



STUK-TR 4 / MAALISKUU 2008

Annoksen ja pinta-alan tulon mittaaminen

DAP-mittarin kalibrointi röntgensäteilykeilassa

Paula Toroi, Tuomo Komppa, Antti Kosunen

ISBN 978-952-478-304-0 (nid.) Edita Prima Oy, Helsinki 2008
ISBN 978-952-478-305-7 (pdf)
ISSN 1796-7171

TOROI Paula, KOMPPA Tuomo, KOSUNEN Antti. Annoksen ja pinta-alan tulon mittaaminen. DAP-mittarin kalibrointi röntgensäteilykeilassa. STUK-TR 4. Helsinki 2008. 26 s. + liitteet 10 s.

Avainsanat: DAP (annoksen ja pinta-alan tulo), KAP (kerman ja pinta-alan tulo), DAP-mittari, kalibrointi

Tiivistelmä

Raportissa tarkastellaan annoksen ja pinta-alan tulon (DAP) mittaamista ja esitetään menetelmiä DAP-mittareiden kalibroimiseksi niiden käyttöpaikoilla. Kalibrointimenetelmästä riippuen vertailumittari, jonka avulla kalibroinnissa käytettävä vertailuarvo määritetään, voi olla DAP-mittari tai ilmakermamittari. ICRU:n suosittelema tavoitetarkkuus röntgentutkimusten DAP-mittauksille on vaativa, eikä siihen aina voi päästä nykyisillä laitteilla ja menetelmillä. DAP-mittarin energiariippuvuudesta johtuvaa epävarmuutta voidaan vähentää käyttämällä kalibroinnissa useita säteilylaatuja. Tämän raportin tarkoitus on esitellä menetelmiä ja toimintatapoja hyvän mittaustarkkuuden saavuttamiseksi. Tarkoitus ei ole rajoittaa erilaisten menetelmien käyttöä eikä esittää tarkkuusvaatimuksia vaihtelevissa käytännön tilanteissa tehtäville mittauksille.

TOROI Paula, KOMPPA Tuomo, KOSUNEN Antti. Measurement of dose-area product. Calibration of DAP meters in x-ray beams. STUK-TR 4. Helsinki 2008. 26 pp. + apps. 10 pp.

Key words: DAP (dose-area product), KAP (kerma-area product), DAP meter, calibration

Abstract

Measurement of the dose-area product (DAP) is studied in this report, and methods for the calibration of DAP meters at clinical users' sites are presented. The reference meter, used to determine the reference value for the calibration, may be a DAP meter or an air kerma meter, depending on the calibration method. The accuracy recommended by ICRU for DAP measurements in x-ray examinations cannot always be achieved by present equipment and methods. The uncertainty arising from the energy dependence of the DAP meter can be reduced by using several radiation qualities in the calibration. The object of this report is to describe methods and procedures to achieve a good accuracy in measurements. The purpose is not to restrict the use of different methods or to set requirements for the accuracy of measurements in variable practical situations.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	7
2 KERMAN JA PINTA-ALAN TULO	8
3 KERMAN JA PINTA-ALAN TULON MÄÄRITTÄMINEN	9
3.1 Mittaus DAP-mittarin avulla	9
3.2 Määrittäminen ilmakerman ja pinta-alan avulla	10
3.3 Paine- ja lämpötilakorjaus	10
4 DAP-KENTTÄMITTARIN KALIBROINTIMENETELMIÄ	12
4.1 Kalibrointi ilmakerman ja pinta-alan mittauksen avulla: pinta-alamenetelmä	12
4.2 Kalibrointi DAP-vertailumittarin avulla: tandem-menetelmä	15
4.3 Laboratoriossa kalibroidun kenttämittarin hajasäteilykorjaus	18
4.4 Kalibrointimenetelmien arviointi	19
5 KALIBROINTIMITTAUKSET	20
5.1 Kalibroinnissa huomattavia seikkoja	20
5.2 DAP-mittarin kalibrointi erikoistarkoituksiin	21
6 KALIBROINTIKERTOIMEN KÄYTTÖ POTILASMITTAUKSISSA	23
7 EPÄVARMUUDEN ARVIOINTI	24
8 DAP-MITTARIN TOIMINTAKUNNON SEURANTA JA KALIBROINTIVÄLI	25
KIRJALLISUUSVIITTEET	26
LIITE 1 SUHTEELLINEN ILMAKERMAMITTAUS	27
LIITE 2 DAP-KENTTÄMITTARIN KALIBROINTI KÄYTTÖPAIKALLA	28
LIITE 3 EPÄVARMUUDEN ARVIOINTI DAP-MITTAUKSISSA	30

1 Johdanto

Annoksen ja pinta-alan tuloa (DAP, dose-area product) tai kerman ja pinta-alan tuloa (KAP, kerma-area product) käytetään yleisesti potilaan säteilyaltistuksen arviointiin röntgentutkimuksissa. DAP-mittaustuloksia voidaan myös suoraan verrata diagnostisiin vertailutasoihin niissä tutkimuksissa, joissa vertailutaso on asetettu DAP-arvon avulla.

Jotta mittaustulokset olisivat oikeita ja luotettavia, annoksen ja pinta-alan tulon mittari (DAP-mittari) pitää *kalibroida*. Kalibroinnissa mittarille määritetään *kalibrointikerroin* eli luku, jolla mittarin näyttämä on kerrottava oikean mittaustuloksen saamiseksi. Koska DAP-mittarin kalibrointikerroin riippuu säteilyn energiasta, se yleensä määritetään useille säteilylaaduille. Mittari voidaan myös säätää näyttämään oikein yhdellä valitulla säteilylaadulla, mutta se ei takaa oikeaa näyttämää muilla laaduilla.

Tässä raportissa tarkastellaan annoksen ja pinta-alan tulon mittaamista ja esitetään menetelmiä DAP-mittareiden kalibroimiseksi niiden käyttöpaikoilla. Kalibroitavaa mittaria nimitetään *kenttämittariksi*. Mittaria, jonka avulla kalibroinnissa käytettävä vertailuarvo määritetään, nimitetään *vertailumittariksi*. Kalibrointimenetelmästä riippuen vertailumittari voi olla DAP-mittari tai ilmakermamittari (säteilymittari, joka on tarkoitettu ilmakerman mittaamiseen röntgensäteilykeilassa).

DAP-kenttämittarilla mitataan yleensä potilaaseen kohdistuvaa säteilykeilaa siten, että mittarin ilmaisimena toimiva ionisaatiokammio on keilassa ennen potilasta. Potilaaseen kohdistuu siis mitta-kammion läpäissyt säteily, jota kammio on vaimentanut ja suodattanut. DAP-kenttämittarin kalib-

rointimenettelyssä tämä vaimennus- ja suodatusvaikutus on otettava huomioon. Erikoistapauksissa DAP-mittarilla voidaan mitata myös kammioon kohdistuvaa säteilyä. Siksi DAP-mittarin kalibroinnissa on otettava huomioon myös mittarin käyttötarkoitus ja käytötapa.

Röntgentutkimusten DAP-mittauksissa on asetettu tavoitteeksi sellainen tarkkuus, että mittaustuloksen suhteellinen kokonaisepävarmuus olisi enintään 7 %, kun käytetään kattavuuskerrointa $k = 2$ (ICRU 2005). Tavoite on vaativa eikä siihen aina voi päästä nykyisillä laitteilla ja menetelmillä. DAP-mittarin kalibrointi usealle eri säteilylaadulle vähentää energiariippuvuudesta johtuvaa epävarmuutta. Erilaisissa käytännön mittaustilanteissa voidaan hyväksyä suurempikin epävarmuus, kuitenkin enintään 25 % (STUK 2004). Lisäksi röntgenlaitteen annosindikaattorina toimivaa DAP-mittaria koskee laitevaatimus, että näyttämä poikkeaa oikeasta arvosta enintään 25 %, läpivalaisulaitteilla enintään 50 % (IEC 60601-2-43, STUK 12/310/06).

Tämän raportin tarkoitus on esitellä menetelmiä ja toimintatapoja hyvän mittaustarkkuuden saavuttamiseksi. Tarkoitus ei ole rajoittaa erilaisten menetelmien käyttöä eikä esittää tarkkuusvaatimuksia vaihtelevissa käytännön tilanteissa tehtäville mittauksille. Käytännössä ei aina tarvita parasta mahdollista tarkkuutta, vaan harkinnan mukaan voidaan käyttää myös yksinkertaistettuja menetelmiä ja tyytyä suurempaan epävarmuuteen. Kun DAP-mittareiden kalibrointipalveluja tarjotaan tai tilataan, on aina syytä sopia tavoitteena olevasta tarkkuudesta.

2 Kerman ja pinta-alan tulo

Säteilykeilaa kuvaava *kerman ja pinta-alan tulo* (KAP , P_{KA}) määritellään ilmakerman pintaintegraalina keilan akselia vastaan kohtisuorassa tasossa. Siihen ei kuulu potilaasta sironnut säteily eikä röntgenlaitteen ulkopuolelta tuleva hajasäteily. Sitä nimitetään yleisesti myös *annoksen ja pinta-alan tuloksi* (DAP). Suureen perusyksikkö on $Gy \cdot m^2$, jonka kerrannaisyksiköitä ovat esimerkiksi $\mu Gy \cdot m^2$ ja $mGy \cdot cm^2$. Suureen nimenä käytetään tässä raportissa ensisijaisesti kerman ja pinta-alan tuloa ja merkintää P_{KA} raportin ICRU 74 (2005) ja IAEA:n ohjeen (2007) mukaisesti, mutta niistä poiketen käytetään suomalaisen käytännön mukaisia laitenimiä DAP-mittari ja DAP-kammio.

Edellä mainittu ilmakerman pintaintegraali tarkoittaa samaa kuin integraalin määrittelyalueen keskimääräinen ilmakerma kerrottuna määrittelyalueen pinta-alalla. DAP-mittarissa määrittelyalue tarkoittaa mittakammion aktiivista pinta-alaa. Sen täytyy kattaa säteilykeilan koko poikkileikkauspinta puolivarjoalueineen, jotta mittari mittaisi koko säteilykeilaa kuvaavaa kerman ja pinta-alan tuloa.

Käytännössä pintaintegraalin likiarvona käytetään usein tuloa, jonka tekijät ovat ilmakerma

säteilykeilan keskiakselilla ja säteilykeilan poikkileikkauksen pinta-ala määrittelytasossa. Tämä tulo on sitä parempi likiarvo, mitä tasaisempi ja teräväreunaisempi säteilykenttä on, ja ideaalisen tasaisessa ja tarkkarajaisessa kentässä tulo ja pintaintegraali ovat yhtä suuret.

Jotta kerman ja pinta-alan tulo olisi yksikäsitteinen ja säteilykentän tasaisuudesta riippumaton suure, sen määrittely perustuu joko edellä mainittuun pintaintegraaliin tai idealisoituun kenttään. Kalibrointilaboratoriossa DAP-mittari voidaan kalibroida määrittelyn mukaisesti säteilykentän tarkan kartoituksen tai vertailevan DAP-mittauksen avulla ja (tai) muodostamalla vertailumittauksia varten mahdollisimman tasainen ja tarkkarajainen säteilykenttä.

Koska etäisyyden kasvaessa säteilykeilan poikkileikkauksen pinta-ala kasvaa lähes samassa suhteessa kuin ilmakerma pienenee, ilmakerman ja pinta-alan tulo pysyy jokseenkin vakiona röntgenlaitteen uloimman kaihtimen ja potilaan välisellä alueella. Käytännössä mittari on kiinnitetty lähelle kaihtimia, jolloin se yleensä on niin kaukana potilaan pinnasta, ettei potilaasta siroava säteily vääristä mittaustulosta.

3 Kerman ja pinta-alan tulon määrittäminen

Kerman ja pinta-alan tulo röntgenlaitteen säteilykeilassa mitataan DAP-mittarilla, joka voi olla röntgenlaitteen kiinteä osa tai kaihdinkoteloon kiinnitettävä erillinen mittari (kohta 3.1). Röntgenlaitteen DAP-näyttämä voi olla myös laske-ohjelman määrittämä arvo, joka perustuu kenttäkokoasetuksiin, kuvausasetuksiin ja röntgenlaitteen säteilyntuotto-ominaisuuksiin. Kerman ja pinta-alan tulo voidaan arvioida myös siten, että ilmakerma säteilykeilassa ja säteilykentän pinta-ala määritetään erikseen (kohta 3.2).

3.1 Mittaus DAP-mittarin avulla

DAP-mittarissa käytetään ilmaisimena yleensä läpinäkyvästä muovista valmistettua tasomaista, läpäisytyyppistä ionisaatiokammiota, jossa muodostuva ionisaatiovirta mitataan elektrometrillä. DAP-kammiossa käytettävä keräysjännite on tyypillisesti 300–400 V. Kokonaisuudessaan mittari koostuu kammion ja elektrometrin näyttölaitteeseen, jännitelähteeseen ja kaapeleihin (kuva 1). Tyypillisen DAP-kammion kokonaispaksuus on 1,5–2 cm ja neliömäisten, säteilyä läpäisevien ikkunatasojen sivujen pituus 14–15 cm. Ikkunoiden sisäpinta ja niiden suuntainen keskielektrodi on pinnoitettu sähköä johtavalla aineella. Kammion paksuus, rakenne ja materiaalit vaikuttavat sen herkkyys-, vaimennus-, suodatus- ja sirontaominaisuuksiin ja niiden riippuvuuteen säteilyn energijakaumasta.

Kun DAP-kammio on kiinnitettynä tavanomaiselle paikalleen röntgenlaitteessa, sen pinta riittää kattamaan suuretkin kenttäkoot ja kammiossa syntyvä kokonaisvaraus on verrannollinen kerman ja pinta-alan tulon mitattavassa säteilykeilassa. Kammioon liitetty mittariosa näyttää tuloksen yleensä kerman ja pinta-alan tulon yksiköissä (esimerkiksi $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ tai $\text{mGy}\cdot\text{cm}^2$). Standardin IEC 60580 vaatimus mittarin näyttötarkkuudelle on $0,1 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ lasten tutkimuksissa, $1 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ aikuisten tutkimuksissa ja $10 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ pitkää lä-

pivalaisua vaativissa toimenpiteissä, ja mittarin käyttöalueen pitää ulottua vähintään miljoonakertaisiin arvoihin. Koska kammion vaste riippuu melko voimakkaasti säteilyn energiasta, on tarkan tuloksen saamiseksi mittarin näyttämä kerrottava mitattavaa säteilylaatua vastaavalla kalibrointikertoimella. Kammio on ilmatäyteinen ja rakenteeltaan avoin, joten periaatteessa mittaustulos on korjattava myös ilman tiheyden suhteen (kohta 3.3).

Tavanomaisessa käytössä DAP-mittarilla on tarkoitus määrittää kerman ja pinta-alan tulo potilaaseen kohdistuvassa säteilykeilassa, joka on läpäissyt mittakammion ja samalla vaimentunut. Mittausten mukaan DAP-kammio vaimentaa säteilyä (ilmakermaa K_a) noin 10–20 % säteilyn energiasta ja kammion rakenteesta riippuen. Kammion suodatusvaikutus vastaa valmistajan ilmoituksen mukaan tyypillisesti 0,2–0,4 mm ja standardin IEC 60580 mukaan enintään 0,5 mm alumiinia. Kammion säteilyä vaimentava vaikutus vastaa yleensä paksumpaa alumiinikerrosta kuin suodatusvaikutus. Mittarin käyttöalueeksi standardissa määritellään säteilylaadut putkijännitteillä 50–150 kV ja suodatuksella 2,5 mm Al. Tällä alueella mittarin näyttämä saa poiketa enintään 8 % vertailuarvosta, joka on mitattu 100 kV:n putkijännitteellä. Standardissa ei ole mittarin ominaisuuksia koskevia vaatimuksia muita suodatuksia vastaavilla säteilylaaduilla.

Mittarin kytkeminen, käynnistäminen ja testaaminen olisi aina tehtävä valmistajan käyttöohjeen mukaisesti. Ellei toisin ole opastettu, DAP-mittari käynnistetään stabiloitumista ja toiminnan varmistusta varten vähintään 15 minuuttia ennen mittausten aloittamista ja sitä esisäteilytetään vähintään arvoon $100 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$. Käynnistyksen ja alkusäteilytysten aikana mittaria tarkkailaan ja sen toimivuus varmistetaan kokeilemalla. Säteilytyksen päätyttyä mittarin näyttämän pitäisi vakiintua muutamassa sekunnissa.



Kuva 1. DAP-mittarin kammio ja elektrometri.

3.2 Määrittys ilmakerman ja pinta-alan avulla

Ilmakerman ja pinta-alan tulo P_{KA} lasketaan usein likiarvona, ilmakerman K_a ja samalla fokusetäisyydellä määritetyn kenttäkoon A tulona ($P_{KA} = K_a \cdot A$). Jos ilmakerma määritetään etäisyydellä d_K ja pinta-ala etäisyydellä d_A , tulokset on muunnettava vastaamaan samaa etäisyyttä kertomalla tulo tekijällä $(d_K/d_A)^2$:

$$P_{KA} = K_a(d_K) \cdot A(d_A) \cdot (d_K/d_A)^2 \quad (1)$$

DAP-mittarin tai DAP-näytön kalibroinnissa (koh- ta 4.1) voidaan ilmakerma mitata tarkalla ilma- kermamittarilla ja säteilykenttä kuvata röntgen- filmille tai digitaaliselle ilmaisimelle pinta-alan mittaamista varten.

Potilastutkimuksissa ei yleensä tehdä ilmaker- mamittauksia kuvausten aikana. Jos kuvausarvot ovat tallessa, ilmakerma voidaan mitata simu- loidussa kuvauksessa myöhemmin tai se voidaan arvioida röntgenlaitteen mitatun säteilyntuoton perusteella (STUK 2004, liite 5). Kuvauksessa käytettyä kenttäkokoja ei yleensä voida toistaa

luotettavasti, mutta usein se voidaan karkeasti arvioida potilaan röntgenkuvasta, jos kentän reu- nat ovat näkyvissä. Ilmakerman ja pinta-alan tulo P_{KA} lasketaan sijoittamalla kuvauksen tuottama ilmakerma K_a ja etäisyyttä d_A vastaava kenttäkoko $A(d_A)$ yhtälöön (1). Menetelmä ei sovellu mitta- reiden kalibrointiin, koska tuloksen epävarmuus muodostuu suureksi. Se ei ole kovin hyödyllinen potilasmittauksissakaan, koska yleensä ilmaker- man määrittäminen riittää siinä tapauksessa, että DAP- mittaria ei ole käytettävissä.

Röntgenlaitteen mahdollinen DAP-laskenta- ohjelma voi määrittää ilmakerman kuvausasetus- ten perusteella ja kenttäkoon kaihtimien paikan ja asennon perusteella. Käytön ja kalibroinnin kannalta se vastaa röntgenlaitteeseen kiinteästi asennettua DAP-mittaria.

3.3 Paine- ja lämpötilakorjaus

Avoimessa ionisaatiokammiossa syntyvä ionisaa- tiovaraus riippuu ilmanpaineesta ja lämpötilasta. Tarkan arvon saamiseksi mittarin näyttämä on korjattava sovittuja normaalioloja vastaavaksi kertomalla se painekorjauskertoimella

$$k_p = 101,325 \text{ kPa} / p$$

ja lämpötilakorjauskertoimella

$$k_T = (273,15 \text{ K} + T) / 293,15 \text{ K} \quad (3)$$

Yhtälössä (2) p on ilmanpaine, ja yhtälössä (3) T on ilman lämpötila (°C) kammion kohdalla. Sovittuna oletuksena näissä kaavoissa on käytetty normaali-
lipainetta $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$ ja normaalilämpötilaa $T_0 = 20 \text{ °C}$.

Paine- ja lämpötilakorjauksen tarkoitus on muuntaa mittarin mittaustilanteessa näyttämä arvo vastaamaan sitä ilman tiheyttä, jossa mittarin kalibrointi on voimassa. Samat korjaukset (2) ja (3) koskevat kaikkia avoimia ionisaatiokammioita. Monissa ilmakermamittareissa paine- ja

(tai) lämpötilakorjaus tehdään automaattisesti. Nykyisissä DAP-mittareissa automaattista korjausta ei yleensä ole, mutta se on standardin IEC 60580 mukaan mahdollista. Käytettävän mittarin toimintatapa on aina syytä tarkistaa.

Käytännön mittauksissa kaavojen (2) ja (3) mukaista korjausta ei yleensä tehdä. Korjaus voi olla DAP-mittareille melko epätarkka, mikä vähentää sen hyödyllisyyttä. Yleensä kuitenkin korjattu arvo on oikeampi kuin korjaamaton, ja siihen liittyvä epävarmuus voidaan arvioida pienemmäksi kuin korjaamattoman arvon epävarmuus. Tulosten luotettavuuden ja epävarmuuden arvioimiseksi tieto ilmanpaineesta ja lämpötilasta on hyödyllinen myös siinä tapauksessa, että korjausta ei tehdä (kohta 5.1).

4 DAP-kenttämittarin kalibrointimenetelmiä

DAP-kenttämittarilla on tarkoitus mitata kerman ja pinta-alan tulo potilaan kohdalla tutkimuksen aikana. Kalibroinnin avulla mittarin antama mittaustulos saadaan vastaamaan DAP-arvoa potilaaseen kohdistuvassa säteilykeilassa, jonka ominaisuuksiin myös mittari itse on vaikuttanut. Toisaalta säteilyn absorboituminen ilmaan sekä röntgenlaitteen tuottama hajasäteily vaikuttavat DAP-arvoon etäisyydestä riippuvalla tavalla. Tästä syystä DAP-kenttämittari olisi mieluiten kalibroitava mittarin käyttöpaikalla käyttäen samaa röntgenlaitetta ja samoja säteilylaatuja kuin potilasmittauksissa. Kalibroinnissa käytettävät säteilylaadut valitaan käyttötarpeen perusteella.

DAP-kenttämittareiden kalibrointiin on yleisesti käytetty *pinta-alamenetelmää*, jossa mitataan erikseen ilmakerma säteilykeilan keskiakselilla ja keilan poikkileikkauksen pinta-ala (kohta 4.1). Kalibroinnissa ilmakerman ja pinta-alan mitattujen arvojen tuloa verrataan kalibroitavan DAP-kenttämittarin näyttämään, joka on mitattu samanaikaisesti ilmakerman kanssa. Jos DAP-kenttämittarin kalibrointikerroin tunnetaan tarkasti vähintään yhdellä säteilylaadulla, kalibrointikerroin saman röntgenlaitteen muille säteilylaaduille voidaan arvioida myös suhteellisten ilmakermamittausten avulla (liite 1).

Kalibrointi voidaan tehdä myös kalibroidulla DAP-vertailumittarilla, joka on säteilykeilassa samanaikaisesti kalibroitavan DAP-kenttämittarin kanssa (kohta 4.2). Tässä *tandem-menetelmässä* kalibroitavan kenttämittarin näyttämää verrataan määritelmän mukaiseen, vertailumittarilla mitattuun kerman ja pinta-alan tuloon.

Vertailumittari (ilmakermamittari tai DAP-mittari) kalibroidaan yleensä kalibrointilaboratoriossa siten, että kalibrointi voidaan jäljittää kansainväliseen mittausjärjestelmään. Myös DAP-

kenttämittari voidaan kalibroida laboratoriossa, jos se on erillinen, itsenäinen mittari ja voidaan irrottaa röntgenlaitteesta. Tällöin olisi kuitenkin selvitettävä mittausetäisyyden ja hajasäteilyn vaikutus kenttämittariin käyttöpaikalla, missä voidaan tarvittaessa määrittää röntgenlaittekohtainen korjaus (kohta 4.3).

Mittarin valmistajan tai kalibrointilaboratorion DAP-mittarille ilmoittamia kalibrointikerroimia käytettäessä on otettava huomioon, mille säteilylaaduille ne on määritetty ja ovatko ne voimassa mittakammioon kohdistuvalle vai kammion läpäiselle säteilylle. Säteilyn vaimeneminen ja suodattuminen kammiossa aiheuttaa vastaavan eron kohdistuvan ja läpäisseen säteilyn kalibrointikertoimiin. Periaatteena molemmissa kalibrointimenetelmissä (kohdat 4.1 ja 4.2) on, että kenttämittarilla ja vertailumittarilla mitataan samaa säteilykeilaa siten, että mitattava säteily on läpäissyt kenttämittarin kammion ja kohdistuu vertailumittarin kammioon.

Kohtien 4.1–4.3 laskukaavoihin ei ole merkitty paineen ja lämpötilan korjauskertoimia, vaan niiden käyttö on harkittava erikseen todellisen mitaustilanteen mukaan (kohdat 3.3 ja 5.1).

4.1 Kalibrointi ilmakerman ja pinta-alan mittauksen avulla: pinta-alamenetelmä

Kalibroinnin suoritus

1. Kalibroitavan kenttämittarin DAP-kammio on omalla paikallaan röntgenlaitteeseen kiinnitettyä samalla tavalla kuin potilasmittauksissa.
2. Vertailumittarin ilmakermakammio asetetaan keskelle säteilykeilaa, suunnilleen samalle etäisyydelle fokuksesta kuin potilaan pinta tyyppillisessä kuvauksessa ja mieluiten yli 30 cm etäisyydelle kenttämittarin DAP-kammiosta.

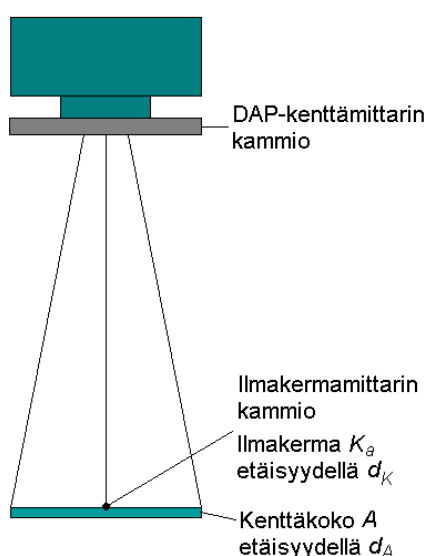
Kammioiden lähellä säteilykeilassa ei saisi olla sirontaa aiheuttavia rakenteita, laitteita eikä muita kappaleita. (kuva 2)

3. Kenttäkooksi ilmakermakammion kohdalla asetetaan noin $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. Kammion koon mukaan on tarvittaessa käytettävä suurempaa kenttää, jotta kammio mahtuisi kokonaan säteilykentän tasaiselle keskialueelle (ei puolivarjoalueelle). DAP-kammio ja ilmakermakammio säteilytetään samanaikaisesti.
4. Sama säteilykenttä kuvataan filmille tai digitaaliseen ilmaisimelle siten, että kuvareseptori on mahdollisimman lähellä samaa etäisyyttä kuin ilmakermakammio kohdan 3 mittauksissa. Pienet etäisyyserot ilmakerman ja kenttäkoon mittauksissa korjataan yhtälön (1) mukaisesti etäisyyden neliöiden suhteessa vastaamaan samaa etäisyyttä. Kuvauksessa käytetty mitta-kaava on tarvittaessa varmistettava käyttämällä sopivia mittakappaleita tarkasti tunnetulla etäisyydellä.

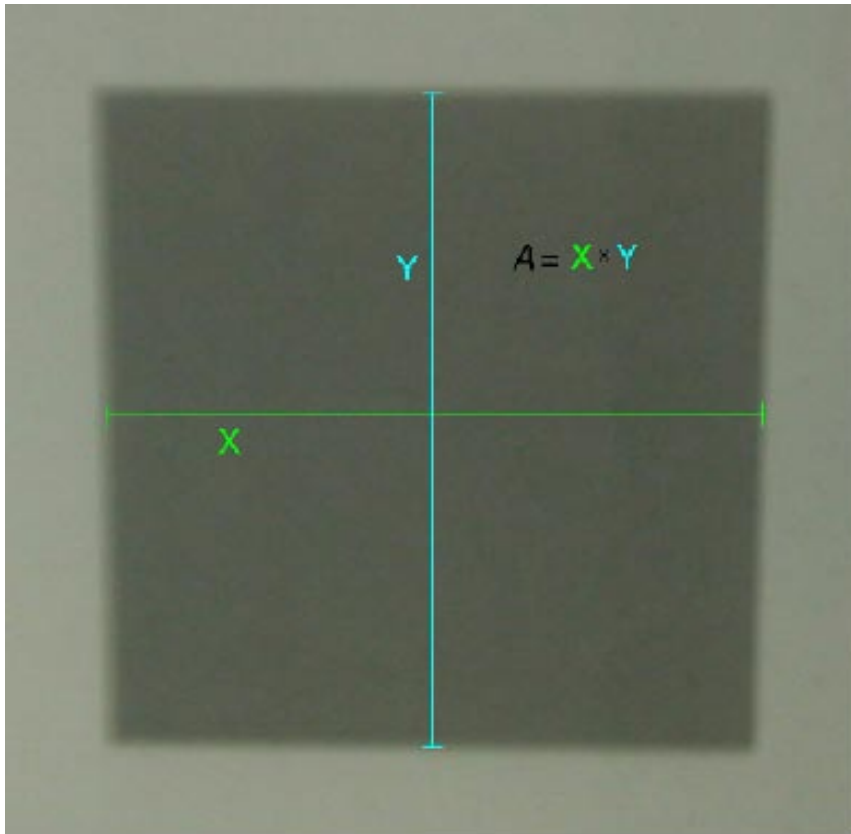
Kenttäkokokuvat säteilytetään siten, että kentän keskialueen mustuma on selvästi vaaleampi (optinen tiheys $0,5\text{--}1,4$) kuin filmille ominainen maksimimustuma ja kentän puolivarjot osuvat filmin mustumakäyrän lineaariselle alueelle. Kentän korkeus ja leveys mitataan kentän pääakselien suunnassa, puolivarjojen mustuman arvioituista puolivarjokohdista. (kuva 3)

Kohtien 3 ja 4 järjestys on vapaavalintainen, kunhan kenttäkokoasetuksia ei välillä muuteta. Yleensä kaihtimien asetuksia ei voi palauttaa tarkasti ja luotettavasti ennalleen, jos niitä on välillä muutettu.

5. Kohtien 3 ja 4 mukainen säteilytys ja kuvaus tehdään kaikilla säteilylaaduilla, joita vastaava kalibrintikerroin halutaan määrittää. Käytännössä kenttäkoko ei riipu sanottavasti säteilylaadusta; siksi kuvausta ei välttämättä tarvitse toistaa jokaisen säteilylaadun kohdalla, ellei kenttäkokoasetuksia ole muutettu (suhteellinen ilmakermamittaus, liite 1). Eri säteilylaadut kannattaa muutoinkin mitata käyttämällä vakioetäisyyksiä ja kenttäkoon vakioasetuksia, koska se helpottaa tulosten vertailua ja tarkistusta.
6. Kalibrintikertoimen kenttäkokoriippuvuuden selvittämiseksi tarkassa kalibroinnissa on syytä käyttää ainakin yhdellä säteilylaadulla myös muita kenttäkokoja, esimerkiksi $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$, $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ ja $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$. Samalla säteilylaadulla on syytä testata kalibrintikertoimen riippuvuutta ilmakermanopeudesta ja DAP-nopeudesta ja verrata tuloksia ohjekirjan tietoihin. Mittauksen avulla tarkistetaan, toimiiko DAP-mittari oikein myös pienillä ja isoilla ilmakermanopeuksilla.



Kuva 2. Pinta-alamenetelmä: kammioiden asettelu säteilykeilaan.



Kuva 3. Pinta-alamenetelmä: kenttään $A = X \times Y$ mittaaminen kuvasta.

Laskutoimitukset pinta-alamenetelmässä

Vertailuarvona käytettävä kerman ja pinta-alan tulo ($P_{KA\ ref}$) lasketaan yhtälön (1) mukaisesti, missä ilmakerma $K_a(d_K)$ mittausetäisyydellä d_K saadaan ilmakermamittarin näyttämän $M_{ref}(d_K)$ ja sen kalibrointikertoimen N_{ref} tulona:

$$P_{KA\ ref} = N_{ref} \cdot M_{ref}(d_K) \cdot A(d_A) \cdot (d_K/d_A)^2 \quad (4)$$

Vastaavasti kenttämittarin mittaama kerman ja pinta-alan tulo ($P_{KA\ field}$) voidaan kirjoittaa kenttämittarin näyttämän M_{field} ja kenttämittarille määritettävän kalibrointikertoimen N_{field} tulona:

$$P_{KA\ field} = N_{field} \cdot M_{field} \quad (5)$$

Kalibrointitilanteessa mittauksen kohteena on molemmissa tapauksissa sama kerman ja pinta-alan tulo, ja kenttämittarin mittaustulokselle asetetaan vaatimus:

$$P_{KA\ field} = P_{KA\ ref} \quad (6)$$

Tämän kalibrointivaatimuksen nojalla kenttämittarin kalibrointikerroin N_{field} voidaan ratkaista yhtälöistä (4) ja (5):

$$N_{field} = N_{ref} \cdot M_{ref}(d_K) \cdot A(d_A) \cdot (d_K/d_A)^2 / M_{field} \quad (7)$$

Kalibroitavan DAP-kenttämittarin kalibrointikerroin N_{field} lasketaan yhtälöstä (7) erikseen jokaiselle kalibroinnissa käytetylle säteilylaadulle. Jotta vertailumittarina käytettävälle ilmakermamittarille saataisiin oikea kalibrointikerroin, on tunnettava siihen kohdistuvan säteilyn laatu. Tarkoitukseen sopivilla, hyvälaatuisilla ilmakermamittareilla kalibrointikerroin muuttuu energian funktiona suhteellisen hitaasti ja voidaan tarvittaessa määrittää interpoloimalla likimääräisesti säteilyn puoliintumispaksuuden suhteen mittarin kalibrointitodistuksessa ilmoitettujen arvojen perusteella.

Esimerkki: DAP-kenttämittarin kalibrointi pinta-alamenetelmällä

Kalibroitavan kenttämittarin DAP-kammio oli kiinnitettynä röntgenlaitteen kaihdinkoteloon. Vertailumittarin sylinterimäinen ilmakermakammio asetettiin keskelle säteilykeilaa siten, että kammion akseli oli kohtisuorassa säteilykeilan akselia vastaan etäisyydellä $d_K = 99,5$ cm röntgenlaitteen fokuksesta. Kenttäkooksi kammion kohdalla asetettiin noin $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. Tutkimuspöytä ei ollut säteilykeilassa ilmakermamittauksen aikana.

Kammiot säteilytettiin samanaikaisesti käyttäen kokonaissuodatusta 5 mm Al ja putkijännitettä 80 kV. Vertailumittarin näyttämä oli 0,336 mGy ja DAP-kenttämittarin näyttämä 33,8 mGy·cm². Kalibroitodistuksen perusteella saatiin vertailumittarin kalibroitokertoimeksi 1,02.

Muuttamatta kaihtimien asetuksia kuvattiin säteilykenttä filmille siten, että filmin etäisyys fokuksesta oli $d_A = 100,5$ cm. Kokeilemalla saatiin sopivan vaalea kuva, josta mitattiin kentän leveydeksi filmillä 9,6 cm ja korkeudeksi 9,8 cm, ja kenttäkooksi filmillä saadaan:

$$A(d_A) = 9,6 \text{ cm} \cdot 9,8 \text{ cm} = 94,1 \text{ cm}^2$$

DAP-kenttämittarin kalibroitokertoimen lasketaan yhtälöstä (7):

$$N_{field} = N_{ref} \cdot M_{ref}(d_K) \cdot A(d_A) \cdot (d_K/d_A)^2 / M_{field}$$

$$= 1,02 \cdot 0,336 \text{ mGy} \cdot 94,1 \text{ cm}^2 \cdot (99,5 \text{ cm} / 100,5 \text{ cm})^2 / 33,8 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2 = 0,935$$

Kun kalibroitimittaus ja -lasku toistetaan sopivasti valituilla säteilylaaduilla, tulokset voidaan esittää kalibroitokäyrinä, kuten esimerkiksi kuvassa 6. (Edellä on eri tulos kuin kuvassa.)

4.2 Kalibrointi DAP-vertailumittarin avulla: tandem-menetelmä

Kalibroinnin suoritus

1. Kalibroitavan kenttämittarin DAP-kammio on omalla paikallaan röntgenlaitteeseen kiinnitettynä samalla tavalla kuin potilasmittauksissa.
2. Vertailumittarin DAP-kammio asetetaan säteilykeilaan siten, että sen etäisyys kenttämittarin kammiosta tai kaihdinkotelon ikkunasta on noin 30–40 cm. Kammioiden lähellä säteilykeilassa ei saisi olla sirontaa aiheuttavia rakenteita, laitteita eikä muita kappaleita. (kuva 4)
3. Kenttäkooksi vertailumittarin pinnalla asete-

taan noin $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$. Säteilykentän puolivarjoineen pitää kokonaan mahtua vertailumittarin alueelle. Kenttämittarin ja vertailumittarin kammiot säteilytetään samanaikaisesti. Säteilytys tehdään kaikilla säteilylaaduilla, joita vastaava kalibroitokertoimen halutaan määrittää.

4. Kenttäkoko-riippuvuuden testaamiseksi tarkassa kalibroinnissa on syytä käyttää ainakin yhdellä säteilylaadulla myös muita kenttäkokoja, esimerkiksi $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$, $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ ja $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. Samalla säteilylaadulla on syytä testata kalibroitokertoimen riippuvuutta ilmakermatopeudesta ja DAP-nopeudesta ja verrata tuloksia ohjekirjan tietoihin. Mittauksen avulla tarkistetaan, toimiiko DAP-mittari oikein myös pienillä ja isoilla ilmakermanopeuksilla.

Laskutoimitukset tandem-menetelmässä

Vertailumittarin mittaustuloksena kerman ja pinta-alan tulo saadaan kertomalla vertailumittarin näyttämä M_{ref} vertailumittarin tunnetulla kalibroitokertoimella N_{ref} :

$$P_{KA\ ref} = M_{ref} \cdot N_{ref} \quad (8)$$

Jotta se saataisiin yhtälön (5) mukaisesti myös DAP-kenttämittarin näyttämän M_{field} ja kalibroitokertoimen N_{field} tulona, on kalibroitokertoimen N_{field} oltava:

$$N_{field} = N_{ref} \cdot M_{ref} / M_{field} \quad (9)$$

Kalibroitavan DAP-kenttämittarin kalibroitokertoimen N_{field} lasketaan yhtälöstä (9) erikseen jokaiselle kalibroinnissa käytetylle säteilylaadulle. Myös DAP-vertailumittarin vaste riippuu säteilylaadusta. Vertailumittarin kalibroitokertoimet, jotka ovat voimassa kammioiden kohdistuvalle säteilylle, on kalibroitodistuksessa ilmoitettu useille eri säteilylaaduille. Yhtälöissä (9) ja (10) tarvittava vertailumittarin kalibroitokertoimen N_{ref} määritetään (interpoloimalla) kalibroitodistuksen perusteella, esimerkiksi kokonaissuodatuksen ja putkijännitteen avulla (kuva 5). Vaihtoehtoisesti määrittämisessä voidaan käyttää säteilyn mitattua puoliintumispaksuutta (HVL, mm Al) yhdessä kokonaissuodatuksen tai putkijännitteen kanssa.

Kokonaissuodatusta arvioitaessa otetaan huomioon laitteen perussuodatuksen ja lisäsuodatuk-

sen lisäksi kenttämittarin ja mahdollisesti myös tutkimuspöydän aiheuttama suodatusvaikutus. Keilassa olevan DAP-kammion aiheuttama suodatus vastaa noin $(0,3 \pm 0,2)$ mm Al. Se on yleensä ilmoitettu tarkemmin mittarin ohjekirjassa. Ellei tutkimuspöydän suodatusvaikutuksesta ole tarkempaa tietoa, voidaan karkeana arviona käyttää $(1 \pm 0,5)$ mm Al. Kokonaissuodatus saadaan laskeamalla yhteen kaikki suodatukset.

Esimerkki: DAP-kenttämittarin kalibrointi tandem-menetelmällä

Kalibroitavan kenttämittarin DAP-kammio on kiinnitetty yläputkilaitteeseen, joten tutkimuspöytä ei lisää potilaaseen kohdistuvan säteilyn suodatusta. Röntgenlaitteen perussuodatus on 2,6 mm Al ja käytettävä lisäsuodatus 2 mm Al. DAP-kenttämittarin ohjekirjan mukaan kammion suodatusvaikutus vastaa 0,3 mm Al. Vertailumittariin tulevan säteilyn kokonaissuodatus on tällöin 4,9 mm Al. Kalibroinnissa käytettiin putkijännitettä 80 kV.

Vertailumittarin kalibroitikerroin määritetään kalibroitodistuksen perusteella interpoloimalla putkijännitteen ja kokonaissuodatuksen suhteen. Jos käytetään samaa vertailumittaria kuin kuvassa 5, kalibroitikertoimeksi voidaan arvioida $N_{ref} \approx 1,11$ kokonaissuodatuksia 3 mm Al ja 5 mm Al vastaavien käyrien avulla.

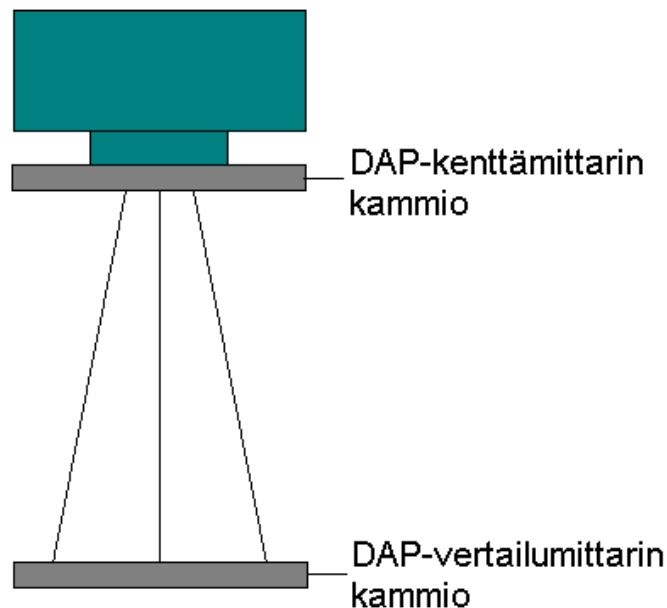
Kun DAP-kammiot säteilytettiin samanaikaisesti, oli kenttämittarin näyttämä

$$M_{field} = 32,2 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2 \text{ ja vertailumittarin näyttämä } M_{ref} = 28,4 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2.$$

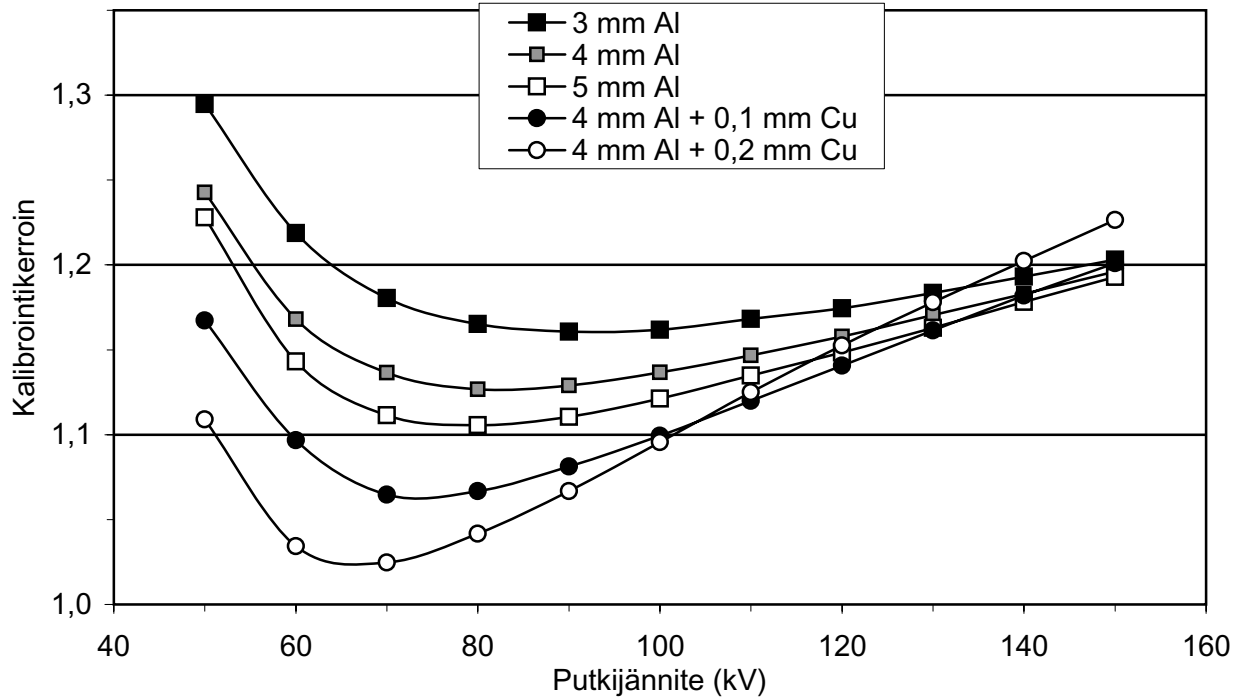
Kenttämittarin kalibroitikerroin ko. säteilylaadulla voidaan laskea yhtälön (9) mukaan:

$$N_{field} = N_{ref} \cdot M_{ref} / M_{field} = 1,11 \cdot 27,8 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2 / 33,3 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2 = 0,927.$$

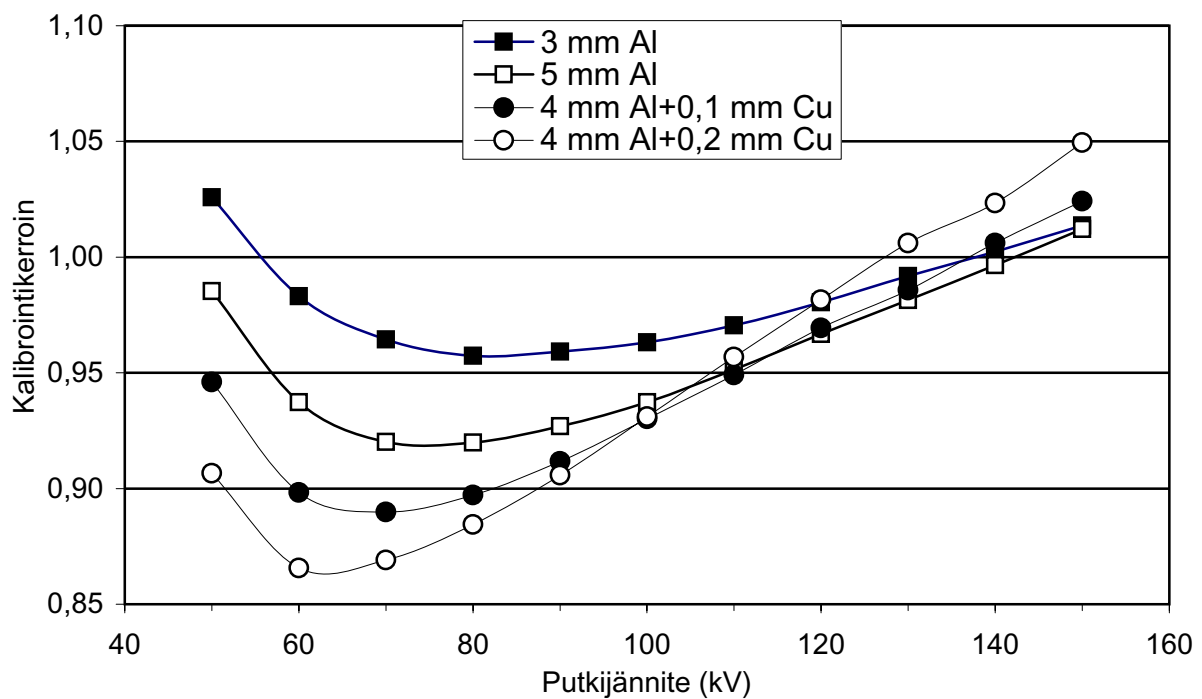
Kun kalibrointimittaus ja -lasku toistetaan sopivasti valituilla säteilylaaduilla, tulokset voidaan esittää kalibroitikäyrinä, kuten esimerkiksi kuvassa 6. (Edellä on eri tulos kuin kuvassa.)



Kuva 4. Tandem-menetelmä: kammioiden asettelu säteilykeilaan.



Kuva 5. Tandem-menetelmä, esimerkki: DAP-vertailumittarin kalibrintikerroin kammioon kohdistuvalle säteilylle putkijännitteen funktiona eri kokonaissuodatuksilla.



Kuva 6. Esimerkki: DAP-kenttämittarin kalibrintikerroin kammion läpäisseele säteilylle putkijännitteen funktiona eri kokonaissuodatuksilla.

4.3 Laboratoriossa kalibroidun kenttämittarin hajasäteilykorjaus

Vaikka kerman ja pinta-alan tulo ideaalisessa säteilykeilassa on riippumaton fokuksen ja mittaustason välisestä etäisyydestä, aiheuttaa säteilyn absorboituminen ilmaan ja röntgenlaitteen hajasäteily jonkin verran riippuvuutta mittausetäisyydestä. Siksi myös DAP-kenttämittarin kalibroitikerroin riippuu siitä, millä etäisyydellä kenttämittarin kammio on fokuksesta ja millä etäisyydellä DAP-arvo halutaan määrittää. Edellä kohdissa 4.1 ja 4.2 esitettyjen menetelmien mukainen kalibroitikerroin vastaa sitä etäisyyttä, missä vertailumittari on kalibroinnissa. Tämä etäisyys riittää korjaamaan röntgenlaitteen hajasäteilyn vaikutuksen, mutta korjaus pätee vain siinä röntgenlaitteessa, missä kalibrointi on tehty.

Kalibroitilaboratorion ilmoittama DAP-kenttämittarin kalibroitikerroin on mitattu kammion sovitussa referenssitasossa, joka yleensä on kammion etupinnan tai keskielektrodin kohdalla. Koska kalibrointi on tehty eri röntgenlaitteella kuin missä kenttämittaria käytetään, laboratorion ilmoittamaan kalibroitikertoimeen ei sisälly tietoa röntgenlaitteen hajasäteilystä. Siitä aiheutuva kalibroitikertoimen virhe voidaan korjata käyttämällä röntgenlaittekohtaista hajasäteilyn korjauskerrointa $k(d, d_0)$, joka voidaan määrittää DAP-mittarin avulla tekemällä vertailumittaus kahdella eri etäisyydellä (d_0 ja d). Etäisyys d_0 tarkoittaa kammion referenssitason etäisyyttä fokuksesta kammion ollessa tavanomaisella paikallaan kaihdinkoteloon kiinnitettynä. Säteilykeilan DAP-arvo $P_{KA}(d_0)$ tässä tasossa saadaan mittarin näyttämän $M(d_0)$ ja laboratorion ilmoittaman kalibroitikertoimen N tulona:

$$P_{KA}(d_0) = N \cdot M(d_0) \quad (10)$$

Jos kammio siirretään toiselle etäisyydelle d , saadaan DAP-arvo vastaavalla tavalla:

$$P_{KA}(d) = N \cdot M(d) \quad (11)$$

Potilasmittauksissa kammio on etäisyydellä d_0 , mutta DAP-arvo $P_{KA}(d)$ halutaan määrittää etäisyydellä d :

$$P_{KA}(d) = N(d, d_0) \cdot M(d_0) \quad (12)$$

Tarvittava kalibroitikerroin $N(d, d_0)$ voidaan ratkaista kahdesta edellisestä yhtälöstä muodossa

$$N(d, d_0) = N \cdot M(d) / M(d_0) = N \cdot k(d, d_0) \quad (13)$$

missä hajasäteilyn korjauskerroin $k(d, d_0)$ voidaan määrittää DAP-mittarin avulla tekemällä vertailumittaus kammion etäisyyksillä d ja d_0 :

$$k(d, d_0) = M(d) / M(d_0) \quad (14)$$

Yhtälöissä $M(d)$ ja $M(d_0)$ tarkoittavat DAP-mittarin näyttämiä, jotka on mitattu käyttäen etäisyyksiä d ja d_0 sekä kenttäkoon ja säteilytyksen vakioasetuksia. Kenttäkoko on valittava siten, että säteilykeila puolivarjoalueineen mahtuu kokonaan kammion mittausalueelle molemmilla etäisyyksillä.

Hajasäteilyn korjauskertoimen määrittämiseen sopiva etäisyyden muutos on noin 30 cm. Tällaisessa mittauksessa absorptio ja hajasäteilyn yhteisvaikutus on tyypillisesti muutama prosentti ja riippuu jonkin verran säteilylaadusta. Korjaus on röntgenlaittekohtainen, ja se on syytä mitata muutamalla valitulla säteilylaadulla. Uusi mittaus tarvitaan vain, jos röntgenlaitteeseen tai DAP-kammion kiinnitykseen tehdään muutoksia. Yli 30 cm etäisyydellä kaihtimista hajasäteilyn osuus on hyvin vähäinen, joten sama hajasäteilykorjaus pätee suuremmillakin etäisyyksillä.

Esimerkki: Hajasäteilykorjauksen mittaaminen

Tämä esimerkki koskee vain laboratoriossa kalibroituja kenttämittaria. Kalibroitilaboratorion antaman todistuksen perusteella on DAP-kenttämittarin kalibroitikertoimeksi saatu $N = 0,965$ (mittarin kohdalla) putkijännitteellä 80 kV ja kokonaissuodatuksella 4 mm Al. Mitataan hajasäteilykorjaus tälle säteilylaadulle.

DAP-mittari kiinni kaihdinkotelossa: Näyttämä $M(d_0) = 26,2 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ ($d_0 \approx 28 \text{ cm}$ fokuksesta).

Mittari siirretään 30 cm kauemmaksi: Näyttämä $M(d) = 24,8 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ ($d \approx 58 \text{ cm}$ fokuksesta).

Hajasäteilyn korjauskerroin lasketaan yhtälöstä (14):

$$k(d, d_0) = M(d) / M(d_0) = 24,8 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2 / 26,2 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2 = 0,947.$$

Korjattu kalibrointikerroin käyttöä varten laske-
taan yhtälöstä (13):

$$N(d, d_0) = N \cdot M(d) / M(d_0) = N \cdot k(d, d_0) = 0,965 \cdot 0,947 = 0,914.$$

4.4 Kalibrointimenetelmien arviointi

Pinta-alamenetelmä

Pinta-alamenetelmässä (kohta 4.1) kenttämittari ja vertailumittari ovat samanaikaisesti säteilykeilassa, jolloin ei tarvita yhtä tarkasti toistuvia kuvausarvoja kuin vuorotellen säteilytettäessä. Vertailumittarina voidaan käyttää hyvälaatuisia ionisaatiokammioita, jonka kalibrointikerroin riippuu suhteellisen vähän säteilyn energias-
ta kalibroitavan DAP-mittarin käyttöalueella. Ilmakermakammion koko saattaa rajoittaa pienimpien kenttäkokojen käyttöä kalibroinnissa, koska kammion pitää kokonaan mahtua säteilykeilan keskialueelle.

Mittausetäisyys ilmakermamittauksessa ja kuvausetäisyys pinta-alan määrittämisessä on tunnettava tarkasti. Kenttäkoon kuvaaminen ja määrittäminen kuvan perusteella vaatii huolellista työskentelyä. Kenttäkoon määrittäminen asetusarvojen tai valokentän perusteella on yleensä epätarkkaa ja epäluotettavaa eikä sovellu kalibrointitarkoituksiin.

Vertailutulos (kenttämittarille määritetty kalibrointikerroin) riippuu säteilylaadun ja kammion ominaisuuksien lisäksi myös säteilykeilan epätasaisuuksista ja profiilien muodosta, koska säteilykeilan keskeltä mitattu ilmakerma ei sisällä tietoa keilan ominaisuuksista mitta-alueen ulkopuolella. Siitä aiheutuu tuloksiin näennäistä kenttäkokeriippuvuutta, joka yleensä johtuu pikemminkin säteilykentän epätasaisuudesta kuin DAP-mittarin ominaisuuksista (kohta 5.1).

Tandem-menetelmä

Myös tandem-menetelmässä (kohta 4.2) kenttämittari ja vertailumittari ovat samanaikaisesti säteilykeilassa, joten kuvausarvojen toistettavuus ei aiheuta lisäepävarmuutta. Tandem-menetelmässä tarvitaan erityisesti vertailumittariksi kalibroitu DAP-mittari ja välineitä sen asettelemiseksi sä-

teilykeilaan. Tyypillisen DAP-mittarin riippuvuus säteilyn energiasta on voimakkaampi kuin hyvälaatuisilla ilmakermamittareilla: se vaatii monipuolisemman kalibroinnin kuin ilmakermamittari, ja säteilylaadun epävarmuus aiheuttaa siinä suuremman epävarmuuden kuin ilmakermamittauksessa. DAP-vertailukammion koko ja etäisyys rajoittavat suurimpien kenttäkokojen käyttöä kalibroinnissa, koska säteilykeilan pitää mahtua kokonaan vertailumittarin mitta-alueelle. DAP-vertailukammiona voitaisiin käyttää myös läpinäkyttämiä, grafiittirakenteisia kammioita, joilla on todettu vähäisempi riippuvuus säteilylaadusta kuin tavanomaisilla DAP-kammioilla (Bednarek, Rudin 2000). Kalibrointitarkoituksiin on saatavana myös suurikokoisia kammioita, joissa mitta-alue ulottuu kenttäkokoon 30 cm x 30 cm asti.

Kenttäkoko ei tarvitse määrittää erikseen, joten kaikki siihen liittyvät työvaiheet ja epävarmuustekijät jäävät pois. Vertailumittari ei vaadi tarkkaa etäisyyden asettelua, koska pienet muutokset etäisyydessä eivät vaikuta mittaustulokseen.

Vertailutulos (kenttämittarin kalibrointikerroin) riippuu vain säteilylaadusta ja kammion ominaisuuksista: hyvälaatuisilla kammioilla kalibrointikerroin on lähes riippumaton säteilykentän tasaisuudesta ja kenttäkoosta.

Laboratoriossa kalibroitu mittari ja hajasäteilykorjaus

DAP-kenttämittarin kalibrointi laboratoriossa on mahdollista vain, jos mittari on erillinen ja irrotettava. Periaatteessa tarkin kalibrointi voidaan tehdä kalibrointilaboratoriossa, mutta käytännössä tarkkuus kärsii siitä, että laboratoriossa käytettävissä olevat säteilylaadut eivät yleensä ole samoja kuin potilastutkimuksissa käytettävät laadut. Lisäksi tietyn röntgenlaitteen hajasäteilyn vaikutukset kenttämittarin näyttämään voidaan ottaa huomioon vain tekemällä hajasäteilykorjausmittaukset (kohta 4.3) kyseisellä laitteella. Näissä mittauksissa joudutaan tekemään kaksi erillistä säteilytystä, joten kuvausarvojen pitäisi olla tarkasti toistettavissa.

5 Kalibrointimittaukset

Jotta DAP-kenttämittarin kalibrointi kattaisi potilastutkimuksissa käytettävät säteilylaadut, kalibrointimittauksissa käytetään niitä vastaavia suodatuksia ja jännitealueita. Samalla säteilylaadulla on syytä tehdä ainakin kolme toistomittausta tulosten luotettavuuden varmistamiseksi. Mittarin näyttötarkkuuden pitäisi olla parempi kuin 1 % mitatusta arvosta: jos näytön viimeinen numero edustaa yhtä yksikköä, pitäisi mitattavan arvon olla yli sata yksikköä. Jos riittävän suureen arvoon on vaikea päästä, toistomittaukset voidaan tehdä kumulatiivisesti siten, että mittareiden näyttämät kirjataan muistiin toistojen välissä, mutta ne nolataan vasta viimeisen toiston jälkeen. Välitulosten vaihtelun perusteella voidaan havaita mittausvirheitä sekä arvioida lopputuloksen luotettavuutta ja epävarmuutta.

Kalibrointimittauksissa kirjattavia tietoja on lueteltu liitteessä 2, jossa on myös esimerkki lomakkeesta mittaustietojen ja tulosten keräämistä varten.

5.1 Kalibroinnissa huomattavia seikkoja

Tutkimuspöytä

Jos röntgentutkimuksessa säteilykeila kohdistuu potilaaseen pöytälevyn läpi, pöydän aiheuttama vaimennus ja suodatus pitää ottaa huomioon käyttämällä DAP-mittarille tässä tapauksessa eri kalibrointikerrointa. Kalibroinnissa vertailumittarin kammio asetetaan pöytälevyn yläpuolelle, jolloin säteilykeila vaimentuu samalla tavalla kuin kuvaustilanteessa. Koska pöydästä sironneen säteilyn määrää ja energijakaumaa ei tunneta, ei tunneta myöskään vertailumittarin kalibrointikerrointa sironneelle säteilylle. Tämän vuoksi myös kalibroinnin epävarmuus on suurempi kuin ilman pöytää tapahtuvassa mittauksessa.

Valotusautomaatti, kuvanvahvistin tai digitaalinen ilmainen

Jos kuvausarvoja ei voida asettaa käsin, valotusautomaatti yleensä katkaisee säteilytyksen ennen kalibroinnissa tarvittavan DAP-arvon saavuttamista. Jotta säteilyä saataisiin riittävästi, voidaan valotusautomaatin anturin eteen asettaa esimerkiksi kupari- ja alumiinilevyjä. Ne on sijoitettava säteilykeilaan vertailumittarin jälkeen, jotta ne eivät vaimentaisi siihen tulevaa säteilyä, ja riittävän kauas (yli 30 cm) vertailumittarista, jotta siihen ei siroaisi niistä liikaa säteilyä. Kalibroinnissa ei pidä tarpeettomasti säteilyttää herkkiä kuvanvahvistimia tai digitaalisia ilmaisimia säteilykeilassa, vaan laitteet on pyrittävä suojaamaan asianmukaisella tavalla.

Kenttäkoko

Jos tandem-kalibroinnissa käytetään niin suurta kenttää, että se vertailumittarin pinnalla ylittää 10 cm × 10 cm, voi osa puolivarjoalueesta joutua vertailukammion ulkopuolelle. Siinä tapauksessa vertailumittarin näyttämä (ja siitä laskettu kenttämittarin kalibrointikerroin) on liian pieni.

Liian pieni kalibrointikerroin saadaan myös, jos pinta-alamenetelmässä käytetään niin pientä kenttää, että osa ilmakermamittarin kammiossa jää säteilykentän ulkopuolelle tai puolivarjoalueelle.

Kalibroinnissa on syytä käyttää ainakin yhdellä säteilylaadulla useampia kenttäkokoja. Todellinen kenttäkokoriippuvuus aiheutuu DAP-kammion annosvasteen epätasaisuudesta, jota voidaan testata siirtämällä mittaria kapean säteilykeilan suhteen keilaa vastaan kohtisuorassa tasossa. Hyvälaatuisilla DAP-kammioilla vaste on erittäin tasainen.

Säteilykentän epätasaisuus

Säteilykentän epätasaisuus voi vaikuttaa pinta-alamenetelmässä siten, että DAP-kenttämittarin kalibrointikerroin näyttää riippuvan kenttäkoosta, vaikka todellista, mittarista johtuvaa riippuvuutta ei olisikaan (kohta 4.4). Kentän tasaisuutta voidaan tarvittaessa kartoittaa mittaamalla ilmakerma kentän eri kohdissa. Käytettäessä tandemkalibrointimenettelyä säteilykentän epätasaisuus ei huononna kalibroinnin tarkkuutta.

Säteilylaatu

DAP-mittarin vasteen energiariippuvuuden vuoksi kalibrointi joudutaan yleensä toistamaan useilla säteilylaaduilla. Yleensä hyvään tarkkuuteen päästään tekemällä kalibrointi kaikilla käytössä olevilla suodatuksilla käyttäen muutamaa sopivasti valittua putkijännitettä, jotka kattavat koko käyttöalueen. Jos kyseisen mittarityypin vasteen energiariippuvuus tunnetaan, voidaan tietoa käyttää apuna sopivien säteilylaatujen valinnassa. Kalibroinnissa tietyille suodatukselle käytettävät putkijännitteet voidaan valita kalibrointikäyrän jyrkältä osalta tiheästi ja loivalta osalta harvemmin.

Jos röntgenlaitteen säteilylaatu (suodatus ja putkijännite) tunnetaan huonosti, siitä aiheutuu yleensä tandem-menetelmässä suurempi epävarmuus kuin pinta-alamenetelmässä, koska kalibrointikerroin riippuu säteilyn energiasta yleensä voimakkaammin DAP-mittarilla kuin ilmakerma-mittarilla. Epävarmuus on sitä suurempi mitä enemmän kalibrointikerroin muuttuu jännitteen ja suodatuksen muuttuessa. Säteilylaatu voi olla huonosti tunnettu esimerkiksi laitteissa, jotka valitsevat automaattisesti suodatuksen ja (tai) putkijännitteen (luku 6). Apuna voidaan käyttää kuvareseptorin eteen sijoitettavaa metallilevyä tai muuta fantomia simuloimaan potilaan aiheuttamaa vaimennusta. Säteilyn puoliintumispaksuuden (HVL) mittaaminen antaa lisätietoa säteilylaadusta, mutta sekin on ongelmallista, ellei röntgenlaitteen automaattisia asetuksia voi lukita.

Paine- ja lämpötilakorjaus kalibroinnissa

Lämpötilakorjauksen tarpeellisuutta voidaan arvioida sillä perusteella, että kolmen asteen muutos kammion lämpötilassa merkitsee yhden prosentin muutosta korjauskertoimessa. Yleensä tutkimushuoneen lämpötila voidaan vakioida niin, ettei

suurempaa vaihtelua esiinny. Vallitsevaa ilmanpainetta sen sijaan ei voida vakioida, ja paineen suhteellinen muutos (%) muuttaa korjauskerrointa suhteellisesti saman verran.

Kalibroinnin tai muun mittarivertailun yhteydessä paine- ja (tai) lämpötilakorjaus on tarpeeton siinä tapauksessa, että vertailun molemmille mittareille olisi tehtävä yhtä suuri suhteellinen korjaus (avoimet kammiot samassa paineessa tai lämpötilassa). Jos sen sijaan oletetaan, että tietyn röntgenlaitteen DAP-mittari (kenttämittari) toimii aina suunnilleen vakiolämpötilassa, niin sen lämpötilakorjaus voidaan jättää tekemättä sekä kalibroinnissa että mittauksissa. Vertailumittarille lämpötilakorjaus pitää kuitenkin periaatteessa tehdä aina. Se supistuu pois vain siinä edellä mainitussa tilanteessa, että kenttämittarille olisi tehtävä samaa lämpötilaa vastaava korjaus.

Kalibrointitilanteessa röntgenlaitteen ja kenttämittarin olisi oltava normaalissa käyttölämpötilassa. Kun kenttämittarin ja vertailumittarin kammiot ovat saaneet tasaantua vallitseviin olosuhteisiin, vertailumittarin kammio on suunnilleen huoneen lämpötilassa, mutta röntgenputken ja valomerkkilamppujen tuntumassa oleva kenttämittarin kammio saattaa olla lämpimämpi. Kokeilumittauksissa on havaittu parin asteen lämpötilaeroja, kun röntgenputki on lämmennyt runsaassa käytössä.

Laskentaan perustuvalla DAP-näyttämälle ei tehdä paine- ja lämpötilakorjausta käytössä eikä kalibroinnissa. Sen vuoksi kalibroinnissa käytettävän vertailumittarin korjauksen merkitys korostuu varsinkin, jos ilmanpaine tai lämpötila on poikkeuksellinen.

On suositeltavaa, että kalibrointipalvelujen yhteydessä aina mitataan vallitseva ilmanpaine ja lämpötila, suoritetaan harkinnan mukaan tarvittavat korjaukset ja arvioidaan niihin liittyvät epävarmuudet osana kalibrointikertoimille ilmoitettavaa kokonaisepävarmuutta (luku 7).

5.2 DAP-mittarin kalibrointi erikoistarkoituksiin

Luvussa 4 on kuvattu DAP-kenttämittarin kalibrointia tavanomaiseen käyttöön eli mittaamaan kerman ja pinta-alan tuloa säteilykeilasta, joka on läpäissyt mittarin ja kohdistuu potilaaseen röntgenutkimuksessa. Seuraavassa tarkastellaan DAP-mittarin käyttöä tiettyihin erikoistarkoituk-

siin, jolloin se saattaa vaatia tavanomaisesta poikkeavan kalibroinnin.

DAP-vertailumittari

Toisin kuin tavanomainen kenttämittari, DAP-vertailumittari kalibroidaan mittariin kohdistuvan säteilykeilan suhteen. Yleensä kalibrointi tehdään laboratoriossa siten, että säteilykeilan keskeltä erotetaan lisärajoittimen avulla tasainen alue, jonka geometrinen pinta-ala tunnetaan tarkasti. Kerman ja pinta-alan tulo rajatussa säteilykeilassa määritetään ilmakermamittausten tai kalibroidun DAP-mittarin avulla. Vertailumittarin kalibrointikertoimia ei voi sellaisenaan käyttää tavallisissa potilasmittauksissa, vaan se pitää tällaista käyttöä varten erikseen kalibroida mittamaan kammion läpäisyyttä säteilyä.

Kiertävä DAP-mittari

Kiertäviä DAP-mittareita kierrätetään mittauksia varten sellaisissa röntgenlaitteissa, joissa ei ole omaa mittaria. Näissä laitteissa potilaat siis kuvataan ilman DAP-mittaria silloin, kun kiertävä mittari ei ole käytettävissä. Kiertävän mittarin kalibrointi on suunniteltava mittarin käyttötarpeen ja käyttötavan mukaan.

Potilastutkimukset valotusautomaattia käyttäen:

Kiertävä DAP-mittari kalibroidaan, kuten muutkin DAP-kenttämittarit, kammion läpäisseen säteilykeilan suhteen. Mitatut kerman ja pinta-alan tulot pätevät mitatuille potilaille ja edustavat hyvää likiarvoa myös niille samankokoisille potilaille, jotka kuvataan samalla tavalla ilman DAP-mittaria.

Potilastutkimukset käsin asetetuilla vakioarvoilla ilman valotusautomaattia:

Kun kiertävä DAP-mittari on kalibroitu kammion läpäisseen säteilyn suhteen, niin kerman ja pinta-alan tulon mitattu arvo pätee DAP-mittarin kanssa kuvatuille potilaille, mutta on liian pieni niille potilaille, jotka kuvataan samoilla asetuksilla ilman DAP-mittaria.

Jos taas kiertävä DAP-mittari on kalibroitu kammioon *kohdistuvan* säteilyn suhteen, niin mitattu kerman ja pinta-alan tulo pätee parhaiten potilaille, jotka kuvataan samoilla asetuksilla ilman DAP-mittaria, mutta on liian suuri mittarin kanssa kuvatuille potilaille. Näin kalibroitu DAP-mittari soveltuu hyvin mittauksiin, jotka tehdään simuloiduissa tutkimuksissa ilman potilasta.

Kiertävä DAP-mittari on syytä kalibroida erikseen jokaisessa röntgenlaitteessa, jotta kaihtimista siroavan ja fokuksen ulkopuolelta tulevan säteilyn osuus tai muut laitekohtaiset erot eivät vaikuttaisi mittaustuloksiin. Voidaan käyttää myös vaihtoehtoista tapaa, jos mittari on kalibroitu tarkoitusta varten riittävän monipuolisesti. Röntgenlaittekohtainen hajasäteilykorjaus (kohda 4.3) kiertävän mittarin kalibrointikertoimelle voidaan määrittää vertailumittauksilla, jotka tehdään samalla DAP-mittarilla kahdella etäisyydellä. Kiertävän mittarin kalibrointi laboratoriossa on syytä tehdä niin monipuolisesti, että sen avulla voidaan määrittää kalibrointikerroin ainakin yhdelle säteilylaadulle jokaisella käyttöpaikalla. Käyttöpaikan muille säteilylaaduille kalibrointikerroin voidaan tarvittaessa määrittää suhteellisten ilmakermamittausten avulla (liite 1).

DAP-mittaus hammaskuvauslaitteessa

Hampaiden panoraatomografiatutkimuksissa potilaan säteilyaltistus voidaan määrittää DAP-mittarin avulla siten, että mittari sijoitetaan kuvauslaitteeseen röntgenputken eteen ja tehdään röntgenkuvaus ilman potilasta mutta käyttäen normaalikokoisen potilaan kuvausarvoja käsisäätöisesti. Jos kuvausarvoja ei voida asettaa käsin, riittävä säteily määrä voidaan saavuttaa käyttämällä valotusautomaatin anturin edessä sopivia suodattimia. Koska mittari ei ole mukana potilasta kuvattaessa, on mittauksessa käytettävä DAP-mittari kalibroitava mittariin kohdistuvan säteilykeilan suhteen. Vertailumittariksi kalibroitu DAP-mittari soveltuu siis suoraan hampaiden panoraatomografialaitteen annosten mittaukseen.

6 Kalibrointikertoimen käyttö potilasmittauksissa

DAP-kenttämittarin kalibrointikerroin otetaan huomioon potilasmittausten tulosten käsittelyn yhteydessä. Kenttämittarin näyttämä kerrotaan kalibrointikertoimella, joka valitaan käytetyn säteilylaadun mukaan. Potilasannosten määritysten kannalta on tärkeää sopia täsmällisesti, missä käsittelyvaiheessa kalibrointikerroin otetaan käyttöön ja miten asia merkitään tiedoksi, jotta ei tehtäisi moninkertaisia korjauksia.

DAP-mittareiden kalibrointikerroin muuttuu yleensä jyrkästi energian funktiona varsinkin alle 60 kV:n putkijännitteillä (kuva 6). Vakiosuodatusta vastaavan kalibrointikäyrän tasaisella alueella (usein suunnilleen välillä 70 kV–100 kV) voidaan käyttää useammalle säteilylaadulle yhteistä kalibrointikerrointa. Eräiden kammioiden kalibrointikäyrä jatkuu melko tasaisena suuremmillakin putkijännitteillä. Säteilylaatu vaikuttaa myös kalibrointikertoimen tarkkuuteen.

Eräät kuvauslaitteet voivat automaattisesti vaihtaa suodatusta ja (tai) putkijännitettä siten, että käyttäjällä on tiedossa vain toiminta-alueen rajat eikä mahdollisuuksia omiin valintoihin. Tällaisessa tapauksessa voidaan arvioida putkijännitteen ja suodatuksen vaihteluvälit ja valita näiden perusteella DAP-mittarille sopiva keskimääräinen kalibrointikerroin. Tällöin joudutaan tyytymään epätarkempiin kalibrointikertoimiin ja mittaustuloksiin kuin kuvattaessa tunnetuilla säteilylaaduilla.

Tutkimuksissa, joissa tutkimuspöytä on fokuksen ja potilaan välissä, on käytettävä tätä asetelmaa varten mitattuja kalibrointikertoimia. Jos säteilykeila tulee osan aikaa pöydän läpi mutta osan ajasta kohdistuu suoraan potilaaseen, voidaan eri vaiheiden osuudet arvioida ja käyttää niiden mukaan painotettua keskimääräistä kalibrointikerrointa. Arvioinnin epävarmuus vaikuttaa myös tuloksiin, ja lisää epävarmuutta voi aiheuttaa säteilykeilan kohdistuminen potilaaseen vinosti pöydän läpi.

Mittaustulosten tulkinta voi vaatia erityistä huomiota esimerkiksi kiertävää DAP-mittaria käytettäessä (kohta 5.2). Ellei DAP-kammio ole paikallaan laitteessa kaikissa potilastutkimuksissa, niin käsisäätöisiä vakioasetuksia käytettäessä potilas saa ilman kammiota kuvattaessa suuremman annoksen kuin kammiota käytettäessä. Valotusautomaattikkaa käytettäessä potilaan saama annos on lähes riippumaton siitä, onko DAP-kammio paikallaan vai ei.

Esimerkki: Kalibrointikertoimen käyttö potilasmittauksessa

Potilaan lannerangan AP-kuva otettiin käyttäen kuvausjännitettä $U = 75$ kV ja kokonaissuodatusta 5 mm Al. Röntgenlaitteessa käytettiin DAP-mittaria, jonka kalibrointikertoimia on esitetty kuvassa 6. Graafisesti interpoloimalla arvioidaan kuvausjännitettä ja kokonaissuodatusta vastaavaksi kalibrointikertoimeksi $N_{field} = 0,92$.

Kuvauksen jälkeen DAP-mittarin korjaamaton näyttämä oli 66,2 mGy·cm².

Kuvaushuoneen lämpötila oli 23 °C ja mitattu ilmanpaine 98,3 kPa.

Painekorjauskerroin on yhtälön (2) mukaan

$$k_p = 101,325 \text{ kPa} / 98,3 \text{ kPa} = 1,03$$

ja lämpötilakorjauskerroin yhtälön (3) mukaan

$$k_T = (273,15 \text{ K} + T) / 293,15 \text{ K} = 296,15 \text{ K} / 293,15 \text{ K} = 1,01.$$

Paineen ja lämpötilan suhteen korjattu näyttämä on siis

$$M_{field} = 1,03 \cdot 1,01 \cdot 66,2 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2 = 68,9 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2.$$

Kerman ja pinta-alan tulo lasketaan yhtälön (5) mukaan:

$$P_{KA} = P_{KA \text{ field}} = N_{field} \cdot M_{field} = 0,92 \cdot 68,9 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2 \approx 63,4 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2.$$

7 Epävarmuuden arviointi

Tulosten tarkkuutta ja luotettavuutta voidaan kuvata arvioidun epävarmuuden avulla, jota voidaan käyttää apuna myös menetelmien valinnassa ja korjausten tarpeellisuuden arvioinnissa. Epävarmuuden arviointia tarkastellaan yksityiskohtaisemmin liitteessä 3, jossa on myös esimerkkejä kalibrointimenetelmiin ja potilasmittauksiin liittyvien epävarmuuksien arvioimisesta. Luku 7 on tiivistelmä liitteen 3 tekstiosasta.

Kenttämittarin kalibrointikertoimen N_{field} suhteellinen epävarmuus voidaan arvioida yhtälön (7) tai (9) perusteella siten, että yhdistetään neliöllisesti tulon kaikkien tekijöiden suhteelliset epävarmuudet. Vertailumittarin kalibrointikertoimen N_{ref} epävarmuus koostuu kalibrointitodistuksen mukaisesta kalibrointiepävarmuudesta ja säteilylaadun epävarmuuden vaikutuksesta. Lisäksi on otettava huomioon paine- ja lämpötilakorjauksen epävarmuuden vaikutus suhteeseen M_{ref} / M_{field} , koska käytännössä eri mittareiden käyttäytymisen paineen ja lämpötilan funktiona voi poiketa yhtälöistä (2) ja (3).

Potilasmittauksissa korjatun mittaustuloksen $k_T \cdot k_p \cdot N_{field} \cdot M_{field}$ suhteellinen epävarmuus arvioidaan yhdistämällä neliöllisesti tekijöiden suhteelliset epävarmuudet. Jos paine- ja lämpötilakorjausta ei tehdä, on siitä aiheutuva suhteellinen epävarmuus erotuksen $k_T \cdot k_p - 1$ itseisarvo. Jos korjaus tehdään, epävarmuudeksi voidaan vastaavasti arvioida puolet erotuksen itseisarvosta.

Jos käytetään yhteistä kalibrointikerrointa laajalla säteilylaatualueella, on tästä aiheutuva lisäepävarmuus otettava huomioon erikseen, ellei se sisälly kalibrointikertoimelle ilmoitettuun epävarmuuteen.

Useista potilaista koostuvaa ryhmää kuvaavan keskiarvon epävarmuuteen vaikuttavat sekä mittauksen epävarmuus että mitattavan suureen potilaskohtainen vaihtelu. Todellista potilaiden välistä vaihtelua ei voi vähentää mittaustarkkuutta parantamalla, mutta usein sitä voidaan vähentää käyttämällä sopivaa luokittelua tai esittämällä mittaustulokset jonkin selittävän muuttujan (esimerkiksi potilaan paksuuden) funktiona (STUK 2004, liite 8).

Kohtuullisen hyvin tunnetuissa ja hallituissa olosuhteissa DAP-kenttämittarin kalibrointikerroimet voidaan määrittää tarkkuudella, jota vastaava kokonaisepävarmuus on alle 7 %, ja kerman ja pinta-alan tulot yksittäisille potilaille vastaavasti 10 % tarkkuudella. Mittarin toiminta-alueen rajalla (pienillä DAP-arvoilla) tehtävissä potilasmittauksissa kokonaisepävarmuus on tyypillisesti noin 20 %. Tässä ja liitteen 3 esimerkeissä esitetyt epävarmuuden numeroarvot eivät kelpaa käytettäväksi sellaisenaan, vaan epävarmuus on aina arvioitava erikseen todellisessa kalibroinnissa ja mittauksessa käytettyjen laitteiden ja menettelytapojen perusteella.

8 DAP-mittarin toimintakunnon seuranta ja kalibrointiväli

DAP-mittari on herkkä mittalaite, jonka toimintaa on syytä tarkkailla ja seurata käyttöohjeen opastamalla tavalla päivittäisessä käytössä. Lisäksi DAP-mittarin toimintakunnon tarkistus on syytä sisällyttää röntgenlaitteen tekniseen laadunvalvontaan. DAP-mittareissa on yleensä testipainike, jonka avulla mittarin sähköinen toiminta voidaan tarkistaa. Suositeltavaa on tehdä päivittäinen tarkistusmittaus laitteiden käynnistämisen yhteydessä säteilyttämällä DAP-mittaria vakioasetuksia käyttäen (suodatus, putkijännite, kenttäkoko ja sähkömäärä), jolloin myös mittarin näyttämän pitäisi toistua melko vakiona. Tarkistuksessa kannattaa yleensä käyttää röntgenlaitteen suurinta kenttäkokoja, jotta sen asetus toistuisi luotettavasti.

Mittarin ensimmäisessä kalibroinnissa voidaan valita tarkistussäteilytyksen asetusarvot ja kirjata muistiin sitä vastaavat mittaustulokset ja kenttäkoko. Samalla voidaan arvioida myös vaihteluväli, jonka sisällä tulosten pitäisi pysyä. Tarkistusmittauksen tulokseen voivat vaikuttaa vaihtelut röntgenlaitteen säteilyntuotossa, kenttäkoon asettelussa, ilmanpaineessa ja lämpötilassa. Tulosten arvioinnin kannalta on hyödyllistä,

että näitä tekijöitä koskevat tiedot ovat muistissa. Tarkistusmittauksen poikkeava tulos voi johtua myös siitä, että mittari tai röntgenlaite ei ole ehtinyt tasaantua käynnistämisen jälkeen. Siksi poikkeavan tuloksen antanut mittausta kannattaa aina toistaa pari kertaa samoilla asetuksilla.

Seuraamalla tarkistusmittausten tuloksia graafisesti voidaan nähdä mahdolliset ajalliset muutokset. Muutoksia arvioitaessa on otettava huomioon kaikki tulokseen vaikuttavat tekijät. Jos todetaan, että muutos johtuu DAP-mittarista, on arvioitava uuden kalibroinnin tai mittarin korjauksen tarve. Vaikka tarkistusmittausten tulokset olisivatkin asetetun vaihteluvälin sisällä, pitäisi DAP-mittarin kalibroinnin pysyvyys tarkistaa ainakin yhdellä säteilylaadulla kerran vuodessa. Jos tulos poikkeaa edellisestä kalibroinnista yli 3 %, poikkeama on syytä ottaa huomioon epävarmuustekijänä. Jos poikkeama ylittää 5 %, on syytä testata mittaria tarkemmin ja harkita uuden kalibroinnin tarvetta. Jos mittaria joudutaan korjaamaan tai säätämään, se on yleensä myös kalibroitava uudelleen. Joka tapauksessa on suositeltavaa, että DAP-mittari kalibroidaan kaikilla tarvittavilla säteilylaaduilla vähintään kerran viidessä vuodessa.

Kirjallisuusviitteet

- Alm Carlsson G, Dance DR, Persliden J, Sandborg M. Use of the concept of energy imparted in diagnostic radiology. *Appl. Radiat. Isot.* 1999; 50(1): 39–62.
- Bednarek DR, Rudin S. Comparison of two dose-area-product ionization chambers with different conductive surface coating for over-table and under-table configurations. *Health Phys.* 2000; 78(3): 316–321.
- Gfirtner H, Stieve F-E, Wild J. A new Diamentor for measuring kerma-area product and air-kerma simultaneously. *Med. Phys.* 1997; 24: 1954–1957.
- International Atomic Energy Agency. Dosimetry in diagnostic radiology: An international code of practice. Technical reports series no. 457. Vienna: IAEA; 2007.
- International Commission on Radiation Units and Measurements. Patient dosimetry for x rays used in medical imaging. ICRU Report 74. *Journal of the ICRU* 2005; 5(2).
- IEC 60580. Medical electrical equipment – Dose area product meters. Geneva: International Electrotechnical Commission; 2000.
- IEC 60601-2-43. Medical electrical equipment – Part 2-43: Particular requirements for the safety of X-ray equipment for interventional procedures. Geneva: International Electrotechnical Commission; 2000.
- International Organization for Standardization. Guide to the expression of uncertainty in measurement. Second edition. Geneva: ISO; 1995.
- Larsson JP, Persliden J, Alm Carlsson G. Ionization chambers for measuring air kerma integrated over beam area. Deviations in calibration values using simplified calibration methods. *Phys. Med. Biol.* 1998; 43: 599–607.
- Larsson JP, Persliden J, Sandborg M, Alm Carlsson G. Transmission ionization chambers for measurements of air collision kerma integrated over beam area. Factors limiting the accuracy of calibration. *Phys. Med. Biol.* 1996; 41: 2381–2398.
- Shrimpton PC, Wall BJ. An evaluation of the Diamentor transmission ionization chamber in indicating exposure-area product ($R\text{ cm}^2$) during diagnostic radiological examinations. *Phys. Med. Biol.* 1982; 29: 871–878.
- Säteilyturvakeskus. Röntgentutkimuksesta potilaalle aiheutuvan säteilyaltistuksen määrittäminen. STUK tiedottaa 1/2005. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2004.
- Säteilyturvakeskus. Päätös 12/310/06. Terveydenhuollon röntgenlaitteiden käytönaikaiset hyväksytävyyssvaatimukset. Röntgenkuvaus- ja läpivalaisulaitteet ja tietokonetomografialaitteet.

LIITE 1

SUHTEELLINEN ILMAKERMAMITTAUS

Jos DAP-kenttämittarin kalibrointikerroin tunnetaan vähintään yhdellä säteilylaadulla, kalibrointikerroin saman röntgenlaitteen muille säteilylaaduille voidaan arvioida myös suhteellisten ilmakermamittausten avulla.

Jos ilmakermaa (K) ja säteilykeilan pinta-alaa (A) tarkastellaan samalla etäisyydellä ($d_K = d_A$), voidaan pinta-alamenetelmän kalibrointiyhtälö (7) kirjoittaa muotoon $N = K \cdot A / M$, missä N on DAP-kenttämittarin kalibrointikerroin ja M sen näyttämä. Vastaavasti voidaan kahden eri säteilylaadun kalibrointikertoimille kirjoittaa yhtälöt

$$N_0 = K_0 \cdot A_0 / M_0 \quad (15)$$

$$N_x = K_x \cdot A_x / M_x \quad (16)$$

ja kalibrointikertoimien suhteeksi saadaan:

$$N_x / N_0 = (K_x / K_0) \cdot (A_x / A_0) \cdot (M_0 / M_x) \quad (17)$$

Jos DAP-arvo (näyttämät M_0 ja M_x) ja ilmakerma (K_0 ja K_x) mitataan molemmilla säteilylaaduilla siten, että kenttäkokoon vaikuttavia asetuksia ei muuteta mittausten välillä, ovat pinta-alat (A_0 ja A_x) hyvällä tarkkuudella yhtä suuret ($A_x / A_0 = 1$). Näin olettaen voidaan tuntematon kalibrointikerroin (N_x) laskea tunnetun kertoimen (N_0) avulla muodossa:

$$N_x = N_0 \cdot (K_x / K_0) \cdot (M_0 / M_x) \quad (18)$$

Suhteellisessa mittauksessa tehdään säteilytykset kahdella eri säteilylaadulla, joista toisella mitataan suureet M_0 ja K_0 , toisella M_x ja K_x . Suhteellisen menetelmän käyttö edellyttää, että kenttäkokoon vaikuttavaa geometrista asettelua ei muuteta millään tavalla näiden säteilytysten välillä. Erona varsinaiseen pinta-alamenetelmään verrattuna on, että suhteellisessa ilmakermamittauksessa säteilykentän pinta-alaa ei tarvitse mitata, koska sen oletetaan pysyvän vakiona. Tarkistuksia varten pinta-ala on kuitenkin syytä kirjata muistiin sillä tarkkuudella kuin se tunnetaan. Lopputulokset

(N_x) kannattaa laskea suhteellisella menetelmällä siinä tapauksessa, että jonkin säteilylaadun kalibrointikerroin (N_0) tunnetaan tarkemmin kuin mitauksissa käytetty säteilykentän pinta-ala (A_x).

Esimerkki: Suhteellisen**ilmakermamittauksen käyttö kalibroinnissa**

DAP-kenttämittarille on mitattu kalibrointikerroin $N_0 = 0,935$ putkijännitteellä 80 kV ja kokonaisuodatuksella 5 mm Al (säteilylaatu 0). Tarvitaan kalibrointikerroin N_x putkijännitteellä 100 kV ja kokonaisuodatuksella 4 mm Al + 0,1 mm Cu (säteilylaatu x).

Mittauksessa käytetään samanlaista geometriaa kuin pinta-alamenetelmää koskevassa esimerkissä (kohta 4.1), mutta kenttäkokoa ja ilmakermakammion etäisyyttä ei mitata tarkasti.

Mittaus säteilylaadulla 0:

DAP-mittarin näyttämä on $M_0 = 33,8$ mGy·cm². Ilmakermamittarin näyttämä on 0,336 mGy ja kalibrointikerroin 1,02. Mitattu ilmakerma on siis $K_0 = 1,02 \cdot 0,336$ mGy = 0,3427 mGy.

Mittaus säteilylaadulla x:

DAP-mittarin näyttämä on $M_x = 31,7$ mGy·cm². Ilmakermamittarin näyttämä on 0,313 mGy ja kalibrointikerroin 1,03 joten mitattu ilmakerma on $K_x = 1,03 \cdot 0,313$ mGy = 0,3224 mGy.

Olettamalla pinta-ala samaksi molemmilla säteilylaaduilla lasketaan kalibrointikerroin N_x yhtälöstä (18): $N_x = N_0 \cdot (K_x / K_0) \cdot (M_0 / M_x) = 0,935 \cdot (0,3224 \text{ mGy} / 0,3427 \text{ mGy}) \cdot (33,8 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2 / 31,7 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2) = 0,938$.

Tarkistus likimääräisen pinta-alan (≈ 100 cm²) avulla:

$$N_x \approx 100 \text{ cm}^2 \cdot 0,3224 \text{ mGy} / 31,7 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2 = 1,017.$$

Tulos voidaan tulkita niin, että todellinen kenttäkoko ilmakermakammion kohdalla oli hiukan arvioitua pienempi.

Kirjattavat tiedot**Mittausta koskevat yleiset tiedot:**

- mittaaja, päivämäärä, kellonaika (mittauksen alussa ja lopussa)
- röntgenlaitteen tunnistetiedot (huone, merkki, muu tunniste)
- mittareiden tunnistetiedot (merkki, sarjanumero tai muu tunniste).
- mittausasettelu:
 - Onko kalibroitava todellinen DAP-mittari vai laskennallinen DAP-näyttö
 - Onko tutkimuspöytä säteilykeilassa röntgenputken ja vertailumittarin välissä
 - Vertailumittarin etäisyys kenttämittarista, fokuksesta tai muusta kiintopisteestä (cm)
 - Kenttäkoko (korkeus ja leveys) vertailumittarin kohdalla (cm)
 - Kenttäkokokuvien kuvausetaisyys

- röntgenlaitteen kiinteä perussuodatus (mm Al)
- vallitseva ilmanpaine ja tutkimushuoneen lämpötila (seuranta mittauksen aikana).

Eri säteilylaatuja koskevat tiedot:

- lisäsuodatus (paksuus ja aine, esim. mm Al, mm Cu)
- putkijännite (kV)
- putkivirta (mA)
- säteilytysaika (s)
- sähkömäärä (mAs)
- vertailumittarin näyttämä (lukuarvo ja yksikkö)
- kenttämittarin näyttämä (lukuarvo ja yksikkö)
- kenttäkokokuvien tunnistustiedot.

Tulosten tarkkuutta ja luotettavuutta voidaan kuvata arvioidun epävarmuuden avulla. Epävarmuuden arviointia voidaan käyttää apuna myös menetelmien valinnassa ja korjauskertoimien tarpeellisuuden arvioinnissa.

Tämän liitteen kohdissa 3.1–3.3 arvioidaan kalibrointimenetelmiin ja kohdassa 3.4 potilasmittauksiin liittyviä epävarmuuksia. Esimerkkiarviot perustuvat osaksi laitestandardien vaatimuksiin, laitteiden teknisiin tietoihin, kalibrointitodistuksiin tai kokeilumittauksiin, osaksi subjektiiviseen näkemykseen ja tuntumaan. Esimerkeissä oletetaan, että mittalaitteet ovat hyvälaatuisia ja mittauksien tehdään kohtuullisen hyvissä ja vakaisissa olosuhteissa, jotka eivät ole lähellä standardien vaatiman toiminta-alueen rajoja. Esimerkkien numeroarvot eivät kelpaa käytettäväksi sellaisenaan, vaan epävarmuus on aina arvioitava erikseen todellisessa kalibroinnissa ja mittauksessa käytettyjen laitteiden ja menettelytapojen perusteella.

Epävarmuuden arvioinnista yleisesti

Tulokseen vaikuttavien suureiden standardiepävarmuudet arvioidaan keskihajontana joko tilastollisilla menetelmillä (A-tyyppin epävarmuus) tai muulla tavalla (B-tyyppin epävarmuus). A-tyyppin standardiepävarmuutena u_A käytetään tyypillisesti keskihajontaa. B-tyyppin standardiepävarmuutta u_B voidaan arvioida poikkeamaa kuvaavan vaihteluvälin ja jakauman avulla. Käytännössä jakaumien todellista muotoa ei tarvitse selvittää, mutta yksinkertaisia jakaumamalleja voi käyttää työkaluina epävarmuusarvion hahmottamiseksi ja tulkitsemiseksi. Jos vaihteluväliksi arvioidaan $\pm M$, niin keskihajonta on tasaiselle jakaumalle $M/\sqrt{3} \approx 0,6 M$ ja tasakylkisen kolmion muotoiselle jakaumalle $M/\sqrt{6} \approx 0,4 M$. Jos vastaavasti normaalijakaumassa 95 %:n luotettavuusväli on $\pm M$, niin keskihajonta on $0,5 M$. Tasaista jakaumaa voidaan käyttää esimerkiksi näyttötarkkuuteen ja lukujen pyöristämiseen liittyvän epävarmuuden arviointiin.

Satunnaisten, toisistaan riippumattomien epävarmuuksien vaikutukset tulokseen voidaan yhdistää neliöllisesti eli laskemalla niiden neliöiden summan neliöjuuri. Jos epävarmuuksien välillä on

suora riippuvuus, vaikutukset voidaan yhdistää suoralla yhteenlaskulla. Vaikutusten yhdistäminen tarkoittaa summalausekkeessa absoluuttisten epävarmuuksien, tulomuotoisessa lausekkeessa suhteellisten epävarmuuksien yhdistämistä neliöllisesti. Suhteellinen epävarmuus $r(a)$ saadaan jakamalla absoluuttinen epävarmuus $u(a)$ suureen arvolla a . Suhteellinen epävarmuus ilmoitetaan yleensä prosentteina.

Useimmat DAP-mittarin kalibroinnissa tarvittavat suuret lasketaan toisistaan riippumattomien tekijöiden tulona, muodossa $a \cdot b$, ja epävarmuuksien vaikutukset tulokseen voidaan yhdistää laskemalla niiden suhteellisten epävarmuuksien neliöiden summan neliöjuuri:

$$r(a \cdot b) = \sqrt{[r(a)]^2 + [r(b)]^2} \quad (19)$$

Yhdistetty standardiepävarmuus u_C tarkoittaa neliöllisesti yhdistettyä A-tyyppin ja B-tyyppin epävarmuuksien kokonaisvaikutusta. Tuloksen kokonaisepävarmuus ilmoitetaan yleensä laajennettuna epävarmuutena U , joka saadaan kertomalla yhdistetty standardiepävarmuus u_C valitulla kattavuuskertoimella k . Tuloksen ilmoittamisen yhteydessä ilmoitetaan kokonaisepävarmuus ja sen kattavuuskerroin, jolle yleensä käytetään arvoa $k = 2$. Sama laajennettu epävarmuus U saadaan yhdistämällä kaikkien osatekijöiden standardiepävarmuudet u kerrottuna samalla kattavuuskertoimella. Jos osaepävarmuus arvioidaan melko varmana ($\approx 95\%$) luotettavuusvälinä $\pm M$, niin arvo M vastaa kattavuuskertoimella $k = 2$ kerrottua standardiepävarmuutta. Yhdistetylle suhteelliselle standardiepävarmuudelle käytetään merkintää r_C ja laajennetulle suhteelliselle epävarmuudelle merkintää R .

Epävarmuuksien neliöllinen yhdistäminen korostaa suurimpien ja vähentää pienimpien epävarmuuksien vaikutusta kokonaisepävarmuuteen. Tämä on syytä ottaa huomioon, kun arvioidaan erilaisten korjausten tarpeellisuutta käytännössä. Esimerkiksi, jos pienemmän epävarmuuden vaikutus yksinään olisi 10% suuremman vaikutuksesta, se vaikuttaisi neliöllisesti yhdistettynä vain $0,5\%$. Se tarkoittaa myös, että pienimpien epävarmuuk-

sien pienentäminen ei sanottavasti vähennä kokonaisepävarmuutta, ellei samalla voi pienentää myös suurimpia epävarmuuksia.

Epävarmuudet DAP-mittauksissa

Kenttämittarin kalibrointikertoimen N_{field} suhteellinen epävarmuus voidaan arvioida yhtälön (7) tai (9) perusteella siten, että yhdistetään neliöllisesti tulon kaikkien tekijöiden suhteelliset epävarmuudet. Vertailumittarin kalibrointikertoimen N_{ref} epävarmuus koostuu kalibrointitodistuksen mukaisesta kalibrointiepävarmuudesta ja säteilylaadun epävarmuuden vaikutuksesta. Lisäksi on otettava huomioon paine- ja lämpötilakorjauksen epävarmuuden vaikutus suhteeseen M_{ref} / M_{field} , koska käytännössä eri mittareiden käyttäytyminen paineen ja lämpötilan funktiona voi poiketa yhtälöistä (2) ja (3).

Potilasmittauksissa korjatun mittaustuloksen $k_T \cdot k_p \cdot N_{field} \cdot M_{field}$ suhteellinen epävarmuus arvioidaan yhdistämällä neliöllisesti tekijöiden suhteelliset epävarmuudet. Jos paine- ja lämpötilakorjausta ei tehdä, on siitä aiheutuva suhteellinen epävarmuus erotuksen $k_T \cdot k_p - 1$ itseisarvo. Jos korjaus tehdään, epävarmuudeksi voidaan vastaavasti arvioida puolet erotuksen itseisarvosta. Jos käytetään yhteistä kalibrointikerrointa laajalla säteilylaatualueella, on tästä aiheutuva lisäepävarmuus otettava huomioon erikseen, ellei se

sisälly kalibrointikertoimelle ilmoitettuun epävarmuuteen.

Edellä ja esimerkissä 3.4 tarkoitetaan yksittäistä potilasta koskevan mittaustuloksen epävarmuutta. Siitä riippumatta myös mitattava suure (todellinen kerman ja pinta-alan tulo) vaihtelee potilaasta toiseen. Kun mitataan useita potilaita, mittaustulosten hajontaan vaikuttavat sekä mittauksen epävarmuus että mitattavan suureen potilaskohtainen vaihtelu. Jos todellinen vaihtelu on selvästi suurempi kuin mittauksen epävarmuus, ei ryhmän keskiarvon epävarmuutta voi sanottavasti vähentää mittaustarkkuutta parantamalla. Potilaskohtaista vaihtelua voidaan usein hallita tai vähentää käyttämällä sopivaa luokittelua tai esittämällä mittaustulokset jonkin vaihtelua selittävän parametrin (esimerkiksi potilaan paksuuden) funktiona (STUK 2004, liite 8).

Yhteenvetona esimerkeistä 3.1–3.4 voidaan todeta, että kohtuullisen hyvin tunnetuissa ja hallituissa olosuhteissa DAP-kenttämittarin kalibrointikertoimet voidaan määrittää tarkkuudella, jota vastaava kokonaisepävarmuus on alle 7 %, ja kerman ja pinta-alan tulot yksittäisille potilaille vastaavasti 10 % tarkkuudella. Mittarin toiminta-alueen rajalla (pienillä DAP-arvoilla) tehtävissä potilasmittauksissa kokonaisepävarmuus on tyyppillisesti noin 20 %.

3.1 Epävarmuus pinta-alamenetelmässä (esimerkki)

Pinta-alamenetelmällä kalibroitavan DAP-kenttämittarin kalibroitikertoimen N_{field} suhteellinen epävarmuus arvioidaan yhtälöstä (7):

$$N_{field} = N_{ref} \cdot M_{ref}(d_K) \cdot A(d_A) \cdot (d_K/d_A)^2 / M_{field}$$

Seuraavassa esimerkkilaskelmassa eri suureisiin vaikuttavien osatekijöiden epävarmuudet arvioidaan siten, että ne vastaavat kattavuuskertoimella $k = 2$ kerrottua standardiepävarmuutta.

Suure (tekijä) ja siihen vaikuttavat osatekijät	Osatekijän epävarmuus (k = 2)	Suureen suhteellinen epävarmuus (k = 2)
1. Vertailumittarin kalibroitikerroin N_{ref} : Epävarmuus kalibroititodistuksesta Käyttö eri säteilylaadulla (interpolointi)	$r_{11} = 3 \%$ $r_{12} = 1 \%$	$r_1(N_{ref}) = 3,16 \%$
2. Vertailumittarin näyttämä M_{ref} (yli 100 yksikköä): Näyttöepävarmuus Mittarin epälineaarisuus Mittarin epävakaisuus	$r_{21} = 0,6 \%$ $r_{22} = 1 \%$ $r_{23} = 1 \%$	$r_2(M_{ref}) = 1,54 \%$
3. DAP-kenttämittarin näyttämä M_{field} (yli 100 yksikköä): Näyttöepävarmuus Mittarin epälineaarisuus Mittarin epävakaisuus	$r_{31} = 0,6 \%$ $r_{32} = 1 \%$ $r_{33} = 1 \%$	$r_3(M_{field}) = 1,54 \%$
4. Suhde M_{ref}/M_{field} (edellisten lisäksi): Paine- ja lämpötilakorjauksen epävarmuus	$r_{41} = 2 \%$	$r_4(M_{ref}/M_{field}) = 2 \%$
5. Kuvasta mitattu pinta-ala A (noin 10 cm x 10 cm): Reunan ja pituusmittauksen epävarmuus	$u_{51} = 3 \text{ mm}$	$r_5(A) = 4,24 \%$
6. Etäisyyskorjaus $(d_K/d_A)^2$: Asettelu samalle etäisyydelle ($d_K = d_A$)	$r_{61} = 1 \%$	$r_6((d_K/d_A)^2) = 2 \%$
7. Kalibroitimenetelmä (edellisten lisäksi): Kentän epätasaisuuden vaikutus kerman ja pinta-alan tuloon (ei sisälly yhtälöihin 1 ja 7) Sironta ja muu hajasäteily kalibroinnissa	$r_{71} = 2 \%$ $r_{72} = 1,5 \%$	$r_7(N_{field}) = 2,5 \%$
Kalibroitikertoimen suhteellinen kokonaisepävarmuus kattavuuskertoimella $k = 2$:		$R(N_{field}) = 6,9 \%$

Jos kalibroinnissa käytettävä säteilylaatu tunnetaan huonosti, on otettava huomioon ilmakermavertailumittarin kalibroitikertoimen vaihtelu säteilylaadun mahdollisella vaihtelualueella:

Esimerkiksi $r_{12} = 2 \%$, jolloin $r_1(N_{ref}) = 3,61 \%$ ja $R(N_{field}) = 7,1 \%$.

Epävarmuus suhteellisissa ilmakermamittauksissa (esimerkki)

Suhteellisen ilmakermamittauksen (liite 1) avulla kalibroittavan DAP-kenttämittarin kalibrointikertoimen N_x epävarmuus arvioidaan yhtälön (18) perusteella, josta saadaan:

$$N_x = N \cdot (M / M_x) \cdot (K_x / K) \cdot (A_x / A)$$

Esimerkkilaskelmassa suhteelliset epävarmuudet arvioidaan samalla tavalla kuin esimerkeissä 3.1 ja 3.2, ja soveltuvin osin käytetään myös samoja numeroarvoja.

Suure (tekijä) ja siihen vaikuttavat osatekijät	Osatekijän suhteellinen epävarmuus (k = 2)	Suureen suhteellinen epävarmuus (k = 2)
1. DAP-kenttämittarin tunnettu kalibrointikerroin N : Laskelman 3.1 mukaan	$r_{11} = 6,9 \%$	$r_1[N(0)] = 6,9 \%$
2. DAP-kenttämittarin näyttämien suhde M/M_x : Näyttämä M (laskelman 3.1 mukaan) Näyttämä M_x (laskelman 3.1 mukaan)	$r_{21} = 1,54 \%$ $r_{22} = 1,54 \%$	$r_2(M/M_x) = 2,17 \%$
3. Ilmakermasuhde K_x / K : Näyttämä K (laskelman 3.1 mukaan) Näyttämä K_x (laskelman 3.1 mukaan) Kalibrointikertoimien suhde (3.1: r_{12})	$r_{31} = 1,54 \%$ $r_{32} = 1,54 \%$ $r_{33} = 1 \%$	$r_3(K_x / K) = 2,39 \%$
4. Pinta-alojen suhde A_x / A (oletusarvon 1 epävarmuus):		$r_4(A_x / A) = 2 \%$
5. Kalibrointimenetelmä (edellisten lisäksi): Sironta ja muu hajasäteily kalibroinnissa	$r_{51} = 1,5 \%$	$r_5(N_{field}) = 1,5 \%$
Määritettävän kalibrointikertoimen N_x suhteellinen kokonaisepävarmuus kattavuuskertoimella $k = 2$:		$R(N_x) = 8,0 \%$

Jos laskelman 3.2 ja 3.3 mukaan arvioidaan $r_{11} \approx 5,4 \%$, saadaan $R(N_x) = 6,8 \%$.

3.2 Epävarmuus tandem-menetelmässä (esimerkki)

Tandem-menetelmällä kalibroitavan DAP-kenttämittarin kalibrointikertoimen N_{field} suhteellinen epävarmuus arvioidaan yhtälöstä (9):

$$N_{field} = N_{ref} \cdot M_{ref} / M_{field}$$

Esimerkkilaskelmassa suhteelliset epävarmuudet arvioidaan samalla tavalla kuin esimerkissä 3.1.

Suure (tekijä) ja siihen vaikuttavat osatekijät	Osatekijän suhteellinen epävarmuus (k = 2)	Suureen suhteellinen epävarmuus (k = 2)
1. DAP-vertailumittarin kalibrointikerroin N_{ref} :		$r_1(N_{ref}) = 4,24 \%$
Kalibrointitodistus	$r_{11} = 3 \%$	
Käyttö eri säteilylaadulla	$r_{12} = 3 \%$	
2. DAP-vertailumittarin näyttämä M_{ref} (yli 100 yksikköä):		$r_2(M_{ref}) = 1,54 \%$
Näyttöepävarmuus	$r_{21} = 0,6 \%$	
Mittarin epälineaarisuus	$r_{22} = 1 \%$	
Mittarin epävakaisuus	$r_{23} = 1 \%$	
3. DAP-kenttämittarin näyttämä M_{field} (yli 100 yksikköä):		$r_3(M_{field}) = 1,54 \%$
Näyttöepävarmuus	$r_{31} = 0,6 \%$	
Mittarin epälineaarisuus	$r_{32} = 1 \%$	
Mittarin epävakaisuus	$r_{33} = 1 \%$	
4. Suhde M_{ref} / M_{field} (edellisten lisäksi):		$r_4(M_{ref} / M_{field}) = 2 \%$
Paine- ja lämpötilakorjauksen epävarmuus	$r_{41} = 2 \%$	
5. Kalibrointimenetelmä (edellisten lisäksi):		$r_5(N_{field}) = 1,5 \%$
Sironta ja muu hajasäteily kalibroinnissa	$r_{51} = 1,5 \%$	
Kalibrointikertoimen suhteellinen kokonaisepävarmuus kattavuuskertoimella $k = 2$:		$R(N_{field}) = 5,4 \%$

Jos kalibroinnissa käytettävä säteilylaatu tunnetaan huonosti, on otettava huomioon DAP-vertailumittarin kalibrointikertoimen vaihtelu säteilylaadun mahdollisella vaihtelualueella:

Esimerkiksi $r_{12} = 6 \%$, jolloin $r(N_{ref}) = 6,71 \%$ ja $R(N_{field}) = 7,5 \%$.

3.3 Etäisyys- ja hajasäteilykorjauksen epävarmuus (esimerkki)

Laboratoriossa kalibroidulle DAP-kenttämittarille tarvittavan etäisyys- ja hajasäteilykorjauksen $k(d, d_0)$ epävarmuus arvioidaan yhtälöstä (14): $k(d, d_0) = M(d) / M(d_0)$ ja korjatun kalibroitikertoimen $N(d, d_0)$ epävarmuus yhtälöstä (11): $N(d, d_0) = N \cdot k(d, d_0)$.

Esimerkkilaskelmassa suhteelliset epävarmuudet arvioidaan samalla tavalla kuin esimerkissä 3.2, ja soveltuvin osin käytetään myös samoja numeroarvoja.

Suure (tekijä) ja siihen vaikuttavat osatekijät	Osatekijän suhteellinen epävarmuus (k = 2)	Suureen suhteellinen epävarmuus (k = 2)
1. DAP-kenttämittarin kalibroitinkerroin N (mittarin kohdalla):		$r_1(N) = 4,24 \%$
Kalibroititodistus	$r_{11} = 3 \%$	
Käyttö eri säteilylaadulla	$r_{12} = 3 \%$	
2. DAP-kenttämittarin näyttämä $M(d_0)$ (yli 100 yksikköä): Mittari kiinni röntgenlaitteessa, etäisyydellä d_0 fokuksesta.		$r_2[M(d_0)] = 1,54 \%$
Näyttöepävarmuus	$r_{21} = 0,6 \%$	
Mittarin epälineaarisuus	$r_{22} = 1 \%$	
Mittarin epävakaisuus	$r_{23} = 1 \%$	
3. DAP-kenttämittarin näyttämä $M(d)$ (yli 100 yksikköä): Mittari etäisyydellä d fokuksesta.		$r_3[M(d)] = 1,54 \%$
Näyttöepävarmuus	$r_{31} = 0,6 \%$	
Mittarin epälineaarisuus	$r_{32} = 1 \%$	
Mittarin epävakaisuus	$r_{33} = 1 \%$	
4. Mittausmenetelmä (edellisten lisäksi):		$r_4[N(d, d_0)] = 2,35 \%$
Sironta ja muu hajasäteily kalibroinnissa	$r_{41} = 1,5 \%$	
Korjauksen riippuvuus säteilylaadusta	$r_{42} = 1 \%$	
Röntgenlaitteen epävakaisuus	$r_{43} = 1,5 \%$	
Korjatun kalibroitikertoimen suhteellinen kokonaisepävarmuus kattavuuskertoimella $k = 2$:		$R[N(d, d_0)] = 5,3 \%$

Jos korjausta ei tehdä, sen mittaamiseen liittyvät epävarmuudet $r_2 - r_4$ jäävät pois. Jos korjauksen puutteesta aiheutuvaksi epävarmuudeksi arvioidaan 6 %, saadaan $R[N(d, d_0)] = 7,3 \%$.

3.4 Epävarmuus potilasmittauksissa (esimerkki)

Kerman ja pinta-alan tulon $P_{KA,field}$ epävarmuus potilaaseen kohdistuvassa säteilykeilassa arvioidaan yhtälöstä (5):

$$P_{KA,field} = N_{field} \cdot M_{field}$$

Esimerkkilaskelmassa suhteelliset epävarmuudet arvioidaan samalla tavalla kuin esimerkeissä 3.1 ja 3.2, ja soveltuvin osin käytetään myös samoja numeroarvoja.

Suure (tekijä) ja siihen vaikuttavat osatekijät	Osatekijän suhteellinen epävarmuus (k = 2)	Suureen suhteellinen epävarmuus (k = 2)
1. DAP-mittarin kalibrointikerroin N_{field} :		$r_1(N_{field}) = 6,63 \%$
Kalibrointitodistus (3.1, 3.2, pyöristys)	$r_{11} = 6 \%$	
Käyttö eri säteilylaadulla	$r_{12} = 2 \%$	
Käyttö eri etäisyydellä	$r_{13} = 2 \%$	
2. DAP-kenttämittarin näyttämä M_{field} (yli 100 yksikköä):		$r_2(M_{field}) = 2,52 \%$
Näyttöepävarmuus	$r_{21} = 0,6 \%$	
Mittarin epälineaarisuus	$r_{22} = 1 \%$	
Mittarin epävakaisuus	$r_{23} = 1 \%$	
Paine- ja lämpötilakorjauksen epävarmuus	$r_{24} = 2 \%$	

Potilaaseen kohdistuvan säteilykeilan kerman ja pinta-alan tulon suhteellinen kokonaisepävarmuus kattavuuskertoimella $k = 2$:

$$R(P_{KA,field}) = 7,1 \%$$

Jos yksi osatekijä kerrallaan muuttuu, kokonaisepävarmuus muuttuu vastaavasti:

Jos $r_{11} = 10 \%$, niin $r_1(N_{field}) = 10,4 \%$ ja $R(P_{KA,field}) = 10,7 \%$.

Jos $r_{12} = 5 \%$, niin $r_1(N_{field}) = 8,1 \%$ ja $R(P_{KA,field}) = 8,4 \%$.

Jos paine- ja lämpötilakorjausta ei tehdä, arvioidaan $r_{24} = 4 \%$, jolloin

$r_2(M_{field}) = 4,3 \%$ ja $R(P_{KA,field}) = 7,9 \%$.

Jos DAP-kenttämittarin näyttämä on noin 10 yksikköä, joka vastaa standardin vaatiman toiminta-alueen alarajaa, arvioidaan $r_{21} = 6 \%$ ja $r_{22} = r_{23} = 10 \%$, jolloin $r_2(M_{field}) = 15,5 \%$ ja $R(P_{KA,field}) = 16,9 \%$.

Jos samanaikaisesti on $r_{11} = 10 \%$, $r_{12} = 5 \%$, $r_{21} = 6 \%$, $r_{22} = r_{23} = 10 \%$ ja $r_{24} = 4 \%$, niin

$r_1(N_{field}) = 11,4 \%$, $r_2(M_{field}) = 15,9 \%$ ja $R(P_{KA,field}) = 19,5 \%$.