

SÄDEHOIDON ANNOSMITTAUKSET

Ulkoisen sädehoidon suurenergisten foton- ja elektronisäteilykeilojen kalibrointi

Antti Kosunen, Petri Sipilä, Ritva Parkkinen, Ilkka Jokelainen,
Hannu Järvinen

ISBN 951-712-927-0 (nid.) Dark Oy, Vantaa 2005
ISBN 951-712-928-9 (pdf)
ISSN 1795-5025

KOSUNEN Antti, SIPILÄ Petri, PARKKINEN Ritva, JOKELAINEN Ilkka, JÄRVINEN Hannu.
Sädehoidon annosmittaukset. Ulkoisen sädehoidon suurenergisten foton- ja elektronisäteilykeilojen kalibrointi. STUK-STO-TR 1. Helsinki 2005. 28 s. + liitteet 29 s.

Avainsanat: sädehoito, annosmittaukset, dosimetria, kalibrointi

Tiivistelmä

Ohjeessa kuvataan ulkoisen sädehoidon suurenergisten foton- ja elektronisäteilykeilojen mittausten menetelmät, joiden mukaan määritetään veteen absorboitunut annos ns. vertailuolosuhteissa ja joita käytetään kiihdyttimen annosmonitorin kalibrointiin. Ohje kattaa Suomessa käytössä olevat foton- ja elektronisäteilykeilojen energia-alueet ja tiedot on koottu Suomessa käytössä oleville annosmittareille (ionisaatiokammioille ja elektrometreille). Menetelmät perustuvat veteen absorboituneen annoksen käyttöön kalibrointi- ja mittaussuurena ja noudattavat Kansainvälisen Atomienergiajärjestön (International Atomic Energy Agency, IAEA) Technical Report Series (TRS) 398 -raportissa kuvattuja menetelmiä. Myös mittauksissa käytettävä fysikaalinen ja tekninen data on IAEA:n raportin mukainen. Menetelmäkuvausten lisäksi annetaan käytännön ohjeita säteilykeilojen kalibrointia varten.

KOSUNEN Antti, SIPILÄ Petri, PARKKINEN Ritva, JOKELAINEN Ilkka, JÄRVINEN Hannu. Determination of Absorbed Dose to Water in Radiotherapy. Calibration of High Energy Photon and Electron Radiation Beams in External Radiotherapy. STUK-STO-TR 1. Helsinki 2005. 28 pp. + apps. 29 pp.

Key words: radiation therapy, dose measurements, dosimetry, calibration

Abstract

For external beam radiation therapy of photon and electron radiation beams the methods of absorbed dose measurements at the reference conditions are described. Absorbed dose determined at the reference conditions is used for calibration of the dose monitoring system of the linear accelerators for radiotherapy. The methods and data for photon and electron radiation beams cover the energy ranges used in Finland. The technical data for dosimeters is presented for dosimeters used in Finland. Described methods are based on use of absorbed dose to water as a measurement quantity and the methods are consistent with the methods recommended in the joint publication by IAEA, WHO, PAHO and ESTRO (Absorbed dose determination in external beam radiotherapy, an international Code of Practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water, IAEA TRS 398, 2000). Practical guidance to perform the dose measurements for beam calibration is given.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	7
2 LAITTEET	9
2.1 Ionisaatiokammiot	9
2.2 Elektrometrit	14
2.3 Tarkistuslähde	14
2.4 Fantomit	15
2.5 Lämpö- ja ilmanpainemittarit	15
3 ANNOSMITTAUKSEN TEORIAA	16
3.1 Ionisaatiokammion kalibrointikerroin	16
3.2 Elektrometrin herkkyyden korjauskerroin	17
4 SÄTEILYKEILAN SÄTEILYLAATUPARAMETRIT	19
4.1 Suurenerginen fotonisäteilykeila	19
4.2 Suurenerginen elektronisäteilykeila	19
5 LINEAARIKIIHDYTTIMEN FOTONISÄTEILYKEILAN KALIBROINTI	21
5.1 Säteilylaatuparametrin määrittäminen	21
5.2 Annosmittaus ja kiihdyttimen monitorikammion kalibrointi	22
5.3 Tulosten tarkastelu	22
6 LINEAARIKIIHDYTTIMEN ELEKTRONISÄTEILYKEILAN KALIBROINTI	24
6.1 Säteilylaatuparametrin määrittäminen	24
6.2 Elektronisäteilykeilan annosmittaus	24
6.3 Tulosten tarkastelu	25
KIRJALLISUUSVIITTEET	27
LIITE 1 ANNOSMITTARIN TOIMINTAKUNNON TARKASTUS	29
LIITE 2 KIIHDYTTIMEN SÄTEILYKEILAN TOIMINTAKUNNON TARKASTUS	30
LIITE 3 ANNOSMITTARILLA MITATTUUN VARAUKSEEN TEHTÄVÄT KORJAUKSET	31
LIITE 4 EPÄVARMUUSARVIOT	33
LIITE 5 VETEEN ABSORBOITUNEEN ANNOKSEN KÄYTTÖ MITTAUSSUUREENA	36
LIITE 6 KALIBROINTITODISTUSTEN MALLIT	39

1 Johdanto

Vuonna 2002 Kansainvälinen Atomienenergiajärjestö (IAEA), Maailman terveysjärjestö (WHO), Pan American Health Organization (PAHO) ja Euroopan sädehoitojärjestön (ESTRO) julkaisivat suosituksen ulkoisen sädehoidon annosmittauksia varten: *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy, An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water*, IAEA Technical Report Series 398 (TRS 398) [1]. TRS 398 kattaa kaikkien ulkoisten sädehoitomuotojen perusdosimetrian so. säteilykeilan annosmittaukset vertailuoloiissa. TRS 398:n ohjeistus ja formalismi perustuvat *veteen absorboituneen annoksen* käyttöön kalibrointisuurena aiemmin käytetyn *ilmakermasuureen* sijaan.

Tässä raportissa on koottu yhteen ne menetelmät, jotka koskevat Suomessa käytössä olevia ulkoisen sädehoidon muotoja. Raportissa noudatetaan TRS 398 -ohjeeseen perustuvaa veteen absorboituneen annoksen mittausten menetelyä. Tarkemmin kuvataan ne menetelmät ja menetelytavat, jotka ovat käytössä Suomessa. Tavoitteena on ollut helppolukuinen käsikirja annosmittauksia tekevien henkilöiden käyttöön. Suurenergiselle fotonin ja elektronisäteilykeiloille ei suomenkielistä mittaushjettä ole aikaisemmin julkaistu.

Keväällä 2004 Suomessa on yhdeksän sädehoitoklinikkaa, joilla on käytössään 28 lineaarikiihdytintä. Näistä valtaosa on monienergiisiä fotonin ja elektronisäteilykeiloja tuottavia lineaarikiihdyttimiä. Lisäksi on yksienergiisiä fotonisäteilyä tuottavia lineaarikiihdyttimiä. Kiihdytinten fotonisäteilykeilojen nimelliset energiat ovat tyypillisesti välillä 4–18 MV ja elektronisäteilykeilojen energiat välillä 4–20 MeV. Tämä raportti kattaa näiden sädehoitolaitteiden ja säteilylaatuojen perusdosimet-

rian ts. absorboituneen annoksen määrittämisen vertailuoloiissa.

TRS 398:ssa kuvattuihin ensisijaisiin menetelmiin verrattuna tässä raportissa on tehty joitakin vaihtoehtoisia valintoja, jotka koskevat lähinnä suurenergisen fotonin ja elektrosäteilykeilojen säteilylaatuojen parametreja. Fotonisäteilyllä ionisaatioon perustuva parametri, ionisaatioosuus ($J_{10,20}$), esitetään TRS 398:n käyttämän kudoksenfantomisuhteen ($TPR_{20,10}$) rinnalla. Elektronisäteilyllä ionisaatioon perustuva parametri, $R_{50,ion}$, esitetään ensisijaisena vaihtoehtona annokseen perustuvan parametrin, R_{50} sijaan. Molempiin valintoihin ovat lähinnä käytännön syyt. Säteilykeilan säteilylaatuojen mittauksiin käytetään ionisaatiokammioita ja automaattisia säteilykeilan kartoittimia, joissa ionisaatioannoskonversion hallinta yhdenmukaisella tavalla on hankalaa. On kuitenkin huomattava, että ionisaatioon perustuvat säteilykeilan säteilylaatuojen parametrit voidaan määrittää luotettavasti ainoastaan tässä ohjeessa suositelluilla ionisaatiokammioilla.

Fotonisäteilyn annosmittauksissa käytäviksi ionisaatiokammioiksi on ensisijaisesti suositeltu ns. Farmer-tyypin sylinteri-ionisaatiokammioita, joista Suomessa ovat käytössä perinteiset NE 2571 grafiittikammioita sekä uudemmat, muoviset PTW:n ja Scanditronix-Wellhöfer'in kammioita. Elektronisäteilyn mittauksiin käytössä on NACP- ja Roos-tyypin tasolevyionisaatiokammioita [1,9]. Yhdenmukaisten kammioojen käytöllä on tavoitteena säilyttää annosmittausten vertailukelpoisuus hyvällä tasolla. On myös mahdollista käyttää muita TRS 398:ssa kuvattuja ionisaatiokammioita, jolloin tarvittavat parametrit on haettava suoraan TRS 398 -ohjeesta.

Säteilyturvakeskuksen (STUK) mittanormaalilaboratorion kalibrointimenetelmät vastaavat tässä raportissa kuvattuja mittausmenetelmiä ja -laitteita. STUKin mittanormaalilaboratorio siirtyi veteen absorboituneen annoksen käyttöön sädehoidon annosmittareiden kalibroinneissa vuoden 2002 alusta. Kalibrointimenettelyn muutos ja samanaikainen sädehoitoannosten mittausmenetelmän muutos on ajoitettu siten, että kaikkien

sädehoitoklinikoiden on ollut mahdollista saada uuden käytännön mukaiset kalibroinnit annosmittareilleen vuoden 2003 alusta. Lokakuussa 2003 kaikilla sädehoitoklinikoilla oli käytössään uuden menettelyn mukaiset kalibroinnit suurenergisen fotoni- ja elektronisäteilyn annosmittareille.

Tässä ohjeessa käytetyt termit ja määritelmät ovat sädehoitofysiikan sanaston mukaiset [4].

2 Laitteet

Ulkoisessa sädehoidossa käytettävien sädehoitokeilojen vertailupisteen annosmittauksissa ja säteilykeilan kalibroinnissa käytetään annosmittarina ionisaatiokammioita ja siihen liitettyä elektrometriä. Tässä ohjeessa, kuten myös TRS 398 -ohjeessa, mittausten menetelmät perustuvat kalibroidun ionisaatiokammion käyttöön. Ionisaatiokammioilla teoriaan perustuva kalibroitikertoimen konversio kalibroitisedeilylaadun ja mittauksissa käytettävän säteilylaadun välillä voidaan tehdä luotettavasti. Muun tyyppisillä annosmittareilla ei säteilykeilan kalibrointia tule tehdä eikä niille voida käyttää tässä ohjeessa esitettyjä menetelmiä tai dataa. Sädehoidon ionisaatiokammioiden ja elektrometrien yleiset tekniset vaatimukset on annettu IEC:n standardissa [7].

2.1 Ionisaatiokammiot

Sädehoidon suurenergisten fotonikeilojen annosmittauksiin käytetään sylinteri-ionisaatiokam-

mioita. Kammion tilavuuden tulee olla 0,1–1 cm³, joka on kompromissi kammion paikkaerotuskyvyn ja tarvittavan herkkyyden välillä. Em. kokovaatimukset täyttyvät kammioilla, joiden sisähalkaisija on pienempi kuin 7 mm ja sisäpituus korkeintaan 25 mm. Kammion seinämän tulee olla mahdollisimman homogeeninen ja kammiossa tulee olla ilma-aukko. Ilma-aukon kautta kammio stabiloituu nopeasti vallitsevaan ilmanpaineeseen ja lämpötilaan.

Yleisin suurenergisen fotonisedeilyn annosmittauksiin käytetty kammio on NE 2571 -tyypin Farmer-kammio (kuvat 1 ja 2). Tämä kammio-tyyppi on osoittautunut luotettavaksi ja on vakiintunut myös Suomessa perusmittalaitteeksi. Alkuperäisen Nuclear Enterprisesin (NE) lisäksi kyseistä kammio-tyyppiä valmistavat useat valmistajat. Yleisimmin käytetyt NE 2571 -tyypin kammiot on esitetty taulukossa I. Taulukossa I mainituille Farmer-tyypin kammioille on saatavissa kalibroitikertoimet

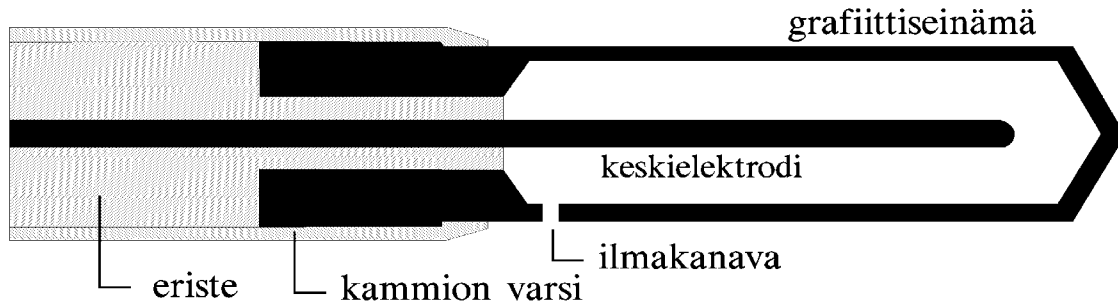
Taulukko I. Fotonikeilojen annosmittauksissa Suomessa käytössä olevia Farmer-tyypin ionisaatiokammioita ja niiden ominaisuuksia.

Kammio (Valmistaja)	Ontelon tilavuus (cm ³)	Ontelon sisäpituus (mm)	Ontelon sisäsäde (mm)	Seinä- mä- mate- riaali	Seinä- män paksuus (g/cm ²)	Kasvu- päälyys- materi- aali	Kasvupää- lyysmate- riaalin paksuus (g/cm ²)	Keski- elektrodi- mate- riaali	Vesi- tiivis
NE 2571 (NE)	0,6	24,0	3,2	Grafiitti	0,065	Delrin	0,551	Alumiini	Ei
PTW 30004/30012 (PTW)	0,6	23,0	3,1	Grafiitti	0,079	PMMA	0,541	Alumiini	Ei
PTW 30006/30013 (PTW)	0,6	23,0	3,1	PMMA	0,059	PMMA	0,541	Alumiini	Kyllä
FC65-G *) (Scdx-Wellhöfer)	0,67	23,0	3,1	Grafiitti	0,068	POM ^{***})	0,560	Alumiini	Kyllä
FC65-P **) (Scdx-Wellhöfer)	0,67	23,0	3,1	Delrin	0,056	POM ^{***})	0,560	Alumiini	Kyllä

*) Vastaa kammiota Scdx-Wellhöfer IC 70 Farmer.

**) Vastaa kammiota Scdx-Wellhöfer IC 69 Farmer.

***) Polyoksimeteeni, CH₂O.



Kuva 1. Fotonisäteilyn mittauksessa käytettävän Farmer-tyyppisen ionisaatiokammion rakenne.

käyttäjän säteilylaaduille STUKin mittanormaalilaboration antamasta kalibroitodistuksesta. Myös muun tyyppisiä, TRS 398:ssa esiteltyjä kammioita voidaan käyttää, mutta kalibroitoker-toimen määrittämisessä käytettävät parametrit on tällöin haettava suoraan TRS 398:sta.

Perinteisestä grafiittiseinämäisestä kammios-ta on saatavissa myös vesitiivis malli. Grafiittiseinämäisillä kammioilla on havaittu muovi-seinämäisiä parempi pitkäaikaisstabiilius ja tasai-sempi vaste energian funktiona [1], kun taas muo-viseinämäiset ovat käytössä kestävämpiä. Mikäli kammio ei ole vesitiivis, se on vedessä mitattaessa suojattava erillisellä vesisuojoilla. Vesisuojan tulee mieluiten olla valmistettu polymetyylimetakry-laattimuovista (PMMA) ja sen seinämän paksuuden tulee olla pienempi kuin 1 mm. Vesisuojan rakenteen tulee sallia kammion sisäisen ilmanpai-neen tasaantuminen vallitsevaan ilmanpaineeseen (vesisuojan ilmarako 0,1–0,3 mm). Kumisten vesi-suojien käyttö ei ole suositeltavaa, sillä ne saatta-vat estää kammion sisäisen ilmanpaineen tasaan-tumisen, joko tiiviytensä vuoksi tai sen vuoksi, että kammion ilma-aukko saattaa tukkiintua kumisuo-jan sisäpinnalla käytettävästä talkista. Kammion säilytystapaan on kiinnitettävä huomiota, sillä pöly ja lika (esim. kammiosalkun haurastuneet so-lumuovipehmusteet) saattavat myös tukkia kam-mion ilma-aukon. Vesitiiviiden kammioiden koh-dalla on käytettävä vesisuoja vain, jos kammio on kalibroitu vesisuojan kanssa.

Elektronikeilojen annosmittauksiin tulee käyt-tää ensisijaisesti tasolevyionisaatiokammioita. Tasolevykammion rakenteessa olevan ohuen ik-kunan, keräselektrodia kiertävän maadoitetun suojaelektrodin ja vesiekvivalentin takaseinäma-terialin avulla pyritään mitattavaan signaaliin keräämään vain ikkunan läpi kulkeneet elektronit

ja minimoimaan sironneiden elektronien osuus mittaussignaaliin [1, 2]. Kammion rakenne pyri-tään tekemään mahdollisimman vesiekvivalentti-si ja homogeeniseksi. Materiaalivaatimus korostuu kammion takaseinämän aiheuttaman takaisinsi-ronnan osalta. Kammion vasteeseen vaikuttavan sironnan minimoimiseksi tulee kammion ilmatilan korkeus olla enintään 2 mm ja suojaelektrodin leveys vähintään 3 mm. Jotta säteilykeilan profi-lin epätasaisuus ei vaikuttaisi mittaustulokseen, kammion levymäisen keräyselektrodin halkaisija ei saa ylittää 20 mm. Kammion ikkunan vaiku-tuksen minimoimiseksi, ja jotta kammiolla voi-daan mitata mahdollisimman lähellä fantomin pintaa, ei ikkunan paksuuden tulisi ylittää arvoa 0,1 g/cm² (~1 mm PMMA). Vesitiiviissä kammioissa kammion sisälle johtava ilma-aukko on yhdistetty kammion kaapelin kuorikerroksessa kulkevaan il-makanavaan. Mikäli kammio ei ole vesitiivis, on se vedessä mitattaessa suojattava erillisellä PMMA:sta valmistetulla vesisuojoilla, johon on liitetty ve-sitiivis kaapelin suojana ja ontelon ilmakekanavana toimiva suojaletku.

NACP-tyypin ionisaatiokammioista luotettavia mittalaitteita on tehnyt erityisesti se, että kam-mion aiheuttama häiriö elektronisäteilykeilassa on hyvin pieni [1]. Suomessa perinteisten NACP-E- ja NACP-02-tasolevykammioiden rinnalle on tullut käyttöön myös Roos-tyypin ionisaatiokam-miot PTW 34001 ja Scanditronix-Wellhöfer PPC 40 (taulukko II ja kuvat 2 ja 3). Kaikille näille kam-miotyypeille häiriötekijän voidaan olettaa olevan merkityksetön. Kammioiden valmistajat ovat pys-tyneet myös tekemään kammioista entistä tasa-laatusempia, jolloin myös tyyppikohtaiset ominai-suudet voidaan olettaa olevan kammioyksilöistä riippumattomia. Edellä mainituista kammioista NACP-E ei ole vesitiivis.

Tässä ohjeessa elektronisäteilykeilojen annosmittauksiin suositellaan käytettävän ensisijaisesti em. tasolevyionisaatiokammioita lineaarikiihdyttimien koko energia-alueella. Koska sekä NACP-että Roos-tyypin kammioille häiriökorjaustekijä voidaan olettaa merkityksettömäksi, on mahdollista käyttää tämän ohjeen mukaista ionisaation perustuvaa säteilylaatuparametria $R_{50,ion}$ elektronisäteilykeilan energian määrittämiseen (kohta 6.1). Tällöin, kuten fotonisäteilyn mittauksissakin, kalibrointikertoimet käyttäjän säteilylaaduille ovat saatavissa suoraan STUKin mittanormaali-

laboratorion kalibrointitodistuksesta. Myös muun tyyppisiä TRS 398:ssa esiteltyjä kammioita voidaan käyttää, mutta tällöin kalibrointikertoimen määrittämisessä käytettävät parametrit on haettava suoraan TRS 398:sta.

Suhteellisten annosjakaumien mittauksiin (säteilykeilan profilit ja syväionisaatio/-annoskäyrät) soveltuvia ionisaatiokammioita on esitelty taulukossa III. Annosjakaumien mittauksissa ionisaatiokammio liitetään tavallisesti automaattiseen annoskartoittimeen. Annoskartoittimien toimintaa ei tässä käsitellä tarkemmin.

Taulukko II. Elektronisäteilykeilojen annosmittauksiin yleisimmin käytettäviä tasolevyionisaatiokammioita ja niiden ominaisuuksia.

Kammio (Valmistaja)	Ontelon keräys-tilavuus (cm ³)	Ikkuna materiaali	Ikkunan paksuus	Elektrodien etäisyys (mm)	Keräys-elektrodi	Keräys-elektrodin halkaisija (mm)	Suoja-elektrodin leveys (mm)	Takaseinä-materiaali
NACP02 (Scanditronix-Wellhöfer)	0,16	Mylar+ grafiitti	104 mg/cm ² 0,6 mm	2,0	grafitoitu rexoliitti	10,0	3,0	grafiitti
NACP-E (Dosetek)	0,16 ^{*)}	Vesis.+ grafiitti	0,8 mm ^{**)}	2,0 ^{*)}	grafiitti ^{*)}	10,0 ^{*)}	3,2 ^{*)}	grafiitti ^{*)}
PTW 34001 (PTW), Roos	0,35	PMMA	118 mg/cm ² 1,0 mm	2,0	grafiitti	15,6	4,0	-
PPC 40 (Scanditronix-Wellhöfer), Roos	0,40	PMMA	118 mg/cm ² 1,0 mm	2,0	grafiitti	16,0	4,0	-

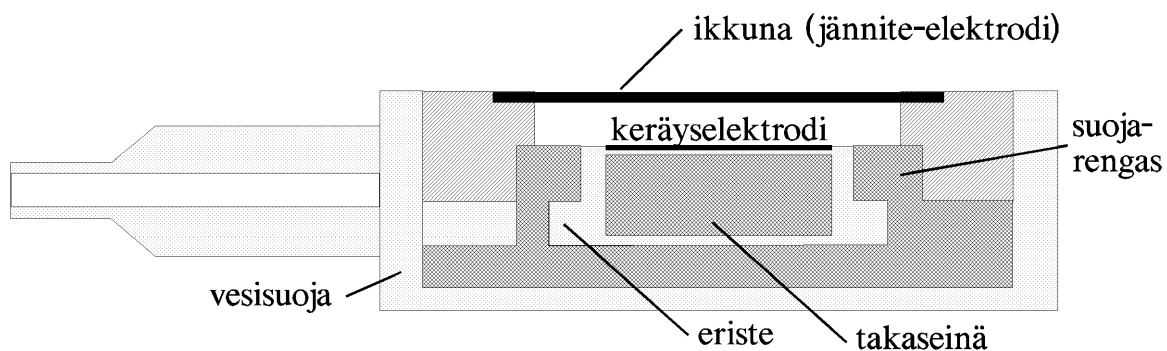
^{*)} NACP (1980) Acta Radiol. Oncol. 20 (1981), 385–399.
^{**)} Dosetek

Taulukko III. Fotonisäteilykeilojen suhteellisten annosjakaumien mittauksissa Suomessa käytössä olevia ionisaatiokammioita ja niiden ominaisuuksia.

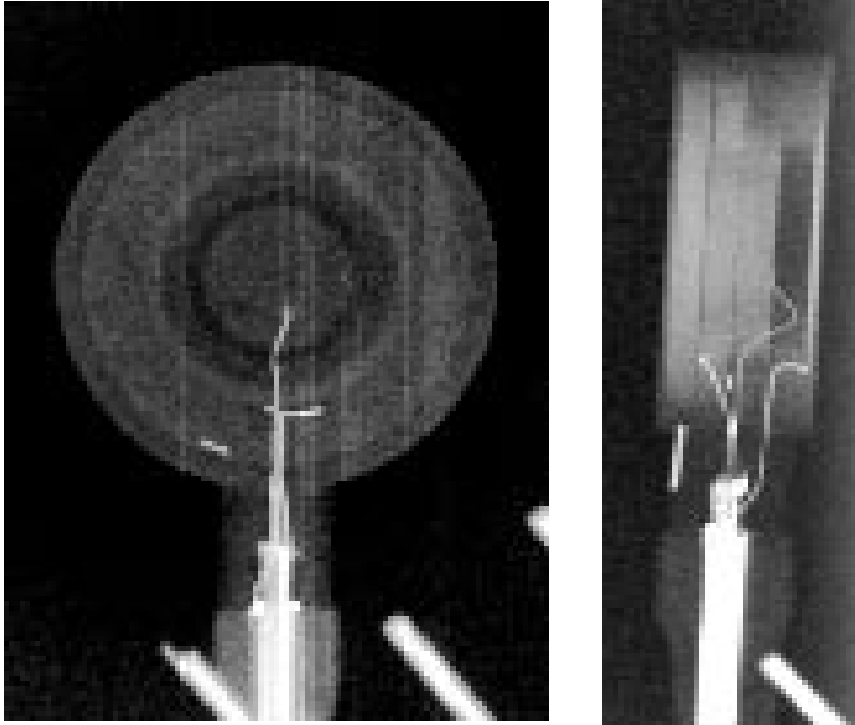
Kammio (valmistaja)	Ontelon tilavuus (cm ³)	Ontelon muoto	Ontelon sisäpituus (mm)	Ontelon sisäsäde (mm)	Seinä-materiaali	Seinämän paksuus (g/cm ²)	Keski-elektrodi materiaali	Vesitiivis
CC08/IC05/ IC06 (Scanditronix-Wellhöfer)	0,08	Puolipallo	4,0	3,0	C-552	0,068	C-552	Kyllä
CC13/IC10/ IC15 (Scanditronix-Wellhöfer)	0,13	Sormustin	5,8	3,0	C-552	0,068	C-552	Kyllä
RK (Scanditronix-Wellhöfer)	0,12	Sylinteri	10,0	2,0	Epoksoitu grafiitti	0,07	Epoksoitu grafiitti	Kyllä
PTW 31002 (PTW)	0,13	Sormustin	6,5	2,8	PMMA	0,078	Alumiini	Kyllä



Kuva 2. Erilaisia ionisaatiokammioita. Ylhäällä kaksi Farmer-tyyppistä sylinterikammioita, alhaalla elektronisäteilyn mittauksissa käytettävät NACP-02- ja Roos-tyyppin tasolevykammiot. Sylinterikammioiden vieressä näkyvät kasvupäällykset ovat ilmassa tehtäviä mittauksia varten ja toimivat myös grafiittisen kammion mekaanisena suojana.



Kuva 3. NACP-tyyppisen tasolevykammion rakenne. Suojarengas (suojaelektrodi) kiertää keräyselektrodin ja sen avulla minimoidaan muualta kuin kammion ikkunan kautta tulevien varausten aiheuttama signaali.



Kuva 4. Röntgenkuvia eräästä NACP-tyyppin tasolevykammioista. Kuvasta erottuu johdinten kytkentä elektrodeille sekä ylimääräinen johdinlangan pätkä alhaalla vasemmalla.

2.2 Elektrometrit

Ionisaatiokammion tuottamien pienten virtojen (pikoampeereita) mittaus voidaan tehdä luotettavimmin suuri-impedanssisen operaatiovahvistimen yli kytketyn kondensaattorin jännitemittauksen avulla. Jännitemittauksen tulos esitetään elektrometrin näytöllä varauksena tai muunnettuna annosyksiköiksi. Käytettävän kondensaattorin kapasitanssi määrää ylärajan mitattavalle varaukselle. Useilla elektrometreillä ja annosmittareilla on sisäänrakennettuna joukko kapasitanssiltaan eriarvoisia kondensaattoreita, jotka jakavat elektrometrin toiminta-alueen erilaajuisiksi mittausalueiksi. Mittausalueen valinnalla määrätään mittauksessa käytettävä kondensaattori.

Elektrometrin eri mittausalueilla käytettävien kondensaattoreiden kapasitanssien lineaarisuudessa mitattavan virran suhteen sekä kapasitanssien välillä on havaittu merkittäviä eroja. Tästä syystä elektrometrin mittausalueiden lineaarisuus ja vaste on mittauksin selvitettävä ennen elektrometrin käyttöönottoa. STUKin mittanormaalilaboratoriossa mittausalueiden välisiä kapasitanssieroja tarkastellaan määrittämällä sylinterikammioiden kalibroinnin yhteydessä elektrometrin herkkyyserroin (k_{elec} , kohta 3.2).

Ionisaatiokammion keräysjännitettä varten elektrometrissä on yleensä säädettävä jännitelähde ± 500 V. Rekombinaatiokorjauskertoimen mittausta (liite 3) varten jännitteen tulee olla säädettävissä portaattomasti tai asteittain siten, että voidaan valita 1/3 tai pienempi jännite kammion valmistajan suosittelemasta keräysjännitteestä. Jännitteen polariteetin tulee olla vaihdettavissa, mikäli elektrometrin kanssa käytetään eri polariteetin vaativia kammioita.

Elektrometrissä tulee olla vähintään neljän numeron näyttö. Elektrometrin pitkäaikaisstabilisuus (vasteen vaihtelu vuoden aikajaksolla), toistettavuus, epälineaarisuus ja vaste-ero eri mittausalueiden välillä eivät saa ylittää $\pm 0,5$ %. [7].

Markkinoilla olevissa sädehoidon mittalaitteiksi tarkoitetuissa elektrometreissä, annosmittareissa (Dosemeter), on elektrometritoiminnon (Charge mode) lisäksi myös annosmittaustoiminto (Dose mode), jossa elektrometrin ionisaatiokammion mittaama varaus on kertoimella muunnettu mittarin näyttöön annossuureeksi. Annosmittarin annosmittaustoimintoon liittyy yleensä myös mahdol-

lisuus syöttää mittariin vallitsevan lämpötilan ja ilmanpaineen arvot, jolloin mittarin näyttämä on korjattu referenssilämpötilaan ja ilmanpaineeseen (vertailuolot, liite 3; k_{Tp} korjauserroin). Suomessa käytössä olevista sädehoidon annosmittareista ainostaan malleissa NE Farmer Dosemeter 2570 ja 2571 paineen- ja lämpötilan korjaus (Tp -korjaus) on mahdollista tehdä myös mittarin elektrometritoiminnon (Charge mode) puolella. Käytettäessä Scanditronix-Wellhöferin annosmittaria DOSE 1 tulee erityistä huomiota kiinnittää Tp -korjauksen käyttöön mittarin Expan-moodissa, jossa varaus- ja annossuureet näkyvät yhtä aikaa näytöllä. Vaikka Tp -korjauksen käytöstä ilmoittava merkivalo tässä tapauksessa palaa mittarin näytössä oikeassa yläkulmassa, kohdistuu Tp -korjaus vain näytön annossuureisiin.

2.3 Tarkistuslähde

Mittalaitteiston herkkyyden muuttumattomuus voidaan varmentaa tarkistuslähdemittauksin, joissa ionisaatiokammioita säteilytetään puoliintumisajaltaan tunnetulla radioaktiivisella tarkistuslähteellä tarkasti toistettavassa säteilytysgeometriassa. Farmer-kammioille käytettävissä tarkistuslähteissä ^{90}Sr -lähde on sijoitettu teräksisen suojalieriön sisälle onteloon, jonne kammion asettelu suojalieriössä olevan reiän kautta on tarkasti toistettavissa. Lähde on rengasmaisen, joka mahdollistaa kammion keräystilavuuden säteilytyksen joka suunnalta. Suomessa on Farmer-kammioille käytössä NE 2503 tarkistuslähteitä, mutta markkinoilla on myös esim. PTW:n ja Scanditronix-Wellhöferin valmistamia tarkistuslähteitä.

Tasolevykammioille tarkoitetuissa tarkistuslähteissä teräksisen suojalieriön kannen sisäpintaan kiinnitetty pistemäinen ^{90}Sr -lähde asetellaan vakioetäisyydelle lähelle kammion ikkunaa. Asettelyn toistettavuus vakioetäisyydelle saavutetaan kullekin kammioityypille soveltuvan lähteen pidikkeen avulla. Suomessa tasolevykammioille on käytössä PTW 8921 tarkistuslähteitä, joita käytetään kammion päälle asetettavan rengasmaisen muovisen tarkistuslähdepidikkeen kanssa. Markkinoilla on myös esim. PTW:n ja Scanditronix-Wellhöferin valmistamia tarkistuslähteitä ja valmistajan kammiolle soveltuvia pidikkeitä. Kammioiden asettelu tarkistuslähteeseen on esitetty kuvassa 5.

2.4 Fantomit

Fotoni- ja elektronekilojen annosmittauksissa tulee käyttää vedellä täytettyä muoviseinäistä (yleensä PMMA-muovia) fantomia ja säteilykeilan tulee kohdistua veteen pystysuoraan ylhäältä. Vesifantomien avulla vältetään annosmäärityksessä epävarmuustekijästä, joka aiheutuu muovifantomissa käytettävien eri muovilaatujen ja veden välisten ekvivalenttipaksuuksien laskennasta. Jotta fantomisironna mittauspisteessä olisi annosmittaukselle riittävä, on fantomin oltava kooltaan sellainen, että valitulla mittaussyvyydellä suurimmalla käytettävällä kenttäkoolla säteilykeilan ja fantomin reunan väliin jää vähintään 5 cm vettä kentän jokaisella neljällä sivulla. Lisäksi fanto-

min syvyys on mitoitettava siten, että mitattaessa suurimmassa mittaussyvydessä kammion takana on vähintään 10 cm vettä. Käytännössä soveltuva fantomin koko on esim. 30 cm · 30 cm · 30 cm. Pystysuoran säteilykeilan suuntauksen ansiosta fantomin muovi-ikkunan vaikutusta mittauksiin ei tarvitse arvioida.

2.5 Lämpö- ja ilmanpainemittarit

Mittauksissa tulee käyttää hyvälaatuisia, kalibroituja lämpö- ja ilmanpainemittareita. Lämpömittareiden näytön tarkkuus tulisi olla vähintään 0,2 °C ja ilman painemittareiden näytön tarkkuus 0,1 kPa.



Kuva 5. Kammiot tarkistuslähteissä. Vasemmalla tasovevykammio, jonka päällä on tarkistuslähte pidikkeessään. Kammion alla tulee käyttää esim. pleksilevyä (PMMA) tasaisen takaisinsironnan aikaansaamiseksi. Oikealla on sylinterikammio tarkistuslähteessä, jossa kammion viivamerkki tulee asettaa lähteen viivamerkin suuntaiseksi.

3 Annosmittauksen teoriaa

3.1 Ionisaatiokammion kalibrointikerroin

Veteen absorboitunut annos vertailuoloissa voidaan määrittää ionisaatiokammion seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$D_{w,Q} = M k_{Tp} k_s k_{pol} k_{elec} N_{D,w,Q} \quad (1)$$

missä

$D_{w,Q}$ on veteen absorboitunut annos säteilylaadulla Q .

M on ionisaatiokammion tuottama, annosmittarilla tai elektrometrillä mitattu lukema tai varaus.

k_{Tp} on paine- ja lämpötilakorjauskerroin.

k_s on ionisaatiokammion epätäydellisestä keräys-
tehokkuudesta johtuva rekombinaatiokorjauskerroin.

k_{pol} on ionisaatiokammion keräysjännitteen polariteetista johtuva korjauskerroin.

k_{elec} on elektrometrin herkkyyden korjauskerroin.

$N_{D,w,Q}$ on ionisaatiokammion kalibrointikerroin veteen absorboituneelle annokselle mittauksessa käytettävälle säteilylaadulle Q .

k_{Tp} , k_s ja k_{pol} ovat kammion tuottamaan varaukseen tehtäviä korjauksia, jotka on kuvattu tarkemmin liitteessä 3.

Kalibrointilaboratorion säteilylaitteista ja mitta-
normaaleista riippuen voidaan kalibrointikerroin
ionisaatiokammion määrittää laboratoriossa joko
käyttäen samaa säteilylaatua kuin mittauksessa
tai käyttäen vertailusäteilylaatua (tyypillisesti
 ^{60}Co -gammäsäteilykeila) ja ionisaatiokammion sä-
teilynlaatukorjauskerrointa. Ionisaatiokammion
kalibrointi laboratoriossa säteilyn käyttäjän mit-
tauksia vastaavalle säteilylaadulle on ensisijaises-
ti tavoiteltava kalibrointimenettely ja tällöin ioni-
saatiokammion vasteen yksilölliset ominaisuu-
det tulevat huomioiduksi jo kalibrointitilanteessa.
Useissa primäärlaboratorioissa on käytettävissä
kiihdyttimiä suurenergisen fotonin- ja elektronisä-

teilyn kalibrointeihin. Tyypillisesti kiihdyttimiä ei
ole pienissä, sekundaaritason kalibrointilaborato-
rioissa ja suora kalibrointi voidaan tehdä ainoas-
taan ^{60}Co -gammäsäteilyllä.

Säteilynlaatukorjauskertoimen avulla kaavan
(1) kalibrointikerroin $N_{D,w,Q}$ voidaan kirjoittaa:

$$N_{D,w,Q} = N_{D,w} k_Q \quad (2)$$

missä

$N_{D,w}$ on ionisaatiokammion kalibrointikerroin ve-
teen absorboituneelle annokselle kalibroinnissa
käytetyllä vertailusäteilylaadulla Q_0 .

k_Q on säteilynlaatukorjauskerroin eli kalibrointi-
kertoimen korjaustekijä vertailusäteilylaadun Q_0
ja mittaussäteilylaadun Q välillä.

Säteilynlaatukorjauskerroin k_Q voidaan kirjoittaa:

$$k_Q = \frac{(s_{w,air})_Q p_Q W_Q}{(s_{w,air})_{Q_0} p_{Q_0} W_{Q_0}} \quad (3)$$

missä

$(s_{w,air})$ on keskimääräinen veden ja ilman mas-
sajarrutuskykyjen suhde sekundaarielektronien
spektrille kyseisellä säteilylaadulla.

p_Q on häiriökorjauskerroin kyseisellä säteilylaa-
dulla.

W on ioniparin muodostumiseen tarvittava energia
ilmassa kyseisellä säteilylaadulla.

Alaindeksi Q viittaa tarkasteltavaan säteilylaa-
tuun mittaustilanteessa ja alaindeksi Q_0 viittaa
vertailusäteilylaatuun. Häiriökorjauskerroin p_Q
huomioi kammion ilmaontelon, seinämän, vesisuo-
jan ja kammion keskielektrodin sironta- ja absorp-
tio-ominaisuuksien vaikutuksen kammion vas-
teeseen. Lisäksi korjauskerroin p_Q sisältää kam-
mion efektiivisen mittauspisteen siirtymän vaiku-
tuksen siten, että mittaustulos saadaan kammion
keskipistettä vastaavalla mittaussyvytydellä.

Megavolttilueen fotonin- ja elektronienergioil-

la ioniparin muodostumiseen tarvittava energia voidaan olettaa vakioksi, jolloin kaava (3) voidaan kirjoittaa:

$$k_Q = \frac{(s_{w,air})_Q}{(s_{w,air})_{Q_0}} \frac{p_Q}{p_{Q_0}} \quad (4)$$

Säteilynlaatukorjauskertoimen k_Q käyttö edellyttää, että kammioiden yksilölliset vaihtelut häiriötekijän p_Q suhteen ovat pieniä kyseiselle kammio-tyypille, jolloin k_Q -tekijä voidaan esittää kammio-tyyppikohtaisesti. Fotonisäteilyllä vertailusäteilylaatu on ^{60}Co gammasäteily.

Elektronisäteilyn mittauksissa käytettävien tasolevykammioiden yksilöllisten ominaisuuksien vuoksi suosittelee TRS 398 -ohjeisto käytettäväksi *ns. cross-calibration* menettelyä (tässä myöhemmin käytetään nimitystä ”kenttäkalibrointi”). Kenttäkalibroinnissa kalibroinnin siirros laboratorion ^{60}Co -gammasäteilynkeilasta kiihdyttimen elektronikeylaan tehdään hyvälaatuisen sylinterikammion avulla ja tasolevyionisaatiokammio kalibroidaan elektronikeylassa ko. sylinterikammion avulla. Vertailusäteilykeilana on tyyppillisesti sädehoitoklinikan elektronisäteilykeila, jonka keskimääräinen energia on yli 16 MeV. Elektronisäteilyn kenttäkalibroinneissa kiihdyttimen säteilykeilan tuottoa ja tasaisuutta tulee monitoroida kalibroinnin yhteydessä. TRS 398 mukaisesti, parasta tarkkuutta tavoiteltaessa on elektronisäteilyn tasolevyionisaatiokammioiden ensisijainen kalibrointi menettely kuitenkin kammioiden suora kalibrointi primaarilaboratorion elektronisäteilykeilassa.

Elektronisäteilykeilojen kenttäkalibrointeihin liittyen, TRS 398 -ohjeessa käytetään k_Q -tekijästä merkintää k_{Q,Q_0} osoittamaan, että kysymyksessä on jokin muu kuin ^{60}Co -vertailusäteilylaatu. Taulukoiden käyttöön liittyvistä teknisistä syistä on TRS 398 -ohjeessa korjauskerroin k_{Q,Q_0} esitetty kahden säteilynlaatukorjauskertoimen osamääränä seuraavasti:

$$k_{Q,Q_0} = \frac{k_{Q,Q_{int}}}{k_{Q_0,Q_{int}}} \quad (5)$$

missä $k_{Q,Q_{int}}$ on säteilynlaatukorjauskerroin siirryttäessä säteilylaadusta Q_{int} mittauksessa käytettävään säteilylaatuun Q ja $k_{Q_0,Q_{int}}$ on vastaava kerroin siirryttäessä säteilylaadusta Q_{int} kalibroinnissa käytettyyn vertailusäteilylaatuun Q_0 .

Säteilylaaduksi Q_{int} , on valittu säteilylaatu, jonka säteilylaatuparametri R_{50} on 7,43 cm ja tällöin säteilynlaatukorjauskerroin $k_{Q_0,Q_{int}}$ saa arvon yksi. Säteilylaadulla Q_{int} ei ole kalibrointiin ja mittauksiin liittyvää merkitystä, vaan se on ainoastaan taulukoitujen arvojen esitystapaan liittyvä tekijä.

Fotonisäteilyn mittauksissa käytettäville sylinteri-ionisaatiokammioille on k_Q -tekijät annettu säteilylaatuparametrien funktiona taulukossa IV ja elektronisäteilyn tasolevyionisaatiokammioille taulukossa V. TRS 398 -ohjeessa on vastaavat kertoimet annettu useille kammio-tyypeille.

3.2 Elektrometrin herkkyuden korjauskerroin

Annosmittaukseen käytettävän mittauslaitteiston ionisaatiokammio ja elektrometri voidaan kalibroida joko erillisinä tai yhdessä. Jos kammio ja elektrometri ovat kalibroidut erillisinä, on elektrometrin tarkkuus huomioitava erillisellä herkkyuden korjauskertoimella:

$$k_{elec} = \frac{Q_{MN}}{Q_{user}} \quad (6)$$

missä

Q_{MN} on mittanormaallaboratorion elektrometrillä mitattu varaus.

Q_{user} on käyttäjän elektrometrillä tai annosmittarilla mitattu varaus.

Tässä tekijästä k_{elec} käytetään nimitystä elektrometrin herkkyuden korjauskerroin (ei kalibrointi-kerroin), koska k_{elec} oletetaan määritetyksi samalla mittanormaallaboratorion varauksen mittauslaitteistolla jota on käytetty myös ko. ionisaatiokammion kalibroinneissa. Absoluuttista varauksen mittauksen tarkkuutta ei tässä tarkastella.

Säteilyturvakeskuksen antamissa kalibroinneissa k_{elec} määritetään käyttäjän elektrometrille fotonisäteilyn sylinterikammioiden kalibrointi-yhteydessä ja ilmoitetaan ko. kalibroinnin todistuksessa. Korjauskerrointa tarvitaan ensisijaisesti elektronisäteilyn mittauksissa tasolevyionisaatiokammiota käytettäessä. Käytännön syistä tasolevykammioiden kenttäkalibroinnit kiihdyttimen elektronikeylassa tehdään ainoastaan ionisaatiokammioille eikä koko annosmittarille.

Taulukko IV. Sylinteri-ionisaatiokammioiden kalibrintikertoimen säteilynlaatukorjauskerroin k_Q fotonisäteilykeilan säteilylaatuparametrien $TPR_{20,10}$ ja $J_{10,20}$ funktiona. Säteilynlaatukorjauskerroin k_Q on voimassa vertailuoloissa (taulukko VII), kun säteilylaatuparametrit on määritetty taulukon VI mukaisissa oloissa.

Säteilylaatu			Säteilynlaatukorjauskerroin, k_Q		
Nimellinen energia [MV] ^{*)}	$TPR_{20,10}$	$J_{10,20}$	NE 2571 kammio	PTW 30006 kammio	WH FC65-G kammio
3	0,583	1,971	1,001	0,999	1,000
4	0,628	1,842	0,997	0,996	0,997
5	0,659	1,762	0,995	0,993	0,995
6	0,683	1,705	0,993	0,990	0,992
7	0,702	1,663	0,991	0,987	0,990
8	0,716	1,633	0,989	0,985	0,988
9	0,728	1,608	0,988	0,982	0,986
10	0,737	1,590	0,986	0,980	0,985
12	0,754	1,556	0,983	0,976	0,981
14	0,768	1,530	0,980	0,972	0,978
16	0,778	1,512	0,977	0,969	0,975
18	0,787	1,496	0,974	0,966	0,972
20	0,793	1,485	0,972	0,963	0,970

^{*)} NACP [9,10]

Taulukko V. Tasolevyionisaatiokammioiden säteilynlaatukorjauskerroin $k_{Q,Q_{int}}$ (kohta 3.1) elektronisäteilyn säteilylaatuparametrien R_{50} ja $R_{50,ion}$ funktiona. Lisäksi taulukossa on annettu säteilylaatuparametria vastaava annosmittauksen mittaussyvyys (kohta 6.2). TRS 398:n mukaisesti vertailusäteilylaadun, Q_{int} , säteilylaatuparametrille on oletettu $R_{50} = 7,43$ cm, jolla arvolla $k_{Q_{int}}$ saa arvon 1,00. Lisätietona on myös säteilylaatuparametria vastaava säteilyn keskimääräinen energia fantomin pinnalla. Säteilynlaatukorjauskerroin $k_{Q,Q_{int}}$ on voimassa vertailuoloissa (taulukko VIII), kun säteilylaatuparametrit on määritetty kohdassa 6.1 kuvatuissa oloissa.

Elektronisäteilyn keskimääräinen energia fantomin pinnalla ^{*)} [MeV]	Elektronisäteilyn säteilylaatu-parametri		Mittaussyvyys Z_{ref} [cm]	Säteilynlaatu-korjauskerroin säteilylaadulle Q_{int} $k_{Q,Q_{int}}$
	R_{50} [cm]	$R_{50,ion}$ [cm]		
2,7	0,97	1,00	0,48	1,077
3,8	1,48	1,50	0,79	1,066
4,9	2,00	2,00	1,10	1,057
6,0	2,51	2,50	1,41	1,048
7,1	3,03	3,00	1,72	1,040
8,2	3,54	3,50	2,02	1,034
9,4	4,06	4,00	2,33	1,027
10,5	4,57	4,50	2,64	1,022
11,7	5,09	5,00	2,95	1,017
12,9	5,60	5,50	3,26	1,013
14,1	6,11	6,00	3,57	1,009
16,5	7,14	7,00	4,19	1,002
18,9	8,17	8,00	4,80	0,996
24,0	10,23	10,00	6,04	0,986
32,0	13,32	13,00	7,94	0,971
40,3	16,40	16,00	9,84	0,957
52,2	20,52	20,00	12,39	0,948

^{*)} TRS 381:n mukaisesti. $\bar{E}_0 = 0,656 + 2,059R_{50} + 0,022(R_{50})^2$

4 Säteilykeilan säteilylaatuparametrit

Kalibroitikertoimen käyttö edellyttää, että ionisaatiokammion kalibroitikertoimen säteilylaatukorjauskerroin k_Q voidaan kuvata yksinkertaisesti mitattavan säteilykeilan säteilylaatua eli säteilykeilan energijakaumaa kuvaavan parametrin avulla.

4.1 Suurenerginen fotonisäteilykeila

IAEA TRS 398:n mukaisesti suurenergisen fotonisäteilyn säteilylaatuparametrina tulisi käyttää ensisijaisesti 20 cm:n ja 10 cm:n syvyyksillä mitattua kudos-fantomisuhdetta (*tissue-phantom ratio*, $TPR_{20,10}$, ks. kuva 6b). $TPR_{20,10}$ -mittauksessa säteilylähteen etäisyys kammioista on 100 cm ja säteilykentän koko mittakammion kohdalla on 10 cm · 10 cm. $TPR_{20,10}$ -parametrille vaihtoehtoinen säteilylaatuparametri on 10 cm:n ja 20 cm:n syvyyksillä mitattu syväionisaatiosuhde ($J_{10,20}$), jolloin mittauksissa fantomin pinta on 100 cm:n etäisyydellä säteilylähteestä (kuva 6a) ja säteilykentän koko fantomin pinnalla on 10 cm · 10 cm. Sädehoidon sanastosta poiketen syväionisaatiosuhdetta ei esitetä 20 cm ja 10 cm syvyyksien ionisaatiosuhteena, vaan NACP:n käytännön mukaisesti mukaisesti 10 cm ja 20 cm syvyyksien ionisaatiosuhteena [10]. Tällä pyritään varmistamaan, etteivät $TPR_{20,10}$ -parametrin ja $J_{10,20}$ -parametrien numeeriset arvot sekoitu.

TRS 398:n mukaisesti parametrien $TPR_{20,10}$ ja vastaavan kiinteän 100 cm:n lähde-pinta-etäisyydellä mitatun annossuhteen ($PDD_{20,10}$) välillä on yhteys:

$$TPR_{20,10} = 1,2661PDD_{20,10} - 0,0595 \quad (7)$$

Kun säteilylaatuparametrin mittauksessa käytetään ionisaatiokammioita, jonka häiriökorjauskerroin (vrt. kaava 3) ei riipu merkittävästi mitta-

syvyydestä 10 cm tai 20 cm, voidaan annossuhde $PDD_{20,10}$ ilmoittaa myös ionisaatiosuhteena suoraan ionisaatiokammioilla mitatuille varauksille. Kaavaa (7) vastaavasti voidaan tällöin kirjoittaa:

$$TPR_{20,10} = \frac{1,2661}{J_{10,20}} - 0,0595 \quad (8)$$

Kaavan (8) mukainen yhteys on voimassa käytettäessä pientä, ohutseinämäistä ionisaatiokammioita, jonka häiriötekijän muutos 10 cm:n ja 20 cm:n syvyyksillä on merkityksettömän pieni.

$J_{10,20}$ - ja $TPR_{20,10}$ -parametrien väliseen riippuvuuteen vaikuttavat säteilyfokuksen koko ja sen todelliset etäisyydet fantomin pinnasta. Tästä syystä $J_{10,20}$ -parametria käytettäessä on $J_{10,20}$ - ja $TPR_{20,10}$ -parametrien välinen yhteys varmistettava vähintään kerran kullekin fotonikeilalle.

Taulukossa IV on esitetty parametrien $TPR_{20,10}$ ja $J_{10,20}$ sekä säteilylaatukorjauskertoimen k_Q väliset yhteydet NE 2571 -tyypin sylinteri-ionisaatiokammioille. Taulukossa parametrien $TPR_{20,10}$ ja $J_{10,20}$ välinen yhteys on kaavan (8) mukainen. Parametrin $TPR_{20,10}$ ja kertoimen k_Q välinen yhteys on TRS 398:n mukainen.

4.2 Suurenerginen elektronisäteilykeila

TRS 398:n mukaan elektronisäteilykeilan säteilylaatuparametriksi suositellaan suhteellisesta syväannosjakaumasta määritettyä 50 %:n annoksen syvyyttä R_{50} . TRS 398 antaa myös ionisaation ja annoksen välisen yhteyden, jolloin säteilylaatuparametrina voidaan käyttää suoraan suhteelliselta ionisaatiokäyrältä mitattua 50 %:n ionisaation syvyyttä $R_{50,ion}$ (kuva 7, taulukko V). On kuitenkin huomattava, että ionisaatioon perustuvaa parametria voidaan käyttää ainoastaan, jos mittauksissa käytettävä tasolevyionisaatiokammio ei aiheuta merkittävää häiriötä elektronivuohon. Tämä

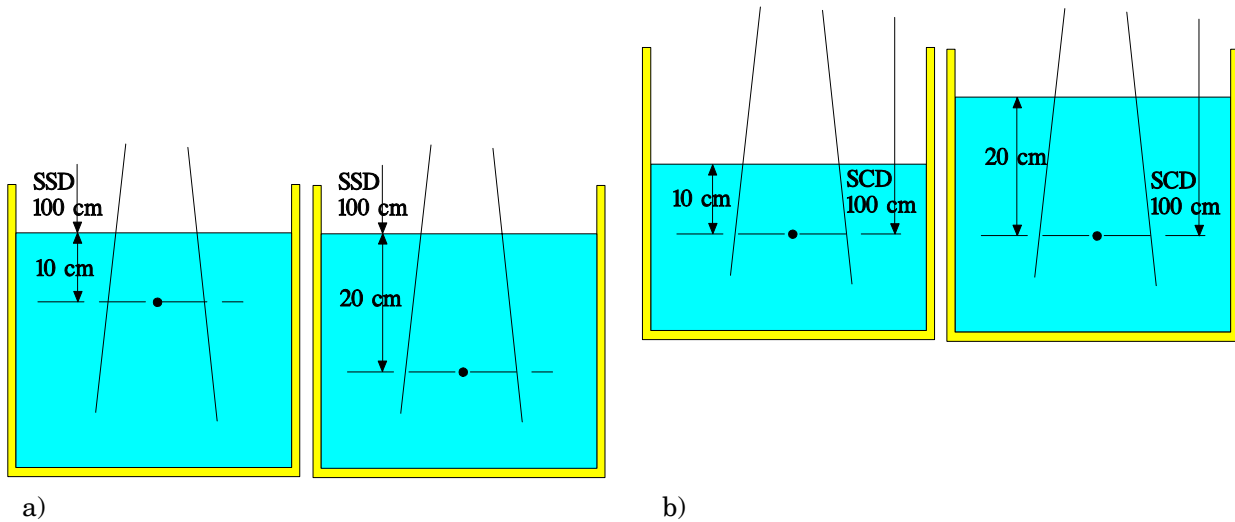
oletus voidaan tehdä ainoastaan hyvälaatuisilla tasolevykammioilla, kuten NACP- ja Roos-tyypin ionisaatiokammioilla.

TRS 398:n mukaisesti syväannos- ja syväionisaatiojakaumista määritettyjen 50 %:n syvyyksien

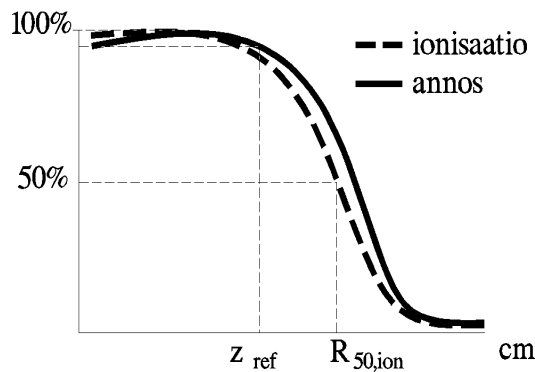
välillä on yhteys:

$$R_{50} = 1,029R_{50,ion} - 0,06 \quad (9)$$

kun $R_{50,ion} \leq 10 \text{ g/cm}^2$.



Kuva 6. Asettelut ja mittausetäisyydet fotonisäteilyn säteilylaatuparametrin mittauksessa. (a) Syväionisaatio-suhteen $J_{10,20}$ mittaus, jossa lähteen (säteilyfokuksen) ja fantomin pinnan välinen etäisyys on vakio=100 cm ja kenttäkoko fantomin pinnalla 10 cm · 10 cm. (b) Kudos-fantomisuhteen $TPR_{20,10}$ mittaus, jossa lähteen ja ionisaatiokammion välinen etäisyys on vakio=100 cm ja kenttäkoko kammion kohdalla on 10 cm · 10 cm.



Kuva 7. 20 MeV:n elektronisäteilykeilan suhteelliset syväannos- ja syväionisaatiokäyrät. $R_{50,ion}$ määritetään syväionisaatiokäyrältä. (Havainnollisuuden vuoksi käyrien ero kuvassa on piirretty todellista suuremmaksi).

5 Lineaarikiihdyttimen fotonisäteilykeilan kalibrointi

Säteilykeilan kalibrointi jaetaan seuraaviin vaiheisiin:

- annosmittarin toimintakunnan tarkistus (liite 1)
- kiihdyttimen ja säteilykeilan toimintakunnan tarkistus (liite 2)
- säteilykeilan säteilylaatuparametrin määrittäminen (kohta 5.1)
- annosmittaus vertailuolosuhteissa ja kiihdyttimen monitorikammion kalibrointi (kohta 5.2).

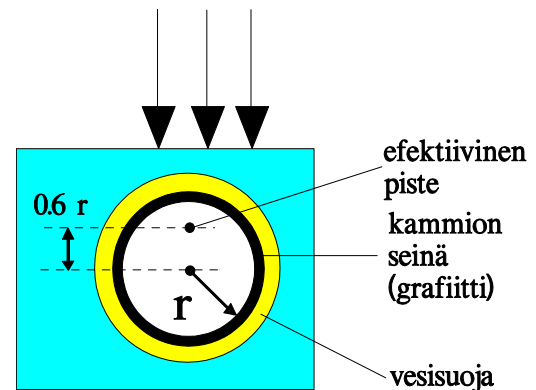
Edellä kuvatut vaiheet ovat myös toimenpiteiden suoritusjärjestys.

5.1 Säteilylaatuparametrin määrittäminen

Ennen kuin säteilykeilan annosmittaus ja kiihdyttimen monitori-ionisaatiokammion kalibrointi voidaan suorittaa luotettavasti, on annosmittarin ja kiihdyttimen toimintakunnosta varmistettava. Kiihdyttimellä oleellimmat tekijät ovat kiihdyttimen annoksen ja monitorointijärjestelmän toistettavuus ja lineaarisuus sekä säteilykeilan annos(ionisaatio-)jakaumien tasaisuus ja symmetria. Monitorointijärjestelmän toistettavuudesta tulee varmistua annosmittausten yhteydessä tekemällä riittävästi toistomittauksia. Tarkemmat ohjeet annosmittarin ja kiihdyttimen toimintakunnan varmistuksesta on annettu liitteissä 1 ja 2.

Säteilylaatu parametri ($TPR_{20,10}$ tai $J_{10,20}$, kohta 4.1) määritetään pienikokoisella ionisaatiokammion (taulukko III) vesifantomissa tehdyistä mittauksista (muuta ilmaisimia, esim. diodia tai timanttia ei tule käyttää). Mittausgeometria on esitetty kuvassa 6. Ionisaatiosuhteen $J_{10,20}$ mittaustuloksessa ionisaatiokammion efektiivinen piste (kuva 8) asetetaan mittaussyvyydelle, kun taas kudoksen fantomisuhteen $TPR_{20,10}$ mittaustuloksessa kammion keskipiste asetetaan mittaussyvyydelle. On

siis huomioitava, että efektiivisistä mittauspisteistä käytetään vain syväannoskäyrän ja siitä saatavan säteilylaatuparametrin $J_{10,20}$ määrittämisessä. Itse annosmittauksessa (kohta 5.2) kammion asettelu tehdään kammion keskipisteen avulla. Ionisaatiokammion ja fantomin asettelu säteilylaatuparametrin määrittämisessä on esitetty taulukossa VI.



Kuva 8. Sylinterikammion efektiivinen piste fotonisäteilyn säteilylaatuparametrin $J_{10,20}$ määrittämisessä. Efektiivinen piste on etäisyydellä $0,6 \cdot r$ kammion keskipisteestä säteilykeilan fokuksen suuntaan, missä r on kammion säde.

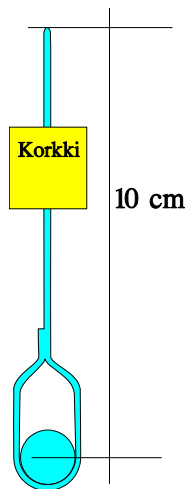
Mittauksissa käytettävän sylinteri-ionisaatiokammion tulisi olla rakenteeltaan, kooltaan ja asettelusuunnaltaan sellainen, että saavutetaan mahdollisimman hyvä paikkaerotuskyky syväannosjakauman suunnassa. Lisäksi on huomioitava, että kammion häiriökorjaustekijän tulisi olla mahdollisimman riippumaton mittaussyvyydestä (10 m ja 20 cm).

Säteilylaatuparametrin mittaustulosta tulee verrata ko. säteilykeilalle aikaisemmin saatuihin vastaaviin tuloksiin, mikäli mahdollista. Hyvälaatuista mittaustulosta käytettäessä säteilylaatuparametrin vaihteluväli stabiilille kiihdyttimelle on tyypillisesti alle 0,5 %.

5.2 Annosmittaus ja kiihdyttimen monitorikammion kalibrointi

Fotonisäteilyn annosmittaus tehdään vesifantomissa (kohta 2.4), taulukossa VII esitetyissä vertailuolosuhteissa.

Annosmittauksessa käytetään taulukossa I esitettyä, kalibrointia kammiota. Kammio asetetaan vesisuojaan ja kammion keskipiste asetetaan vertailusyvyydelle eli 10 cm syvyydelle. Kammiossa käytetään samaa vesisuojaa kuin kammion kalibroinnissa ^{60}Co -gammäsäteilykeilassa. Kammion syvyysasettelua voidaan helpottaa mittatulkin avulla (kuva 9).



Kuva 9. Sylinterikammion syvyysasettelu vesifantomissa mittatulkin avulla.

Mittaus tehdään niin suurella annoksella, että elektrometrin lukemataarkkuus on parempi kuin 0,1 %. Tyypillisesti kiihdyttimen annosmonitorin lukemaa 300 MU vastaava annos on riittävä. Peräkkäisten mittauslukemien muutosta tulee seurata ja varmistua, että kammion toiminta on stabiili. Mittaussarjaan valitaan vähintään kolme peräkkäistä lukemaa, joista suurimman ja pienimmän lukeman ero ei saisi olla suurempi kuin 0,5 %.

Veteen absorboitunut annos sataa kiihdyttimen monitoriyksikköä kohti vertailusyvyydellä saadaan seuraavasti:

$$D_{w,Q}(z_{ref}) = M(z_{ref}) k_{Tp} k_s N_{D,w,Q} \frac{100}{MU_{annettu}} \quad (10)$$

missä

$D_{w,Q}(z_{ref})$ on veteen absorboitunut annos sataa kiih-

dyttimen monitoriyksikköä kohti vertailusyvyydellä [Gy/100 MU].

$M(z_{ref})$ on kiihdyttimeltä annettua monitoriyksikkömäärää ($MU_{annettu}$) vastaava elektrometrin lukema. Elektrometrissä on ionisaatiokammion kalibrointikerrointa $N_{D,w,Q}$ vastaavat asetukset.

$MU_{annettu}$ on kiihdyttimeltä annettu monitoriyksiköiden määrä.

k_{Tp} on paine- ja lämpötilakorjauskerroin (liite 3). Paine- ja lämpötilakorjaus tehdään vain, mikäli kiihdyttimessä on suljettu tai toiminnaltaan kompensoitu monitorikammio. Korjaus voidaan useissa elektrometreissä tehdä automaattisesti myös asettamalla paine ja lämpötila elektrometriin.

k_s on kammion rekombinaatiokorjauskerroin (liite 3).

$N_{D,w,Q}$ on annosmittarin (kammion ja elektrometrin yhteinen) kalibrointikerroin mitattavalle säteilylaadulle [Gy/mittarin näyttämä yksikkö] (ks. luku 3). Kalibrointikerroin on esitetty fotonisäteilyn säteilylaatuparametrin funktiona STUKin antaman kalibrointitodistuksen liitteessä.

Veteen absorboitunut annos kiihdyttimen sataa monitoriyksikköä kohti säteilykeilan keskiakselin syväannoskäyrän maksimissa saadaan seuraavasti:

$$D_{w,Q}(z_{max}) = \frac{D_{w,Q}(z_{ref})}{DD(z_{ref})} \quad (11)$$

missä

$D_{w,Q}(z_{ref})$ on kaavassa (10) esitetty veteen absorboitunut annos sataa kiihdyttimen monitoriyksikköä (100 MU) kohti vertailusyvyydellä.

$DD(z_{ref})$ on suhteellinen annos vertailusyvyydellä, kun annosmaksimissa on suhteellinen annos 1,00. $DD(z_{ref})$ kannattaa määrittää useamman mittauksen keskiarvona, mikäli säteilylaatuparametri on pysynyt näissä mittauksissa vakiona 0,5 %:n tarkkuudella.

5.3 Tulosten tarkastelu

Kaikkia mittauksia tulee verrata ko. säteilykeilan aiemmin määritettyihin vastaaviin parametreihin ja ominaisuuksiin, mikäli mahdollista. Mikäli hoitolaite on uusi tai sitä on korjattu tavalla, joka voi muuttaa sen ominaisuuksia, on syytä suorittaa riippumattomia vertailumittauksia.

Säteilylaatuparametrin vaihteluväli on tyypilli-

sesti alle 0,5 %, kun kiihdytin on stabiili ja käytetään hyvälaatuista mittauslaitteistoa. Suhteellisen annoksen vaihteluväli vertailusyvyydellä voi olla jopa yli 1 %. Yleensä suurin epätarkkuus syntyy annosmaksimin kohdalla ja mittaukset, joissa arvoa verrataan maksimiannokseen, tulisi määrittää useamman mittauksen keskiarvona.

Hoitolaitteen normaalin laadunvalvonnan seuranta-mittauksessa havaittu annosmuutos kannat-

taa varmentaa useammalla mittauksella ennen korjaustoimenpiteitä. Yli 2 %:n annosmuutoksissa on harkittava potilashoittojen keskeyttämistä ennen korjaavia toimenpiteitä. Mikäli muutos on yli 5 %, ei potilaita ole syytä hoitaa ennen korjauksia ja asiasta on ilmoitettava STUKille.

Tyypillisen mittauksen epävarmuusarvio on esitetty liitteessä 4.

Taulukko VI. Ionisaatiokammion ja fantomin asettelu säteilylaatuparametrin määrittämisessä.

Parametri	$J_{10,20}$ määrittäminen	TPR _{20,10} määrittäminen
Kenttäkoko	10 cm · 10 cm	10 cm · 10 cm
Mittaussyvyys fantomissa	10 cm ja 20 cm	10 cm ja 20 cm
Fokus-fantomien pinta etäisyys	100 cm	90 cm ja 80 cm
Fokus-detektorin etäisyys	110 cm ja 120 cm	100 cm
Kammion asettelu	Kammion efektiivinen piste *) mittaussyvyydelle	Kammion keskipiste mittaussyvyydelle
*) Kammion efektiivisen pisteen paikka on esitetty kuvassa 8.		

Taulukko VII. Vertailuolosuhteet suurenergisen fotonisäteilykeilan annosmittauksissa.

Parametri	Asetusarvo
Kenttäkoko	10 cm · 10 cm
Mittaussyvyys (vertailusyvyyden) fantomissa	10 cm
Fantomien asettelu	Lähteen etäisyys fantomien pinnasta 100 cm tai Lähteen etäisyys ionisaatiokammion pinnasta 100 cm
Fantomien koko	Tyypillisesti 30 cm · 30 cm · 30 cm *)
Kammion asettelu	Kammion keskipiste mittaussyvyydelle
*) Fantomien minimikoon vaatimukset on esitetty tarkemmin kohdassa 2.4.	

6 Lineaarikiihdyttimen elektronisäteilykeilan kalibrointi

Säteilykeilan kalibrointi jaetaan seuraaviin vaiheisiin:

- ionisaatiokammion ja annosmittarin toimintakunnan tarkistus (liite 1)
- kiihdyttimen ja säteilykeilan toimintakunnan tarkistus (liite 2)
- säteilykeilan säteilylaatuparametrin määrittäminen (kohta 6.1)
- annosmittaus vertailuolosuhteissa ja kiihdyttimen monitorikammion kalibrointi (kohta 6.2).

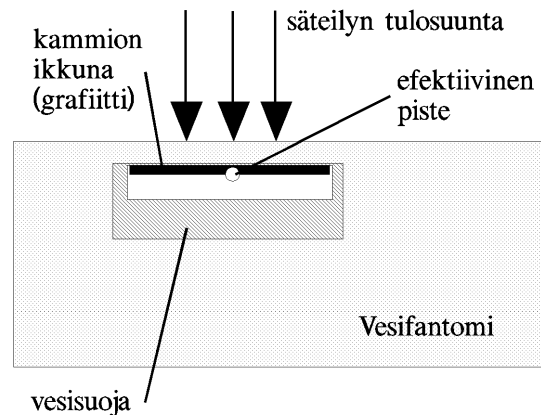
Edellä kuvatut vaiheet ovat myös toimenpiteiden suoritusjärjestys.

6.1 Säteilylaatuparametrin määrittäminen

Elektronisäteilykeilan säteilylaatuparametrin mittaamiseen käytetään tasolevyionisaatiokammiota (taulukko II). Käytettävä kenttäkoko on

- vähintään 15 cm · 15 cm säteilylaaduille, joilla vedessä mitattu kantama $R_{50} \leq 7$ cm (käytännössä elektronisäteilylaadut, joilla elektronien keskimääräinen energia fantomin pinnalla $E_0 \leq 16$ MeV) ja
- vähintään 20 cm · 20 cm säteilylaaduille, joilla $R_{50} > 7$ cm (käytännössä elektronisäteilylaadut, joilla $E_0 > 16$ MeV)

Mittauksissa käytetään vesifantomia ja lähteen ja fantomin pinnan välinen etäisyys on 100 cm. Mittauksessa tasolevykammion efektiivinen piste (kuva 10) asetetaan mittaussyvyydelle.



Kuva 10. Tasolevykammion efektiivinen piste. Efektiivinen piste on kammion ikkunan sisäpinnalla. Ikkunan paksuudet eri tyyppisille tasolevykammiolle on annettu taulukossa II.

6.2 Elektronisäteilykeilan annosmittaus

Elektronisäteilyn annosmittaus tehdään vesifantomissa (kohta 2.4) taulukossa VIII esitetyissä vertailuolosuhteissa. Mittauksessa käytetään taulukossa II esitettyä tasolevyionisaatiokammiota. Kammion efektiivinen piste asetetaan taulukossa VIII annetulle mittaussyvyydelle.

Mittaussyvyys (vertailussyvyys) z_{ref} [cm] määritetään seuraavasti:

$$z_{ref} = 0,6(1,029 R_{50,ion} - 0,06) - 0,1 \quad (12)$$

Mittaussyvyys z_{ref} on ilmoitettu parametrin $R_{50,ion}$ [cm] funktiona taulukossa V ja myös STUKin antamassa tasolevyionisaatiokammion kalibrointitodistuksessa.

Taulukko VIII. Vertailuolosuhteet suurenergisen elektronisäteilykeilan annosmittauksissa (tasolevykammio).

Parametri	Asetusarvot
Kenttäkoko	Vertailukenttäkoko 15 cm · 15 cm tai 20 cm · 20 cm
Mittaussyvyys (vertailussyvyys) fantomissa	Ks. kaava (12) tai STUKin antama tasolevykammion kalibrointitodistus
Fantomin asettelu	Lähteen etäisyys fantomin pinnasta 100 cm
Fantomin koko	Tyypillisesti 30 cm · 30 cm · 30 cm *)
Kammion asettelu	Kammion etuikkunan sisäpinta mittaussyvyydelle
*) Fantomin minimikoon vaatimukset on esitetty tarkemmin kohdassa 2.3.	

Mittaus tehdään niin suurella annoksella, että elektrometrin lukemataarkkuus on parempi kuin 0,1 %. Tyypillisesti kiihdyttimen annosmonitorin lukemaa 300 MU vastaava annos on riittävä. Peräkkäisten mittaoslukemien muutosta tulee seurata ja varmistua, että kammion toiminta on stabiili. Mittaussarjaan valitaan vähintään kolme peräkkäistä lukemaa, joista suurimman ja pienimmän lukeman ero ei saa olla suurempi kuin 0,5 %.

Veteen absorboitunut annos sataa kiihdyttimen monitoriyksikköä kohti vertailussyvyydellä saadaan seuraavasti:

$$D_{w,Q}(z_{ref}) = M(z_{ref})k_{Tp}k_s k_{elec} N_{D,w,Q} \frac{100}{MU_{annettu}} \quad (13)$$

missä

$D_{w,Q}(z_{ref})$ on veteen absorboitunut annos sataa kiihdyttimen monitoriyksikköä kohti vertailussyvyydellä [Gy/100 MU].

$M(z_{ref})$ on kiihdyttimeltä annettua monitoriyksikkömäärää ($MU_{annettu}$) vastaava kammion tuottama ja elektrometrilla mitattu varaus [C]. Elektrometrissä on ionisaatiokammion kalibrointikerrointa $N_{D,w,Q}$ vastaavat asetukset.

$MU_{annettu}$ on kiihdyttimeltä annettu monitoriyksikköiden määrä.

k_{Tp} on paine- ja lämpötilakorjauskerroin (liite 3). Paine- ja lämpötilakorjaus tehdään vain, mikäli kiihdyttimessä on suljettu tai toiminnaltaan kompensoitu monitorikammio. Korjaus voidaan useissa elektrometreissa tehdä automaattisesti myös asettamalla paine ja lämpötila elektrometriin. Erityisesti tulee huomata, että joissakin elektrometreissa varausmoodia käytettäessä paine- ja lämpötilakorjausta ei tehdä automaattisesti, vaikka paine ja lämpötila syötetään elektrometriin ja ne ovat näkyvissä elektrometrin näytössä.

k_s on kammion rekombinaatiokorjauskerroin (liite 3).

k_{elec} on elektrometrin herkkyyden korjauskerroin. Korjauskerrointa käytetään, koska elektronisäteilyn mittauksissa käytettävä tasolevykammio on kalibroitu erillisenä, ilman elektrometriä. Elektrometrin herkkyyden korjauskerroin on esitetty STUKin antamassa kalibrointitodistuksessa, jossa ko. elektrometriä on käytetty yhdessä sylinterikammion kanssa.

$N_{D,w,Q}$ on tasolevykammion kalibrointikerroin mitattavalle säteilylaadulle [Gy/C]. Kalibrointikerroin on esitetty elektronisäteilyn säteilylaatuparametrin funktiona STUKin antaman kalibrointitodistuksen liitteessä.

Koska vertailussyvyys ei aina ole sama kuin annosmaksimin syvyys, tulee maksimiannoksen arvo määrittää vertailussyvyden suhteellista annosta DD (z_{ref}) käyttäen. Veteen absorboitunut annos kiihdyttimen sataa monitoriyksikköä kohti säteilykeilan keskiakselin syväannoskäyrän maksimissa saadaan kaavasta:

$$D_{w,Q}(z_{max}) = \frac{D_{w,Q}(z_{ref})}{DD(z_{ref})} \quad (14)$$

missä

$D_{w,Q}(z_{ref})$ on kaavassa (13) esitetty veteen absorboitunut annos sataa kiihdyttimen monitoriyksikköä (100 MU) kohti vertailussyvyydellä.

DD (z_{ref}) on suhteellinen annos vertailussyvyydellä, kun annosmaksimissa on suhteellinen annos 1,00.

6.3 Tulosten tarkastelu

Kaikkia mittauksia tulee verrata ko. säteilykeilan aiemmin määritettyihin vastaaviin parametreihin ja ominaisuuksiin, mikäli mahdollista. Mikäli

kiihdytin on uusi tai sitä on korjattu tavalla, joka voi muuttaa sen ominaisuuksia, on syytä suorittaa riippumattomia vertailumittauksia.

Säteilylaatuparametrin vaihteluväli on tyyppillisesti alle 0,5 %, kun kiihdytin on stabiili ja käytetään hyvälaatuista mittauslaitteistoa. Aikaisempaan mittauskäytäntöön verrattuna kammion asettelulla on suurempi merkitys, koska nyt käytettävä vertailusvyvyys on suurilla elektronienenergioilla (elektronisäteilyn nimellisenergia ≥ 16 MeV) syväannoskäyrän laskevalla osuudella eikä aikaisemman käytännön mukaisesti annos-

maksimissa eli syväannoskäyrän tasaisella osalla.

Hoitolaitteen normaaliin laadunvalvontaan kuuluvissa seurantamittauksessa havaittu annosmuutos kannattaa varmentaa usealla mittauksella ennen korjaustoimenpiteitä. Yli 3 %:n annosmuutoksissa on harkittava potilashoitajien keskeyttämistä ennen korjaavia toimenpiteitä. Mikäli muutos on yli 5 %, ei potilaita ole syytä hoitaa ennen korjauksia ja asiasta on ilmoitettava STUKille.

Tyypillisen mittauksen epävarmuusarvio on esitetty liitteessä 4.

Kirjallisuusviitteet

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water. Sponsored by the IAEA, WHO, PAHO and ESTRO. Technical Report Series 398. Vienna: IAEA; 2000.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA). The Use of Plane Parallel Ionization Chambers in High Energy Electron and Photon Beams. An International Code of Practice for Dosimetry. Technical Report Series 381. Vienna: IAEA; 1997.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA). Calibration of Dosimeters Used in Radiotherapy. Technical Report Series 374. Vienna: IAEA; 1994.
- [4] Säteilyturvakeskus. Säteilyturvakeskuksen sanasto. Säteilyturvakeskuksen sanastotyöryhmän ehdotus 1997. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 1997.
- [5] Parkkinen R, Kosunen A, Sipilä P, Järvinen H. Implementation of the IAEA TRS 381 for the electron beam calibration of plane parallel ionization chambers in Finland. In Abstract book of 19th Annual ESTRO Meeting in Istanbul, Turkey, 19–23 September, 2000. *Radiotherapy & Oncology* 2000; 56 (Supplement 1): S199.
- [6] Sipilä P, Järvinen H, Kosunen A, Parkkinen R. Stick out like a sore thumb. In Abstract Book of the Workshop on “Verification of IMRT” and of the 6th Biennial ESTRO Meeting on “Physics for Clinical Radiotherapy” and on “Radiation Technology for Clinical Radiotherapy”. *Radiotherapy & Oncology* 2001; 61 (Supplement 1): S89.
- [7] IEC Standard 60731. Medical electrical equipment-Dosimeters with ionization chambers used in radiotherapy. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC);1997.
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA). Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams. An International Code of Practice. Technical Report Series 277. Second Edition. Vienna: IAEA; 1987.
- [9] Mattson LO, Johansson KA, Svensson H. Calibration and use of plane-parallel ionization chambers for determination of absorbed dose in electron beam. *Acta Radiol. Oncol.* 1981; 20: 385–399.
- [10] Nordic Association of Clinical Physics (NACP). Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV. *Acta Radiol. Oncol.* 1980; 19.
- [11] Seuntjens JP, DuSautoy AR. Review of calorimeter based absorbed dose to water standards. In book: *Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry*. IAEA-CN-96/3. Proceedings of an International Symposium, 25–28 November 2002, Vienna. Vol 1. Vienna: IAEA; 2003. p. 37–66.
- [12] Stucki G, Muench W, Quintel H. The METAS absorbed dose to water calibration service for high energy photon and electron beam radiotherapy. In book: *Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry*. IAEA-CN-96/8. Proceedings of an International Symposium, 25–28 November 2002, Vienna. Vol 1. Vienna: IAEA; 2003. p. 103–115.

- [13] Bjerke H, Järvinen H, Grimbergen TWM, Grindborg J-E, Chauvenet B, Czap L, Ennow K, Moretti C, Rocha P. Comparison of two methods of therapy level calibrations at 60Co gamma beams. *Phys. Med.Biol.* 1998; 43: 2329–2740.
- [14] Kosunen A, Sipilä P, Järvinen H, Parkkinen R, Jokelainen I. Finnish national code of practice for the reference dosimetry of radiation therapy. In book: *Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry*. IAEA-CN-96/22. Proceedings of an International Symposium, 25–28 November 2002, Vienna. Vol 1. Vienna: IAEA; 2003. p. 263–270.
- [15] Parkkinen R, Kosunen A, Sipilä P, Järvinen H. Development of calibration procedures for the electron beam calibration of plane-parallel ionization chambers. In book: *Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry*. IAEA-CN-96/33P. Proceedings of an International Symposium, 25–28 November 2002, Vienna. Vol 1. Vienna: IAEA; 2003. p. 361–366.
- [16] International Organization for Standardization (ISO). *Guide to the expression of uncertainty in Measurements*. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization; 1995.

LIITE 1

ANNOSMITTARIN TOIMINTAKUNNON TARKASTUS

Ohjeen ST 2.1 mukaisesti annosmittarin (elektrometrin ja ionisaatiokammion) toimintakuntoa on seurattava kirjallisen laadunvalvontaohjelman mukaisesti. Tarkistuslähdemittauksen ja vuotomittauksen lisäksi annosmittarin kunto on tarkastettava silmämääräisesti säännöllisin väliajoin (mm. kaapeleiden taittumat, eristeen kulumat, liittimien puhtaus ja mahdollisen kuivauspatruunan kunto). Poikkeuksellisen suurten rekombinaatio- ja polariteetti-ilmiöiden syynä voi olla viallinen ionisaatiokammio, joten myös näiden mittausten (liite 3) avulla voidaan arvioida annosmittarin kuntoa.

Tarkistuslähdemittaus

Tarkistuslähdemittaus (kohta 2.3) tulee tehdä säännöllisesti ja suositellaan tehtäväksi ennen annosmittausta (säteilykeilan kalibrointia, luvut 5 ja 6) sekä aina ennen annosmittarin lähettämistä kalibrointiin.

Tarkastuslähdemittauksen tarkoituksena on varmistaa annosmittarin (elektrometrin ja ionisaatiokammion) vakioisuus. Testin suoritus voi vaihdella elektrometrin tyypistä riippuen.

Tarkistuslähde säilytetään mittaushuoneessa vähintään vuorokauden ennen mittausta, jotta lähteen lämpötila stabiloituu huoneen lämpötilaan. Tarkistuslähteen lämpötila ei saa poiketa huoneilman lämpötilasta enempää kuin ± 2 astetta.

Ionisaatiokammio asetetaan tarkistuslähteesseen mahdollisten kohdistusmerkkien mukaisesti, ja liitetään elektrometriin annosmittauksessa käytettävien kaapeleiden avulla. Elektrometrin toiminta-asetukset valitaan samoiksi kuin kalibroinnin yhteydessä on käytetty. Asetukset ilmenevät kalibrointitodistuksen liitteestä. Ilmanpaine ja kammion lämpötila mitataan ja niiden arvot syötetään elektrometriin, tai lasketaan korjauskerroin k_{Tp} (ks. liite 3), jolla mittaustulos korjataan. Luotettavan lukeman saamiseksi tarkistuslähteen tuottaman virran tulisi olla suurempi kuin 100 pA. Varauksen mittausaika valitaan riittävän pitkäksi, jotta elektrometrin lukemaan saadaan vähintään neljä merkitsevää numeroa. Tyypillinen

mittausaika on 30–120 s. Mittaus toistetaan, kunnes kahden viimeisen mittaustuloksen poikkeama toisistaan on pienempi kuin 0,5 %. Lasketaan kahden viimeisen tuloksen keskiarvo ja sen poikkeama kalibrointitodistuksen vertailuarvosta. Poikkeaman vertailuarvosta tulee olla pienempi kuin 1 % sylinterikammioilla ja pienempi kuin 2 % tasolevykammioilla. Mikäli tämä raja ylittyy, kannattaa mittaus toistaa seuraavana päivänä ja tarvittaessa suorittaa kammion uudelleenkalibrointi. Kammiota ei tule käyttää annosmittaukseen ennen kuin poikkeaman syy on selvitetty.

Annosmittarin vuotomittaus

Annosmittarin (elektrometrin ja ionisaatiokammion) vuotomittaus voidaan suorittaa tarkastuslähdemittauksen tai säteilykeilan kalibroinnin yhteydessä. Hyvä käytäntö on suorittaa testi vuoroin kummassakin yhteydessä, jolloin vuoto tulee määritettyä kaikilla käytetyillä elektrometrin mitta-alueilla.

Asetetaan elektrometriin riittävän pitkä mittausaika. Käynnistetään varauksen mittaus ja noin 10 s kuluttua poistetaan ionisaatiokammio tarkistuslähteestä tai katkaistaan säteilytys hoitolaitteesta, jolloin saadaan elektrometrille pieni alkuvaraus. Kirjataan kertynyt varaus ja kulunut aika noin 1 min välein vähintään kolmen minuutin ajan. Lasketaan vuotovirta jakamalla varauksen muutos tähän kuluneella ajalla. Mikäli vuotovirta on yli 0,5 % tarkistuslähteen tai kiihdyttimen säteilykeilan tuottamasta virrasta, on liittimien puhtaus ja kaapeleiden kunto tarkastettava.

Jos vuotovirta on suurempi kuin 0,5 %, mutta enintään 5 % tarkistuslähteen tai 1 % kiihdyttimen säteilykeilan tuottamasta virrasta, vuotovirta on kompensoitava. Kompensaatio voidaan tehdä joko laskennallisesti tai käyttäen annosmittarissa mahdollisesti olevaa automaattista toimintaa. Jos vuotovirta on suurempi kuin edellä mainitut vuotovirran ylärajat (5 % ja 1 %), tulisi annosmittarin ja liittimen kunto tarkastaa perusteellisesti vuotovirran pienentämiseksi ja tarvittaessa annosmittarin korjaamiseksi.

LIITE 2**KIIHDYTTIMEN SÄTEILYKEILAN TOIMINTAKUNNON TARKASTUS**

Ennen kuin kiihdyttimen säteilykeilan kalibrointi voidaan suorittaa luotettavasti, on kiihdyttimen toimintakunnosta varmistuttava. Oleellimmat tekijät ovat kiihdyttimen annosmonitorin toistettavuus ja verrannollisuus, sekä säteilykeilan annosjakaumien tasaisuus ja symmetria. Kiihdyttimen toimintakunnon varmistamiseen kuuluu lisäksi säteilykeilan kalibroinnin yhteydessä (luvut 3 ja 4) määritetyn syväannoskäyrän vertailu aikaisempiin syväannoskäyrän mittaustuloksiin.

Annosmonitorin toimintakunto

Annosmonitorin toistettavuus voidaan varmistaa säteilykeilan kalibrointiin liittyvien annosmittausten yhteydessä tekemällä riittävästi toistomittauksia. Annosmonitorin verrannollisuus on syytä varmistaa uuden kiihdyttimen käyttöönoton yhteydessä ja tämän jälkeen vähintään parin vuoden välein sekä välittömästi keilan monitorointiin tarvittavien komponenttien vaihdon jälkeen.

Toistettavuuden ja verrannollisuuden mittaamiseen voidaan käyttää esim. Farmer-tyyppistä kammiota (taulukko I). Annosmittarin toistettavuuden tulisi olla parempi kuin 0,2 %. Mittaus voidaan suorittaa vesifantomissa tai vapaana ilmassa. Ilmassa mitattaessa kammiossa on oltava riittävän paksu kasvupäällys.

Toistettavuus ja verrannollisuus mittaauksissa voidaan mitatun annoksen sijaan tarkastella suoraan ionisaatiokammioilla mitattua varausta. Toistettavuus määritetään mittaamalla varaus vähintään 10 kertaa samalla kiihdyttimen MU-asetuksella. MU-asetuksen on oltava riittävän suuri, jotta elektrometrin lukematarkkuus olisi alle 0,2 % (noin 100 MU on yleensä riittävä). Mittaustulosten keskihajonnan on oltava alle 0,5 %.

Verrannollisuus määritetään mittaamalla varaus usealla MU-asetuksella, joista vähintään kolmen on oltava alle 100 MU ja vähintään kolmen yli 100 MU. Hoidoissa käytetty pienin ja suurin MU-asetus on suositeltua sisällyttää testiin. Mittaustuloksiin sovitetaan pienimmän neliösumman menetelmällä origon kautta kulkeva

suora, jolta määritetään kunkin mittauspisteen poikkeama. Poikkeamat saavat olla enintään 1 % yli 1 Gy:n annoksilla ja enintään 20 mGy alle 1 Gy:n annoksilla.

Annosjakaumat

Annosjakaumien osalta määritetään säteilykentän profiilien tasaisuus ja symmetria erityisesti säteilykentän pääakseleilla. Profiilien mittaukset tehdään vesifantomissa vähintään säteilykeilan kalibroinnissa käytettävällä kenttäkoolla.

Profiilien mittaussyvyydeksi suositellaan fotonisäteilyllä vertailusyvyyttä ja elektronisäteilyllä annosmaksimin syvyyttä. Profiilien määrittämisessä oleellista on tasaisuus ja symmetria kentän keskialueella. Profiilin tarkka määrittäminen puolivarjoalueella ei ole säteilykeilan kalibroinnin kannalta välttämätöntä.

Pääakseliprofiilit mitataan luotettavimmin pienikokoisella ionisaatiokammioilla (taulukko III, kohta 2.1). Tällöin mittaustuloksia voidaan verrata suoraan toleranssiarvoihin. Muitakin menetelmiä tai ilmaisimia voidaan käyttää, kunhan niiden soveltuvuus ko. mittauksiin on varmistettu aiemmin (esimerkiksi vertailulla ionisaatiokammiomittauksiin). Muita menetelmiä käytettäessä mittaustulosten vertailu suoraan toleranssiarvoihin ei aina ole mahdollista.

Profiilien mittaauksissa ilmaisimen efektiivinen piste asetetaan mittaussyvyydelle. Ilmaisimen suunta valitaan siten, että ilmasimen paikkareoluutio liikesuunnassa on mahdollisimman hyvä. Sylinteri-ionisaatiokammion pituus akseli on asetettava kohtisuoraan liikesuuntaa ja säteilyn tulo-suuntaa vastaan, jolloin kammio on käännettävä eri pääakseliprofileja mitattaessa. Pallokammiota ja diodia käytettäessä ei ilmaisinta tarvitse kääntää.

Profiililta määritetty laakeus ja symmetrisyys (ks. Sätehoitofysiikan sanasto) eivät saa olla suurempia kuin ohjeessa ST 2.1 asetetut hyväksyttävyyksvaatimukset. Kammion pituisella alueella symmetrisyyden tulee olla alle 1 %.

LIITE 3

ANNOSMITTARILLA MITATTUUN VARAUKSEEN TEHTÄVÄT KORJAUKSET

Paine- ja lämpötilakorjaus (k_{Tp})

Tässä ohjeessa mainitut ionisaatiokammiot (taulukot I ja II, kohta 2.1) ovat avoimia, jolloin kammion ilmatilan massa ja tuotettu kokonaisionisaatiovaraus vaihtelevat vallitsevan ilmanpaineen mukaan.

Ionisaatiokammion kalibrointitodistuksessa kalibrointikerroin ja tarkistuslähdelukemat ilmoitetaan ns. vertailuolosuhteissa. STUKin mittanormaalilaboratorin käyttämät vertailuolosuhteet ovat: lämpötila $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ja ilmanpaine $p_0 = 101,3 \text{ kPa}$. Kammiota käytettäessä mittaolosuhteet yleensä poikkeavat vertailuolosuhteista ja mittaustulokset on korjattava vertailuolosuhteissa tehtyjä mittauksia vastaaviksi korjauskertoimella k_{Tp} .

Korjauskerroin k_{Tp} lasketaan seuraavasti:

$$k_{Tp} = \frac{273,2 + T}{273,2 + T_0} \frac{p_0}{p} \quad (15)$$

missä p ja T ovat ionisaatiokammion ilmatilan paine ja lämpötila mittaushetkellä ja p_0 ja T_0 ovat vertailuolosuhteet.

Rekombinaatiokorjaus (k_s)

Ionisaatiokammion ilmatilassa tapahtuvan ionien rekombinaation vuoksi kammiota ei pysty keräämään kaikkea ionisaatiossa syntyneitä varauksia. Tästä aiheutuvan ionisaatiiovirran mittaustuloksen korjaukseen tarvitaan rekombinaatiokorjauskerroin k_s .

Lineaarikiihdyttimen pulssitetussa säteilykeilassa rekombinaatio muuttuu säteilypulsseihin kohti saatavan annoksen mukaan. Rekombinaatiokorjauskerroin on määritettävä kullakin käytössä olevalla annosnopeusasetuksella (MU/min), ellei annosnopeuden muuttaminen perustu pulssitaajuuden muuttamiseen siten, että annos pulssia kohti pysyy vakiona. Rekombinaatiokorjauskerroin on määritettävä erikseen myös kullekin fotonisäteilylaadulle, sillä esimerkiksi 6 MV:n fotonikeilassa annos pulssia kohti on tyypillisesti noin puolet siitä mitä se on 15 MV:n fotonikeilassa. Elektronisäteilykeiloissa annos pulssia kohden on yleensä sama kaikilla energioilla, jolloin samaa

rekombinaatiokorjauskerrointa voidaan käyttää eri energisissä elektronikeiloissa. Uudelle kammiolle rekombinaatiokorjauskerroin on kuitenkin suositeltavaa määrittää kaikissa mitattavissa säteilykeiloissa. Myöhemmissä mittauksissa samalla kammiolla ja samoissa säteilykeiloissa, rekombinaatiokorjauskerroin tarkistetaan, jos on aihetta epäillä sen muuttuneen.

Rekombinaatiokorjaus voidaan määrittää Boagin teorian mukaan mittaamalla varaus usealla jännitteellä. Ns. kahden jännitteen menetelmä on kuitenkin yksinkertaisempi ja riittävän tarkka rekombinaatiokorjauskertoimen määrittämiseen pulssitetussa säteilykeilassa. Siinä oletetaan, että $1/M$:n ja $1/U$:n suhde on lineaarinen, missä M on elektrometrin lukema keräysjännitteellä U . Kahden jännitteen menetelmässä rekombinaatiokorjauskerroin lasketaan kaavalla:

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \quad (16)$$

missä M_1 on normaalisti käytetyllä keräysjännitteellä U_1 saatu elektrometrin lukema ja M_2 pienemmällä keräysjännitteellä U_2 saatu elektrometrin lukema. Jännitteet on valittava siten, että $U_1/U_2 \geq 3$. Kertoimet a_0 , a_1 ja a_2 lineaarikiihdyttimen pulssitetulle säteilylle saadaan tämän liitteen taulukosta (s. 32):

Kun $k_s < 1,03$ voidaan rekombinaatiokorjauskerroin laskea likiarvokaavaa käyttäen:

$$k_s = \frac{M_1/M_2 - 1}{U_1/U_2 - 1} + 1 \quad (17)$$

Hyvälaatuiselle sylinterikammiolle rekombinaatiokorjauskerroin on alle 1,008 alle 10 MV:n fotonikeilassa ja alle 1,015 yli 10 MV:n fotonikeilassa. Hyvälaatuiselle tasolevykammiolle rekombinaatiokorjauskerroin elektronikeilassa on alle 1,02.

Polariteettikorjaus (k_{pol})

Ionisaatiokammiolla tehtävissä annosmittauksissa tulee käyttää samaa keräysjännitteen polariteettia kuin kammion kalibroinnissa. Polariteettikorjauskerrointa k_{pol} ei tällöin käytetä.

Polariteettikorjauskertoimen avulla voidaan

kuitenkin arvioida kammion toimintakuntoa. Tämän vuoksi mm. STUKin mittanormaalilaboratorion antamassa kalibrointitodistuksessa ilmoitetaan myös kalibroinnin yhteydessä mitattu polariteettikorjauskerroin k_{pol} . Hyvälaatuiselle kammionille $k_{pol} < 1,005$, eli keräysjännitteen vastakkaisen polariteetin käyttäminen ei yleensä aiheuta huomioon otettavaa mittausvirhettä.

Ennen uuden kammion käyttöönottoa on suositeltavaa tutkia polariteettikorjauskertoimen suuruus. Samoin on meneteltävä epäiltäessä kammion

viallisuutta. Polariteettikorjauskerroin määritetään kaavasta:

$$k_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2M} \quad (18)$$

missä M_+ ja M_- ovat elektrometrin lukemat positiivisella ja negatiivisella polariteetilla ja M on näistä kahdesta se lukema, joka on saatu kalibroinnissa käytetyllä (ja annosmittauksissa normaalisti käytettävällä) polariteetilla.

Taulukko. Rekombinaatiokorjauksen (kaava 16) kertoimet a_0 , a_1 ja a_2 pulssitetulle säteilylle keräysjännitteiden suhteen U_1/U_2 funktiona. Mittauksessa tulee olla $U_1/U_2 \geq 3$.

U_1/U_2	a_0	a_1	a_2
2,0	2,337	- 3,636	2,299
2,5	1,474	- 1,587	1,114
3,0	1,198	- 0,875	0,677
3,5	1,080	- 0,542	0,463
4,0	1,022	- 0,363	0,341
5,0	0,975	- 0,188	0,214

LIITE 4

EPÄVARMUUSARVIOT

Kun veteen absorboitunut annos mitataan annosmittarilla vertailupisteessä vesifantomissa, mittaustulokseen vaikuttavien tekijöiden epävarmuuksia voidaan tarkastella kahdessa tai kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan epävarmuuksia, jotka liittyvät sylinteri-ionisaatiokammioista ja elektrometristä koostuvan annosmittarin (fotonisäteily) tai vertailumittarin (elektronisäteily) kalibrointiin mittanormaallilaboratoriossa ^{60}Co -gammäsäteilykeilassa veteen absorboituneelle annokselle (tuloksena kalibrointikerroin $N_{D,w,Co}^{cyl}$). Kun kyseessä on fotonisäteilyn annosmittaus, toisessa vaiheessa tarkastellaan suoraan fotonikeilan annosmittaukseen vertailupisteessä vesifantomissa liittyviä epävarmuuksia. Tähän vaiheeseen sisältyy myös fotonien energian huomioivan säteilynlaatukorjauskertoimen k_Q epävarmuus. Kun kyseessä on elektronisäteilyn annosmittaus, toisessa vaiheessa tarkastellaan epävarmuuksia, jotka liittyvät annosmittauksissa käytettävän tasolevykammion kalibrointiin vertailumittaria vastaan elektroneikeilassa (“cross

calibration” eli kenttäkalibrointi). Kolmannessa vaiheessa tarkastellaan itse elektroneikeilan annosmittaukseen vertailupisteessä vesifantomissa liittyviä epävarmuuksia. Tähän vaiheeseen kuuluu myös elektroneien energian huomioivan korjauskertoimen $k_{Q,Q_{int}}$ epävarmuus. Veteen absorboituneen annoksen yhdistetty epävarmuus vertailupisteessä saadaan laskemalla neliöllisesti yhteen eri vaiheisiin liittyvät epävarmuudet.

Tämän liitteen taulukoissa I ja II on arvioitu tyypilliset veteen absorboituneen annoksen mittaused epävarmuudet suurenergiafotoni- ja elektroneikeiloissa, kun mittarit on kalibroitu ja mittaukset tehdään tässä raportissa suositelluilla menetelmillä. Korjauskertoimien k_Q ja $k_{Q,Q_{int}}$ epävarmuudet koskevat laskennallisia kertoimia ja ovat IAEA:n suosituksen mukaiset [1]. Korjauskertoimen $k_{Q,Q_{int}}$ epävarmuus on taulukossa II purettu osatekijöihinsä, koska kalibrointimenettelyn perusteella osa epävarmuustekijöistä eliminoiduu. Epävarmuudet on esitetty Kansainvälisen standardoimisjärjestön ohjeen mukaisesti [16]

Taulukko I. Epävarmuusarvio veteen absorboituneelle annokselle. Suurenerginen fotonisäteily. Veteen absorboituneen annoksen ($D_{w,Q}$) mittaustuloksen arvioitu suhteellinen epävarmuus vertailupisteessä vedessä, kun annosmittarin ionisaatiokammio (sylinterikammio) on kalibroitu veteen absorboituneelle annokselle vesifantomissa ^{60}Co -gamma-säteilykeilassa.

Veteen absorboituneen annoksen mittaustulokseen vaikuttava tekijä	Parametri	Suhteellinen epävarmuus (keskiarvon keskihajonta) %
Vaihe 1: Annosmittarin kalibrointi mittanormaaliolosuhteissa		
$N_{D,w,Co}^{cyl} = N_{D,w,Co}^{std} \cdot M_{Co}^{std} / M_{Co}^{cyl}$		
Mittanormaanin kalibrointikerroin	$N_{D,w,Co}^{std}$	0,41
Mittanormaanin kalibrointikertoimen pitkäaikainen vakioisuus	$N_{D,w,Co}^{std}$	0,17
Mittanormaanin asettelu	M_{Co}^{std}	0,06
Kalibroitavan kammion asettelu	M_{Co}^{cyl}	0,06
Mittanormaanin ionisaatiovirran mittaaminen MN-elektrometrillä	M_{Co}^{std}	0,13
Kalibroitavan annosmittarin (kammio+elektrometri) ionisaatiovirran mittaaminen	M_{Co}^{cyl}	0,14
Vaiheen 1 epävarmuus		0,49
Vaihe 2: Annosmittaus fotonikeilassa		
$D_{w,Q} = M_Q^{cyl} \cdot N_{D,w,Co}^{cyl} \cdot k_Q$		
Annosmittarin kalibrointikertoimen pitkäaikainen vakioisuus	$N_{D,w,Co}^{cyl}$	0,3
Vertailuolosuhteiden toteutuminen	M_Q^{cyl}	0,4
Annosmittarin lukema	M_Q^{cyl}	0,6
Korjauskertoimet (T_p -korjaukset)	M_Q^{cyl}	0,4
Säteilynlaatukorjauskerroin	k_Q	1,0
Vaiheen 2 epävarmuus		1,3
Yhdistetty epävarmuus.		1,42

Taulukko II. Epävarmuusarvio veteen absorboituneelle annokselle. Suurenerginen elektronisäteily. Veteen absorboituneen annoksen ($D_{w,Q}$) mittaustuloksen arvioitu suhteellinen epävarmuus vertailupisteessä vedessä, kun annosmittarin ionisaatiokammio (tasovevykammio) on kalibroitu veteen absorboituneelle annokselle vesifantomissa elektronisäteilykeilassa ("cross calibration").

Veteen absorboituneen annoksen mittaustulokseen vaikuttava tekijä	Parametri	Suhteellinen epävarmuus (keskiarvon keskihajonta) %
Vaihe 1: Vertailumittarin kalibroitukertoimen määrittäminen mittanormaalilaboratoriossa (^{60}Co)		
$N_{D,w,\text{Co}}^{\text{ref}} = N_{D,w,\text{Co}}^{\text{std}} \cdot M_{\text{Co}}^{\text{std}} / M_{\text{Co}}^{\text{ref}}$		
Mittanormaalin kalibroitukerroin	$N_{D,w,\text{Co}}^{\text{std}}$	0,54
Mittanormaalin kalibroitukertoimen pitkäaikainen vakioisuus	$N_{D,w,\text{Co}}^{\text{std}}$	0,17
Mittanormaalin ja vertailukammion asettelu samalle syvyydelle	$M_{\text{Co}}^{\text{std}} / M_{\text{Co}}^{\text{ref}}$	0,06
Mittanormaalin ionisaatiovirran mittaus MN-elektrometrillä	$M_{\text{Co}}^{\text{std}}$	0,13
Vertailukammion ionisaatiovirran mittaus MN-elektrometrillä	$M_{\text{Co}}^{\text{ref}}$	0,13
Vertailumittarin elektrometrin herkkyyskorjauskertoimen k_{elec} määrittäminen MN-elektrometriä vasten	$M_{\text{Co}}^{\text{ref}}$	0,07
Vaiheen 1 epävarmuus		0,60
Vaihe 2: Tasovevykammion kalibroitukertoimen määrittäminen vertailumittarin avulla elektronikeilassa ("cross calibration")		
$N_{D,w,Q_0}^{\text{pp}} = D_{w,Q_0} / M_{Q_0}^{\text{pp}}$ $= M_{Q_0}^{\text{ref}} \cdot N_{D,w,\text{Co}}^{\text{ref}} \cdot k_{Q_0,\text{Co}}^{\text{ref}} / M_{Q_0}^{\text{pp}}$		
Vertailumittarin kalibroitukertoimen pitkäaikainen vakioisuus (a=0,3 %)	$N_{D,w,\text{Co}}^{\text{ref}}$	0,2
Vertailukammion säteilylaadun korjauskerroin ^{60}Co gamma-säteilystä kalibroitienenergiaan ([1] Table 22, Step 2, cylindrical)	$k_{Q_0,\text{Co}}^{\text{ref}}$	1,2
Vertailukammion ja tasovevykammion asettelu samalle syvyydelle kalibroititelineessä	$M_{Q_0}^{\text{ref}} / M_{Q_0}^{\text{pp}}$	0,04
Kalibroititelineen asettelu määritetyille kalibroitisyvyydelle z_{ref}	$k_{Q_0,\text{Co}}^{\text{ref}}$	0,03
Säteilykentän tasaisuus (kammioiden kokoero)	$M_{Q_0}^{\text{ref}} / M_{Q_0}^{\text{pp}}$	0,12
Vertailukammion ionisaatiovirran mittaus vertailuelektrometrillä	$M_{Q_0}^{\text{ref}}$	0,14
Tasovevykammion ionisaatiovirran mittaus vertailuelektrometrillä	$M_{Q_0}^{\text{pp}}$	0,14
Vaiheen 2 epävarmuus		1,24
Vaihe 3: Annosmittaus elektronikeilassa tasovevykammiolla ([1] Table 23, Step 2, plane parallel)		
$D_{w,Q} = M_Q^{\text{pp}} \cdot N_{D,w,Q_0}^{\text{pp}} \cdot k_{Q,Q_0}^{\text{pp}}$		
Säteilylaatu- ja korjauskerroin (tasovevykammiolle, kalibroitikeilan ja mitattavan elektronikeilan välillä)	k_{Q,Q_0}^{pp}	0,6
Annosmittarin kalibroitukertoimen pitkäaikainen vakioisuus	N_{D,w,Q_0}^{pp}	0,4
Vertailuolosuhteiden toteutuminen	M_Q^{pp}	0,6
Annosmittarin lukema	M_Q^{pp}	0,6
Korjauskertoimet (T_p -korjaukset)	M_Q^{pp}	0,5
Vaiheen 3 epävarmuus		1,22
Yhdistetty epävarmuus		1,84

LIITE 5

VETEEN ABSORBOITUNEEN ANNOKSEN KÄYTTÖ MITTAUSSUUREENA

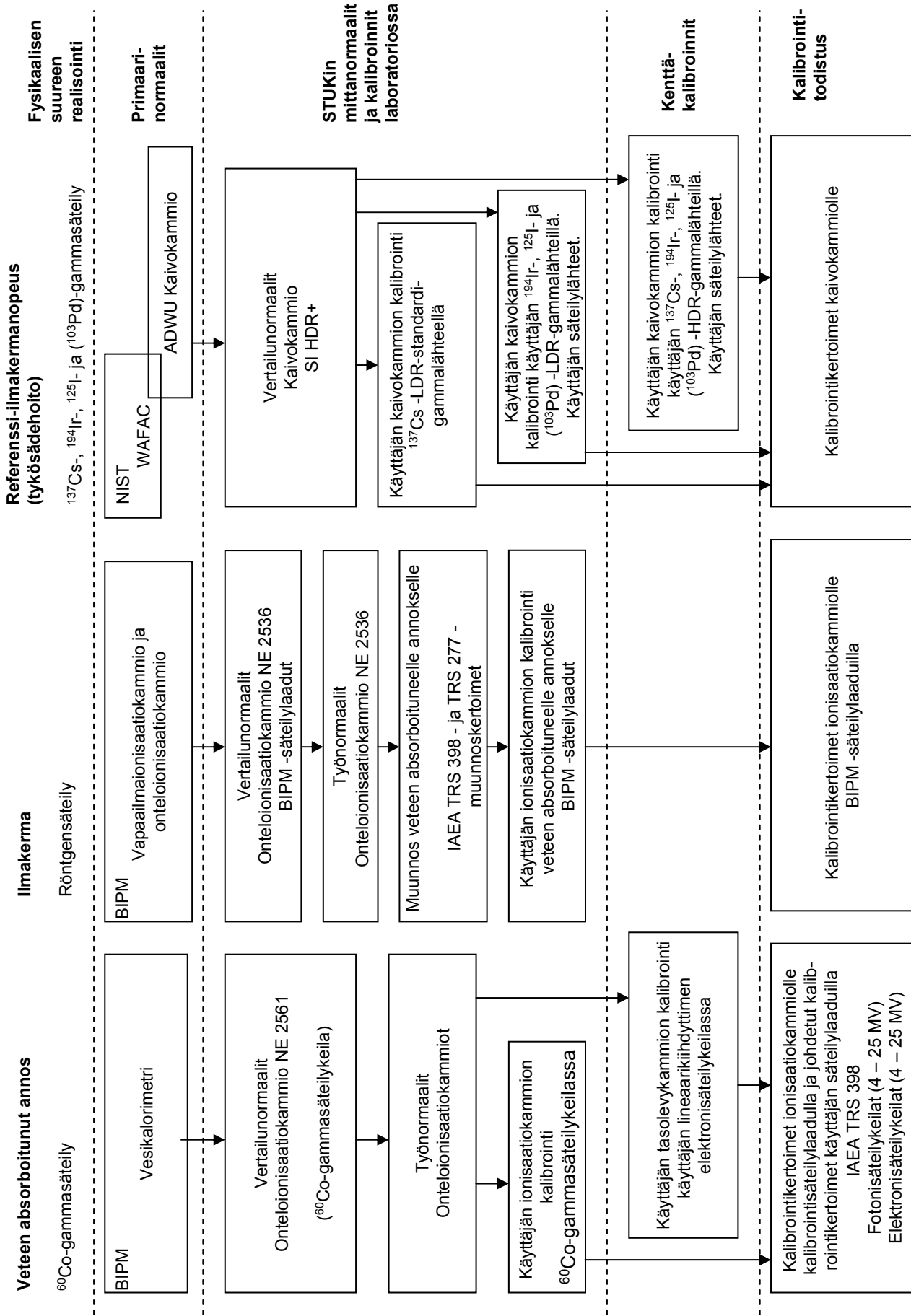
Kalibrointilaboratorioiden mittausten jäljitettävyyteen liittyvän hierarkian mukaisesti veteen absorboituneen annoksen kalibrointikertoimet sädehoidon annosmittareille siirtyvät primaaridosimetrialaboratorioissa (Primary Standard Dosimetry Laboratory, PSDL) realisoituna annoksesta ja mittanormaanin kalibroinnista sekundaaridosimetrialaboratorion (Secondary Standard Dosimetry Laboratory, SSDL) kautta sädehoitoklinikan annosmittariin. Saavutettavan tarkkuuden kannalta paras tapa megavolttilueen fotonin- ja elektronisäteilyn ionisaatiokammioiden kalibrointiin on kalibroida ko. mittalaitteet mittanormaalilaboratoriossa spektreiltään kliinisiä sädehoitokeiloja vastaavissa säteilykeiloissa. Kiihdyttimiä on kalibrointitoimintaan käytettävissä useissa primaarilaboratorioissa, ja niissä megavolttilueen fotonisäteilyn primäärinormaalina käytetään tyypillisesti vesikalorimetrejä. Elektronisäteilyllä veteen absorboituneen annoksen primäärinormaalina käytetään yleensä kemiallisia dosimetrejä (Fricke-dosimetri). Ionisaatiokammioita käytetään siirto- ja työnormaaleina [11,12].

SSDL laboratorioissa kalibroinneissa käytetään tyypillisesti ^{60}Co gammasäteilykeilaa ja tällöin annosmittauksessa huomioidaan säteilylaaturkorjauskerroin. Sekundaarilaboratorioissa annoksen mittanormaalit ovat erityisesti mittanormaalikäyttöön suunniteltuja ionisaatiokammioita. Säteilyturvakeskuksen dosimetrialaboratorio on SSDL-tason laboratorio ja toimii kansallisena mittanormaalilaboratoriona ionisoivan säteilyn annossuureille. Sen mittanormaalit sekä annosmittareille tehtävät kalibroinnit ovat suoraan jäljitettävissä Kansainvälisen Paino- ja Mittatoimiston (BIPM) primäärinormaalieihin. Kuvassa 1 on STUKin mittanormaalilaboratorion mittanormaalien jäljitettävyysskaavio.

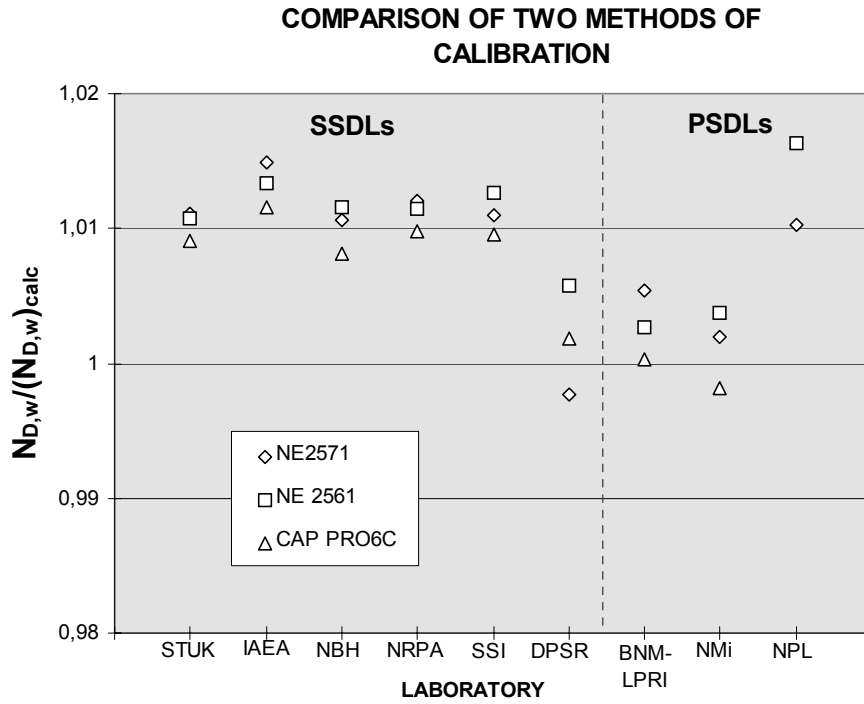
Fotonisäteilyllä annosmittauksen epävarmuus

on noin 0,3–0,4 % (1 sd) suurempi, kun ionisaatiokammio on kalibroitu ^{60}Co gammasäteilykeilassa ja käytetään säteilynlaatutekijää verrattuna tilanteeseen, jossa ionisaatiokammio on kalibroitu suoraan primaarilaboratoriossa kiihdyttimen säteilykeilassa. Elektronisäteilyllä, käytettäessä tasolevykammiota ja kenttäkalibrointimenettelyä, on epävarmuuden lisäys hieman suurempi. Sairaalan kiihdyttimen elektronisäteilykeilassa tehtävän kenttäkalibroinnin kautta voidaan kuitenkin tasolevykammioiden yksilölliset erot huomioida suoraan kalibroinnissa ja sen vuoksi tämä menettely on tasolevykammiolla luotettavampi ^{60}Co -kalibrointiin verrattuna.

Siirryttäessä aikaisemmasta ilmakerma-perusteisesta kalibrointimenettelystä veteen absorboituneen annoksen käyttöön tapahtui ^{60}Co -gamma-säteilyllä määritetyssä annoksessa ja ionisaatiokammioiden kalibroinnissa perustason muutos. Muutoksesta johtuen uudet kammioiden kalibrointikertoimet ja annokset olivat noin 0,9 % aiempia suurempia. Tämä perustason muutos siirtyi kalibrointien kautta edelleen kaikkiin megavolttilueen annosmittauksiin hieman erisuuruisena säteilynenergiasta riippuen. Perustason muutos ^{60}Co -gammasäteilyllä johtui aiemman ilmakerma-perusteisen sekä sen kanssa yhdessä käytetyn IAEA:n annosmittausohjeen erosta verrattuna suoraan veteen absorboituneen annoksen määrittämiseen [8]. Perustason muutos oli em. suuruinen, kun mittanormaanin kalibrointi perustui BIPM:n primäärinormaalieihin. Tämän liitteen kuvassa 2 on esitetty mittanormaalien veteen absorboituneen annoksen kalibrointikertoimien suhde ^{60}Co -gammasäteilyllä silloin, kun se perustuu suoraan veteen absorboituneeseen annokseen $N_{D,w}$ (nykyinen, tämän ohjeen perusteena oleva menettely) ja ilmakermaan yhdistettynä IAEA:n annosmittausohjeen [8] muunnostekijöiden käyttöön ($N_{D,w})_{calc}$ (aiempi menettely) [13].



Kuva 1. STUKin mittanormaali-laboratorion mittanormaalien ja kalibrointien jäljitettävyyshaavo.



Kuva 2. Veteen absorboituneeseen annokseen suoraan perustuvan kalibroitikertoimen ja ilmakerma-perusteisen laskennallisen kalibroitikertoimen suhde ^{60}Co -gamma-säteilyllä, kolmelle eri kammiotyypille. Vastaava muutos saadaan annosmittauksessa ^{60}Co -gamma-säteilykeilassa [13].

LIITE 6 KALIBROINTITODISTUSTEN MALLIT

Tilaaja

Viite

Kalibroitu laite

Ionisaatiokammio	NE 2571	Sarjano	-
Kammion vesisuoja	STUK/PMMA/NE	Sarjano	-
Mittari	NE Farmer Dosemeter 2570/1	Sarjano	-
Tarkistuslähde	NE 2503/3A	Sarjano	-

Kalibrointi suoritettu, pvm.

11.3.2003

Kalibroinnissa määritettiin kalibrintikerroin veteen absorboituneelle annokselle (Taulukko 1, liite 1). Lisäksi määritettiin mittarin herkkyuden korjauskerroin varausmittauksessa (Taulukko 3).

Taulukko 1. Kalibrintitulokset ⁶⁰Co-säteilyllä perusoloissa 20 °C, 101,3 kPa ja 40 % RH. Keräysjännite -250 V.

Kammio: Mittari:	NE 2571 (-) Mn-laboratorion elektrometri ¹⁾	NE 2571 (-) Farmer 2570/1 (-) ²⁾
Kalibrintikerroin veteen absorboituneelle annokselle $N_{D,w}$	44,93 MGy/C	1,043 Gy/Gy
Tarkistuslähdemittauksessa saatu virta tai näyttämä 8.11.2002	36,08pA	1,553 mGy/s
Vuotovirta tai -näyttämä	~ 10 fA	< 0,001 Gy/min

1) Virran mittauksessa B-tyyppin epävarmuus /2/ pienempi kuin 0,1 %.

2) Elektrometrin asetukset liitteessä 4. Mittarin mittausalueeksi valittiin kalibrintikertoimen ja vuotovirran määrityksessä "High"- ja tarkistuslähdemittauksessa "Low".

Kalibrintikerroin $N_{D,w,Q}$ veteen absorboituneen annoksen määrittämistä varten on annettu fotonisäteilylle perusoloissa säteilylaatuparametrien (kudosfantomisuhteen $TPR_{20,10}$ ja ionisaatiosuhteen $J_{10,20}$) funktiona liitteissä 1. Tarkistuslähdemittauksessa saatava virta tai näyttämä ajan funktiona on annettu liitteissä 2.

24.3.2003

Tarkastaja Ilkka Jokelainen

Tämän asiakirjan julkaiseminen osittaisena tai asiakirjaan viittaaminen mainostarkoituksessa on sallittu vain Säteilyturvakeskuksen kirjallisella luvalla. Säteilyturvakeskus toimii ionisoivan säteilyn kansallisen mittanormaalilaboratoriona (laki 1334/1994 ja asetus 1515/1991) ja on jäsenenä IAEA/WHO:n SSDL-laboratorioverkossa.

STUK - SÄTEILYTURVAKESKUS STRÅLSÄKERHETS CENTRALEN RADIATION AND NUCLEAR SAFETY AUTHORITY	OSOITE Laippatie 4 00880 HELSINKI	POSTIOSOITE PL / P.O.BOX 14 FIN - 00881 HELSINKI, FINLAND	PUH. (09) 759 881 +358 9 759 881	FAX (09) 7598 8450 +358 9 7598 8450
--	---	---	--	---

Kalibrointi suoritettiin ^{60}Co -gamma-säteilykeilassa viitteen /1/ mukaisesti. Kalibrointi-geometria ja -olosuhteet on annettu taulukossa 2. Kalibroinnissa kammio asetettiin vesifantomiin siten että fantomin etuseinä ja kammion pituusakseli olivat kohtisuorassa säteilykeilan keskiakselia vastaan. Kammion keskipiste oli säteilykeilan keskiakselilla. Kammion päällä käytettiin PMMA muovista valmistettua vesisuojaa. Kammion varren vuodon ja varren aiheuttaman sironnan suhteen ei tehty korjausta. Ionien rekombinaatiokorjaus oli merkityksetön.

Taulukko 2. Kalibrointi-geometria ja olosuhteet.

Kammion ilman lämpötila	19 °C – 21 °C
Ilman paine	Vallitseva ilmanpaine
Ilman kosteus	n. 40 % RH
Fantomimateriaali	Vesi
Fantomin koko	30 cm x 30 cm x 30 cm
Fantomin seinämateriaali	PMMA-muovi
Fantomin seinämateriaalin paksuus	10 mm. Etuseinä säteilykeilan kohdalla, 2 mm.
Fantomin etuseinän etäisyys säteilyfokuksesta	n. 100 cm
Kammion vertailupiste	Kammion ilmatilan keskipiste kammion pituusakselilla
Kammion vertailupisteen syvyys fantomissa (fantomin ulkopinnasta)	50 mm
Kammion vesisuojan seinämateriaali	PMMA-muovi
Kammion vesisuojan seinän paksuus	n. 1 mm
Säteilykentän koko kammion syvyydellä	n. 10,5 cm * 10,5 cm
Annosnopeus kalibrointisyvyydellä	n. 5 mGy/s

Taulukossa 1 annettu ionisaatiokammion kalibrointikerroin veteen absorboituneelle annokselle ^{60}Co gamma-säteilyllä $N_{D,w}$ määritettiin seuraavasti:

$$N_{D,w} = \frac{D_w}{M} \quad (1)$$

missä D_w on veteen absorboitunut annos ja M ionisaatiokammion mitattu varaus tai mittarin näyttämä perusoloissa 20 °C, 101,3 kPa ja 40 % RH. D_w määritettiin mittanormaalilla (ionisaatiokammio), joka on kalibroitu ^{60}Co -gamma-säteilyllä veteen absorboituneelle annokselle Kansainvälisessä paino- ja mittatoimistossa (BIPM, Ranska).

Liitteessä 1 annetut kalibrointikertoimet muille kuin ^{60}Co vertailusäteilylaaduille, $N_{D,w,Q}$ on laskettu seuraavasti:

$$N_{D,w,Q} = N_{D,w} k_Q \quad (2)$$

missä k_Q on kalibrointikertoimen korjauskerroin. Korjauskerroin voidaan kirjoittaa:

$$k_Q = \frac{(s_{w,air})_Q}{(s_{w,air})_{Q_0}} \frac{p_Q}{p_{Q_0}} \quad (3)$$

missä $(s_{w,air})_u$ on keskimääräinen veden ja ilman massajarrutuskykyjen suhde sekundäärielektronien spektrille kyseisellä säteilylaadulla, p_Q on häiriökorjauskertoimen kyseisellä säteilylaadulla. Alaindeksi Q viittaa tarkasteltavaan säteilylaatuun mittaustilanteessa ja alaindeksi Q_0 viittaa ^{60}Co vertailusäteilylaatuun. Häiriökorjauskertoimen p_Q huomioi kammion ilmaontelon, seinämän, vesisuojan ja kammion keskielektrodin sironta- ja absorptio-ominaisuuksien vaikutuksen kammion vasteeseen. Lisäksi korjauskertoimen p_Q sisältää kammion efektiivisen mittauspisteen siirtymän vaikutuksen siten, että mittaustulos saadaan kammion keskipistettä vastaavalla mittaussyvyydellä.

Kalibroitikertoimen $N_{D,w,Q}$ määrittämisessä käytetyt (kaava 2) korjauskertoimen arvot k_Q on annettu liitteessä 3. k_Q arvot ovat viitteen /1/ mukaiset. Säteilylaatuparametrien $\text{TPR}_{20,10}$ ja korjauskertoimen k_Q välinen vastaavuus on viitteen /1/ mukainen. Parametrien $\text{TPR}_{20,10}$ ja $J_{10,20}$ välinen suhde perustuu viitteeseen /1/. Kammiolla mitatun ionisaation ja annoksen välinen suhde on oletettu syvyydestä riippumattomaksi, jolloin viitteessä /1/ esitetty parametri $\text{PDD}_{20,10}$ voidaan korvata parametrin $J_{10,20}$ käänteisluvulla.

Kalibroitikertoimen $N_{D,w,Q}$ käyttö edellyttää, että mittausteoria on viitteen /1/ mukainen ja että fotonisäteilyn laatuparametrit ($\text{TPR}_{20,10}$ tai $J_{10,20}$) määritetään ja kammion keskiakseli sijoitetaan mittaussyvyydelle Z_{ref} viitteen /1/ mukaisesti. Veteen absorboitunut annos mittaussyvyydellä saadaan, kun ionisaatiokammiolla vesifantomissa kyseisellä syvyydellä mitattu varaus tai mittarin näyttämä kerrotaan säteilylaatua vastaavalla kammion kalibroitikertoimella $N_{D,w,Q}$.

Koska kalibroitikerroin $N_{D,w,Q}$ on annettu perusoloissa (20 °C, 101,3 kPa), on mitattu varaus tai mittarin näyttämä kerrottava lisäksi lämpötilan ja paineen korjauskertoimella k_{Tp} :

$$k_{Tp} = \frac{273,2 + T}{293,2} \cdot \frac{101,3}{p} \quad (4)$$

missä T on kammion sisältämän ilman lämpötila (°C) ja p on sen paine (kPa).

Taulukossa 1 esitetyn kalibroitikertoimen $N_{D,w}$ kokonaisepävarmuus varmuuskertoimella 2 on noin 1,2 % (ilmoitettuna viitteen /2/ mukaisesti). Annettu epävarmuus ei sisällä mittarin Farmer 2570 toimintaan liittyvää epätarkkuutta.

Taulukko 3. Mittarin Farmer 2570/1 (-) herkkyuden korjauskerroin k_{elec} varausmittauksessa eri mittausalueilla.

Mittarin asetukset	k_{elec}
Charge / Low	0,997
Charge / High	0,998

Taulukossa 3 esitetty mittarin varausmittauksen herkkyuden korjauskerroin k_{elec} määritettiin seuraavasti:

$$k_{elec} = \frac{Q_{MN}}{Q_{user}} \quad (5)$$

missä Q_{MN} on mittanormaalilaboratorion elektrometrillä mitattu varaus ja Q_{user} mittarilla mitattu varaus. Määrittäessä käytetty virta oli n. 130 pA. Käytettäessä mittaria elektrometrinä varausmittauksissa (mittaukset ”Charge”-asetuksella) on tarkan tuloksen saamiseksi mitattu varaus kerrottava herkkyuden korjauskertoimella k_{elec} .

Kammio on edellisen kerran kalibroitu Säteilyturvakeskuksessa pp.kk.vvvv (MN/nn/vv). Kammio suositetaan kalibroitavaksi uudelleen viimeistään 8.11.2005 tai, jos tarkistuslähdemittauksessa saatu virta tai näyttämä poikkeaa liitteissä 2 esitetystä arvosta yli 1 %.

VIITTEET

- /1/ IAEA, International Atomic Energy Agency. *Absorbed dose determination in External Beam Radiotherapy. An international code of practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water*. Technical reports series no. 398, 2000.
- /2/ CIPM, Comite International des Poids et Mesures, Recommendation 1 CI-1981. *Assignment of experimental uncertainties*. 1981.

KALIBROINTIKERROIN $N_{D,w,Q}$ [MGy/C] FOTONISÄTEILYLLE

Ionisaatiokammio:
Mittari:

NE 2571A
Mn-lab. laitteisto

Sarjanro: -

20,0 °C, 101,3 kPa, 40% RH

Nimellinen kiihdytysjännite [MV]	Kudosfantomi- suhde TPR _{20,10}	Ionisaatio- suhde $J_{10,20}$	Kalibrointi- kerroin $N_{D,w,Q}$ MGy/C	Mittaus- syvyys [cm]
2	0,514	2,208	45,15	10
3	0,583	1,971	44,95	10
4	0,628	1,842	44,80	10
5	0,659	1,762	44,70	10
6	0,683	1,705	44,61	10
7	0,702	1,663	44,53	10
8	0,716	1,633	44,46	10
9	0,728	1,608	44,38	10
10	0,737	1,590	44,31	10
12	0,754	1,556	44,16	10
14	0,768	1,530	44,01	10
16	0,778	1,512	43,89	10
18	0,787	1,496	43,76	10
20	0,793	1,485	43,67	10
22	0,799	1,475	43,56	10
25	0,807	1,461	43,42	10
26	0,810	1,456	43,36	10
30	0,818	1,443	43,19	10

$$N_{D,w} = 44,93 \text{ MGy/C}$$

KALIBROINTIKERROIN $N_{D,w,Q}$ [Gy/Gy] FOTONISÄTEILYLLE

Ionisaatiokammio: NE 2571A Sarjanro: -
 Mittari: NE Farmer Dosemeter 2570/1B Sarjanro: -
 Mittarin asetukset: 0.6 cc / High

20,0 °C, 101,3 kPa, 40% RH

Nimellinen kiihdytysjännite [MV]	Kudosfantomi- suhde TPR _{20,10}	Ionisaatio- suhde $J_{10,20}$	Kalibrointi- kerroin $N_{D,w,Q}$ Gy/Gy	Mittaus- syvyys [cm]
2	0,514	2,208	0,9243	10
3	0,583	1,971	0,9204	10
4	0,628	1,842	0,9173	10
5	0,659	1,762	0,9152	10
6	0,683	1,705	0,9134	10
7	0,702	1,663	0,9117	10
8	0,716	1,633	0,9101	10
9	0,728	1,608	0,9086	10
10	0,737	1,590	0,9072	10
12	0,754	1,556	0,9042	10
14	0,768	1,530	0,9011	10
16	0,778	1,512	0,8985	10
18	0,787	1,496	0,8959	10
20	0,793	1,485	0,8940	10
22	0,799	1,475	0,8919	10
25	0,807	1,461	0,8889	10
26	0,810	1,456	0,8877	10
30	0,818	1,443	0,8843	10

$$N_{D,w} = 0,9198 \text{ Gy/Gy}$$

TARKISTUSLÄHDEMITTAUKSESSA SAATAVA VIRTA [pA]

Ionisaatiokammio: NE 2571A Sarjanro: -
 Mittari: Mn-lab. laitteisto
 Tarkistuslähde: NE 2503 Sarjanro: -

20,0 °C, 101,3 kPa, 40% RH ⁹⁰Sr-lähteen puoliintumisaika 28,81 a

Päivä	Kuukausi	2003	2004	2005	2006
1	1		21,17	20,67	20,18
11	1		21,16	20,66	20,17
21	1		21,15	20,64	20,15
1	2		21,13	20,63	20,14
11	2		21,12	20,61	20,12
21	2		21,10	20,60	20,11
1	3		21,09	20,59	20,10
11	3		21,08	20,58	20,09
21	3		21,06	20,56	20,07
1	4		21,05	20,55	20,06
11	4		21,03	20,53	20,05
21	4		21,02	20,52	20,03
1	5		21,01	20,51	20,02
11	5		20,99	20,49	20,01
21	5		20,98	20,48	19,99
1	6		20,96	20,46	19,98
11	6		20,95	20,45	19,97
21	6		20,94	20,44	19,95
1	7		20,92	20,42	19,94
11	7		20,91	20,41	19,93
21	7		20,89	20,40	19,91
1	8	21,39	20,88	20,38	19,90
11	8	21,37	20,87	20,37	19,89
21	8	21,36	20,85	20,36	19,87
1	9	21,34	20,84	20,34	19,86
11	9	21,33	20,82	20,33	19,84
21	9	21,32	20,81	20,31	19,83
1	10	21,30	20,80	20,30	19,82
11	10	21,29	20,78	20,29	19,81
21	10	21,27	20,77	20,27	19,79
1	11	21,26	20,75	20,26	19,78
11	11	21,25	20,74	20,25	19,77
21	11	21,23	20,73	20,23	19,75
1	12	21,22	20,71	20,22	19,74
11	12	21,20	20,70	20,21	19,73
21	12	21,19	20,68	20,19	19,71

TARKISTUSLÄHDEMITTAUKSESSA SAATAVA NÄYTTÄMÄ [mGy/s]

Ionisaatiokammio: NE 2571A Sarjanro: -
 Mittari: NE Farmer Dosemeter 2570/1B Sarjanro: -
 Mittarin asetukset: 0.6 cc / Low
 Tarkistuslähde: NE 2503 Sarjanro: -

20,0 °C, 101,3 kPa, 40% RH ⁹⁰Sr-lähteen puoliintumisaika 28,81 a

Päivä	Kuukausi	2003	2004	2005	2006
1	1		1,035	1,011	0,9867
11	1		1,035	1,010	0,9861
21	1		1,034	1,009	0,9854
1	2		1,033	1,009	0,9847
11	2		1,033	1,008	0,9841
21	2		1,032	1,007	0,9834
1	3		1,031	1,007	0,9829
11	3		1,031	1,006	0,9822
21	3		1,030	1,005	0,9816
1	4		1,029	1,005	0,9809
11	4		1,029	1,004	0,9802
21	4		1,028	1,003	0,9796
1	5		1,027	1,003	0,9789
11	5		1,026	1,002	0,9783
21	5		1,026	1,001	0,9777
1	6		1,025	1,001	0,9770
11	6		1,024	1,000	0,9763
21	6		1,024	0,9994	0,9757
1	7		1,023	0,9988	0,9750
11	7		1,022	0,9981	0,9744
21	7		1,022	0,9974	0,9737
1	8	1,046	1,021	0,9967	0,9730
11	8	1,045	1,020	0,9961	0,9724
21	8	1,045	1,020	0,9954	0,9718
1	9	1,044	1,019	0,9947	0,9711
11	9	1,043	1,018	0,9940	0,9704
21	9	1,042	1,018	0,9934	0,9698
1	10	1,042	1,017	0,9927	0,9691
11	10	1,041	1,016	0,9921	0,9685
21	10	1,040	1,016	0,9914	0,9679
1	11	1,040	1,015	0,9907	0,9672
11	11	1,039	1,014	0,9900	0,9665
21	11	1,038	1,013	0,9894	0,9659
1	12	1,038	1,013	0,9887	0,9652
11	12	1,037	1,012	0,9881	0,9646
21	12	1,036	1,011	0,9874	0,9640

KALIBROINTIKERTOIMEN $N_{D,w,Q}$ LASKENNASSA KÄYTETTY**KALIBROINTIKERTOIMEN KORJAUSKERROIN**

Nimellinen kiihdytysjännite ¹⁾	Kudosfantomi- suhde	Ionisaatio- suhde ²⁾	Kalibrointikertoimen korjauskerroin kammiolle NE 2571
[MV]	TPR _{20,10}	$J_{10,20}$	k_Q
2	0,514	2,208	1,005
3	0,583	1,971	1,001
4	0,628	1,842	0,997
5	0,659	1,762	0,995
6	0,683	1,705	0,993
7	0,702	1,663	0,991
8	0,716	1,633	0,989
9	0,728	1,608	0,988
10	0,737	1,590	0,986
12	0,754	1,556	0,983
14	0,768	1,530	0,980
16	0,778	1,512	0,977
18	0,787	1,496	0,974
20	0,793	1,485	0,972
22	0,799	1,475	0,970
25	0,807	1,461	0,966
26	0,810	1,456	0,965
30	0,818	1,443	0,961

¹⁾ Nimellisen kiihdytysjännitteen arvot perustuvat $J_{10,20}$ ja kiihdytysjännitteen väliseen

riippuvuuteen NACP:n mukaisesti (Nordic Association of Clinical Physics, NACP. Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV. Acta Radiol., Oncol. 19, 1980.)

²⁾ Kudosfantomisuhteen TPR_{20,10} ja annossuhteen PDD_{20,10} vällinen yhteys /IAEA TRS 398/ voidaan esittää ionisaatiosuhteen $J_{10,20}$ avulla

$$\text{TPR}_{20,10} = 1,2661/J_{10,20} - 0,0595$$

kun säteilylaatuparametrien mittauksessa käytetään ionisaatiokammiota, jonka häiriökorjauskerroin ei riipu merkittävästi mittaussyvyydestä 10cm ja 20cm. Taulukon ionisaatiosuhteen ja kudosfantomisuhteen vällinen yhteys on edellä mainitun kaavan mukainen.

NE FARMER DOSEMETER 2570 ASETUKSET KALIBROINTIMITTAUKSISSA

Chamber: .6 cc

Range:

Vuotovirtamittaus: High

$N_{D,w}$:n määrittäminen: High

Tarkistuslähdemittaus: Low

Tp:

Uncorrected (paine- ja lämpötilakorjaus tehtiin laskennallisesti)

Measuring time:

Vuotovirtamittaus: 440 s

$N_{D,w}$:n määrittäminen: 300 s

Tarkistuslähdemittaus: 300 s

Correction factor: 1

Tilaaaja

Viite

Kalibroitu laite

Ionisaatiokammio	NACP-02	Sarjano	-
Tarkistuslähde	PTW 1971	Sarjano	-
Lähteen teline	NACP-02/	Sarjano	-

Kalibrointi suoritettu, pvm.

11.3.2003

Taulukko 1. Kalibrointitulokset perusoloissa 20 °C, 101,3 kPa ja 40 % RH. Keräysjännite -250 V. Kalibroinnissa käytetyn elektronisäteilykeilan tiedot, kalibrointikertoimen N_{D,w,Q_0} määrittäolosuhteet ja kalibrointiin liittyvät tekniset tiedot ovat annettu liitteessä 3a. Elektronisäteilykeilan energiaparametri $R_{50,ion}(Q_0) = 8,07 \text{ cm}$.

Kammio: Mittari:	NACP-02 (-) MN-laboratorion elektrometri
Kalibrointikerroin veteen absorboituneelle annokselle N_{D,w,Q_0}	136,2 mGy/nC
Tarkistuslähdemittauksessa saatu virta 12.3.2003	2,505 pA
Vuotovirta	< 10 fA

Veteen absorboituneen annoksen määrittämistä varten on kalibrointikerroin $N_{D,w,Q}$ annettu säteilykeilan laatutekijän $R_{50,ion}$ funktiona liitteessä 1. Liitteen 1 kalibrointikertoimet ovat voimassa säteilylaatua vastaavalla mittaussyvyydellä Z_{ref} . Tarkistuslähdemittauksissa saatava virta ajan funktiona on annettu liitteessä 2.

24.3.2003

Tarkastaja Ilkka Jokelainen

Tämän asiakirjan julkaiseminen osittaisena tai asiakirjaan viittaaminen mainostarkoituksessa on sallittu vain Säteilyturvakeskuksen kirjallisella luvalla. Säteilyturvakeskus toimii ionisoivan säteilyn kansallisena mittanormaallilaboratoriona (laki 1334/1994 ja asetus 1515/1991) ja on jäsenenä IAEA/WHO:n SSDL-laboratorioverkossa.

STUK - SÄTEILYTURVAKESKUS STRÅLSÄKERHETSCENTRALEN RADIATION AND NUCLEAR SAFETY AUTHORITY	OSOITE Laippatie 4 00880 HELSINKI	POSTIOSOITE PL / P.O.BOX 14 FIN - 00881 HELSINKI, FINLAND	PUH. (09) 759 881 +358 9 759 881	FAX (09) 7598 8450 +358 9 7598 8450
---	---	---	--	---

Kalibrointi suoritettiin elektronisäteilykeilassa viitteen /1/ mukaisesti, käyttäen mittanormaalina sylinterimäistä ionisaatiokammiota, joka on kalibroitu ^{60}Co -gamma-säteilyllä veteen absorboituneelle annokselle. Mittanormaalin kalibroitikerroin käytössä olleelle elektronisäteilykeilalle laskettiin ^{60}Co -gamma-säteilyn kalibroitikertoimesta viitteen /1/ mukaisesti (ns. ”cross-calibration” menetelmä). Kalibroinnissa käytetyn mittanormaalin kalibrointi on suoraan jäljitettävissä Kansainvälisen paino- ja mittatoimiston (BIPM, Ranska) primaarimittanormaaleihin.

Taulukossa 1 esitetty kalibroitikerroin veteen absorboituneelle annokselle perusoloissa (20°C , $101,3\text{ kPa}$ ja $40\% \text{ RH}$), N_{D,w,Q_0} määritettiin seuraavasti:

$$N_{D,w,Q_0} = \frac{D_w}{M \cdot k_{TP} \cdot k_s} \quad (1)$$

missä D_w on perusoloissa mittanormaalilla määritetty veteen absorboitunut annos ja M on ionisaatiokammion mitattu säteilyn tuottama varaus. k_{TP} on kalibroititilanteen ja perusolojen välinen kammion ilman tiheyskorjauskorroin (kaava 5), k_s on ionisaatiovarauksen rekombinaation huomioiva korjauskorroin. Rekombinaatiokorjaus k_s määritettiin ns. kahden jännitteen menetelmällä viitteen /1/ mukaisesti käyttäen taulukossa 1 ilmoitetun jännitteen polariteettia. Varaus M määritettiin taulukossa 1 ilmoitetulla keräysjännitteellä. Lisäksi määritettiin kammion keräysjännitteen polariteetin vaikutuksen huomioiva korjauskorroin k_{pol} . Kalibrointiin liittyvät tekniset tiedot on annettu liitteessä 3a.

Liitteessä 1 esitetyt kalibroitikertoimet, $N_{D,w,Q}$ laskettiin seuraavasti:

$$N_{D,w,Q} = N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0} \quad (2)$$

missä k_{Q,Q_0} on säteilylaadusta ja ionisaatiokammion tyypistä riippuva kalibroitikertoimen korjauskorroin. Korjauskorroin k_{Q,Q_0} voidaan kirjoittaa:

$$k_{Q,Q_0} = \frac{(s_{w,air})_Q}{(s_{w,air})_{Q_0}} \frac{p_{Q_0}}{p_Q} \quad (3)$$

missä $(s_{w,air})_Q$ on keskimääräinen veden ja ilman massajarrutuskykyjen suhde elektroneille kyseisellä säteilyspektrillä ja p_Q on ionisaatiokammion häiriökorjauskorroin kyseisellä säteilyspektrillä. Alaindeksi Q viittaa tarkasteltavaan säteilylaatuun mittaustilanteessa ja alaindeksi Q_0 säteilylaatuun kalibroinnissa. Häiriökorjauskorroin p_Q huomioi kammion ilmaontelon, kammion seinämän, vesisuojan sekä kammion keskielektrodin sironta- ja absorptio-ominaisuuksien vaikutuksen kammion vasteeseen.

Taulukoiden käyttöön liittyvistä teknisistä syistä, on viitteessä 1 korjauskerroin k_{Q,Q_0} esitetty kahden korjauskertoimen suhteena seuraavasti:

$$k_{Q,Q_0} = \frac{k_{Q,Q_{int}}}{k_{Q_0,Q_{int}}} \quad (4)$$

missä $k_{Q,Q_{int}}$ on kalibroitikertoimen korjauskerroin siirryttäessä säteilylaadusta Q_{int} säteilylaatuun Q ja $k_{Q_0,Q_{int}}$ on vastaava kerroin siirryttäessä säteilylaadusta Q_{int} kalibroinnissa käytettyyn säteilylaatuun Q_0 . Säteilylaadulla Q_{int} ei ole kalibrointiin ja mittauksiin liittyvää merkitystä, vaan se on ainoastaan taulukoitujen arvojen esitystapaan liittyvä tekijä /1/. Kalibroitikertoimen $N_{D,w,Q}$ (Kaava 2) laskennassa tarvittavat k_{Q,Q_0} arvot on määritetty Kaavan 4 avulla. Kertoimien $k_{Q,Q_{int}}$, $k_{Q_0,Q_{int}}$ ja k_{Q,Q_0} arvot on esitetty liitteessä 3b.

Veteen absorboitunut annos vertailusyvyydellä saadaan, kun ionisaatiokammion vesifantomissa kyseisellä syvyydellä mitattu varaus kerrotaan säteilylaatua vastaavalla kammion kalibroitikertoimella $N_{D,w,Q}$ (Liite 1). Kalibroitikertoimen $N_{D,w,Q}$ käyttö edellyttää, että mittausgeometria on viitteen /1/ mukainen ja että elektronisäteilykeilan laatutekijä $R_{50,ion}$ määritetään ja kammio asetetaan mittaussyvyydelle Z_{ref} viitteen /1/ mukaisesti.

Koska kalibroitikerroin $N_{D,w,Q}$ on annettu perusoloissa (20 °C, 101,3 kPa), on mitattu varaus tai mittarin näyttämä kerrottava lisäksi lämpötilan ja paineen korjauskertoimella k_{Tp} :

$$k_{Tp} = \frac{273,2 + T}{293,2} \cdot \frac{101,3}{p} \quad (5)$$

missä T on kammion sisältämän ilman lämpötila (°C) ja p on sen paine (kPa). Lisäksi mitatun varauksen rekombinaatiokorjaus tulee määrittää ns. ”kahden jännitteen” menetelmällä käyttäen samoja keräysjännitteen arvoja kuin tässä kalibroinnissa (Liite 3a.).

Taulukossa 1 annetun kalibroitikertoimen N_{D,w,Q_0} kokonaisepävarmuus varmuuskertoimella 2 on noin 1,4 % ilmoitettuna viitteen /2/ mukaisesti.

Säteilyturvakeskus on edellisen kerran kalibroinut kammion pp.kk.vvvv (MN/nn/vv). Kammio suositetaan kalibroitavaksi uudelleen viimeistään 11.3.2006 tai, jos tarkistuslähdemittauksessa saatu virta tai näyttämä poikkeaa liitteissä 2 esitetystä arvosta yli 1 %.

VIITTEET

- /1/ IAEA, International Atomic Energy Agency. *Absorbed dose determination in External Beam Radiotherapy. An international code of practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water*. Technical reports series no. 398, 2000.
- /2/ CIPM, Comite International des Poids et Mesures, Recommendation 1 CI-1981. *Assignment of experimental uncertainties*. 1981.

KALIBROINTIKERROIN $N_{D,w,Q}$ [MGy/C] ELEKTRONISÄTEILYLLE

Ionisaatiokammio:
Mittari:

NACP-02
MN-laitteisto

Sarjanro: -

20,0 °C, 101,3 kPa, 40% RH

Säteilyn laatutekijä	Mittaussyvyys	Kalibroitikerroin
$R_{50, ion}^{1)}$ [cm]	$Z_{ref}^{1)}$ [cm]	$N_{D,w,Q}$ [MGy/C]
1,00	0,48	147,4
1,50	0,79	145,9
2,00	1,10	144,6
2,50	1,41	143,4
3,00	1,72	142,4
3,50	2,02	141,4
4,00	2,33	140,6
4,50	2,64	139,8
5,00	2,95	139,2
5,50	3,26	138,6
6,00	3,57	138,0
7,00	4,19	137,1
8,00	4,80	136,3
10,00	6,04	134,9
13,00	7,94	132,9
16,00	9,84	131,0
20,00	12,39	129,8

$$N_{D,w,Q^0} = 136,2 \text{ MGy/C}$$

¹⁾ $R_{50, ion}$ on 50 prosentin ionisaatiota vastaava syvyys. $R_{50, ion}$ ja Z_{ref} ovat IAEA:n TRS 398 mukaiset /1/.

Allekirjoitus

TARKISTUSLÄHDEMITTAUKSESSA SAATAVA NÄYTTÄMÄ [pA]

Ionisaatiokammio: NACP-02 Sarjanro: -
 Mittari: MN-laitteisto
 Tarkistuslähde: PTW 1971 Sarjanro: -
 Lähteen teline: NACP-02/ Sarjanro: -

20,0 °C, 101,3 kPa, 40% RH ⁹⁰Sr-lähteen puoliintumisaika 28,81 a

Päivä	Kuukausi	2003	2004	2005	2006
1	1		2,457	2,398	2,341
11	1		2,455	2,397	2,340
21	1		2,453	2,395	2,338
1	2		2,452	2,393	2,336
11	2		2,450	2,392	2,335
21	2		2,448	2,390	2,333
1	3		2,447	2,389	2,332
11	3		2,445	2,387	2,330
21	3	2,503	2,444	2,386	2,329
1	4	2,502	2,442	2,384	2,327
11	4	2,500	2,440	2,382	2,326
21	4	2,498	2,439	2,381	2,324
1	5	2,497	2,437	2,379	2,323
11	5	2,495	2,435	2,378	2,321
21	5	2,493	2,434	2,376	2,320
1	6	2,491	2,432	2,374	2,318
11	6	2,490	2,431	2,373	2,316
21	6	2,488	2,429	2,371	2,315
1	7	2,487	2,427	2,370	2,313
11	7	2,485	2,426	2,368	2,312
21	7	2,483	2,424	2,367	2,310
1	8	2,481	2,422	2,365	2,309
11	8	2,480	2,421	2,363	2,307
21	8	2,478	2,419	2,362	2,306
1	9	2,476	2,417	2,360	2,304
11	9	2,475	2,416	2,358	2,302
21	9	2,473	2,414	2,357	2,301
1	10	2,472	2,413	2,355	2,299
11	10	2,470	2,411	2,354	2,298
21	10	2,468	2,409	2,352	2,296
1	11	2,466	2,408	2,351	2,295
11	11	2,465	2,406	2,349	2,293
21	11	2,463	2,405	2,347	2,292
1	12	2,462	2,403	2,346	2,290
11	12	2,460	2,401	2,344	2,289
21	12	2,458	2,400	2,343	2,287

Allekirjoitus

KALIBROINTIIN LIITTYVÄT TEKNISET TIEDOT**Kalibroinnissa käytetyn
elektronisäteilykeilan tiedot:**

Kiihdyttimen tyyppi:	Varian 2100 C/D
Kiihdyttimen sarjanumero:	-
Nimellisenergia:	20 MeV
Nimellinen annosnopeus:	300 MU/min
Fantomin pinta-fokus-etäisyys:	100 cm
Kenttäkoko fantomin pinnassa:	20 cm * 20 cm
$R_{50,ion}(Q_0)^{1)}$	8,07 cm
Mittausvyvyys $Z_{ref}^{1)}$	4,85 cm

Ionisaatiokammion tiedot:

Ionisaatiokammion tyyppi	NACP-02
Kammion vertailupiste	Kammion ikkunaelektrodin sisäpinta 0,6 mm ulkopinnasta
Polariteetin korjauskerroin k_{pol} :	0,998 (Ei ole huomioitu kalibrointikertoimessa)
Rekombinaation korjauskerroin, k_s :	1,014
Keräysjännite U_1 :	250 V
Keräysjännite U_2 :	50 V

¹⁾ $R_{50,ion}$ on 50 prosentin ionisaatiota vastaava syvyys. $R_{50,ion}$ ja Z_{ref} ovat IAEA:n TRS 398 mukaiset /1/.

KALIBROINTIKERTOIMEN $N_{D,w,Q}$ LASKENNASSA KÄYTETTYKORJAUSKERROIN k_{Q,Q_0}

Säteilyn laatutekijä	Mittaussyvyys	Laskentaparametri	Kalibroitokertoimen korjauskerroin
$R_{50,ion}^{1)}$ [cm]	$Z_{ref}^{1)}$ [cm]	$k_{Q,Q_{int}}$	k_{Q,Q_0}
1,00	0,48	1,077	1,082
1,50	0,79	1,066	1,071
2,00	1,10	1,057	1,061
2,50	1,41	1,048	1,053
3,00	1,72	1,040	1,045
3,50	2,02	1,034	1,038
4,00	2,33	1,027	1,032
4,50	2,64	1,022	1,027
5,00	2,95	1,017	1,022
5,50	3,26	1,013	1,017
6,00	3,57	1,009	1,013
7,00	4,19	1,002	1,006
8,00	4,80	0,996	1,000
10,00	6,04	0,986	0,990
13,00	7,94	0,971	0,976
16,00	9,84	0,957	0,962
20,00	12,39	0,948	0,953

Viitteen /1/ mukaiset laskentaparametrit:

$$R_{50}(Q_{int}) = 7,50 \text{ cm}$$

$$k_{Q_0,Q_{int}} = 0,995$$

¹⁾ $R_{50,ion}$ on 50 prosentin ionisaatiota vastaava syvyys. $R_{50,ion}$ ja Z_{ref} ovat IAEA:n TRS 398 mukaiset /1/.