

TÄMÄN RAPORTIN ON LAATINUT

Ilkka Jokelainen

**TULOSAINEISTON MITTAUKSIIN
OVAT OSALLISTUNEET**

Ilkka Jokelainen

Petri Sipilä

ISBN 978-952-309-499-4 (pdf)

ISSN 2243-1896

JOKELAINEN Iikka. Annosmääritykset sädehoidon lineaarikiihdyttimien pienissä fotonisäteilykentissä. Terveystieteiden tutkimuskeskus. STUK-B 272, Helsinki 2021, 21 s.

AVAINSANAT: säteilyn käyttö, terveydenhuolto, lineaarikiihdytin, fotonisäteily, dosimetria, pienet säteilykentät, sädehoito

Tiivistelmä

Säteilyturvakeskus verifioi vuosina 2015–2019 annosmäärityksin sädehoidossa käytettävien lineaarikiihdyttimien annossuunnittelujärjestelmien pienten fotonisäteilykenttien potilasannoslaskentaa. Veteen absorboituneen annoksen määrityksiä tehtiin yhteensä 1500 kpl viranomaistarkastusten yhteydessä 13 suomalaisen sädehoitoklinikan 45 lineaarikiihdyttimen eri kokoisissa tasoitetuissa ja tasoittamattomissa fotonisäteilykeiloissa. Määritykset perustuivat ionisaatiomittauksiin käyttäen ilmaisimina ionisaatiokammioita ja synteettistä timanttia. Sairaalan annossuunnittelujärjestelmällä lasketun ja STUKin mittauksin määrittämän annoksen ero oli valtaosassa sairaaloita ± 3 %:n sisällä. Yhdessä sairaalassa mitattiin saman tarkastuksen aikana kahden eri kiihdyttimen molemmilla fotonienenergioilla (6 MV ja 15 MV) pienimmän kenttäkoon (2 cm x 2 cm) annoseroksi yli 4 %. Suurimmillaan ero oli sairaalan vanhimmalla kiihdyttimellä 6 MV keilassa 7,4 %.

JOKELAINEN Iikka. Dose determinations in small fields of radiotherapy linear accelerators. Supervision report in health care. STUK-B 272, Helsinki 2021, 21 pp.

KEYWORDS: radiation practise, health care, linear accelerator, photon radiation, dosimetry, small radiation fields, radiation therapy

Abstract

Radiation and Nuclear Safety Authority verified the small field patient dose calculations of the dose planning systems used in radiotherapy during the period 2015–2019. A total of 1500 absorbed dose to water determinations performed as part of authority inspections of 45 linear accelerators in 13 Finnish radiotherapy centers photon radiation beams with different field sizes. Results include absorbed dose determinations in conventional filtered beams and in beams without flattening filter.

Determinations are based on ionization measurements using ionization chambers and synthetic diamond as the detectors. In the greater part of the hospitals the difference between doses calculated with dose planning system by hospital and determined by measurements of STUK did not exceed $\pm 3\%$. In one hospital the difference of doses determined for smallest field size (2 cm x 2 cm) exceeded 4 % with both photon energies (6 MV ja 15 MV) of hospitals two accelerators during the same inspection. The biggest difference up to 7,4 % was found with the hospital oldest accelerator in 6 MV beam.



Sisällys

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	6
2 MENETELMÄT	7
3 TULOKSET	13
3.1 SÄDEHOITOKIIHDYTTIMIEN FOTONIKEILOJEN PROFIILIMITTAUKSET	13
3.2 TIMANTTI-ILMAISIMEN JA PINPOINT-IONISAATIOKAMMION KALIBROINTI SÄDEHOITOKIIHDYTTIMIEN FOTONIKEILOISSA	15
3.3 ANNOSMÄÄRITYKSET SÄDEHOITOKIIHDYTTIMIEN FOTONIKEILOISSA	17
4 JOHTOPÄÄTÖKSET	18
5 LÄHDELUETTELO	20

1 Johdanto

Ionisoivalla säteilyllä toteutettu sädehoito on Suomessa säteilylaissa (859/2018, /1/) määritellyn turvallisuusluvan edellyttämää toimintaa. Sädehoitotoiminnan säteilyturvallisuusvalvonnan toimeenpanoon kuuluvista viranomaistehtävistä huolehtii Suomessa säteilylain ja valtioneuvoston asetuksen (1034/2018, /2/) mukaisesti STUK.

Säteilyturvallisuusvalvonnan pääpaino sädehoitotoiminnassa on toiminnanharjoittajan toimitiloissa, sädehoitoklinikalla, paikan päällä suoritettavissa sädehoitolaitteiden käyttöönotto- ja määräaikaistarkastuksissa, joilla varmennetaan säteilytoiminnan turvallisuudesta ja turvallisuusluvassa annettujen ehtojen noudattamisesta, sekä verifioidaan STUKin antaman säteilylähteiden käytönaikaista säteilyturvallisuutta koskevan määräyksen (S/5/2019, /3/) toteutumista. Vastuu sädehoitolaitteiden (ionisoivaa säteilyä sähköisesti tuottavat laitteet ja radionuklidit) turvallisesta käytöstä ja hoitohuonetta ympäröivien tilojen säteilysuojauksesta on toiminnanharjoittajalla. Sairaalan on osoitettava sädehoitolaitteiden käytönaikaisten hyväksyttävyyksivaatimusten toteutuminen sairaalan laadunvarmistusohjelman sädehoitolaitteen mekaanisiin ominaisuuksiin ja säteilyntuottoon kohdistuvien määrävälein suoritettavien laadunvarmistusmittauksin.

Suomen sädehoitoklinikoissa tavanomaisen ulkoisen sädehoidon lineaarikiihdyttimien hoitokeilojen dosimetria perustuu kansainvälisesti laajalti käytettyyn IAEAn julkaisemaan annosmittausprotokollaan TRS398 /4/. Protokolla perustuu veteen absorboituneen annoksen määrityksiin mittauksin vesifantomissa referenssigeometriassa (etäisyys lähteestä veden pintaan 100 cm, syvyys 10 cm kenttäkoko 10 cm x 10 cm) primäärimitannormaaleihin jäljitettävästi kalibroiduilla ionisaatiokammioilla. Samaan metodiin pohjautuu pitkälti myös STUKin viranomaisvalvontana tekemät sädehoidon lineaarikiihdyttimien määräaikaisten ja käyttöönottotarkastukset.

Ennen ulkoisen sädehoidon lineaarikiihdyttimien käyttöönottoa potilashoitoihin, joko uuden kiihdyttimen asennuksen (vastaanottomittaukset), annoslaskenta-algoritmin päivityksen (algoritmin testaus) tai kiihdyttimen säteilyntuottoon oleellisesti vaikuttavan huollon (tarvittavat laadunvalvontamittaukset) tapauksessa, sairaala tuottaa vesifantomissa tehtävin annosmittauksin hoitokeilaa karakterisoivan syöttödatan annossuunnittelujärjestelmän konfigurointia varten tapauskohtaisen harkinnan perusteella tarvittavassa laajuudessa. Sairaala pyrkii annosmittauksissaan (pisteannos) alle 2 % mittauserävarmuuteen, jotta annossuunnittelujärjestelmällä hoitokohteeseen lasketun potilasannoksen (tilavuusannos) epävarmuus ei ylittäisi kansainvälisesti suositeltua 5 % /4/.

STUKin tekemissä tarkastuksissa sädehoidon käyttötilaa ympäröivien tilojen säteilysuojaus ja käyttötilan turvalaitteiden toiminta varmennetaan mittauksin ja testein. Tarkastusten yhteydessä STUK myös valvoo pistokoemaisesti sairaaloiden annossuunnittelujärjestelmien syöttödatan oikeellisuutta vertaamalla, hoitolaitteen fotonikeilasta mitattua annosta samassa geometriassa sairaalan annossuunnittelujärjestelmän laskemaan annokseen. Annosmittaukset tehdään STUKin mittauskalustolla vesifantomissa. Lisäksi sairaalan annosmittauksissaan käyttämän dosimetriakaluston toiminta ja henkilökunnan dosimetrinen osaaminen varmennetaan kansainväliseen annosmittausprotokollaan (IAEA TRS398, /5/) perustuvien referenssigeometriassa tehtävin STUKin ja sairaalan kaluston välisin annosmittausvertailuin.

Käyttöönottotarkastus tehdään ennen potilashoitojen aloittamista uuden sädehoitolaitteen käyttöönoton, tai säteilysuojusten merkittävän muutoksen yhteydessä. Hoitokäytössä oleville sädehoidon hoitolaitteille, sädehoitokiihdyttimille ja jälkilataushoitolaitteille, määräaikaistarkastus tehdään kahden vuoden välein.

STUKin tekemän tarkastuksen yhteydessä vesifantomissa referenssigeometriassa tehtävän STUKin ja sairaalan välisen dosimetrikalustojen annosmittausvertailun poikkeaman hyväksyttävyyssrajaksi fotonikeiloille on asetettu 1 %. Annossuunnittelujärjestelmällä lasketun ja mitatun annoksen hyväksyttävyyssrajaksi on asetettu avokentissä veteen absorboituneelle pisteannokselle 3 % (50 cm x 50 cm x 50 cm vesifantomi) ja vesiekvivalentille materiaalille suunnittelukohteen tilavuuteen lasketulle annokselle 5 % (esim. potilaan lantioaluetta kuvaava vesifantomi) /3/. Annosmittauksissa on perinteisesti fotonikeiloissa käytetty Farmer-tyyppisiä sylinterimäisiä ionisaatiokammioita, joiden efektiivinen keräystilavuus on 6 mm x 23 mm. Tämä on käytännössä rajannut niillä mitattavien kenttien koon alarajaksi 5 cm x 5 cm. Sama annossuunnittelun tarkkuus tulisi toteutua myös käytettäessä kenttäkooltaan pienempiä fotonikeiloja.

Sädehoitomenetelmien kehittyessä on kooltaan pieniin ja muodoltaan yksilöllisempiin fotonihoitokenttiin perustuvien sädehoitotekniikoiden (IMRT ja VMAT) käyttö yleistynyt. Tämä luo tarpeen selvittää ja varmistaa viranomaisvalvonnassa myös kenttäkooltaan pienten fotonikeilojen (alle 5 cm x 5 cm) dosimetriaa. Tätä on tehty verifioimalla tarkastuksilla sairaaloiden annossuunnittelujärjestelmien syöttödatan oikeellisuutta annosmittauksin kenttäkooltaan entistä pienemmissä fotonikeiloissa käyttäen detektoreina pienikokoista ionisaatiokammioita, sekä timantti-ilmiasinta.

2 Menetelmät

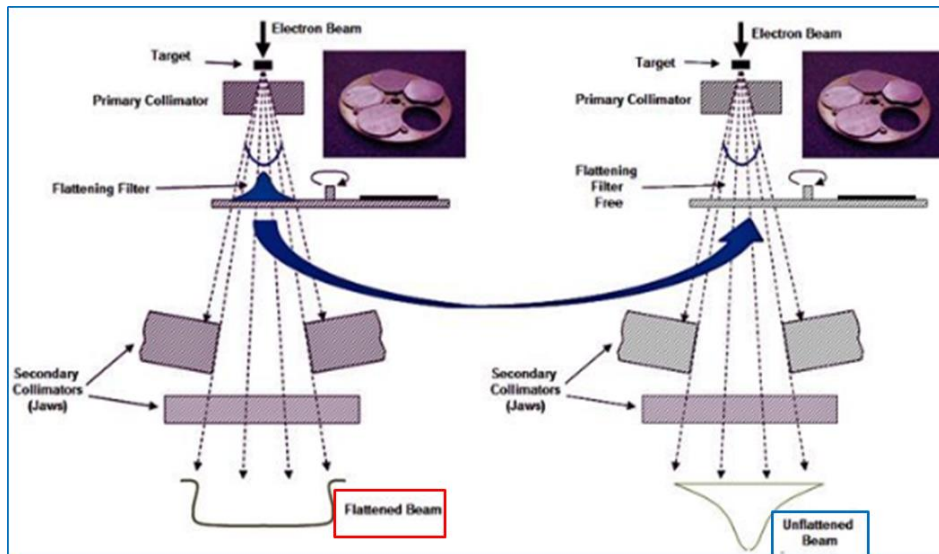
STUK verifioi sädehoidon lineaarikiihdyttimien määräaikais- ja käyttöönottotarkastusten yhteydessä sairaaloiden annossuunnittelujärjestelmien syöttödatan oikeellisuutta. Tarkastuksessa sairaalan annossuunnittelujärjestelmällä fotonisäteilykeilojen avokentille lasketut veteen absorboituneen annoksen pistearvot määritettiin pistokoemaisesti mittauksin sairaalan vesifantomissa (50 cm x 50 cm x 50 cm). Annossuunnitelmat laskettiin 2,0 Gy:n pisteannoksille 10 cm syvyyteen eri kokoisille symmetrisille neliökentille.

Tavanomaisessa tarkastuksessa annosmittaukset tehdään referenssikenttäkoon (10 cm x 10 cm) lisäksi muutamassa suuremmissa symmetrisessä (esim. 20 cm x 20 cm, 30 cm x 30 cm) ja pienemmässä epäsymmetrisessä (esim. 5 cm x 10 cm tai 7 cm x 14 cm) säteilykentässä. Tätä selvitystä varten annosmittauksia tehtiin tavanomaisten kenttäkokojen lisäksi myös pienemmissä neliökentissä aina 2 cm x 2 cm kenttäkokoon asti.

Referenssikenttäkokoa pienemmissä säteilykentissä (5 cm x 5 cm kenttäkoko pois lukien) primäärikeila on ensin rajattu perinteisillä alemmilla keilarajaimilla (Jaws) kokoon 10 cm x 10 cm ja lopullinen kenttäkoko toteutettu näiden alapuolisilla moniliuskakollimaattoreilla (MLC, multileaf collimators). MLC-rajaimet mahdollistavat IMRT- ja VMAT-sädehoidoissa hoitokentän epäsymmetrisen rajauksen. Varianin kiihdyttimissä alemmat keilarajaimet löytyvät sekä x- että y-suunnissa, mutta Elektran kiihdyttimissä hoitokeila rajataan vain yhdestä suunnasta alemmilla keilarajaimilla ja toisesta suunnasta rajataan ainoastaan MLC:llä.

Yhteensä annosmittauksia tehtiin vuosien 2015–2019 aikana 1500 kpl viranomaistarkastusten yhteydessä 13 suomalaisen sädehoitoklinikan 45 lineaarikiihdyttimen eri kokoisissa tasoitetuissa ja tasoittamattomissa fotonisäteilykeiloissa.

Annosmäärittämiä tehtiin sekä tasoitetuissa (WFF-keilat, with flattening filter), että tasoittamattomissa (FFF-keilat, flattening filter free) kollimoiduissa fotonisäteilykeiloissa (kuva 1).



Kuva 1. Tasoitettu- ja tasoittamaton fotonisäteilykeila.

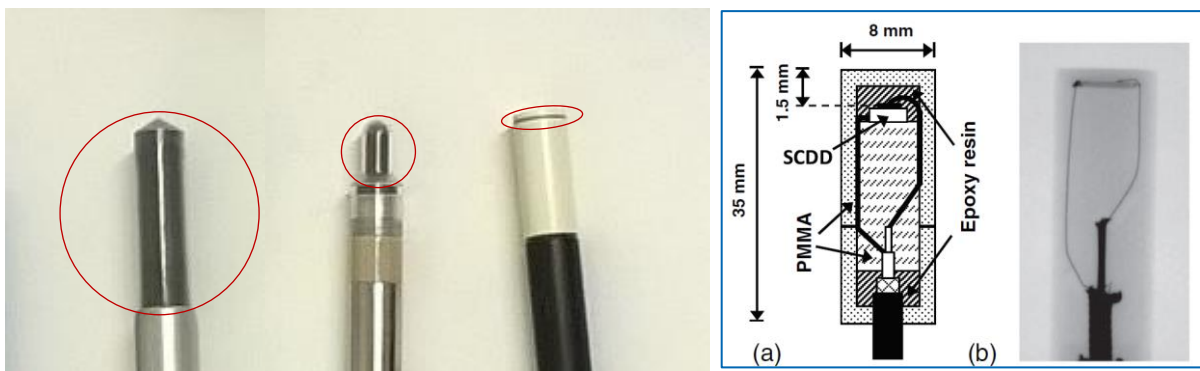
Veteen absorboituneen annoksen määritykset tehtiin säteilyilmaisimiin ja elektrometriin perustuvien ionisaatiomittauksin. Ilmaisimina käytettiin ulkoisen sädehoidon veteen absorboituneen annoksen määrityksissä yleisesti käytössä olevaa Farmer-tyyppistä ionisaatiokammiota, sekä pienemmällä kenttäkoolla PinPoint-tyyppistä ionisaatiokammiota ja timantti-ilmaisinta (kuva 2, taulukko 1). Ilmaisimilla kerätty ionisaatiosignaali mitattiin varausmoodissa sädehoidon annosmäärittämiin soveltuvalla PTW UNIDOS E elektrometrillä.

Taulukko 2. Veteen absorboituneen annoksen määrityksissä käytetyt ilmaisimet, sekä sairaaloissa suhteellisissa profiilimittauksissa yleisesti käytetty ionisaatiokammio (Semiflex).

Ilmaisim	Tyyppi	Sno.	Efektiivinen koko	
			Tilavuus	Pinta-ala
Ionisaatiokammio	PTW30013 (Farmer)	7264	0,6 cm ³	23 mm x 6 mm
Ionisaatiokammio	PTW 31010 (Semiflex)		0,125 cm ³	6,5 mm x 5,5 mm
Ionisaatiokammio	PTW31015 (PinPoint)	370	0,03 cm ³	5 mm x 3 mm
Timantti	PTW60019	122308	0,004 mm ³	4 mm ²

Farmer-ionisaatiokammio on kalibroitu absorboituneelle annokselle veteen STUKin SSDL-laboratorion ⁶⁰Co-keilassa, josta on jäljitettävyyden primäärimittanormaaleihin (BIPM, Ranska). PinPoint-ionisaatiokammio ja timantti-ilmaisim kalibroitiin tarkastuksen yhteydessä kaikille kussakin sairaalassa mitattaville fotonisäteilylaaduille. Kalibrionti tehtiin sairaalan fotonikeilassa veteen absorboituneelle annokselle Farmer-ionisaatiokammiota vasten. Elektrometrin herkkyys on tarkastettu MIKESSä kalibroitua STUKin SSDL-laboratorion vakiovirtageneraattoria (Keithley 263 Sno. 426240) vasten.

PinPoint-kammion ja timantti-ilmaisimen kalibroinnit tehtiin sairaalan keilankartoittimen vesifantomissa (50 cm x 50 cm x 50 cm) referenssigeometriassa (SSD = 100 cm, kenttäkoko 10 cm x 10 cm, syvyys 10 cm) "yksi ilmaisim keilassa" -menetelmällä (substitution method, IAEA TRS469, /7/), jossa kalibroitavat ilmaisimet ja referenssi-ilmaisim (Farmer-kammio) asemoitiin vuoron perään 10 cm:n syvyydelle referenssipisteensä mukaan ionisaatiovirran mittausta varten. Ionisaatiokammiot asemoitiin vaakatasoon keskiakseli kohtisuoraan säteilykeilaan nähden ja timantti-ilmaisim pystyyn keskiakseli säteilykeilan suuntaisesti. Syvyysasemoinnissa ionisaatiokammioiden referenssipisteenä käytettiin IAEA TRS398 annosmittausprotokollan /5/ mukaisesti kammion keskiakselia, kun taas timantti-ilmaisim suhteellisena ilmaisimena asemoitiin efektiivisen pisteensä mukaan (1,0 mm ilmaisimen etupinnasta ilmaisimen keskiakselilla, kuva 2).

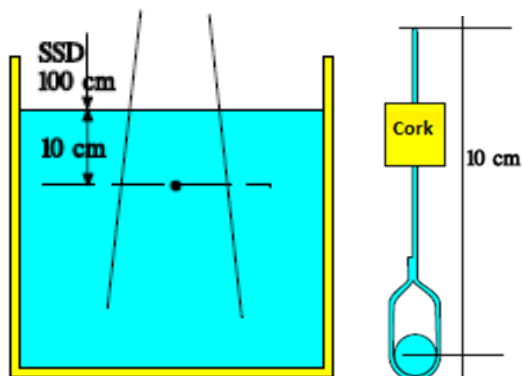


Kuva 2. Vasemmalla Farmer- ja PinPoint-tyyppinen ionisaatiokammio, sekä timantti-ilmaisim (vasemmalta lukien). Oikealla SCDD (synthetic single crystal diamond detector) timantti-ilmaisimen rakenne (a) ja röntgenkuva (b), PTW60019 ilmaisimen prototyyppi.

Ennen vesifantomissa tehtäviä annosmäärytyksiä tarkistettiin kiihdyttimen valokentän ja asettelulasereiden yhtenevyys fotonikeilan säteilyisosentrin kanssa. Tarkistus tehtiin kuvaamalla 6 MV tasoitettun fotonikeilan mekaaniseen isosentriin asemoitu metallinen osoitin ilmassa useasta eri kanturikulmasta säteilytetyillä kentillä (1 cm x 1 cm) osoittimen ympärille kehärenkaaseen kiinnitetylle Gafchromic-filmiliuskalle (3 cm x 25 cm, RTQA).

Ilmaisinten asemoinneissa vesifantomiin säteilykeilan keskiakselille käytettiin kiihdyttimen valokenttää ja asettelulasereita, sekä kartoittimen siirtomekanismia. Vesifantomi (veden pinta) asemoitiin 100 cm:n etäisyydelle kiihdyttimen kohtiosta (SSD = 100 cm) hoitolaitteen etuosoinviitan avulla. Farmer-ionisaatiokammion syvyysasemoinneissa käytettiin STUK-valmisteista kammiotyyppikohtaista syvyysmittatikkua (kuva 3), joka vie kammion keskiakselinsa suhteen 10 cm:n syvyydelle. Timantti-ilmaisim ja PinPoint-ionisaatiokammio asemoitiin efektiivisen pisteensä (timanti-ilmaisimen merkkiviiva) ja keskiakselinsa (PinPoint-kammion kärki) suhteen silmämääräisesti fantomin pintaan, josta siirros 10 cm:n syvyydelle tehtiin kartoittimen siirtomekanismin avulla.

Fotonikeila



Kuva 3. Farmer-ionisaatiokammion asettelu vesifantomiin 10 cm:n syvyydelle mittaussyvyydelle mittatikun avulla.

Fotonikeilojen kentän profiilien tasaisuudet tarkastettiin tarkastusten yhteydessä määritetystä, tai sairaalan aiemmin referenssigeometriassa mittaamasta lateraalitason profiilidatasta. Profiilimittaukset tehtiin sairaaloiden keilankartoittimilla käyttäen ilmaisimena pääosin PTW Semiflex -ionisaatiokammiota (taulukko 1).

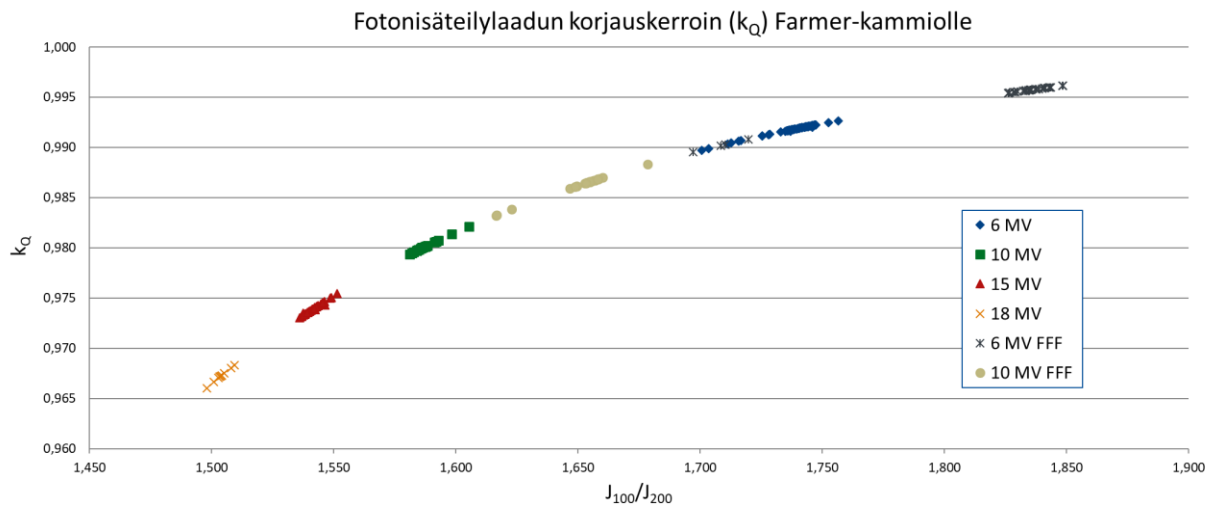
Profiilimittauksissa ionisaatiokammio voidaan asemoida keilaan, joko vaaka-asentoon keskiakseli keilaan nähden kohtisuorassa, tai pystyyn keskiakseli keilan suuntaisesti. Kammion paikkatarkkuus on parhaimmillaan kammion lyhyemmän dimension suhteen. Tästä syystä, jotta kammio ei keskiarvoistaisi liikaa keilan yli mitattua profiilisignaalia, tulee vaakatasoon asemoidun kammion keskiakselin olla molemmissa skannaussuunnissa kohtisuorassa kartoittimen etenemissuuntaan nähden. Pystyyn asemoidulla kammiolla keilaprofiilien mittaus on skannaussuunnasta riippumaton.

Veteen absorboituneen annoksen ($D_{w,Q}$) määrittämisessä Farmer-ionisaatiokammiolla noudatettiin IAEA:n annosmittausprotokollien TRS398 ja TRS483 /5, 6/ mukaista laskentaa.

$$D_{w,Q} = M_Q * N_{D,w,Q_0} * k_Q * k_{T,p} * k_{rec} * k_{elec} * k_{vol} \quad (1)$$

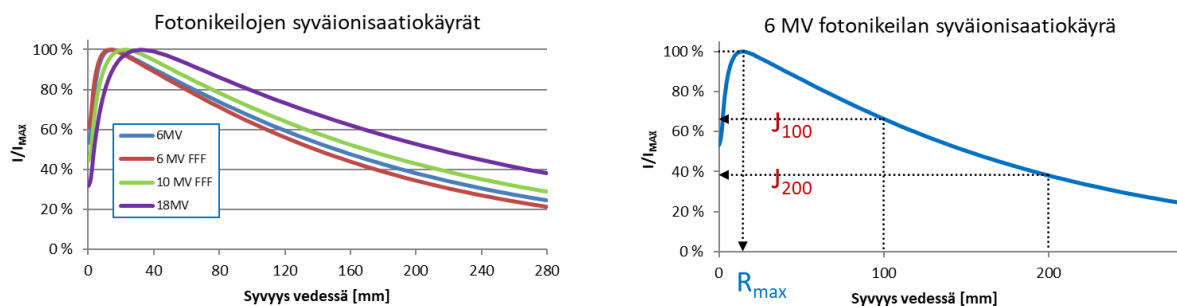
missä M_Q sairaalan fotonikeilassa mitattu signaali, N_{D,w,Q_0} Farmer-kammion kalibrintikerroin veteen absorboituneelle annokselle ^{60}Co -keilassa, k_Q säteilylaadun korjauskerroin siirryttäessä kalibroinnissa käytetystä säteilylaadusta lineaarikiihdyttimen säteilylaatuun, $k_{T,p}$ paine/lämpötila - korjauskerroin referenssiolosuhteisiin, k_{rec} rekombinaatiokorjauskerroin, k_{elec} elektrometrin herkkyyskorjauskerroin ja k_{vol} ionisaatiokammion tilavuuskorjauskerroin.

Farmer-ionisaatiokammion kalibrintikertoimen muunnoksessa ^{60}Co -keilasta N_{D,w,Q_0} (SSDL-laboratorion kalibrintilaatu) lineaarikiihdyttimien fotonien energiaihin käytettiin IAEA TRS398:ssa /5/ fotonikeilan säteilylaatuparametrin funktiona esitettyjä säteilylaadun korjauskertoimia, k_Q (kuva 4).



Kuva 4. Farmer ionisaatiokammion kalibrointikertoimien määrityksissä käytetyt säteilylaadun korjauskertoimet k_Q fotonikeilan säteilylaatuparametrin (J_{100}/J_{200}) funktiona.

Säteilylaatuparametrit J_{100}/J_{200} (10 cm:n ja 20 cm:n syvyyksillä mitattujen ionisaatiostaalien suhde, IAEA TRS398, /5/) laskettiin sairaalan keilankartoittimella määritetyltä syväionisaatiokäyrältä (suhteellinen ionisaatiomittaus), joko tarkastuksen aluksi, tai sairaalan aiemmin mittaamasta (maksimissaan 2 kk vanhasta) viimeisimmästä laadunvarmistusdatasta (kuva 5).



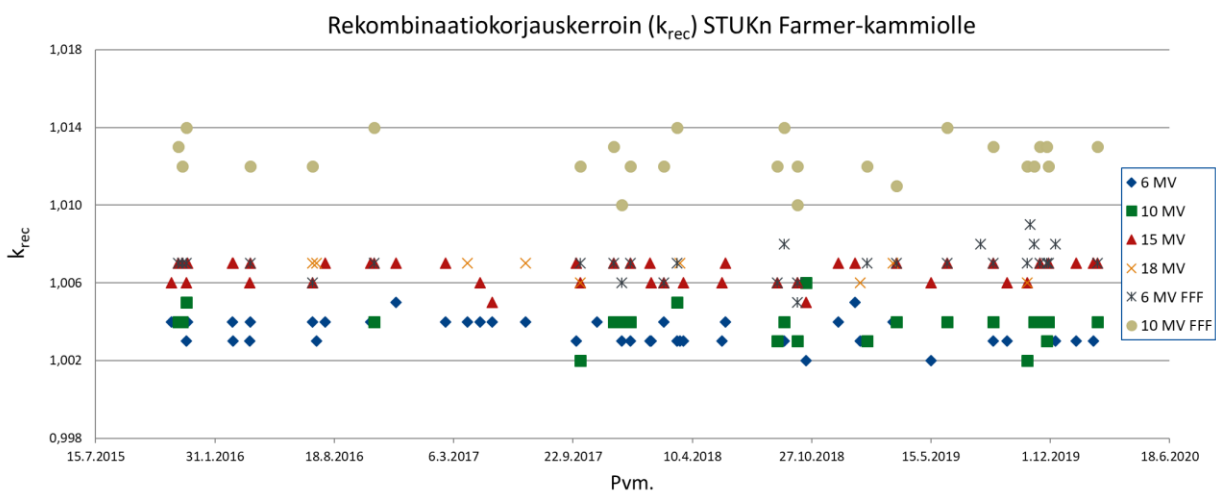
Kuva 5. Fotonisäteilykeilojen (tasoittamaton - FFF) syväionisaatiokäyrät (vasemmalla), sekä keilan energiaa kuvaavat parametrit ionisaatiomaksimin syvyys, R_{MAX} , ja ionisaatioprosentti 10 cm:n ja 20 cm:n syvyydellä, J_{100} ja J_{200} , (oikealla).

Annosmäärityksissä käytetyt ionisaatiokammiot ovat ympäröivälle ilmanpaineelle ja lämpötilalle avoimia, mikä vaikuttaa kammioon ilmatilan massaun ja sitä kautta määritettävään annokseen. Referenssikammion (Farmer-kammio) kalibrointikerroin on ^{60}Co -kalibroinnissa esitetty referenssiolosuhteissa ($T=20\text{ °C}$, $p=101,3\text{ kPa}$). Tästä syystä sairaalassa kalibroitavalla kammioilla ja referenssikammioilla mitatut ionisaatiot on korjattava paine/lämpötila -kertoimella (k_{TP}) vastaamaan referenssiolosuhteita. Vallitseva ilmanpaine ja fantomin veden lämpötila määritettiin STUKin mittalaitteilla.

Timantti-ilmaisimen lämpötilariippuvuudeksi on raportoitu 0,2 % välillä 18–40 °C /11/. Fotonikeiloissa tehdyissä mittauksissa lämpötila vaihteli välillä 21–23 °C, jolloin timantti-ilmaisimen lämpötilariippuvuus oletettiin merkityksettömäksi.

Kaikilla ilmaisimilla mitattu signaali korjattiin elektrometrin herkkyysskorjauskertoimella k_{elec} .

Ionisaatiokammionmittauksissa lineaarikiihdyttimen säteilykeilan pulssimaisesta luonteesta johtuva korkea annos pulssia kohden ja pulssitaajuus (annosnopeus) aiheuttavat varauksenkuljettajien rekombinaatiota ionisaatiokammion keräystilavuudessa laskien mitattua ionisaatiovirtaa. Näin syntynyt ionisaatiovirran vaje korjataan kunkin lineaarikiihdyttimen kullekin säteilylaadulle tyypillisellä rekombinaatiokorjaukskertoimella (k_{rec}), joka määritetään mittauksin säteilykeilassa ns. kahden jännitteen menetelmällä Boaquin teoriaan /9/ perustuvaa polynomisovitusta /10/ käyttäen. Rekombinaatiokorjaukskertoimet määritettiin joko kyseisen tarkastuksen yhteydessä, tai kyseisen kiihdyttimen aiemmalla tarkastuksella mitatusta datasta. Nominaalienergialtaan samaenergisissä fotonikeiloissa annosmäärityksissä käytetyn Farmer-kammion (PTW30013, sno 7264) k_{rec} eroaa eri kiihdyttimien kesken suurimmillaan $\pm 0,2 \%$ (kuva 6).



Kuva 6. STUKin tarkastuskaluston ionisaatiokammionille PTW30014 (7264) sairaaloiden fotonikeiloihin määritetyt rekombinaatiokorjaukskertoimet (k_{rec}).

Fotonikeiloissa annosnopeusalueella 1–5 Gy/min timantti-ilmaisimelle on raportoitu $\pm 0,2 \%$ annosnopeusriippuvuus /11/, mikä oletettiin merkityksettömäksi tässä raportissa esitetyissä mittauksissa. Timantti-ilmaisimen annosnopeusriippuvuus on kuitenkin syytä jatkossa selvittää tarkentavin mittauksin FFF-keiloissa, joissa päästään jopa 24 Gy/min annosnopeuksiin.

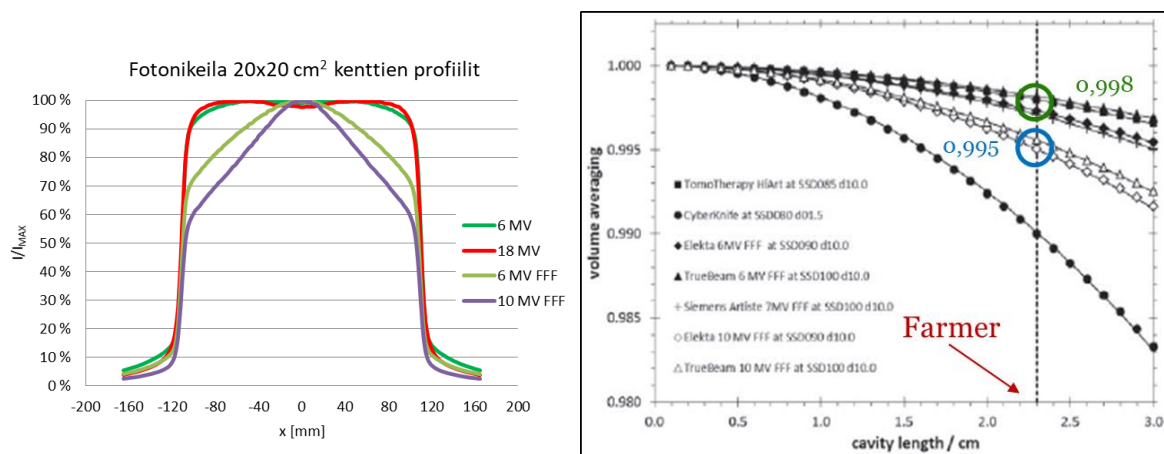
Tasoittamattomien ja pienten (2 cm:n ja 3 cm:n neliökentät) tasoitettujen fotonikenttien keskiakselille painottuvasta annosjakaumasta johtuva ionisaatiokammion alivasteellisuus korjattiin ionisaatiokammion tilavuuskorjaukskertoimella (k_{vol}), joka määritettiin säteilykeilan lateraalitasossa keilaprofiiliin intensiteettijakaumasta kammion keräysalan (kammion pituus \times leveys) yli lasketun maksimiin normitetun signaalin keskiarvon käännteislukuna /8/ (kuva 7). Tilavuuskorjaukskerroin voidaan määrittää myös laskennallisesti kaavalla

$$k_{vol} = 1 + (6,2 \cdot 10^{-3} \cdot TPR_{20,10}(10) - 3,57 \cdot 10^{-3}) \cdot \left(\frac{100}{SDD}\right)^2 \cdot L^2 \quad (2)$$

missä muuttujina on fotonikeilan säteilylaatuparametri, kudos-fantomi suhde $TPR_{20,10}$, joka voidaan esittää myös 10 cm:n ja 20 cm:n syvyyksillä vedessä mitatun ionisaatiosuhteen (J_{100}/J_{200}) avulla (IAEA TRS398, /5/)

$$TPR_{20,10} = 1,2661/(J_{100}/J_{200}) - 0,0595 \quad (3)$$

missä SDD on detektori—lähde—etäisyys ja L on kammion ontelon pituus. Menetelmä perustuu Varian TrueBeam, Siemens Artiste ja Elekta Versa HD kiihdyttimien FFF-keilojen profiilidatata laskettujen tilavuuskorjausten sovitusfunktioon (kuva 7, IAEA TRS483, /6/).

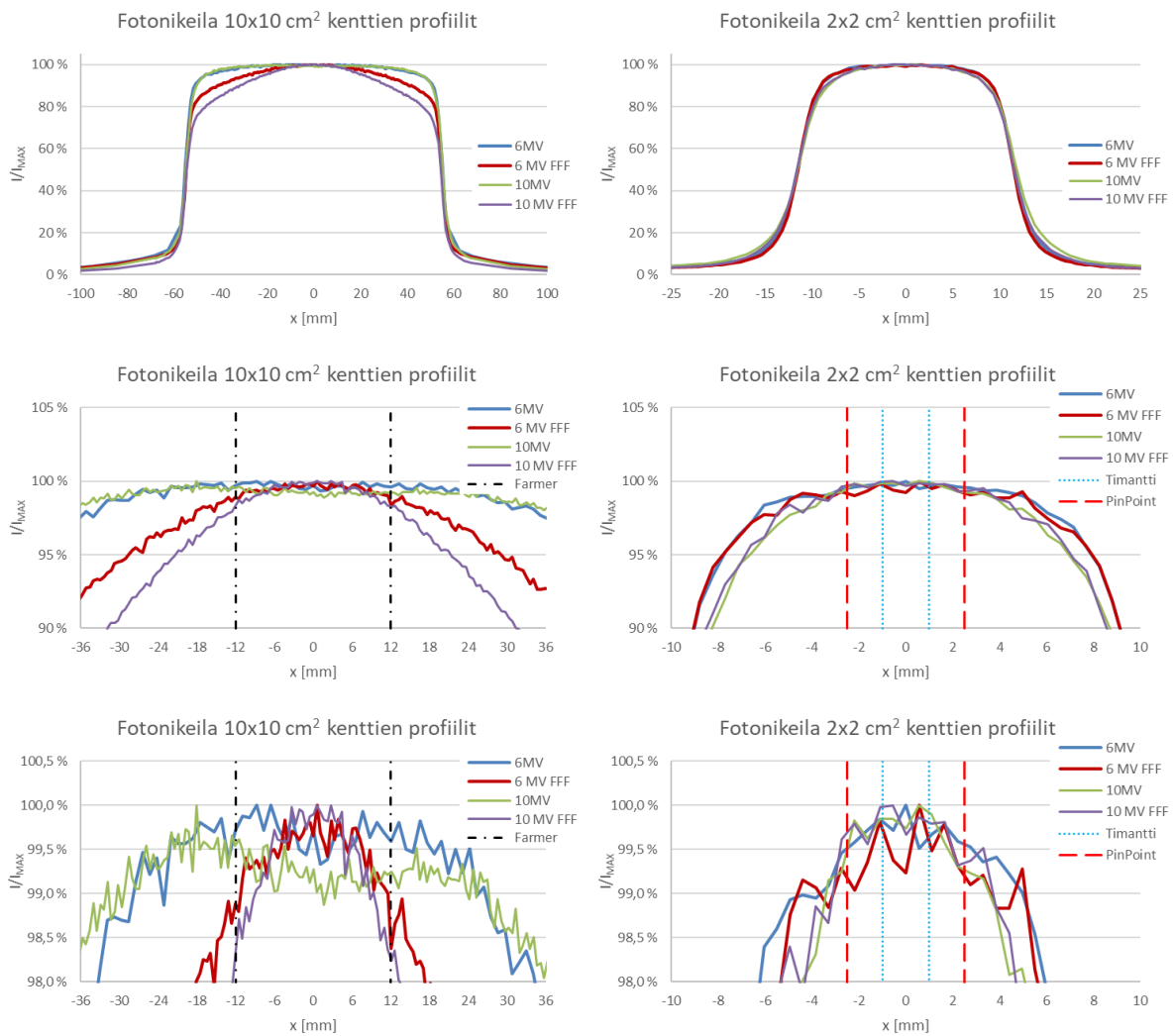


Kuva 7. Tasoitettujen ja tasoittamattomien (FFF) fotonisäteilykeilojen (20 cm x 20 cm) intensiteettiprofiilit keilan x-akselisuunnassa. Intensiteetti on normitettu 100 % keilan intensiteettimaksimissa (vasemmalla). 6MV ja 10MV FFF- fotonikeilojen intensiteettiprofiileista määritetty kammio tilavuuden ionisaatiosignaalia keskiarvoistava vaikutus (tilavuuskorjauskertoimen käänteisluku) ionisaatiokammion pituus akselin funktiona (Farmer-kammion pituus akseli 23 mm) eri valmistajien kiihdyttimille (oikealla, IAEA TRS483, /6/).

3 Tulokset

3.1 Sädehoitokiihdyttimien fotonikeilojen profiilimittaukset

Fotonikeiloissa tehdyistä profiilimittauksista käy ilmi, että profiilin intensiteettijakauman muutos kaikilla mitatuilla säteilylaaduilla on 0,5 % \pm 6 mm:n alueella keilan keskiakselilta 10 cm x 10 cm:n kenttäkoossa, ja vastaavasti 2 cm x 2 cm:n kenttäkoossa \pm 2 mm:n alueella (kuva 8 alarivi). Tämän perusteella keilaprofiilit mahdollistavat timantti-ilmaisimen (efektiivinen keräysala 2 mm x 2 mm) aseoinnin keilan keskiakselille 99,5 %:n isodoosin alueelle \pm 1 mm:n toleranssilla niin WFF- kuin FFF-säteilylaaduilla aina 2 cm x 2 cm:n kenttäkokoon asti.



Kuva 8. Varian TrueBeam STx kiihdyttimen tasoitettujen ja tasoittamattomien (FFF) fotonisäteilykeilojen intensiteettiprofiilit keilan x-akselisuunnassa. Intensiteetti on normitettu 100 % keilan intensiteettimaksimissa. Keski- ja alarivin kuviin on merkitty Farmer- ja PinPoint-kammioiden efektiiviset pituudet, sekä timantti-ilmaisimen efektiivinen keräysalue (katkoviivat).

FFF keilojen profiilien epähomogeenisuus näkyy Varian TrueBeam STx -kiihdyttimen keilasta mitatuissa 10 cm x 10 cm ja 2 cm x 2 cm:n kenttään profiilikuvaajissa keskiakselille piikittyneinä intensiteettijakaumina (kuva 8). Voimakkaimmin keila on piikittyneenä 2 cm x 2 cm:n tasoittamattomassa 10 MV:n keilassa, 5 mm:n alueella 1 % (PinPoint-kammioiden efektiivinen pituus 5 mm). Huomioitavaa on, että pienellä kenttäkokoalla (2 cm x 2 cm) tasoitettujen ja tasoittamattomien keilojen profiilit ovat samanmuotoisia, keskiakselille piikittyneitä.

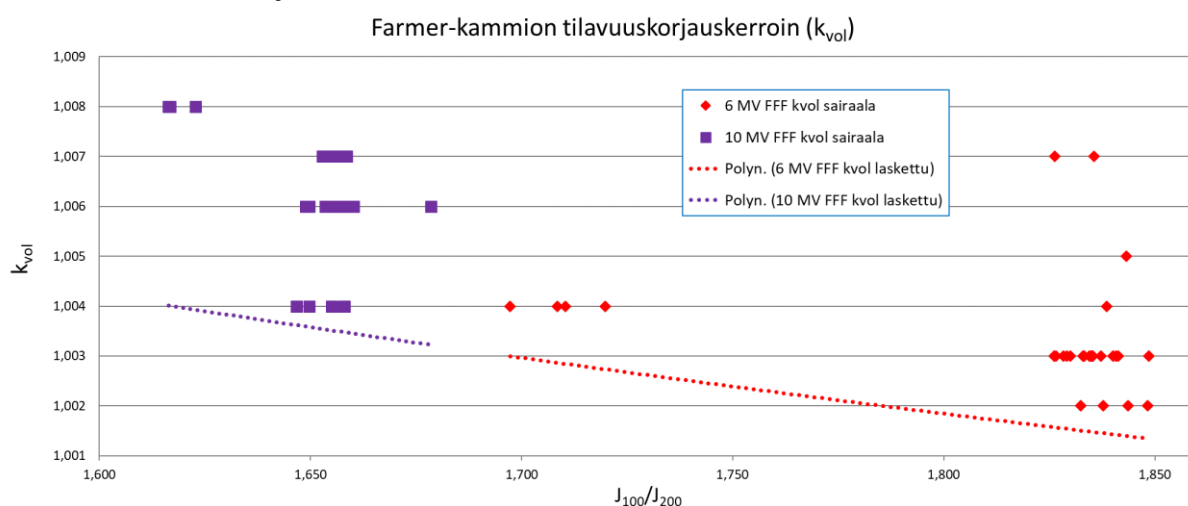
10 cm x 10 cm:n kenttäkokoalla Varian TrueBeam STx -kiihdyttimen 6 MV:n ja 10 MV:n FFF-keilojen keilaprofiileista keilan keskeltä määritetty intensiteettijakauman muutos 24 mm:n alueella on 0,8 % ja 1,5 %, ja 6 mm:n alueella 0,1 %. Tämä aiheuttaa 0,1 %:n ja 0,3 %:n keilaprofiileista määritetyt tilavuuskorjaukset ($k_{vol} = 1,001$ ja $1,003$) Farmer-kammiolla (efektiivinen ala 23 mm x 6 mm) ko. säteilykeiloissa mitattuihin signaaleihin. Määritetyt tilavuuskorjaukset vastaavat mittaustarkkuuden rajoissa laskennallisin menetelmin FFF-keiloille 10 cm x 10 cm:n kenttäkokoille laskettuja arvoja.

PinPoint-kammion efektiivisen pituuden ollessa 5 mm on FFF-keilan keilaprofiilin epähomogeenisuudesta johtuva kammion tilavuuskorjaus 10 cm x 10 cm:n kenttäkoolla merkityksetön.

2 cm x 2 cm:n kenttäkoolla 6 MV:n ja 10 MV:n keilaprofileista PinPoint-kammion (efektiivinen ala 5 mm x 3 mm) tilavuuskorjauskertoimeksi saadaan 1,002 ja 1,003 sekä WFF että FFF-säteilylaaduille. Suurempien energioiden (15 MV:n ja 18 MV:n WFF-keilat) 2 cm x 2 cm:n kenttään profiilidatan puuttuessa, tehdään tilavuuskorjaus 10 MV:n keilojen dataan perustuen.

3 cm x 3 cm:n kenttäkoolla PinPoint-kammion käyttöön käytettiin 2 cm x 2 cm:n tilavuuskorjausta ja suuremmilla kenttäkoilla tilavuuskorjaus oletettiin merkityksettömäksi kaikilla tarkastelluilla säteilylaaduilla.

Veteen absorboituneen referenssiannoksen laskennassa sairaaloissa käytössä olevat tasoittamattomista fotonisäteilykeilojen intensiteettiprofileista määritetyt Farmer-kammion tilavuuskorjauskertoimet poikkeavat suurimmillaan n. 0,5 % laskennallisista menetelmin (IAEA TRS483, /6/) määritetyistä arvoista (kuva 9).



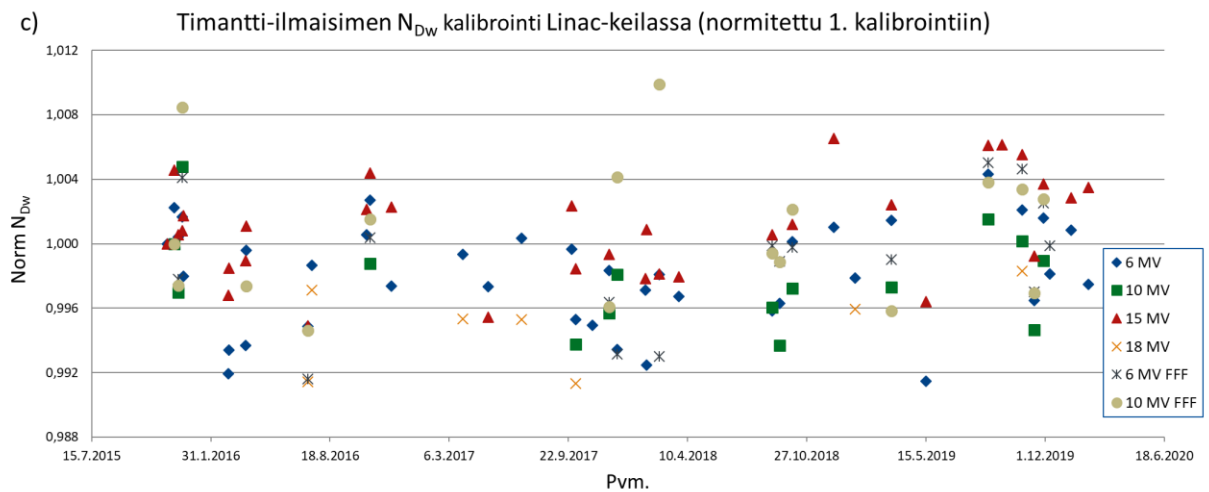
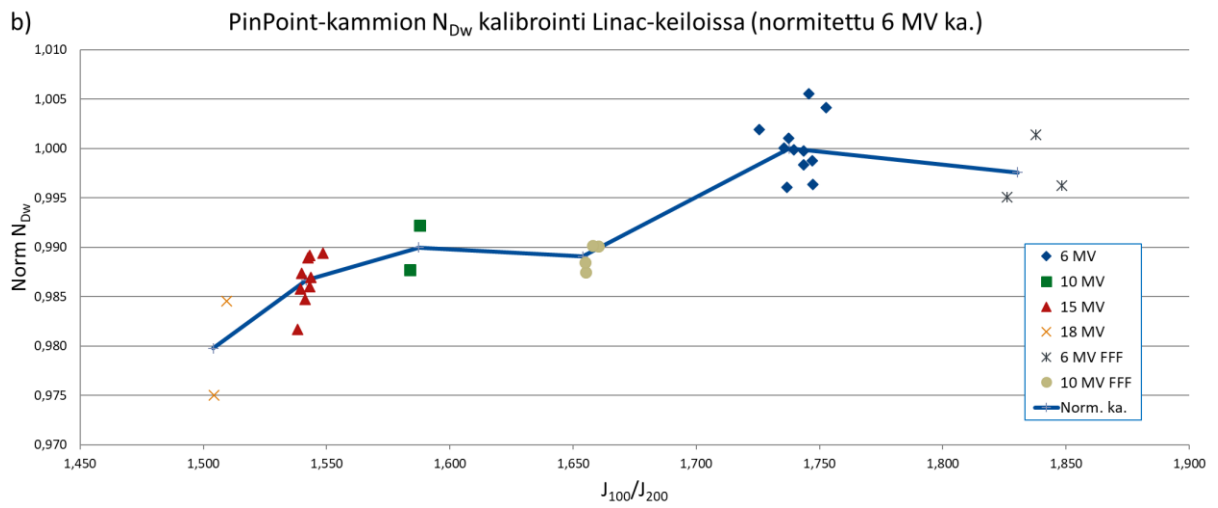
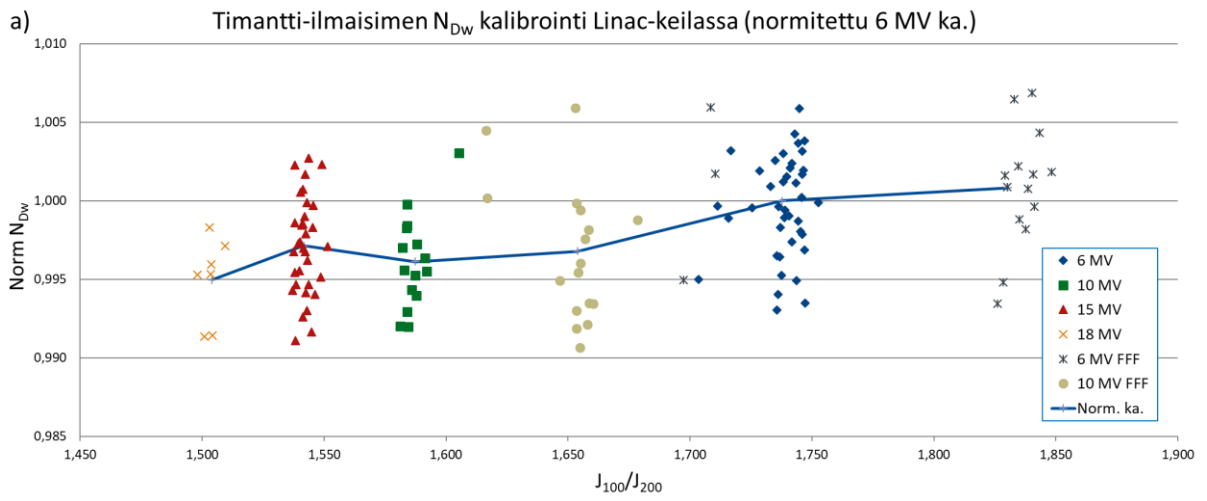
Kuva 9. Tasoittamattomista Varian ja Elekta kiihdyttimien fotonikeilojen intensiteettiprofileista sairaaloiden määrittämät (neliö ja ruutu), sekä IAEA TRS483 /6/ laskentaan (katkoviivat) perustuvat Farmer-kammion tilavuuskorjauskertoimet k_{vol} säteilykeilan energiaparametrin J_{100}/J_{200} funktiona.

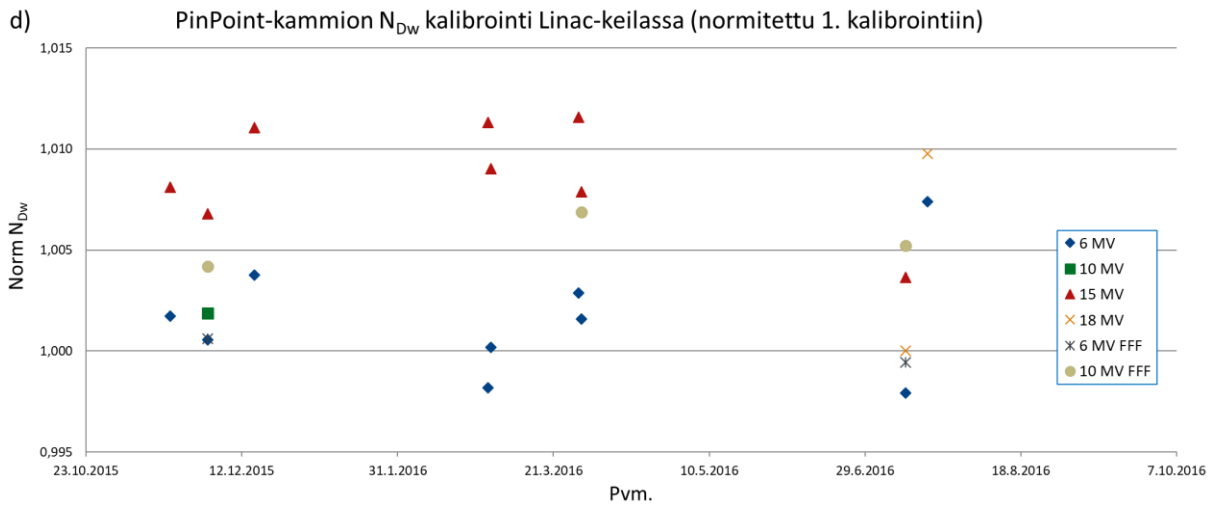
3.2 Timantti-ilmaisimen ja PinPoint-ionisaatiokammion kalibrointi sädehoitokiihdyttimien fotonikeiloissa

Tasotetuissa ja tasoittamattomissa fotonikeiloissa 10 cm x 10 cm:n kenttäkoolla tehdyissä kalibroinneissa veteen absorboituneen annoksen kalibrointikertoimen hajonta oli timantti-ilmaisimella n. 1,5 % ja PinPoint-ionisaatiokammion n. 1 % (kuva 10a ja 10b).

Fotonisäteilykeilan energia-alueella 6 MV – 18 MV (J_{100}/J_{200} : 1,85–1,50) määritettyjen kalibrointikertoimien energiariippuvuus oli timantti-ilmaisimella n. 0,5 % ja PinPoint-ionisaatiokammion n. 2,0 % (kuva 10a ja 10b).

Sekä timantti-ilmaisimen, että PinPoint-ionisaatiokammion kalibrointituloksissa ei havaittu systemaattista vasteen muutosta ajan funktiona (kuvat 10c ja 10d).





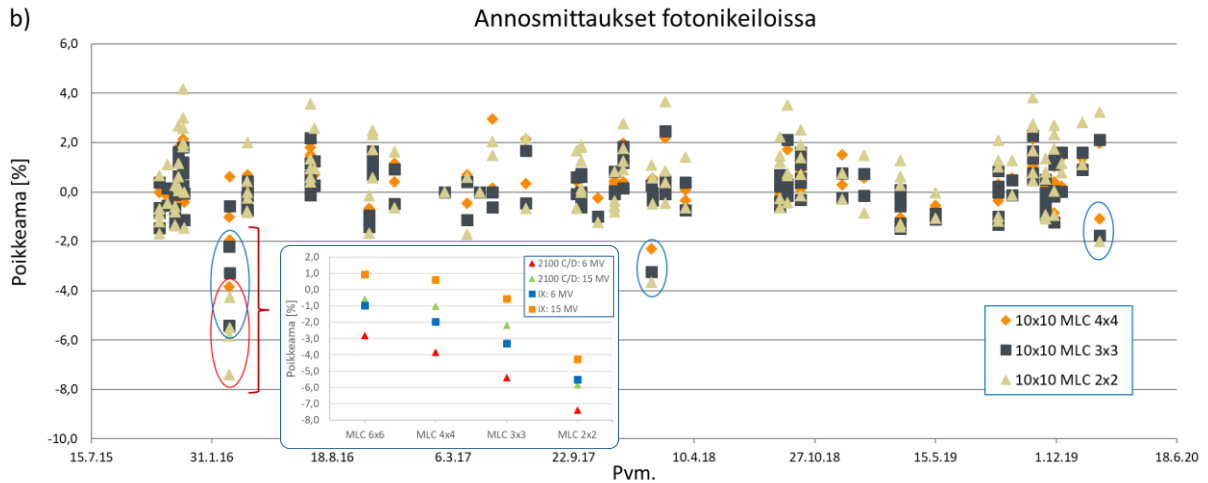
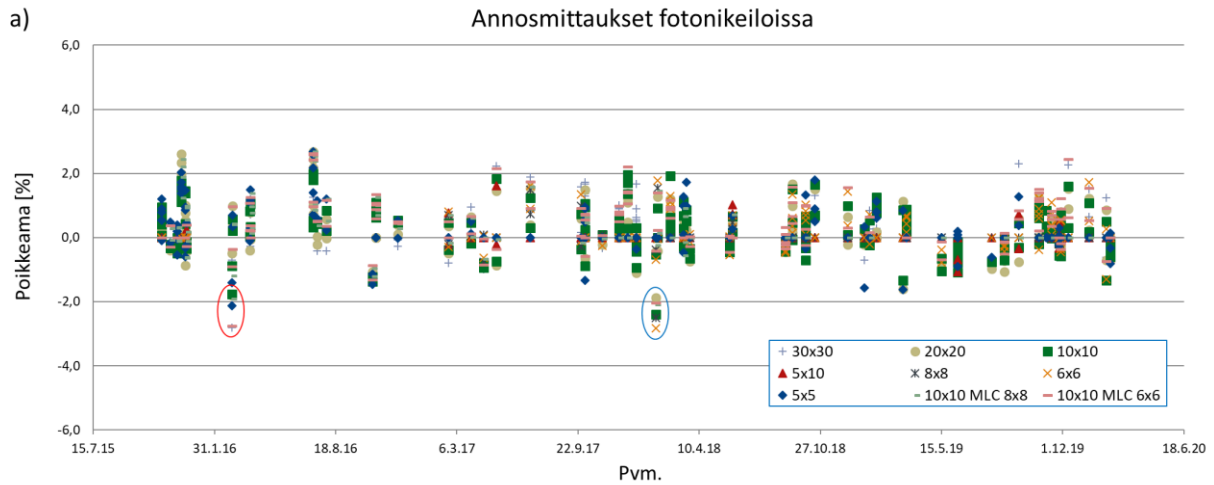
Kuva 10. Timantti-ilmaisimen (PTW60019) ja PinPoint-ionisaatiokammion (PTW31015) normitetut kalibrointikertoimet veteen absorboituneelle annokselle (N_{Dw}) energiaparametrin (J_{100}/J_{200} , kuvat a ja b) ja kalibrointipäivän (kuvat c ja d) funktiona. Kalibroinnit tehtiin Varian- ja Elekta - lineaarikiihdyttimien tasoitetuissa ja tasoittamattomissa MV-alueen fotonikeiloissa Farmer-ionisaatiokammiota vasten. Kalibrointikertoimet on normitettu 6 MV:n säteilylaadun kalibrointikertoimien keskiarvoihin (kuvat a ja b) ja 1. kalibrointiin (kuvat c ja d). Yhtenäinen viiva kuvaa kalibrointikertoimien normitettuja keskiarvoja energiaparametrin funktiona (kuvat a ja b).

3.3 Annosmääritykset sädehoitokiihdyttimien fotonikeiloissa

Veteen absorboituneen annoksen määrittämisä tehtiin sairaaloiden fotonisäteilykeiloissa STUK:n mittalaittein yhteensä 1500 fotonisäteilykentässä.

Yhdenkään sairaalan kiihdyttimellä 5 cm x 5 cm tai sitä suuremmissa fotonikeiloissa ero sairaalan annosuunnittelujärjestelmällä lasketun ja STUKin mittauksin määrittämän fotonkentän pisteannoksen välillä ei ylittänyt käytönaikaisten hyväksyttävyysskriteerien 3 %:n rajaa (kuva 11a).

Valtaosassa kenttäkoilla 4 cm x 4 cm ja 3 cm x 3 cm tehdyissä mittauksissa annosero oli alle 3 % ja 2 cm x 2 cm:n kenttäkoolla ± 4 %:n sisällä. Yhdessä sairaalassa kahden kiihdyttimen kohdalla käytönaikaisten hyväksyttävyysskriteerien 3 %:n raja ylittyi 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm ja 2 cm x 2 cm:n kenttäkoilla ollen suurimmillaan 7,4 % kenttäkoolla 2 cm x 2 cm (kuva 11b).



Kuva 11. STUKin annosmittausten ja sairaaloiden annoslaskennan välinen ero (STUK/sairaala) Varian- ja Elekta -kiihdyttimien eri kokoisille avokentille 2 Gy:n pisteannokseen lasketuissa suunnitelmissa. Ympyröidyt tulokset on mitattu saman sairaalan kiihdyttimiltä: Varian 2100 C/D (6MV- punainen, 15MV) ja Varian iX (6MV- sininen, 15MV).

4 Johtopäätökset

PTW60019 timantti-ilmaisimen ja PTW31015 PinPoint-ionisaatiokammion kalibrointi sädehoitokiihdyttimen fotonikeiloissa veteen absorboituneelle annokselle Farmer-kammiota vasten osoittautui luotettavaksi kenttäkalibroitimenetelmäksi. Kalibrointikertoimien hajonta saman nimellisenergian sisällä oli timantti-ilmaisimelle 1,5 % ja PinPoint-ionisaatiokammion 1,0 %.

2 %:n muutos PinPoint-ionisaatiokammion energiavasteessa kalibroinnissa käytetyllä 6 MV – 18 MV:n fotonenergia-alueella on sädehoidon annosmäärityksissä käytettäville ionisaatiokammioille tyypillinen. Timantti-ilmaisimen energiavaste osoittautui ionisaatiokammiota tasaisemmaksi, vasteen muutoksen ollessa n. 0,5 % käytetyllä kalibroitialueella.

Johtuen timantti-ilmaisimen energiavasteen tasaisuudesta, on nimellisenergialtaan samanarvoisten fotonikeilojen energiajakautuksen vaikutus kalibroitukertoimen hajontaan merkityksetön. Määrävä tekijä määritettyjen kalibroitukertoimien hajonnassa kunkin nimellisenergian sisällä on todennäköisesti timantti-ilmaisinta vesifantomiin asemoitaessa syntynyt virhe mittaussyvyydessä. Timantti-ilmaisimen kenttäkalibroinnin toistettavuutta ja annosmäärityksen tarkkuutta voidaan todennäköisesti parantaa kehittämällä ilmaisimen syvyyssasemointimenetelmän tarkkuutta.

Pienen efektiivisen pinta-alansa ansiosta timantti-ilmaisimen lateraalitason asetteluvarmuudella 2 cm x 2 cm tai sitä suuremmissa kentissä ei ole merkittävää vaikutusta fotonikeilan keskiakselilta määritetyn pisteannoksen epävarmuuteen.

Timantti-ilmaisimen annosnopeusriippuvuus on syytä selvittää. Se on helpoiten toteutettavissa FFF-keiloissa, joissa maksimiannosnopeus ylittää 24 Gy/min.

Sekä timantti-ilmaisimen, että PinPoint-ionisaatiokammion kalibroituloksissa ei ole havaittavissa systemaattista vasteen muutosta ajan funktiona. Molemmat ilmaisimet soveltuvat kenttäkalibroituina pienten fotonisäteilykenttien veteen absorboituneen annoksen määrittämiseen sädehoidon viranomaisarkistusten yhteydessä.

Havaittu ero fotonikeilojen kenttäprofiilien intensiteettijakaumista määritettyjen ja STUKin laskemien Farmer-ionisaatiokammion tilavuuskorjauskertoimien välillä kaipaa lisäselvitystä. Mikäli sairaaloiden määrittämät Farmer-ionisaatiokammion tilavuuskorjauskertoimet FFF-keiloissa on laskettu ainoastaan kammion pituusaksella (23 mm) vastaavalta profiililta intensiteettijakaumalta, jättäen kammion leveys (6 mm) huomioimatta, yliarvioi se tilavuuskorjauskerrointa.

Suurimmassa osassa mitatuista fotonisäteilykeiloista ero sairaaloiden annossuunnittelujärjestelmillä laskettujen ja STUKin mittauksin määrittämien fotonikenttien pisteannosten välillä oli alle sädehoitolaiteille säädetyn 3 %:n hyväksyttävyyssrajaa kaikilla mitatuilla kenttäkoilla.

Suurin osa lasketun ja mitatun annoksen välisistä 3 %:n ylityksistä löytyi 2 cm x 2 cm:n kenttäkoolla. Näissä tapauksissa sairaaloita on ohjeistettu tarkistamaan annossuunnittelujärjestelmiensä syöttödatan oikeellisuus.

Sairaalassa, missä 3 %:n annosraja ylittyi 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm ja 2 cm x 2 cm:n kenttäkoilla ollen suurimmillaan 7,4 %, tilanne korjaantui vanhimman kiihdyttimen uusinnalla, sekä sairaalan annossuunnittelujärjestelmän laskenta-algoritmin ja kiihdyttimien syöttödatan päivityksellä.

Yllä esitetyt valvontatulokset vahvistavat näkemystä sairaaloissa paikan päälle tehtävän sädehoidon viranomaisvalvonnan tärkeydestä ja muistuttavat tarpeesta ylläpitää valvontaviranomaisten mittausosaamista.

5 Lähdeluettelo

1. Säteilylaki 859/2018. Annettu Helsingissä 9 päivänä marraskuuta 2018. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180859>
2. Valtioneuvoston asetus ionisoivasta säteilystä 1034/2018. Annettu Helsingissä 22.11.2018. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2018/20181034#L13>
3. Määräys STUK S/5/2019. Säteilyturvakeskuksen määräys säteilylähteiden käytönaikaisesta säteilyturvallisuudesta ja säteilylähteiden ja käyttötilojen poistamisesta käytöstä, Annettu Helsingissä 2.7.2019. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/555001/45348>
4. IAEA, International Atomic Energy Agency. Commissioning and quality assurance of computerized planning systems for radiation treatment of cancer. Technical Reports Series no. 430, 2004. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.iaea.org/publications/6974/commissioning-and-quality-assurance-of-computerized-planning-systems-for-radiation-treatment-of-cancer>
5. 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, V12, 05 June 2006. Saatavilla sähköisesti osoitteessa http://www-naweb.iaea.org/nahu/DMRP/documents/CoP_V12_2006-06-05.pdf
6. IAEA, International Atomic Energy Agency. Dosimetry of small static fields used in external beam radiotherapy. An international code of practice for Reference and Relative Dose Determination. Technical Reports Series no. 483, November 2017. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/D483_web.pdf
7. IAEA, International Atomic Energy Agency. Calibration of reference dosimeters for external beam radiotherapy. Technical Reports Series no. 469, June 2009. Saatavilla sähköisesti osoitteessa https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs469_web.pdf
8. Kawachi T, et al. Reference dosimetry condition and beam quality correction factor for CyberKnife beam. Med. Phys. 35 (2008): 4591-4598.
9. Boag JW, Currant J. Current correction and ionic recombination in small cylindrical ionization chambers exposed to pulsed radiation. Brit. J. Radiol. 53 (1980): 471.
10. Weinhaus MS, Meli JA. Determining Pion, the correction factor for recombination losses in an ionization chamber. Med. Phys. 11 (1984): 846-849.
11. Ciancaglioni I, Marinelli M, Milani E, Prestopino G, Verona C, Verona-Rinati JG, Consorti R, Petrucci A, De Notaristefani F. Dosimetric characterization of a synthetic single crystal diamond detector in clinical radiation therapy small photon beams. Med. Phys. 39 (2012): 4493.

STUK-B sarjan julkaisuja

- [STUK-B 272](#) Jokelainen I, Sipilä P. Annosmääritykset sädehoidon lineaarikiihdyttimien pienissä fotonisäteilykentissä. Terveystieteiden tutkimuskeskuksen valvontaraportti.
- [STUK-B 271](#) Lajunen A. Oikeutusarvioinnin edellytysten toteutuminen. Terveystieteiden tutkimuskeskuksen valvontaraportti.
- [STUK-B 270](#) Virtanen S, Vartti V-P, Turunen J, Mattila A. Monitoring of radioactivity in the environment of Finnish nuclear power plants. Annual report 2020.
- [STUK-B 269](#) Virtanen S, Vartti V-P, Turunen J, Mattila A. Ydinvoimalaitosten ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2020.
- [STUK-B 268](#) Mattila A, Inkinen S (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2020. — Strålningsövervakning av miljön i Finland. Årsrapport 2020. — Surveillance of Environmental Radiation in Finland. Annual Report 2020.
- [STUK-B 267](#) Kainulainen E (ed.). Regulatory oversight of nuclear safety in Finland. Annual report 2020.
- [STUK-B 266](#) Venelampi E (toim.). Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2020.
- [STUK-B 265](#) Okko O (ed.). Implementing nuclear non-proliferation in Finland. Regulatory control, international cooperation and the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. Annual report 2020.
- [STUK-B 264](#) Marttila J (toim.). Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta. Vuosiraportti 2020.
- [STUK-B 263](#) Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 3/2020.
- [STUK-B 262](#) Suutari J. Säteilylain uusien vaatimusten toteutuminen säteilyn käytössä. Terveystieteiden tutkimuskeskuksen valvontaraportti.
- [STUK-B 261](#) Kojo K, Vahtola J, Kurttio P. Radonkysely työsuojeluhenkilöille.
- [STUK-B 260](#) Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 2/2020.
- [STUK-B 259](#) Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 7th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention.
- [STUK-B 258](#) Venelampi E (ed.) Radiation practices. Annual report 2019.
- [STUK-B 257](#) Helasvuo T. Radiologian henkilöstöresurssit 2019. Valtakunnallinen selvitys julkisen terveydenhuollon toiminnanharjoittajien tilanteesta.
- [STUK-B 256](#) Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 1/2020.
- [STUK-B 255](#) Virtanen S, Vartti V-P, Turunen J, Mattila A. Monitoring of radioactivity in the environment of Finnish nuclear power plants. Annual Report 2019.
- [STUK-B 254](#) Turtiainen T, Ilander T, Mänttari I, Leikoski N, Kurttio P. Sammandrag enligt hushållsvattenförordningen av mätresultat 2016–2018 för hushållsvattnets radioaktivitet.
- [STUK-B 253](#) Virtanen S, Vartti V-P, Turunen J, Mattila A. Ydinvoimalaitosten ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2019.
- [STUK-B 252](#) Liukkonen J. Isotooppitutkimukset ja -hoidot Suomessa vuonna 2018.
- [STUK-B 251](#) Liukkonen J. Optimointi isotooppikuvantamisessa.
- [STUK-B 250](#) Helasvuo T (toim.). Kuvantamisessa henkilöön kohdistettu muu kuin lääketieteellinen altistus vuonna 2017.
- [STUK-B 249](#) Mattila A, Inkinen S (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2019. — Strålningsövervakning av miljön i Finland. Årsrapport 2019. — Surveillance of Environmental Radiation in Finland. Annual Report 2019.