalibrointilaboratoriossa ionisaatiokammion avulla mitattujen ISO N -sarjan HVL-arvojen arvioitu epävarmuus (Paavolainen ja Järvinen 1983, Kosunen, henkilökohtainen tiedonanto 18.3.2005) on 3–4 % ISO N25 ja sitä suurenergisemmille spektreille ja 6 % spektreille ISO N15 ja N20 (kattavuuskerroin $k=2$). Pienillä fotonienenergioilla ionisaatiokammioilla mitatun HVL:n epävarmuuteen vaikuttaa eniten ionisaatiokammion energiavasteen heikkeneminen pienillä energioilla ja suurilla fotonienenergioilla mitatakammioon kohdistuva sironnut säteily: näiden kummankin virhelähteen seurauksena ionisaatiokammion avulla mitatut HVL-arvot voivat olla hieman todellisia HVL-arvoja suurempia. Yleensä ottaen nämä 1 m etäisyydellä mitatut HVL-arvot yhtyvät spektreistä laskettuihin arvoihin edellä mainittujen epävarmuuksien rajoissa, lukuun ottamatta ehkä pehmeimpiä spektrejä (IEC RQR 2 sekä ISO N15 ja N20, joilla kuitenkin numeroarvojen merkintätarkkuuskin vaikuttaa asiaan). Näiden mittausten perusteella 3 m etäisyydellä mitatut, spektrometrin vasteella ja 2 m ilmakerroksen vaimennuksella korjatut spektrit vastaavat hyvin todellisia spektrejä (Hakanen ym. 2006).

Putkijännite

Spektrikuvaajien yhteyteen on merkitty myös spektrin maksimienergian perusteella arvioitu

röntgenputken jännite. Perinteisen määritelmän mukaan putkijännite ilmaistaan ajallisesti vaihtelevan putkijännitteen huippuarvona (ns. kVp-arvo), joka vastaa myös spektrissä olevien fotonien maksimienergiaa. Tämä määritelmä on kuitenkin hankala ja jossain määrin harhaanjohtava tilanteissa, joissa putkijännitteen aaltoilussa on teräviä (ts. lyhytaikaisia) huippuja. Tässä tilanteessa spektrillä ei ole helposti mitattavaa maksimienergiaa, vaan spektrin kuvaaja lähenee nolaa loivenevasti. Tässä työssä mitatuissa spektreissä näkyy tällainen loiveneva, noin 0,5 keV:in mittainen häntä odotetun maksimienergian yläpuolella. Samanlainen häntä on havaittu myös PTB:ssä mitatuissa spektreissä (Ankerhold ym. 1999, Ankerhold 2000), mille ilmiölle ei PTB:n työssä löydetty selitystä. Monikanava-analysaattorin digitaalisen suodatuksen asetusten muuttamisen jälkeen mitatuissa spektreissä ei tätä häntää kuitenkaan näy, ja aikaisemmin käytetyllä monikanava-analysaattorilla mitatuissa spektreissä (ks. luku 2) se on hieman pienempi. Tällä perusteella on luultavaa, että häntä ei ole todellinen, röntgenlaitteistosta johtuva spektrien ominaisuus, vaan johtuu suurella pulssinlaskentataajuudella tapahtuneesta resoluution heikkenemisestä epäoptimaalisilla digitaalisen suodattimen asetuksilla.

Taulukko I. STUKin kalibrointilaboratoriossa mitatuista ISO N-sarjan spektreistä laskettu keskimääräinen energia (\bar{E}) ja spektrin suhteellinen leveys verrattuna standardin ISO 4037-1:1996 vaatimuksiin. Spektrit on korjattu vastaamaan mittausta 1 m etäisyydellä röntgenputken fokuksesta.

Spektri	Mitattu \bar{E} (keV)	\bar{E} (ISO 4037-1) (keV)	Mitattu spektrin leveys (%)	Spektrin leveys (ISO 4037-1) (%)
ISO N10	7,9 ^{*)}	8 (± 5 %)	28 ^{*)}	28 (± 15 %)
ISO N15	11,5	12 (± 5 %)	29	33 (± 15 %)
ISO N20	15,4	16 (± 5 %)	31	34 (± 15 %)
ISO N25	20,1	20 (± 5 %)	34	33 (± 15 %)
ISO N30	24,2	24 (± 5 %)	32	32 (± 15 %)
ISO N40	33,2	33 (± 3 %)	30	30 (± 10 %)
ISO N60	48,1	48 (± 3 %)	37	36 (± 10 %)
ISO N80	65,4	65 (± 3 %)	32	32 (± 10 %)
ISO N100	83,4	83 (± 3 %)	28	28 (± 10 %)
ISO N120	100,1	100 (± 3 %)	29	27 (± 10 %)
ISO N150	117,4	118 (± 3 %)	39	37 (± 10 %)
ISO N200	163,2	164 (± 3 %)	31	30 (± 10 %)

^{*)} STUKin ISO N10-spektrin keskimääräinen energia on todellisuudessa hieman pienempi kuin tässä ilmoitettu luku. Ilman vaimennuksen korjaus tälle spektrille on niin suuri, että spektrin pienien energistä päätä ei voitu määrittää luotettavasti.

Taulukko II. Ionisaatiokammionmittausten ja mitatuista spektreistä laskettujen HVL₁- ja HVL₂-arvojen yhteensopi-
vuus ISO N-spektreille 1 m etäisyydellä. Vuonna 2004 mitatuista spektreistä lasketut (Hakanen ym. 2006) HVL-
arvot on esitetty suluissa.

	Spektreistä lasketut HVL-arvot (mmAl, ellei toisin mainittu)		Ionisaatiokammion avulla mitatut HVL-arvot (mmAl, ellei toisin mainittu)	
	HVL ₁	HVL ₂	HVL ₁	HVL ₂
N15	0,13 (0,13)	0,14 (0,14)	0,14	0,16
N20	0,30 (0,30)	0,34 (0,34)	0,32	0,35
N25	0,65 (0,65)	0,72 (0,72)	0,66	0,73
N30	1,13 (1,13)	1,24 (1,24)	1,15	1,24
N40	0,084 (0,085) mmCu	0,092 (0,092) mmCu	0,084 mmCu	0,089 mmCu
N60	0,24 (0,24) mmCu	0,27 (0,27) mmCu	0,24 mmCu	0,26 mmCu
N80	0,59 mmCu	0,64 mmCu	0,58 mmCu	0,63 mmCu
N100	1,11 mmCu	1,17 mmCu	1,11 mmCu	1,16 mmCu
N120	1,69 mmCu	1,76 mmCu	1,71 mmCu	1,78 mmCu
N150	2,32 mmCu	2,44 mmCu	2,36 mmCu	2,48 mmCu
N200	3,89 mmCu	3,98 mmCu	4,00 mmCu	4,11 mmCu

Taulukko III. Ionisaatiokammiomittauksista ja mitatuista spektreistä laskettujen HVL-arvojen yhteensopivuus IEC RQR (2005)-laaduille 1 m etäisyydellä.

	Spektreistä lasketut HVL-arvot	Ionisaatiokammion avulla mitatut HVL-arvot
	HVL₁ (mmAl)	HVL₁ (mmAl)
RQR 2	1,36	1,42
RQR 3	1,73	1,77
RQR 4	2,13	2,16
RQR 5	2,73	2,62
RQR 6	2,94	2,98
RQR 7	3,45	3,48
RQR 8	3,86	3,94
RQR 9	5,07	5,03
RQR 10	6,35	6,60

4 Johtopäätökset

Esitetyt mittausjärjestelyt ja pulssinkorkeusspektrien korjaus mahdollistavat fotonikertymäspektrin luotettavan mittauksen. Mitatuista spektreistä lasketut HVL-arvot vastaavat hyvin ionisaatiokammion ja absorbaattoreiden avulla mitattuja arvoja. ISO N30–N80 -spektreistä lasketut puoliintumispaksuuden arvot ja keskimääräiset energiat vastasivat myös hyvin kirjallisuudessa esitettyjä arvoja (Ankerhold ym. 1999). ISO N15- ja ISO N20 -spektrien puoliintumispaksuudet ja keskimääräiset energiat olivat kuitenkin hieman kirjallisuudessa esitettyä pienempiä. Tämä on selitettävissä STUKin kalibrointilaboratoriossa näiden säteilylaatuojen synnyttämisessä käytettävällä, nominaalista pienemmällä putkijännitteen arvolla.

Spektrimittaukset tarjoavat hyvän ja käyttökelpoisen mahdollisuuden säteilylaatuojen vakioisuuden seurantaan. Mittausten teko kuitenkin helpottuisi, jos mittauksia varten valmistettaisiin suoraan käytettävissä oleva, riittävän pienireikäinen kollimaattori. Suurten pulssitaajuuksien ongelmaan saattaisi saada helpotusta myös optimoimalla spektrometrin elektroniikan asetuksia edelleen. Yli 200 kV jännitteillä tuotetun säteilyn spektrin mittaus edellyttää nykyisin käytetyn spektrien korjausohjelman datan parantamista.

STUKin Dosimetrialaboratorion ISO N10–N200 -säteilylaadut täyttävät 1 m etäisyydellä mitattuna ISO 4037-1 -standardissa esitetyt vaatimukset. Kolmen metrin etäisyydellä 20 kV tai sitä pienemmällä jännitteillä tuotetut spektrit ovat ilman aiheuttaman suodatuksen takia kapeampia kuin standardin määrittelemä arvo. Suurimpia jännitteitä (250 kV ja 300 kV) vastaavia spektrejä ei tässä työssä ole tarkasteltu. Pehmeimpien ISO N10–N20 -spektrien standardinmukaisuutta voitaisiin edelleen parantaa käyttämällä hieman nykyistä suurempaa putkijännitettä.

STUKin Dosimetrialaboratorion röntgenlaitteisto (Seifert Isovolt 160 HS / MB 161/4) on säilynyt stabiilina edellisten spektrimittausten (v. 2004) jälkeen. Ainoastaan ISO N15 -spektreissä havaittiin pieni ero, joka aiheutunee eroista mittausjärjestelyissä.

STUKin Dosimetrialaboratorion laatukäsikirjassa ilmoitetut putkijännitteen arvot vastaavat hyvin todellisia putkijännitteitä (erot 1 % luokkaa tai pienemmät), lukuun ottamatta pienimpiä putkijännitteen arvoja. Alle 40 kV jännitteillä laatukäsikirjassa annetut arvot ovat 0,5–1,0 kV (1,3 %–10 %) todellisia jännitteitä suuremmat.

Kirjallisuusviitteet

Ankerhold U, Behrens R, Ambrosi P. X ray spectrometry of low energy photons for determining conversion coefficients from air kerma, K_a , to personal dose equivalent, $H_p(10)$, for radiation qualities of the ISO narrow spectrum series. Radiation Protection Dosimetry 1999; 81: 247–258.

Ankerhold U. Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data -ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra-. PTB-Bericht, PTB-Dos-34. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt; 2000.

Hakanen A, Kosunen A, Pöyry P and Tapiovaara M. Determination of conversion factors from air kerma to operational dose equivalent quantities for low-energy x-ray spectra. Radiation Protection Dosimetry (painossa, <http://rpd.oxfordjournals.org/cgi/reprint/ncl386v1.pdf>); 2006.

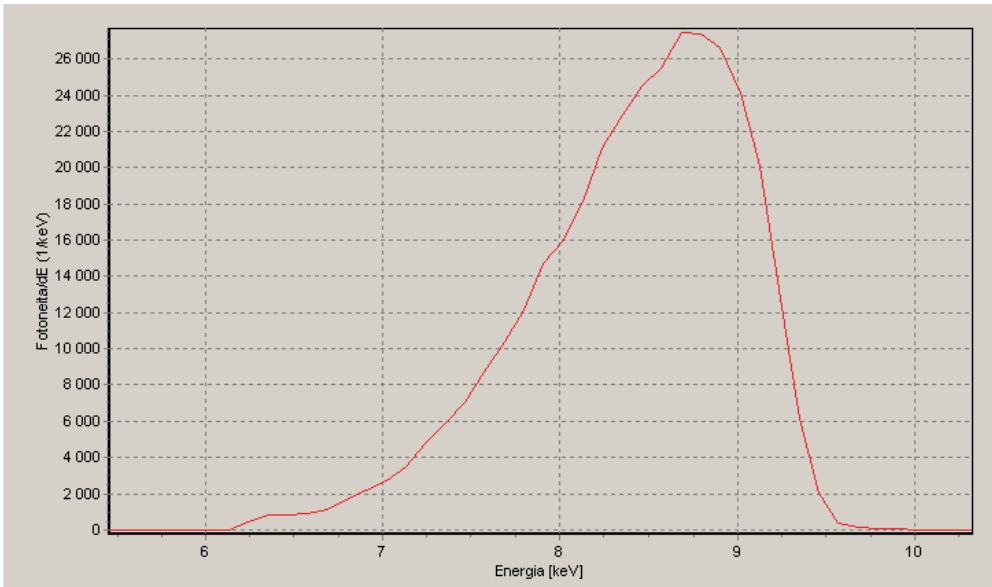
IEC 1267. Medical diagnostic x-ray equipment – Radiation conditions for use in the determination of characteristics. Geneve: International Electrotechnical Commission; 1994.

IEC 61267. Medical diagnostic x-ray equipment – Radiation conditions for use in the determination of characteristics. Geneve: International Electrotechnical Commission; 2005.

ISO 4037-1. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods. Geneve: International Organization for Stardardization; 1996.

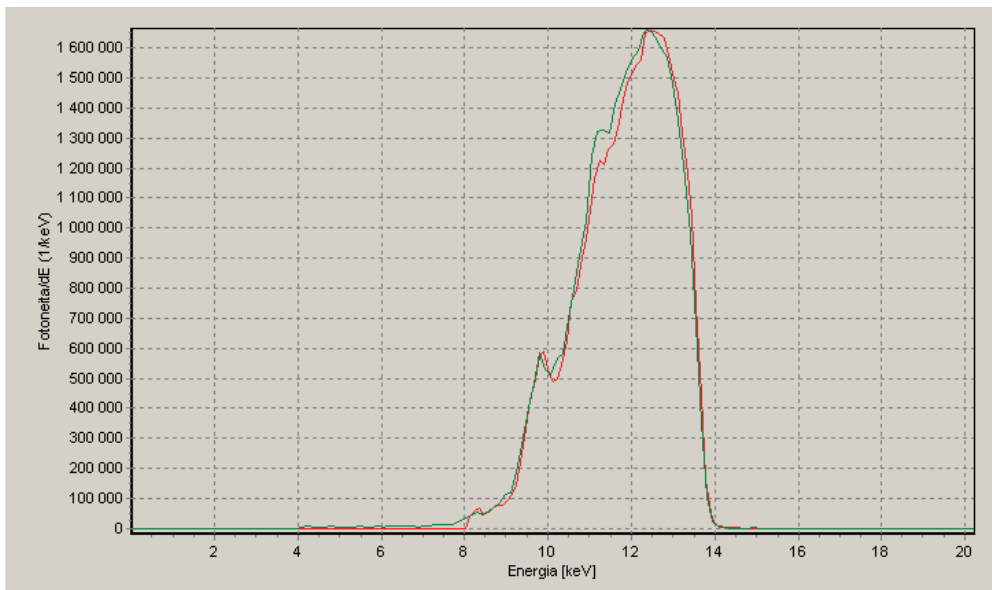
STUKin Dosimetrialaboratorion Laatukäsikirja DOS-M4.7.2, ISO Narrow-säteilylaadut (12.8.2005).

Tapiovaara M, Tapiovaara T. Spektripaja (2.0) -ohjelman käyttöohje ja validointi. STUK-TR 3. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2008.



ISO N10

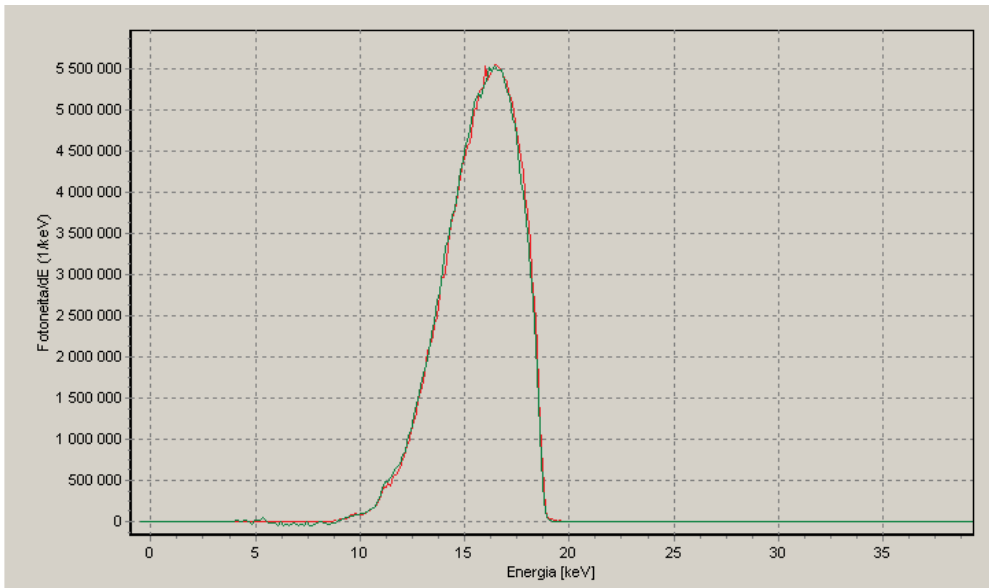
Spektristä arvioitu jännite:	9,4 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	9,0 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	10,4 kV	
Keskimääräinen energia: 8,4 keV;	FWHM: 1,4 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 16,2 %
Spektristä laskettu HVL ₁ (3 m):	0,055 mm Al	HVL ₂ (3 m): 0,058 mm Al
Spektristä laskettu HVL ₁ (1 m):	–	HVL ₂ (1 m): –
Laatukäsikirjan mukainen HVL ₁ (1 m):	0,047 mm Al	HVL ₂ (1 m): 0,053 mm Al



ISO N15

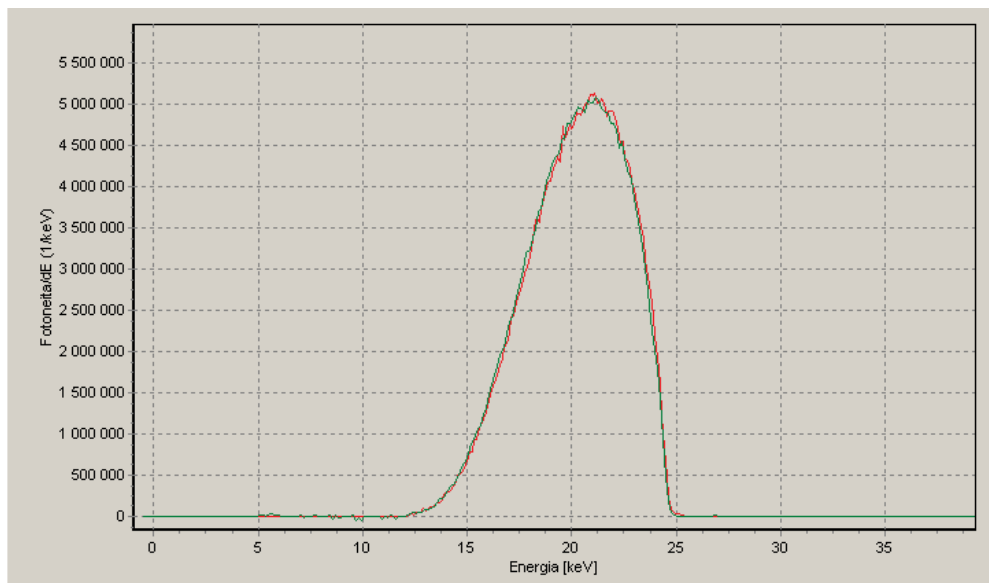
Punainen: elokuussa 2007 mitattu spektri; Vihreä: 21.6.2004 mitattu spektri.

Spektristä arvioitu jännite:	13,8 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	13,4 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	14,8 kV	
Keskimääräinen energia: 11,8 keV;	FWHM: 2,8 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 23,7 %
Spektristä laskettu HVL ₁ (3 m):	0,15 mm Al	HVL ₂ (3 m): 0,16 mm Al
Spektristä laskettu HVL ₁ (1 m):	0,13 mm Al	HVL ₂ (1 m): 0,14 mm Al
Laatukäsikirjan mukainen HVL ₁ (1 m):	0,14 mm Al	HVL ₂ (1 m): 0,16 mm Al

**ISO N20**

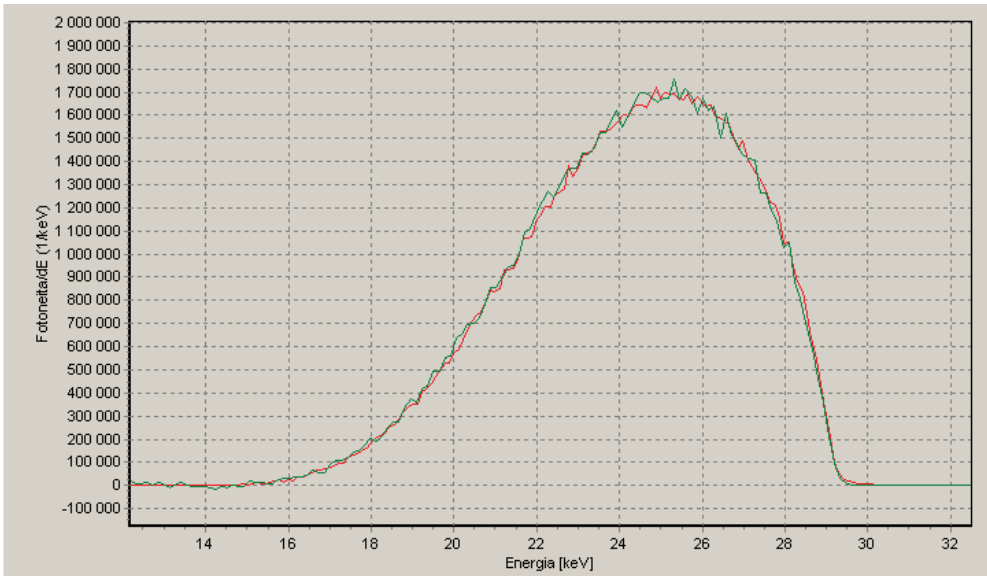
Punainen: elokuussa 2007 mitattu spektri; Vihreä: 21.6.2004 mitattu spektri.

Spektristä arvioitu jännite:	18,9 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	18,4 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	19,7 kV	
Keskimääräinen energia: 15,7 keV;	FWHM: 4,5 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 28,7 %
Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	0,32 mm Al	HVL_2 (3 m): 0,36 mm Al
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	0,30 mm Al	HVL_2 (1 m): 0,34 mm Al
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	0,32 mm Al	HVL_2 (1 m): 0,35 mm Al

**ISO N25**

Punainen: elokuussa 2007 mitattu spektri; Vihreä: 21.6.2004 mitattu spektri.

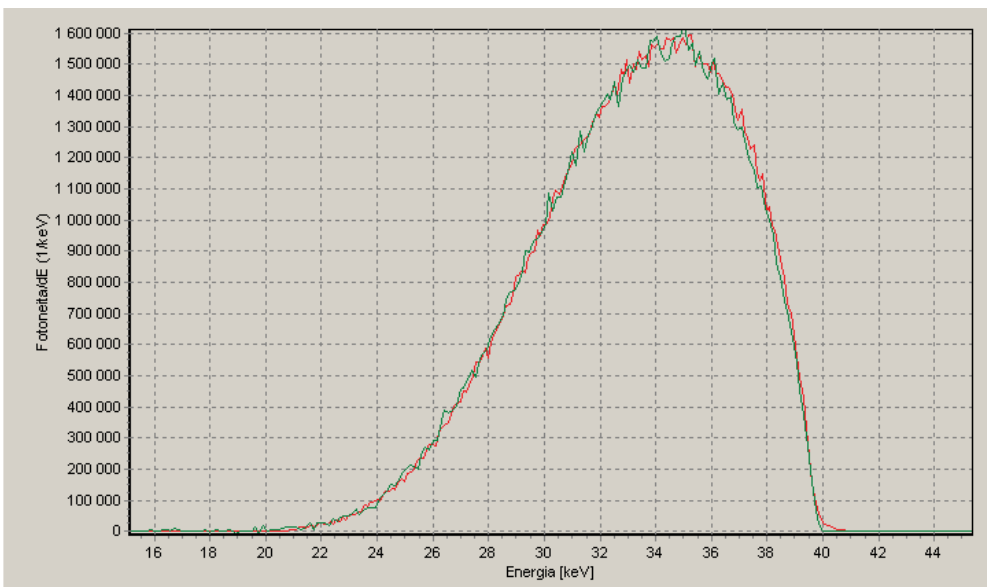
Spektristä arvioitu jännite:	24,8 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	24,2 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	25,5 kV	
Keskimääräinen energia: 20,2 keV;	FWHM: 6,5 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 32,2 %
Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	0,67 mm Al	HVL_2 (3 m): 0,74 mm Al
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	0,65 mm Al	HVL_2 (1 m): 0,72 mm Al
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	0,66 mm Al	HVL_2 (1 m): 0,73 mm Al



ISO N30

Punainen: elokuussa 2007 mitattu spektri; Vihreä: 21.6.2004 mitattu spektri.

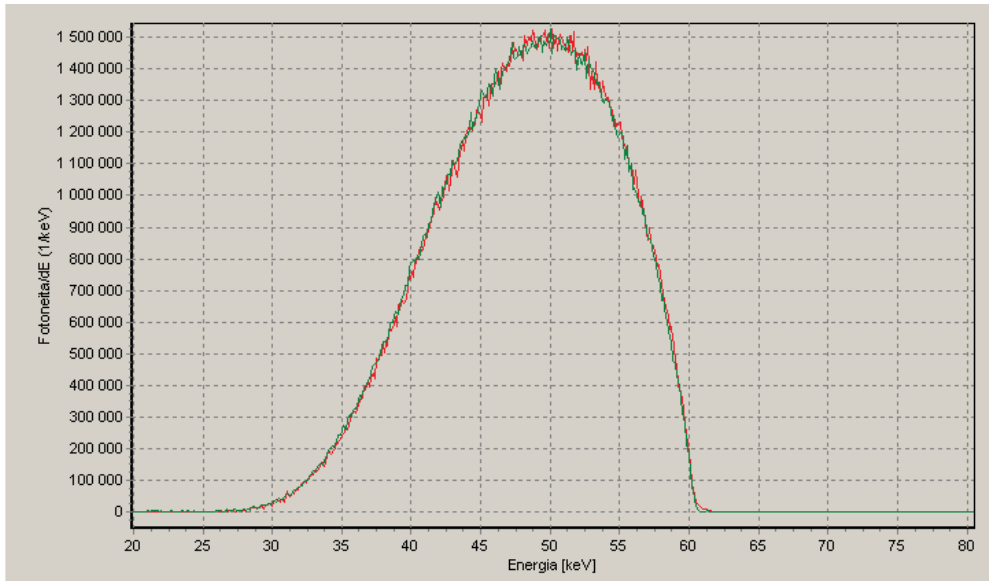
Spektristä arvioitu jännite:	29,4 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	28,8 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	30,1 kV	
Keskimääräinen energia: 24,2 keV;	FWHM: 7,4 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 30,4 %
Spektristä laskettu HVL ₁ (3 m):	1,14 mm Al	HVL ₂ (3 m): 1,25 mm Al
Spektristä laskettu HVL ₁ (1 m):	1,13 mm Al	HVL ₂ (1 m): 1,24 mm Al
Laatukäsikirjan mukainen HVL ₁ (1 m):	1,15 mm Al	HVL ₂ (1 m): 1,24 mm Al



ISO N40

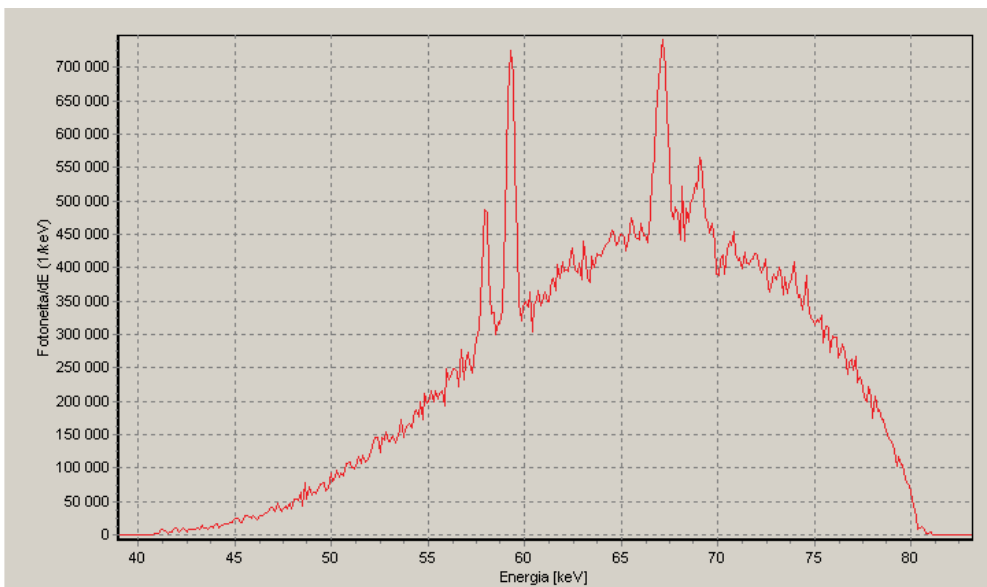
Punainen: elokuussa 2007 mitattu spektri; Vihreä: 21.6.2004 mitattu spektri.

Spektristä arvioitu jännite:	40,0 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	39,3 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	40,5 kV	
Keskimääräinen energia: 33,2 keV;	FWHM: 9,7 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 29,1 %
Spektristä laskettu HVL ₁ (3 m):	0,085 mm Cu	HVL ₂ (3 m): 0,092 mm Cu
Spektristä laskettu HVL ₁ (1 m):	0,084 mm Cu	HVL ₂ (1 m): 0,092 mm Cu
Laatukäsikirjan mukainen HVL ₁ (1 m):	0,084 mm Cu	HVL ₂ (1 m): 0,089 mm Cu

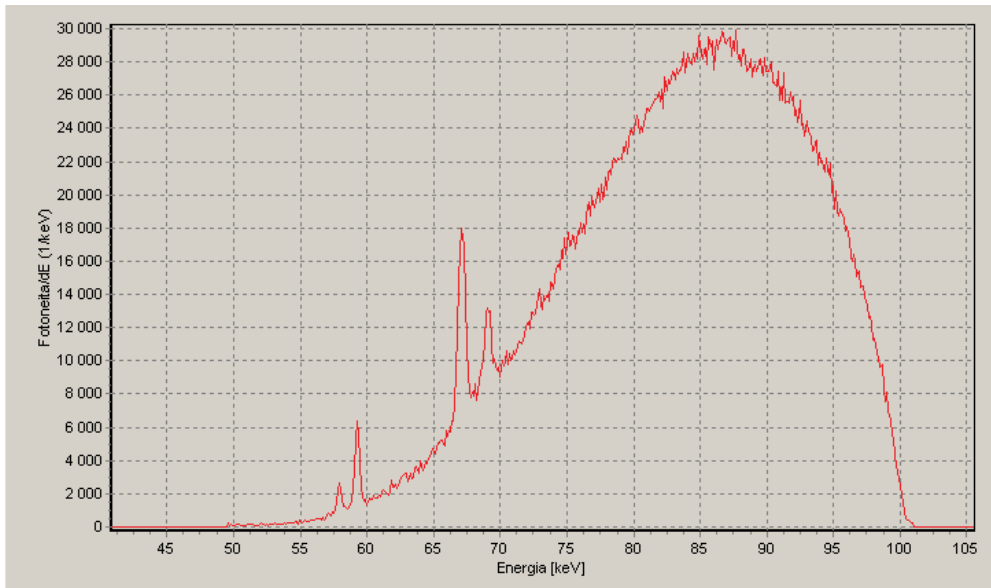
**ISO N60**

Punainen: elokuussa 2007 mitattu spektri; Vihreä: 21.6.2004 mitattu spektri.

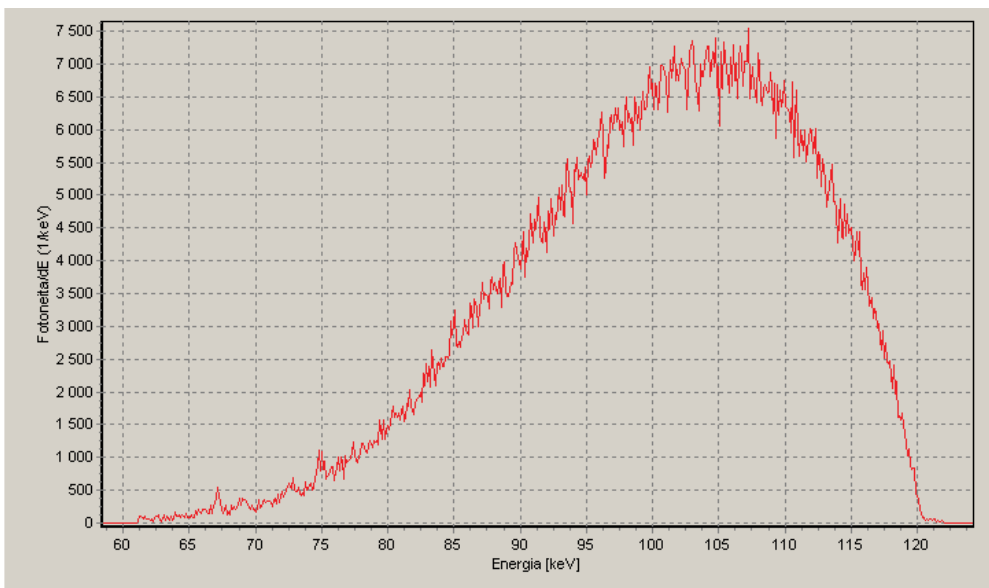
Spektristä arvioitu jännite:	60,5 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	59,9 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	61,0 kV	
Keskimääräinen energia: 48,2 keV;	FWHM: 18,1 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 37,5 %
Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	0,24 mm Cu	HVL_2 (3 m): 0,27 mm Cu
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	0,24 mm Cu	HVL_2 (1 m): 0,27 mm Cu
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	0,24 mm Cu	HVL_2 (1 m): 0,26 mm Cu

**ISO N80**

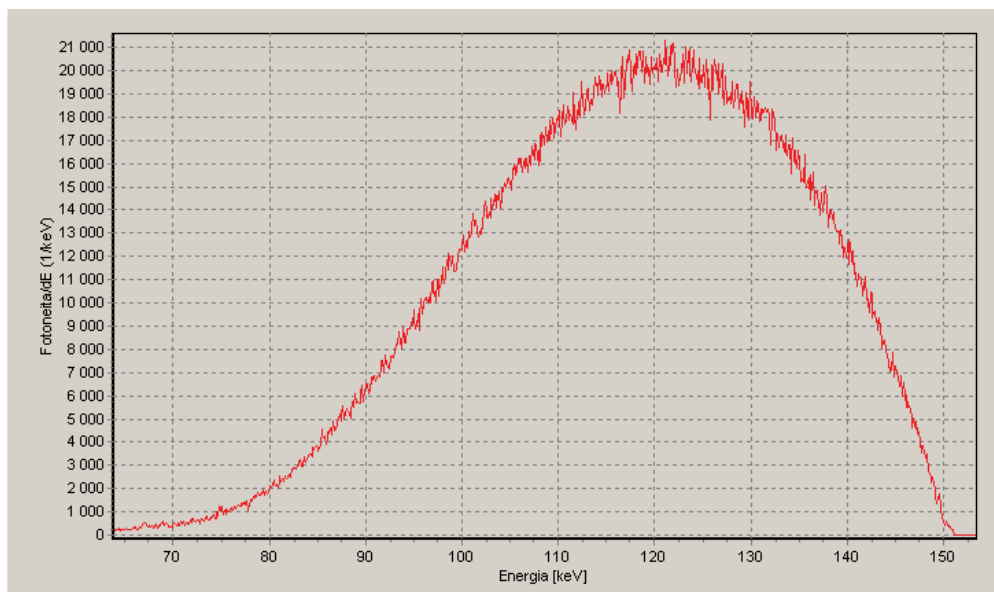
Spektristä arvioitu jännite:	80,4 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	80,0 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	80,5 kV	
Keskimääräinen energia: 65,5 keV;	FWHM: 20,9 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 31,9 %
Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	0,59 mm Cu	HVL_2 (3 m): 0,64 mm Cu
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	0,59 mm Cu	HVL_2 (1 m): 0,64 mm Cu
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	0,58 mm Cu	HVL_2 (1 m): 0,63 mm Cu

**ISO N100**

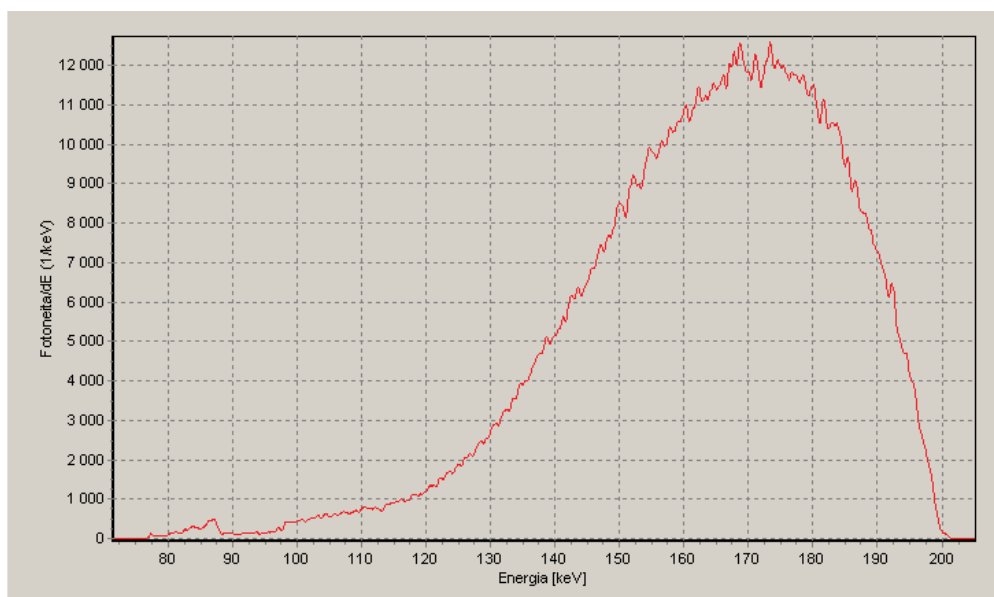
Spektristä arvioitu jännite:	100,3 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	100,0 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	100,3 kV	
Keskimääräinen energia: 83,4 keV;	FWHM: 23,1 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 27,7 %
Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	1,11 mm Cu	HVL_2 (3 m): 1,17 mm Cu
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	1,11 mm Cu	HVL_2 (1 m): 1,17 mm Cu
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	1,11 mm Cu	HVL_2 (1 m): 1,16 mm Cu

**ISO N120**

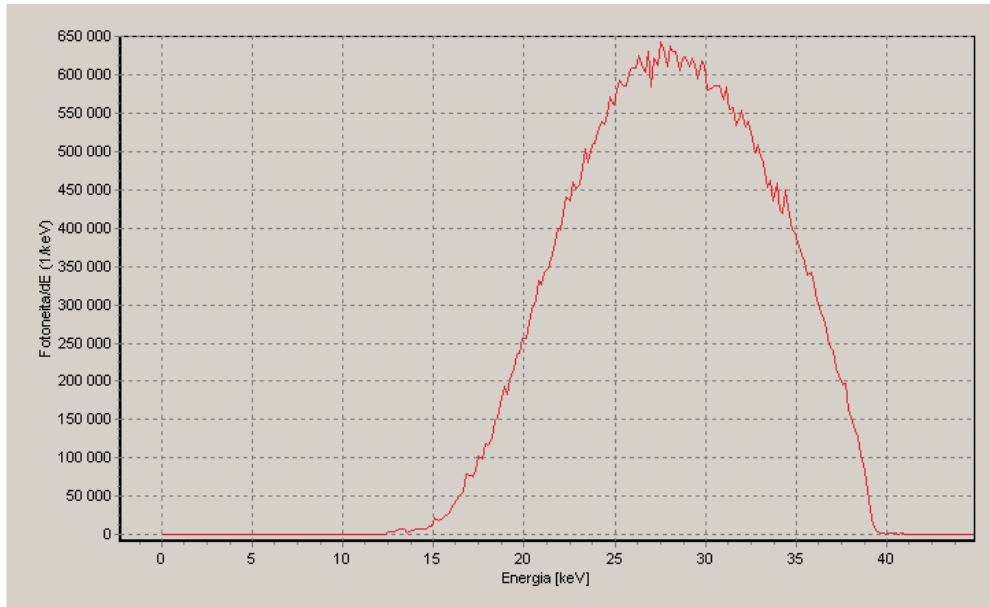
Spektristä arvioitu jännite:	120,3 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	120,0 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	120,1 kV	
Keskimääräinen energia: 100,1 keV;	FWHM: 29,0 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 29,0 %
Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	1,69 mm Cu	HVL_2 (3 m): 1,76 mm Cu
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	1,69 mm Cu	HVL_2 (1 m): 1,76 mm Cu
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	1,71 mm Cu	HVL_2 (1 m): 1,78 mm Cu

**ISO N150**

Spektristä arvioitu jännite:	150,2 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	150,0 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	149,8 kV	
Keskimääräinen energia: 117,4 keV;	FWHM: 45,4 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 38,7 %
Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	2,32 mm Cu	HVL_2 (3 m): 2,44 mm Cu
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	2,32 mm Cu	HVL_2 (1 m): 2,44 mm Cu
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	2,36 mm Cu	HVL_2 (1 m): 2,48 mm Cu

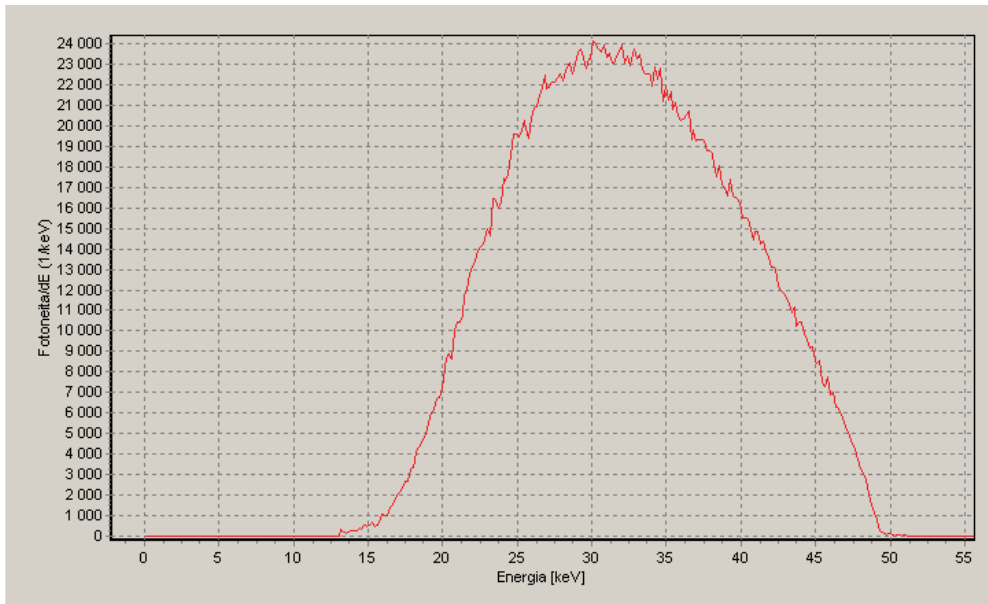
**ISO N200**

Spektristä arvioitu jännite:	199,8 kV	
Generaattorille asetettu jännite:	200,0 kV	
Laatukäsikirjan mukainen jännite:	199,2 kV	
Keskimääräinen energia: 163,2 keV;	FWHM: 49,8 keV;	spektrin suhteellinen leveys: 30,5 %
Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	3,90 mm Cu	HVL_2 (3 m): 3,98 mm Cu
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	3,89 mm Cu	HVL_2 (1 m): 3,98 mm Cu
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	4,00 mm Cu	HVL_2 (1 m): 4,11 mm Cu

**RQR 2 (2005)**

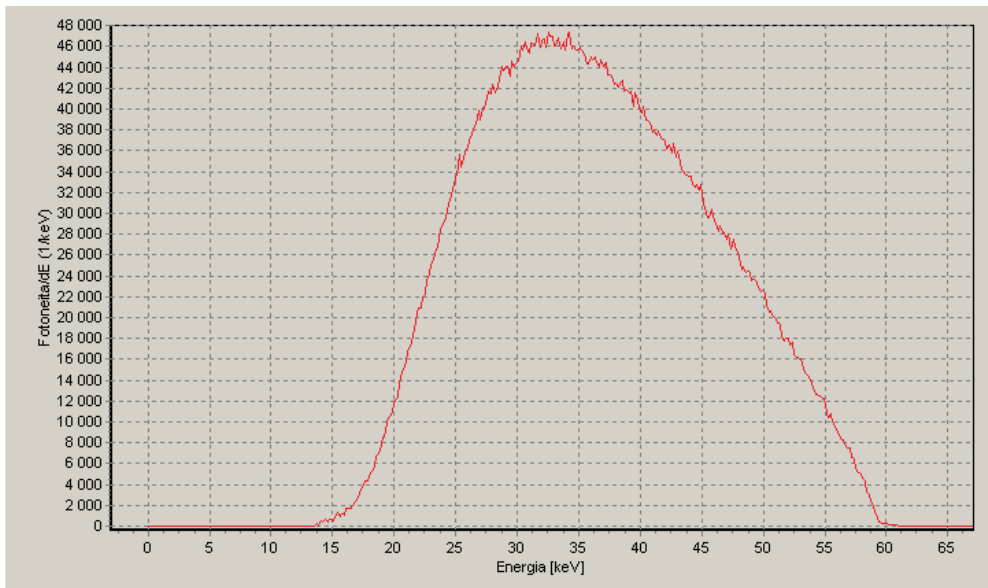
Spektristä arvioitu jännite: 39,5 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 38,8 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 40,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 1,40 mm Al HVL_2 (3 m): 1,74 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 1,36 mm Al HVL_2 (1 m): 1,70 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 1,42 mm Al

**RQR 3 (2005)**

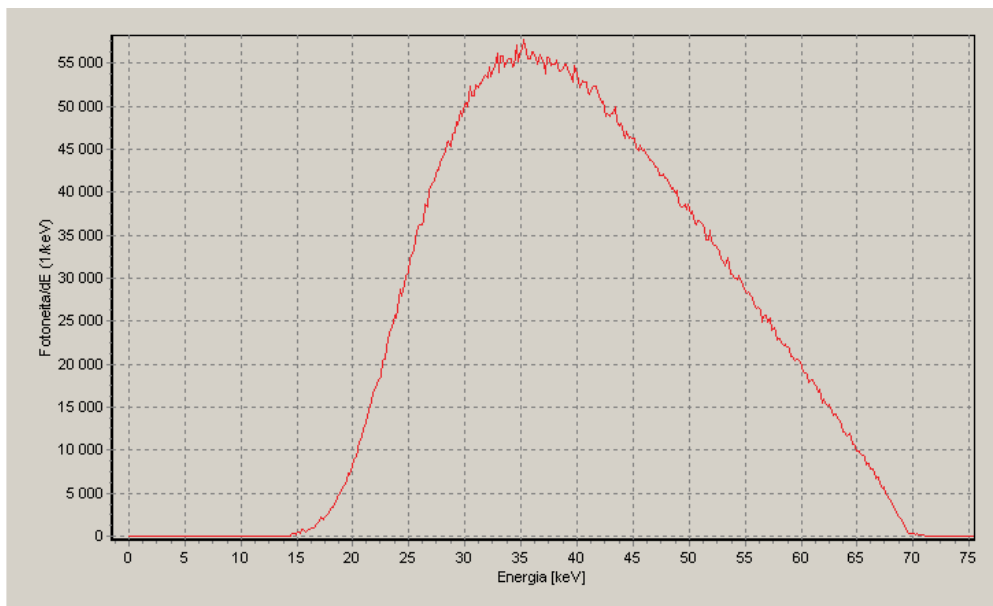
Spektristä arvioitu jännite: 49,5 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 48,8 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 50,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 1,79 mm Al HVL_2 (3 m): 2,37 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 1,73 mm Al HVL_2 (1 m): 2,31 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 1,77 mm Al

**RQR 4 (2005)**

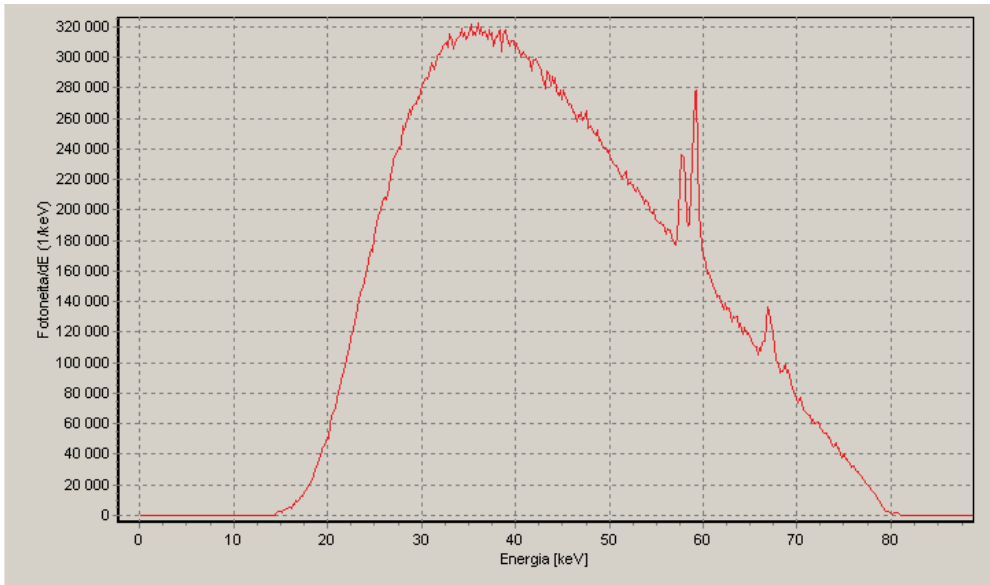
Spektristä arvioitu jännite: 59,7 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 58,9 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 60,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 2,21 mm Al HVL_2 (3 m): 3,04 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 2,13 mm Al HVL_2 (1 m): 2,96 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 2,16 mm Al

**RQR 5 (2005)**

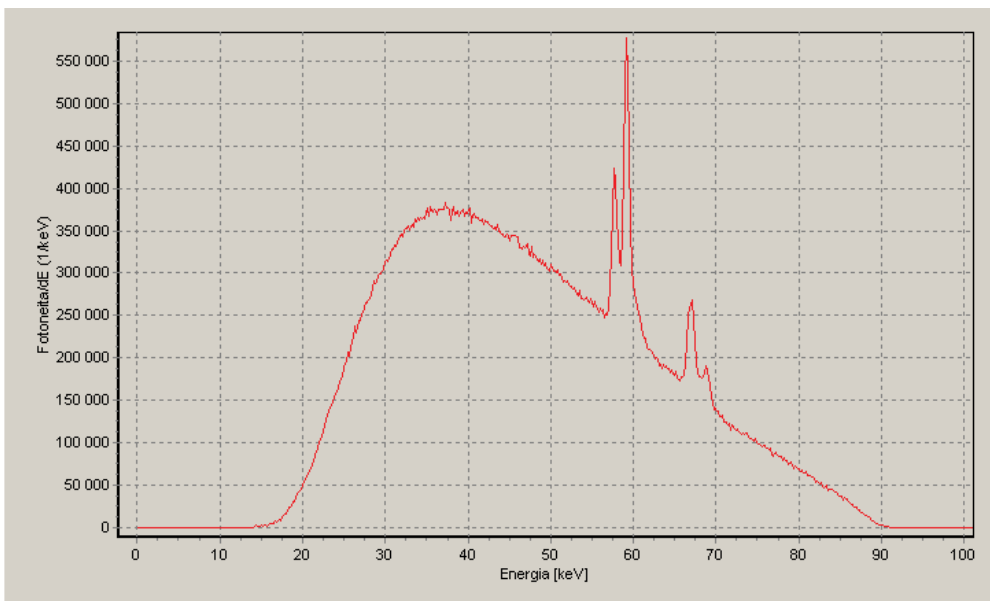
Spektristä arvioitu jännite: 70,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 68,9 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 70,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 2,78 mm Al HVL_2 (3 m): 3,89 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 2,73 mm Al HVL_2 (1 m): 3,82 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 2,62 mm Al

**RQR 6 (2005)**

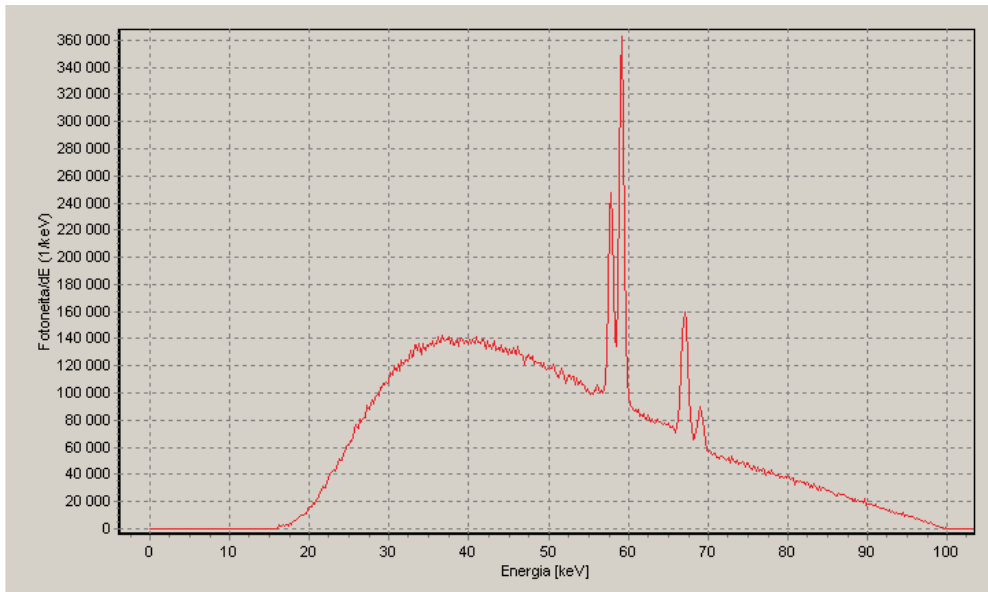
Spektristä arvioitu jännite: 80,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 78,9 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 80,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 3,03 mm Al HVL_2 (3 m): 4,43 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 2,94 mm Al HVL_2 (1 m): 4,33 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 2,98 mm Al

**RQR 7 (2005)**

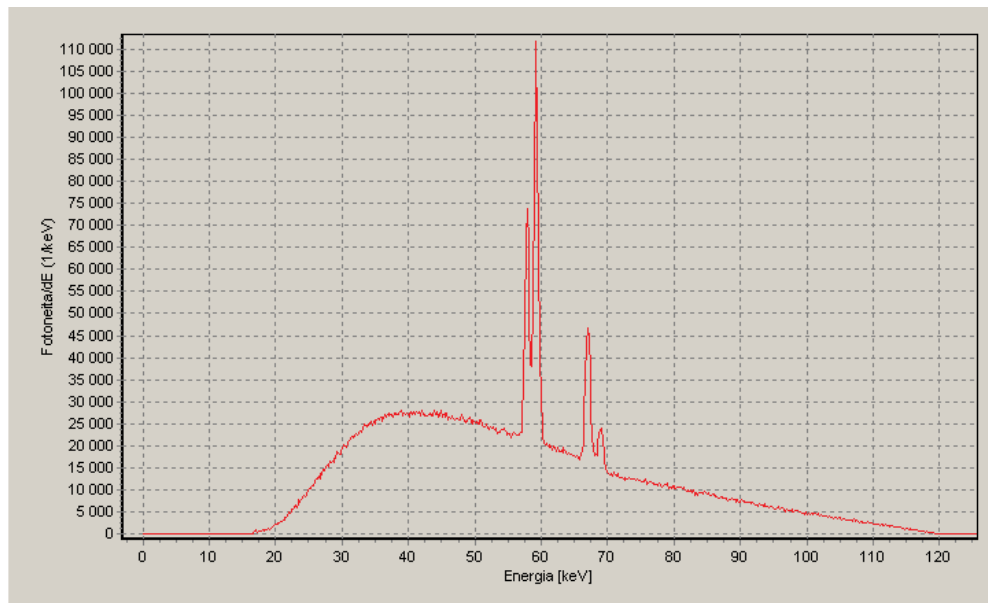
Spektristä arvioitu jännite: 90,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 89,0 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 90,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 3,55 mm Al HVL_2 (3 m): 5,26 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 3,45 mm Al HVL_2 (1 m): 5,16 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 3,48 mm Al

**RQR 8 (2005)**

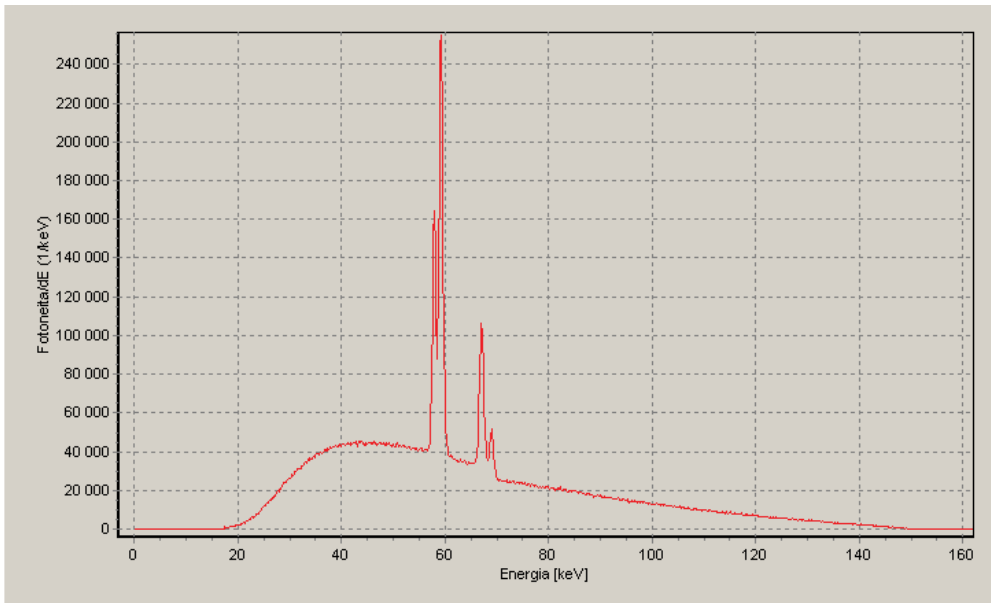
Spektristä arvioitu jännite: 100,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 99,0 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 100,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 3,97 mm Al HVL_2 (3 m): 5,92 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 3,86 mm Al HVL_2 (1 m): 5,82 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 3,94 mm Al

**RQR 9 (2005)**

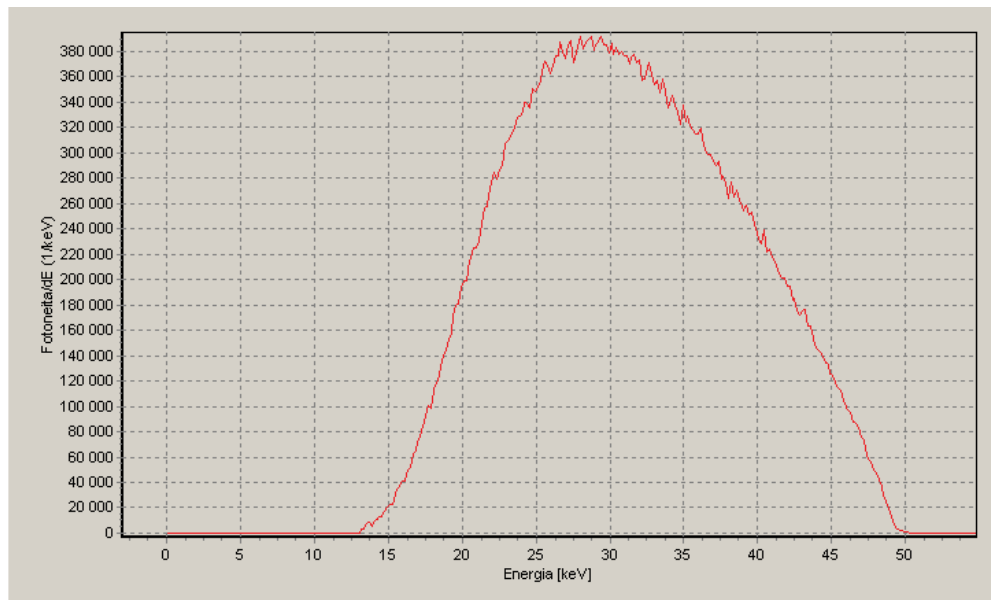
Spektristä arvioitu jännite: 120,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 119,1 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 120,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 5,03 mm Al HVL_2 (3 m): 7,35 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 5,07 mm Al HVL_2 (1 m): 7,38 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 5,03 mm Al

**RQR 10 (2005)**

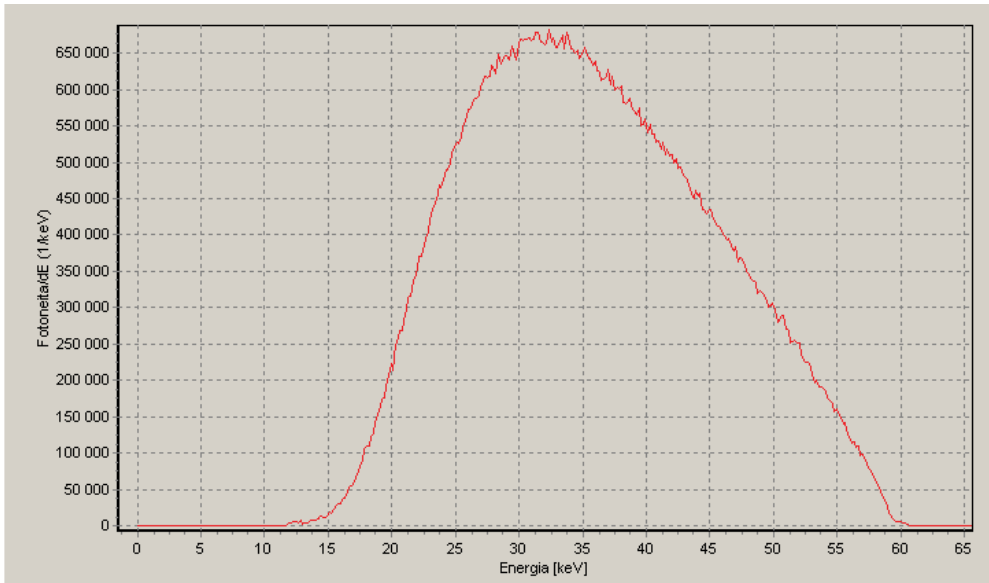
Spektristä arvioitu jännite: 150,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 149,4 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 150,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 6,47 mm Al HVL_2 (3 m): 9,09 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 6,35 mm Al HVL_2 (1 m): 9,00 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 6,60 mm Al

**RQR 3 (1994)**

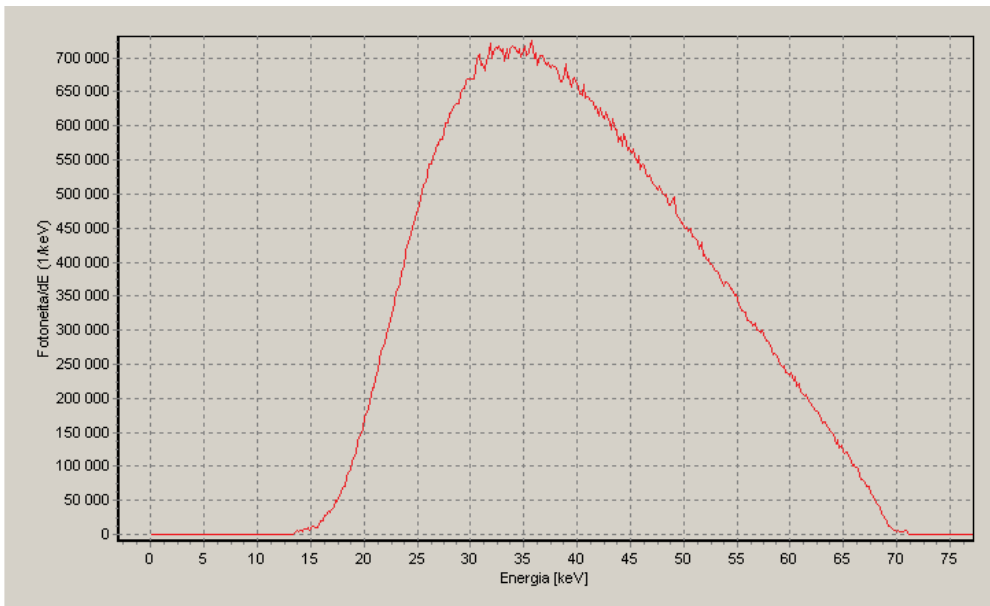
Spektristä arvioitu jännite: 49,5 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 48,8 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 50,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 1,52 mm Al HVL_2 (3 m): 2,09 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 1,45 mm Al HVL_2 (1 m): 2,02 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 1,49 mm Al

**RQR 4 (1994)**

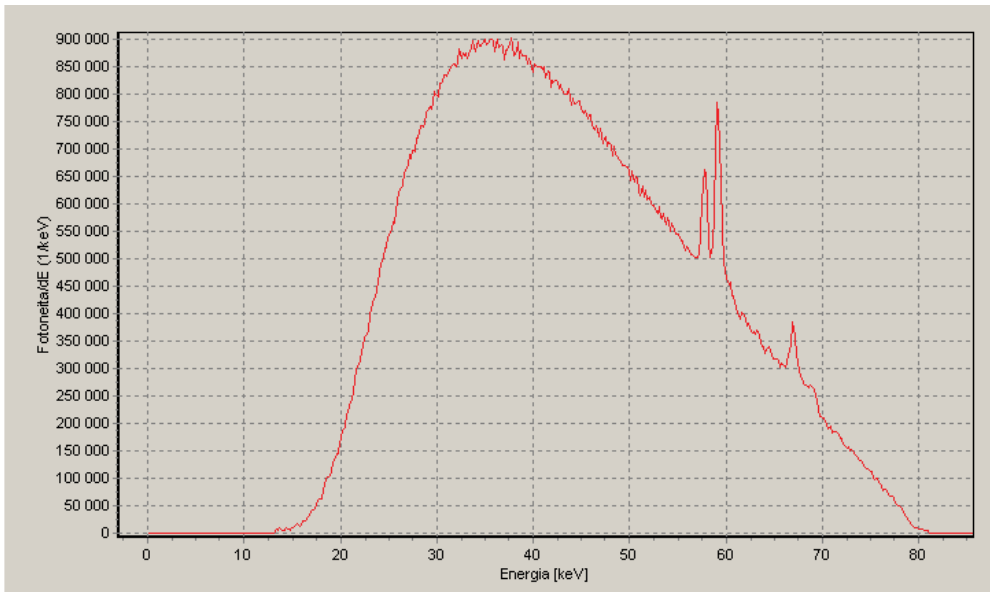
Spektristä arvioitu jännite: 59,7 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 58,9 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 60,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 2,01 mm Al HVL_2 (3 m): 2,85 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 1,93 mm Al HVL_2 (1 m): 2,76 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 2,02 mm Al

**RQR 5 (1994)**

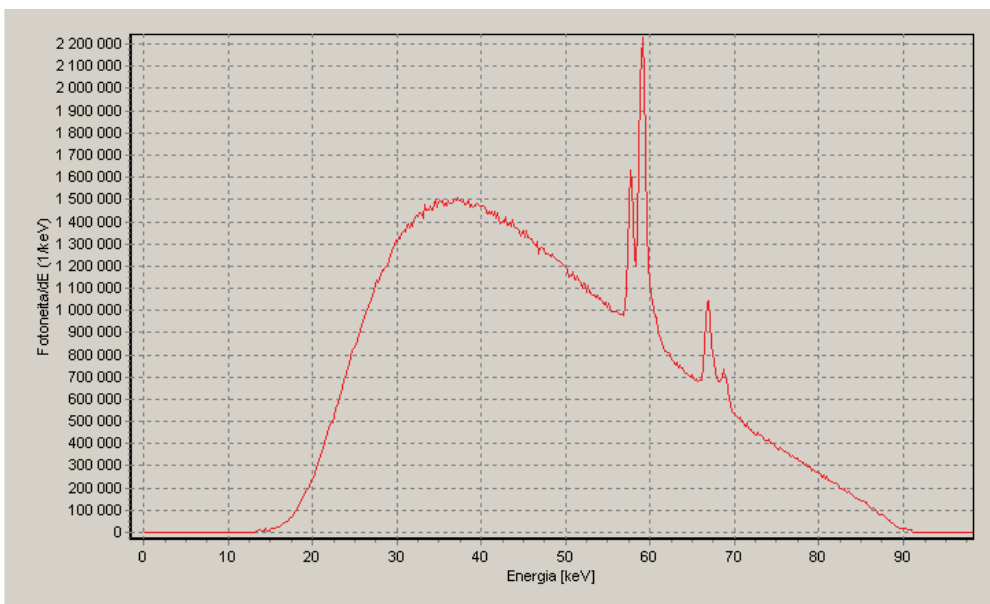
Spektristä arvioitu jännite: 70,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 68,9 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 70,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 2,52 mm Al HVL_2 (3 m): 3,62 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 2,43 mm Al HVL_2 (1 m): 3,53 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 2,47 mm Al

**RQR 6 (1994)**

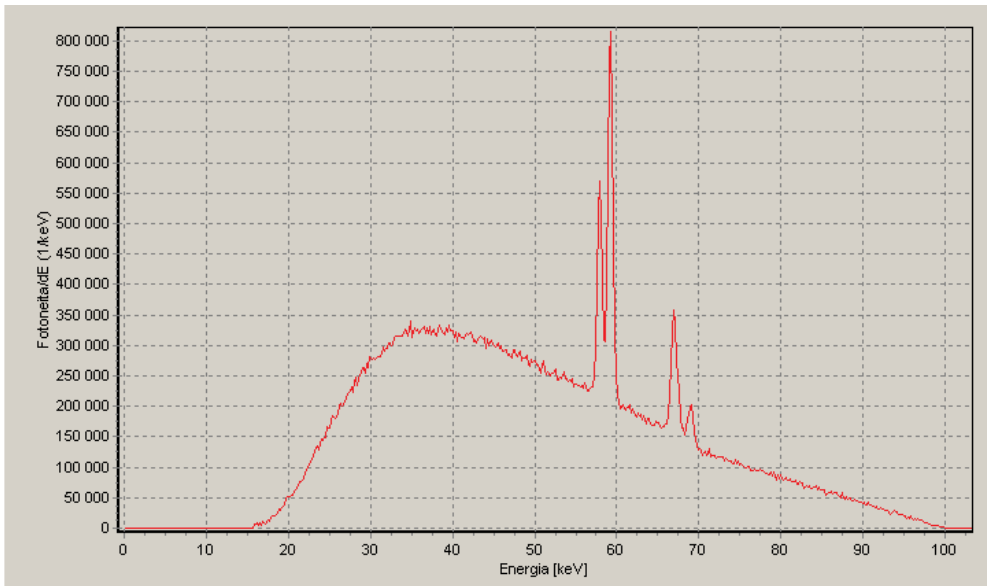
Spektristä arvioitu jännite: 80,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 78,9 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 80,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 2,93 mm Al HVL_2 (3 m): 4,34 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 2,83 mm Al HVL_2 (1 m): 4,23 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 2,90 mm Al

**RQR 7 (1994)**

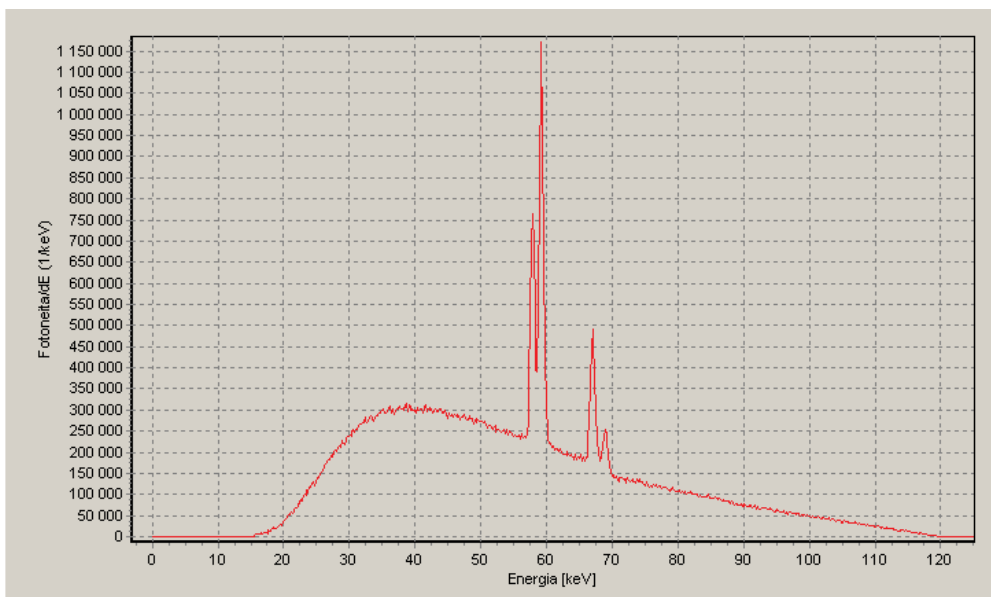
Spektristä arvioitu jännite: 90,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 89,0 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 90,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 3,36 mm Al HVL_2 (3 m): 5,07 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 3,25 mm Al HVL_2 (1 m): 4,96 mm Al
 Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 3,29 mm Al

**RQR 8 (1994)**

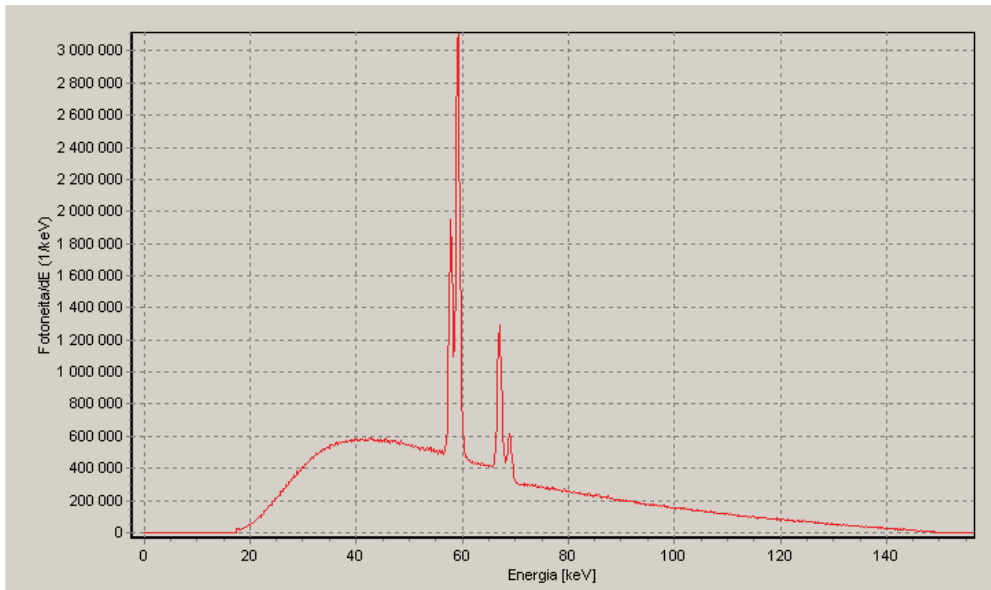
Spektristä arvioitu jännite: 100,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 99,0 kV
 Laatuksikirjan mukainen jännite: 100,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 3,76 mm Al HVL_2 (3 m): 5,71 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 3,64 mm Al HVL_2 (1 m): 5,60 mm Al
 Laatuksikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 3,73 mm Al

**RQR 9 (1994)**

Spektristä arvioitu jännite: 120,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 119,1 kV
 Laatuksikirjan mukainen jännite: 120,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m): 4,52 mm Al HVL_2 (3 m): 6,93 mm Al
 Spektristä laskettu HVL_1 (1 m): 4,38 mm Al HVL_2 (1 m): 6,81 mm Al
 Laatuksikirjan mukainen HVL_1 (1 m): 4,49 mm Al

**RQR 10 (1994)**

Spektristä arvioitu jännite: 150,0 kV
 Generaattorille asetettu jännite: 149,4 kV
 Laatukäsikirjan mukainen jännite: 150,0 kV

Spektristä laskettu HVL_1 (3 m):	5,75 mm Al	HVL_2 (3 m):	8,58 mm Al
Spektristä laskettu HVL_1 (1 m):	5,61 mm Al	HVL_2 (1 m):	8,48 mm Al
Laatukäsikirjan mukainen HVL_1 (1 m):	5,77 mm Al		