

# 3

## MITTANORMAALIT JA MITTAUSTARKKUUS

Hannu Järvinen

### SISÄLLYSLUETTELO

3.1	Metrologian peruskäsitteet .....	94
3.2	Yleinen kansainvälinen metrologia .....	95
3.3	Ionisoivan säteilyn kansainvälinen metrologia .....	97
3.4	Mittanormaalien tekniikkaa .....	100
3.5	Mittaustarkkuus .....	108

## 3.1 | Metrologian peruskäsitteet

---

### Metrologia

Metrologia on mittauksia käsittelevä tieteenala, jonka keskeisiä käsitteitä ovat muun muassa suureet, mittayksiköt ja mittanormaalit, mittaukset ja mittauslaitteet. Metrologia sisältää kaikki mittauksiin liittyvät teoreettiset ja käytännölliset näkökohdat riippumatta mittausten epävarmuudesta ja tieteen tai tekniikan alasta.

### Mittanormaali

Mittanormaalilla tarkoitetaan kiintomittaa, mittauslaitetta, vertailuainetta tai mittausjärjestelmää, jolla määritellään, realisoidaan, säilytetään tai toistetaan suureen mittayksikkö tai suureen yksi tai useampi referenssiarvo. Referenssiarvolla tarkoitetaan tässä suureen määritelmän mukaista sovittua arvoa tai suureen arvon parasta arviota. Primaarinormaali on mittanormaali, jonka metrologinen laatu on yleisesti tunnustettu parhaaksi ja jonka arvo on hyväksyttävissä vertaamalla sitä muihin saman suureen mittanormaaleihin. Sekundaarinormaali on mittanormaali, jonka arvo määritetään vertaamalla sitä saman suureen primaarinormaaliiin.

Vertailu- tai referenssinormaali on mittanormaali, jolla on tietyssä paikassa tai organisaatiossa yleensä paras saatavissa oleva metrologinen laatu ja johon siellä tehtävät mittaukset perustuvat. Käyttönormaali on mittanormaali, jota käytetään rutiiniluontoisesti mittauslaitteiden kalibrointiin (katso seuraava kohta) tai tarkastukseen. Käyttönormaali kalibroidaan tavallisesti vertailunormaalien avulla. Siirtonormaali on mittanormaali, jota käytetään välittävänä laitteena normaalien vertailussa.

Kansainvälinen mittanormaali on kansainvälisen sopimuksen perusteella tunnustettu mittanormaali, joka toimii kansainvälisenä perustana määritettäessä kyseessä olevan suureen muiden mittanormaalien arvoja. Kansallinen mittanormaali on kansallisen päätöksen perusteella tunnustettu mittanormaali, joka toimii kansallisena perustana, määritettäessä kyseessä olevan suureen muiden mittanormaalien arvoja.

Mittanormaalien ylläpidolla tarkoitetaan toimenpiteitä, joiden avulla varmistetaan mittanormaalien metrologisten ominaisuuksien pysyminen asianmukaisten rajojen sisällä. Toimenpiteisiin kuuluu tavallisesti säännöl-

lisin väliajoin tapahtuva kalibrointi ja vakioisuuden tarkistus, säilytys sopivissa olosuhteissa ja huolellinen käyttö.

## Kalibrointi

Kalibroinnilla tarkoitetaan toimenpiteitä, joiden avulla saadaan määritellyissä olosuhteissa mittauslaitteen tai mittausjärjestelmän näyttämien tai kiintomitan tai vertailuaineen edustamien suureen arvojen ja vastaavien mittanormaaleilla realisoitujen arvojen välinen yhteys. Kalibroinnin tulos mahdollistaa joko näyttämän määrittämisen mittaussuureen arvojen avulla tai näyttämän korjauksen määrittämisen. Kalibroinnilla voidaan määrittää myös muita metrologisia ominaisuuksia, kuten vaikutussuureiden vaikutukset. Vaikutussuure on suure, joka ei ole mittaussuure, mutta joka vaikuttaa mittaustulokseen. Kalibroinnin tulos voidaan kirjata asiakirjaan, jota sanotaan kalibrointitodistukseksi tai kalibrointipöytäkirjaksi.

Käytännössä mittauslaitteen kalibrointi tarkoittaa vertailua, jossa laitteen tarkkuus määritetään käyttämällä tarkempaa mittauslaitetta, jonka tarkkuus tunnetaan. Kaikki mittauslaitteet täytyy valmistusvaiheessa kalibroida jollakin tavoin, jotta niihin saadaan siirrettyksi tieto ”oikeasta arvosta” eli mittaussuureen arvon parhaasta arviosta. Mittauslaitteen kuluminen ja muuttumisen vuoksi kalibrointi on toistettava sopivin väliajoin.

## Jäljitettävyys

Jäljitettävyydellä tarkoitetaan mittaustuloksen tai mittanormaalin yhteyttä ilmoitettuihin referensseihin, yleensä kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin, sellaisen aukottoman vertailuketjun välityksellä, jossa kaikille vertailuille on ilmoitettu epävarmuudet. Käsite esitetään usein adjektiivilla ”jäljitettävä”. Aukotonta vertailuketjua sanotaan ”jäljitettävyysketjuksi”. Jäljitettävyys on eri aikoina ja eri paikoissa tehtyjen mitausten yhtäpitävyyden perusta.

### 3.2 | Yleinen kansainvälinen metrologia

#### Metrisopimus

Vuonna 1875 seitsemäntoista maata allekirjoitti Pariisissa Metrisopimuk-

sen (Convention du Mètre), jonka tarkoituksena oli saada aikaan maailmanlaajuinen mittojen yhdenmukaisuus. Suomi allekirjoitti sopimuksen vuonna 1921.

Yleinen paino- ja mittakonferenssi (CGPM) on metrisopimuksen allekirjoittajavaltioiden hallitusten edustajien kokous, joka toimii mittayksikköasioissa korkeimpana kansainvälisenä elimenä. Kansainvälinen paino- ja mittakomitea (CIPM) on metrisopimuksen toimeenpaneva elin, joka valmistelee ja toimeenpanee CGPM:n päätökset. Apunaan CIPM:llä on kahdeksan neuvoa-antavaa komiteaa, yksi kullakin metrologian osa-alueella. Kansainvälinen painojen ja mittojen toimisto (BIPM) on CGPM:n ja CIPM:n päätösten toimeenpaneva elin. Se on kansainvälinen laboratorio, jonka päätehtäviin kuuluu perustaa ja ylläpitää fysikaalisten suureiden mittanormaaleja (primaarinormaaleja) ja vertailla kansallisia ja kansainvälisiä mittanormaaleja.

## Lakisääteinen metrologia

Lakisääteisen metrologian kansainvälinen järjestö (OIML) pyrkii yhtenäistämään kansainvälisellä tasolla mittaamiseen ja mittauslaitteisiin liittyviä hallinnollisia ja teknisiä määräyksiä eri maissa. Järjestön tarkoituksena on näihin säädöksiin liittyvien kansainvälisen kaupan esteiden poisto.

## Vastavuoroinen tunnustamisjärjestely

Kansallisia mittanormaaleja ja kansallisten metrologiajärjestöjen (National Metrology Institute, NMI) antamia kalibrointi- ja mittaustodistuksia koskeva vastavuoroinen tunnustamisjärjestely (Mutual Recognition Arrangement, MRA) on CIPM:n organisoima, Metrisopimuksen jäsenvaltioiden NMI:den johtajien allekirjoittama järjestely. Järjestelyn tarkoituksena on antaa perusteet kansallisten mittanormaalien vastaavuudelle, aikaansaada NMI:den antamien kalibrointi- ja mittaustodistusten vastavuoroinen tunnustaminen, ja antaa hallituksille ja muille osapuolille vankka tekninen perusta kansainvälistä kaupankäyntiä ja lainsäädäntöasioita koskevia sopimuksia varten. Tavoitteisiin pyritään mittausten kansainvälisillä vertailuilla (avainvertailuilla ja lisävertailuilla) sekä NMI:den laatujärjestelmillä ja pätevyyden osoituksilla. BIPM ylläpitää tietokantaa NMI:den mittauskyyvistä, ja tiedot on julkisesti saatavilla internetin kautta. Alueellisten metrologia-organisaatioiden (Regional Metrology Organisation, RMO) ja BIPM:n muodostama yhteinen komitea hy-

väksyy tietokantaan tarkoitetut tiedot. CIPM, RMO:t ja BIPM ovat velvolliset suorittamaan edellä mainittuja avain- ja lisävertailuja.

## Euromet

EUROMET on vuonna 1987 perustettu Euroopan kansallisten metrologiajärjestöjen välinen yhteistyöelin eli Euroopan alueella toimiva RMO. EUROMET:n tavoitena on parantaa jäsenten välistä yhteistyötä mittanormaalityöinnissä, optimoida jäsenten resurssien ja palveluiden käyttöä havaittujen metrologisten tarpeiden tyydyttämiseksi, parantaa mittauspalveluita ja niiden saatavuutta, ja varmistaa EUROMET-yhteistyössä kehitettyjen kansallisten mittausjärjestelmien käytettävyys muissa jäsenmaissa. Tavoitteisiin pyritään koordinoimalla mittanormaalien ja metrologisten laitteistojen kehitystyötä, tarjoamalla yhteistyöhön tarvittava runko-organisaatio, välittämällä asiantuntemusta ja tietoja resursseista ja palveluista NMI:den kesken, ja järjestämällä kalibrointipalveluita ja lakisäätöisen metrologian palveluita koskevaa yhteistyötä. EUROMET:n komiteassa on edustaja kustakin jäsenmaasta. EUROMET:n toiminta on organisoitu suureryhmittäin, ja kullakin ryhmällä on oma koordinaattori ja kunkin maan kansallisia mittanormaaleja ylläpitävistä laitoksista pyydetty yhdyshenkilöt. Kussakin suureryhmässä käytännön toiminta tapahtuu EUROMET-projektien muodossa, jotka ovat pääasiallisesti mittanormaalien kehittämiin liittyviä tutkimuksia tai mittanormaalien vertailuja.

### 3.3 Ionisoivan säteilyn kansainvälinen metrologia

#### Kansainvälinen mittausjärjestelmä

Ionisoivan säteilyn suureiden kansainvälinen mittausjärjestelmä ja mitausten jäljitettävyyssketju on esitetty kuvassa 3.1. Järjestelmän avulla säteilyn käyttäjät saavat säteilymittareilleen kalibroinnit, joiden perusteella säteilymittaukset ovat jäljitettävissä kansainvälisesti tunnustettuihin primäärinormaaleihin.

Jäljitettävyyssketjun ylimmällä tasolla on BIPM tai jokin kansallisista primäärinormaali-laboratorioista (PSDL). Primaarinormaalien perustaminen ja ylläpito ionisoivan säteilyn suureille on teknisesti vaativaa ja kallista, ja primäärinormaaleja ylläpidetään kansallisina mittanormaaleina vain noin 20 maassa. Useimmissa maissa (kuten Suomessa ja muissa Pohjoismaissa)

kansalliset mittanormaalit ovat sekundaarinormaaleja, jotka on kalibroitu primaarinormaalien avulla BIPM:ssä, jossakin kansallisessa primaarinormaalilaboratoriossa tai IAEA:n mittanormaalilaboratoriossa. Näissä maissa kansallisia mittanormaaleja ylläpitävä sekundaarinormaalilaboratorio (SSDL) kalibroi yleensä säteilyn käyttäjien säteilymittarit ja käyttäjien omat säteilymittareiden kalibrintilaitteistot. Joissakin suurissa maissa kalibrintitarve on niin suuri, että kansallisia mittanormaaleja ylläpitävä PSDL kalibroi pääsääntöisesti vain sekundaarinormaaleja, ja säteilyn käyttäjien mittareiden ja kalibrintilaitteistojen kalibroinneista huolehtivat muutamat tätä varten perustetut SSDL-laboratoriot.

Useimmat kansalliset SSDL-laboratoriot ovat jäsenenä Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) ja Maailman terveysjärjestön (WHO) yhdessä perustamassa ja ylläpitämässä sekundaarinormaalilaboratorioiden verkostossa eli SSDL-verkostossa. SSDL-verkosto perustettiin vuonna 1976 parantamaan ionisoivan säteilyn suureiden mittaustarkkuutta lähinnä säteilyn lääketieteellisessä käytössä, mutta myös säteilyn muussa käytössä ja säteilysuojelussa. Sysäyksenä verkoston perustamiselle olivat sädehoidon annosmittauksissa maailmalla todetut suuret virheet samalla kun oli alettu tiedostaa hoitoannoksen hyvän tarkkuuden merkitys hoidon onnistumiselle: sädehoidossa hoitoannoksen mittausepävarmuus ei saisi ylittää muutamaa prosenttia (katso luku 3.5).

Kansainvälinen SSDL-verkosto helpottaa jäsenlaboratorioiden yhteyksiä primaarinormaalilaboratorioihin ja BIPM:ään, auttaa kokemusten ja tiedon vaihdossa eri laboratorioiden välillä, edistää kalibrinti- ja mittausten menetelmien yhdenmukaisuutta sekä varmistaa kalibrintipalvelujen saannin eri puolilla maailmaa. Vuonna 1998 SSDL-verkostoon kuului 70 laboratoriota ja 6 kansallista SSDL-organisaatiota 58:ssa IAEA:n jäsenmaassa, joista yli puolet kehitysmaissa. Verkostolla on lisäksi 16 verkoston toimintaa tukevaa liitännäisjäsentä, kuten BIPM, useita kansallisia PSDL-laboratorioita, Kansainvälinen säteilymittausten ja -yksiköiden komissio (ICRU) ja muita kansainvälisiä järjestöjä. SSDL-verkoston keskuslaboratoriona toimiva IAEA:n mittanormaalilaboratorio kalibroi niiden jäsenlaboratorioiden sekundaarinormaaleja, joilla ei ole mahdollisuutta käyttää BIPM:n tai jonkin muun primaarinormaalilaboration kalibrintipalveluja.

## Suomen kansallinen mittanormaalilaboratorio

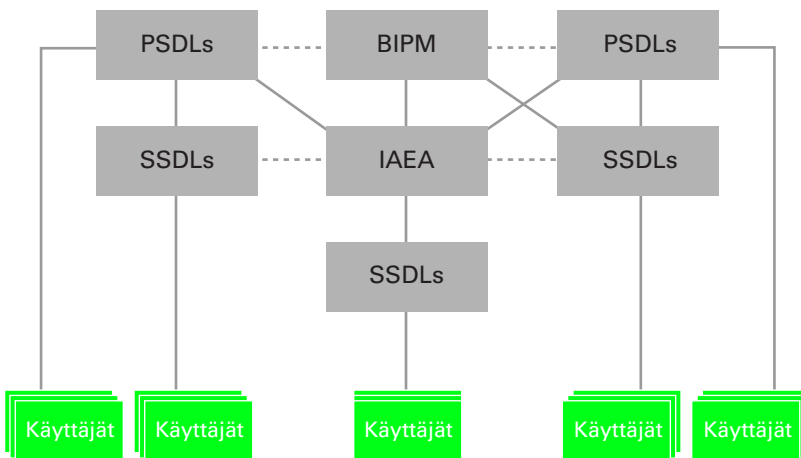
Suomessa ionisoivan säteilyn suureiden kansallisia mittanormaaleja ylläpi-

tää STUK. Mittanormaalit ovat pääosin sekundaarinormaaleja. STUKin mittanormaalilaboratorio on ollut kansainvälisen SSDL-verkoston jäsen vuodesta 1977 lähtien. Metrisopimuksen jäsenmaana Suomella on mahdollisuus käyttää hyväkseen BIPM:n kalibrintipalveluita, ja osa STUKin ylläpitämistä sekundaarinormaaleista kalibroidaan säännöllisesti BIPM:ssä.

STUKin mittanormaalilaboratorio ylläpitää kansallisia mittanormaaleja suureille ilmakehän, veteen absorboitunut annos, ja annosekvivalentti. Mittanormaalit ovat säteilylähteitä ja hyvälaatuisia ionisaatiokammioita, joiden käyttöä varten ylläpidetään tarkkoja säteilytyslaitteistoja.

### Mittanormaalitoiminnan laadunhallinta

Säteilymittausten vaativuuden ja vaadittavan suuren mittaustarkkuuden vuoksi ionisoivan säteilyn mittanormaalien ylläpidossa ja kalibrintoiminnassa on suurta huomiota kiinnitetty nykyisin laadunhallintaan. Mittanormaalilaboratoriot pyrkivät perustamaan ja ylläpitämään toimintaansa kansainvälisten standardien mukaisia laatujärjestelmiä jäljitettävyysetjun kaikilla tasoilla (kuva 3.1). Useat laboratoriot myös hankkivat sertifiointin laatujärjestelmälleen, eli ulkopuolisen sertifiointielimen antaman osoituksen laatujärjestelmän vaatimustenmukaisuudesta, tai akkreditoinnin kalibrintipalveluilleen, eli ulkopuolisen akkreditointielimen antaman todistuksen laboratorion pätevyydestä kalibrintien suorit-



**KUVA 3.1** Ionisoivan säteilyn suureiden kansainvälinen mittausjärjestelmä

PSDLs: primaarinormaalilaboratoriot, SSDLs: sekundaarinormaalilaboratoriot, BIPM: Kansainvälinen paino- ja mittatoimisto, IAEA: Kansainvälinen atomienergiajärjestö.

tamiseen. Osana laatujärjestelmää laboratoriot toimeenpanevat säännöllisiä uusintakalibrointeja, laadunvalvontatestejä ja -mittauksia mittanormaaleille ja kalibroinneissa tarvittaville muille laitteistoille.

Toiminnan luotettavuuden ja tarkkuuden osoittamiseksi mittanormaallilaboratorioiden edellytetään osallistuvan kansainvälisiin mittausvertailuihin (MRA-sopimuksen avain- ja lisävertailut, luku 3.2). Yhä tärkeämmäksi osaksi laadunvarmistusta on tullut myös jonkin ulkopuolisen organisaation toimeenpanema kalibrointi- tai mittausvertailu, niin kutsutut kalibrointiaudit tai mittausaudit. Muun muassa IAEA toteuttaa vuosittain postitse lähetettävien termoloiste-annosmittareiden avulla annosvertailun kansainvälisen SSDL-verkoston jäsenlaboratorioille. Se on kehittänyt myös muita menetelmiä jäsenlaboratorioiden kalibrointitoiminnan auditoimiseksi.

### 3.4 | Mittanormaalien tekniikkaa

#### Yleistä primaarinormaaleista

Kuten luvussa 2 on kerrottu, ensimmäiset ionisoivan säteilyn ilmaisumenetelmät perustuivat fotonisäteilyn ilmassa aiheuttaman ionisaation määrittämiseen. Mittaukseen käytetty laite, avoionisaatiokammio (free-air chamber, FAC), on yhä käytössä oleva mittausmenetelmä, johon suureen ”säteilytys” primaarinormaalit perustuvat. Avoionisaatiokammiota voidaan käyttää kuitenkin vain alle noin 300 keV fotonisäteilyllä, koska fotonien energian kasvaessa ilmassa syntyvien sekundaarielektronien pysäyttämiseksi tarvitaan yhä suurempi tilavuus (300 keV fotonisäteilyllä elektrodien välimatka on jo 30 cm). Käyttöä rajoittavat siis kammion suuri koko ja siihen liittyvät tekniset ongelmat, jolloin myös tarkkuus huononee. Yli 300 keV:n fotonisäteilyllä säteilytyksen primaarinormaalina käytetään onteloionisaatiokammiota (cavity ionization chamber), jonka toiminta perustuu niin kutsuttuun onteloionisaatioteoriaan.

Säteilytyksen ( $X$ ) käytöstä kalibrointisuurena jäljitettävyyssketjussa on luovuttu muun muassa suureen hankalan yksikön vuoksi, ja koska se soveltuu vain fotonisäteilylle. Sen asemesta käytetään ilmakehää ( $K_{air}$ ), joka saadaan säteilytyksestä yksinkertaisella laskutoimituksella:

$$K_{air} = X(W/e)(1 - g)^{-1}, \quad (3.1)$$

missä ( $W/e$ ) on yhden ioniparin tuottamiseen ilmassa kuluva energia jaet-



tuna elektronin varauksella ja  $g$  on elektronien liike-energiasta jarrutus-säteilyn tuottamiseen ilmassa kuluva osuus. Tekijän  $g$  merkitys on vähäinen mutta kasvaa fotonien energian kasvaessa:  $^{60}\text{Co}$ -gamma-säteilyn energialla  $g = 0,0032$  ja alle 300 keV:n fotonisäteilyllä  $g \approx 0$ . Yli noin 300 keV:n fotonisäteilyllä ilmakerma on hyödyllinen suure myös sen vuoksi, että se voidaan määrittää onteloionisaatiokammioilla tarkemmin kuin säteilytys (katso jäljempänä).

Perinteinen avoionisaatiokammio soveltuu säteilytyksen (ja ilmakerman) primaarinormaaliksi useimpiin mittaustarkoituksiin alle 300 keV:n fotonisäteilyllä. Poikkeuksen muodostavat tykösädehoitoa varten tarvittavien pienienergiasten fotonilähteiden (kuten  $^{125}\text{I}$  ja  $^{103}\text{Pd}$ ) ilmakermanopeuden mittaukset. Näiden lähteiden tuottaman tyypillisesti pienen ilmakermanopeuden mittaukseen perinteisten avoionisaatiokammioiden herkkyyks ei riitä, ja sen vuoksi on kehitetty erikoisrakenteinen laajakulma-avoionisaatiokammio (wide-angle free-air chamber, WAFAC). Laajakulma-avoionisaatiokammio on kehitetty ja toistaiseksi käytössä vain USA:n kansallisessa mittanormaalilaboratoriossa (NIST).

Veteen absorboitunut annos on yleisesti hyväksytty sädehoidossa hoitolaitteiden kalibrointisuureksi ja potilaan säteilyannoksen mittaussuureksi. Veteen absorboitunut annos mitataan pienikokoisella (tilavuus  $\approx 1 \text{ cm}^3$ ) ionisaatiokammioilla suuressa vesiasiassa eli vesifantomissa. Perinteinen menettely, johon useimmat kansalliset ja kansainväliset mittaushjeet perustuvat, on kalibroida ionisaatiokammio ilmakerhalle ja määrittää veteen absorboitunut annos kammioilla mitatusta ionisaatiovarauksesta onteloionisaatioteorian avulla. Laskennassa tarvitaan useita säteilyn energiasta ja ionisaatiokammion rakenteesta ja materiaaleista riippuvia parametreja ja korjauskertoimia, jotka kasvattavat menetelmän epävarmuutta.

Sädehoidon annosmittaukselta vaadittu suuri tarkkuus ja ilmakermaan perustuvaan menetelmään liittyvät epävarmuudet ovat jouduttaneet mittanormaalien kehittämistä suoraan veteen absorboituneelle annokselle. Useat primaarilaboratoriot ovat viime vuosina kehittäneet absorboituneen annoksen mittanormaaleja. Näistä suorinta mittaushjeitä edustavat kalorimetrit, jotka perustuvat absorboituneen annoksen väliaineessa aiheuttaman lämpötilan nousun mittaukseen.

Kalorimetrien perusongelmana on niiden epäherkkyyks. Sädehoidossa tyypillinen kerta-annos, 2 Gy, aiheuttaa vedessä vain noin  $0,0005^\circ\text{C}$  lämpötilan nousun. Tämän mittaamiseksi yhden prosentin tarkkuudella vesikalorimetrin mittaustalteen olisi pystyttävä havaitsemaan muutaman

miljoonasosa-asteen lämpötilan muutoksia. Grafiitissa vastaava lämpötilan nousu on noin kuusinkertainen, mutta senkin mittausta on yhä vaikeaa. Kalorimetrien ongelmana on lisäksi niin kutsuttu lämpöhäiriö, jonka vuoksi säteilyn lämpövaikutus ei olekaan täsmällisen verrannollinen absorboituneeseen annokseen. Tämä on ollut merkittävä ongelma erityisesti vesikalorimetrissa, jossa lämpöhäiriö on vasta viime vuosina opittu huomioon ottamaan mittanormaalilta vaadittavalla tarkkuudella. Grafiitissa lämpöhäiriö on merkityksettömän pieni.

Grafiitin hyvien ominaisuuksien vuoksi grafiittikalorimetri on ollut eniten tutkittu ja jo pitkään käytetty kalorimetrityyppi. Veteen absorboituneen annoksen mittauksessa grafiittikalorimetriä käytetään joko sellaisenaan tai veteen sijoitettuna, jolloin veteen absorboitunut annos voidaan laskea grafiittiin absorboituneesta annoksesta useammallakin menetelmällä.

Kalorimetrien lisäksi veteen absorboituneen annoksen mittanormaaleina on kehitetty kemiallista annosmittaria (Fricke-dosimetria) ja ionisaatiokammioon perustuvaa menetelmää. Kemiallisessa menetelmässä määritetään elektronikeilan kokonaisabsorptio Fricke-liuokseen. Kun elektronien energia, elektronivirta ja absorboiva massa tunnetaan tarkasti, voidaan veteen absorboitunut annos määrittää. Käytännön mittauksia varten määritetään näin saadun veteen absorboituneen annoksen suhde spektrofotometrisesti määritettyyn Fricke-liuoksen absorbanssiin. Ionisaatiomenetelmä perustuu onteloionisaatioteoriaan ja kammion koon tarkkaan tuntemukseen.

Neutronisäteilyn mittanormaaleilla tarkoitetaan yleensä säteilylähteitä, jotka emittoivat termisiä tai nopeita neutroneita, sekä mittausmenetelmiä, joilla lähteiden neutronikertymänopeus voidaan määrittää. Mittausmenetelmät perustuvat neutronien ja aineen vuorovaikutuksissa syntyvien reaktiotuotteiden (aktivointi- tai fissiotuotteiden) laskentaan. Väliaineeseen absorboitunut annos lasketaan neutronikertymästä käyttäen julkaisuja muunnoskertoimia. Neutronisäteilyn absorboitunut annos voidaan myös määrittää kalorimetrillä tai kudosekvivalentilla ionisaatiokammion avulla. Ionisaatiokammioon perustuvassa menetelmässä sovelletaan onteloionisaatioteoriaa ja siihen liittyvää Fanon teoreemaa (katso jäljempänä).

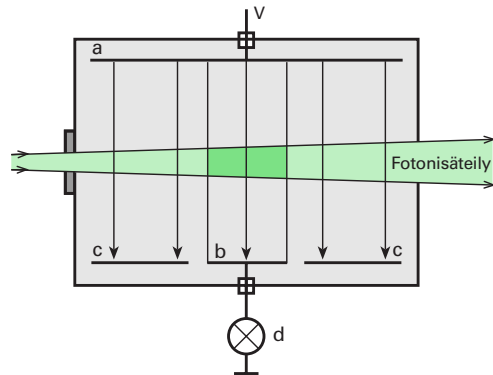
Beeta-säteilyn väliaineeseen absorboitunut annos voidaan määrittää absoluuttisesti ekstrapolaatio-ionisaatiokammion avulla. Tässä kammiossa kammion kokoa muutetaan asteittain, ja ”ekstrapoloimalla” nolla-tilavuuteen määritetään ionisaatiokammion tilavuusyksikköä kohden. Veteen absorboitunut annos lasketaan soveltaen onteloionisaatioteoriaa.

Seuraavassa käsitellään tarkemmin joidenkin primaarinormaalien rakennetta ja toiminta-periaatetta.

## Avoionisaatiokammio

Avoionisaatiokammion rakenne on esitetty kuvassa 3.2. Kammio on ”laatikko”, jossa fotonisäteilykeilan sisäänmenoaukko on rajattu kaihtimella tietyn kokoiseksi. Laatikon vastakkaisella puolella on säteilykeilan ulostuloaukko. Kammion sisällä säteilykeila kulkee vapaassa ilmatilassa, jota toisella reunalla rajoittaa suurjännite-elektrodi ja toisella reunalla keräys- ja suoja-elektrodit. Suurjännite-elektrodille tuodulla jännitteellä luodaan suurjännite- ja keräyselektrodien välille sähkökenttä ilmassa synnyttämien ionien keräämiseksi. Suojaelektrodin avulla varmistetaan, että sähkökentän kenttäviivat ovat suoria ja kohtisuorassa elektrodien tasoa vastaan. Ionien keräystilavuus voidaan tällöin määrittää tarkasti. Elektrodien välimatka ja kammion muut mitat on valittu siten, että ionien keräysalueella (kuvassa 3.2 viivoitettu alue) syntyvät sekundaarielektronit menettävät kaiken energiansa ennen kuin ne saavuttavat elektrodit tai kammion seinät: elektronit pysähtyvät täydellisesti ilmassa. Katkoviivojen välisellä alueella syntyneet samanmerkkiset ionit kerätään sähkökentän avulla keräyselektrodille.

Elektronitasapainon vallitessa (katso luku 2) mitattu ionisaatiovirta vastaa ionisaatiota, jonka viivoitetulla alueella syntyneet elektronit pysähtyessään aiheuttavat. Säteilytys ( $X$ ) voidaan siis määrittää, kun tunnetaan viivoitetun alueen tilavuus ja siten ilman massa. Säteilytyksen mittaustulos määritellään yleensä kaihtimen kohdalle, jossa keilan poikkileikkauksen pinta-ala ( $A$ ) tunnetaan täsmällisesti. Jos ilman vaimennus on merkityksettömän vähäistä,  $X = Q/\rho A \ell$ , missä  $Q$  on mitattu varaus,  $\rho$  on ilman tiheys ja  $\ell$  on keräyselektrodin pituus keilan suunnassa. Käytännössä hyvän tarkkuuden saavuttaminen edellyttää tähän lausekkeeseen lukuisia korjauksia. Niillä otetaan huomioon muun muassa ilman aiheuttama vaimennus kaihtimen ja keräysalueen keskipisteen välillä, ionien rekombinaatio, ilman kos-



**KUVA 3.2** Avoionisaatiokammion rakenne

(a) suurjännite-elektrodi, (b) keräyselektrodi,  
(c) suojaelektrodi, (d) elektrometri

teus, ja ionisaatio, jonka aiheuttaa jarrutussäteily, sironnut säteily tai kamion sisään seinämien läpi vuotanut säteily.

## Onteloionisaatiokammio

Onteloionisaatiokammiossa sovelletaan onteloionisaatioteoriaa tai lyhyesti onteloteoriaa. Teorian perusteet loivat Bragg ja Gray. Gray tarkasteli elektronitasapainossa olevaa, fotoneilla paikan suhteen tasaisesti säteilytettyä ainetta, johon asetetaan kaasutäytteen ontelo. Jos sekä aineen että kaasun läpi kulkee sama määrä sekundaarielektroneja, joilla on myös sama energijakauma, elektronit menettävät energiaa yhtä kilogrammaa kohti aineen ja kaasun massajarrutuskykyjen suhteessa. Gray oletti, että myös energiaa absorboituu samassa suhteessa. Kaasussa yhtä kilogrammaa kohti absorboitunut energia on  $J_g W_g / e$ , missä  $J_g$  on sekundaarielektronien tuottamassa ionisaatiossa syntyvä varaus yhtä kilogrammaa kohti,  $W_g$  on ioniparin tuottamiseen kaasussa keskimäärin tarvittava energia ja  $e$  on elektronin varaus. Aineeseen absorboitunut annos ( $D_m$ ) saadaan siten niin kutsutusta Braggin-Grayn suhteesta:

$$D_m = s_{m,g} J_g W_g e^{-1}, \quad (3.2)$$

missä  $s_{m,g} = (S/\rho)_m / (S/\rho)_g$  on aineen ja kaasun (törmäys-) massajarrutuskykyjen suhde.

Braggin-Grayn teorian eli yhtälön (3.2) perusoletukset ovat seuraavat:

- 1) Elektronitasapaino vallitsee ennen ontelon asettamista.
- 2) (a) Ontelo ei häiritse elektronikertymää (elektronisäteilyn hiukkaskertymää) eikä sen energia- ja suuntajakaumaa.
  - (b) Elektroneja syntyy ontelossa merkityksettömän vähän tai saman verran kuin massaltaan vastaavassa määrässä ympäröivää ainetta.
- 1) Elektronit menettävät energiaa pieninä erinä (jatkuva hidastuminen).

Jotta oletus (2) olisi voimassa, on ontelon oltava hyvin pieni. Jos onteloa ei voida tehdä riittävän pieneksi, turvaudutaan Fanon teoreemaan: kun koostumukseltaan tunnettua ainetta säteilytetään siten, että primaarisäteilyn hiukkaskertymä on paikan suhteen tasainen, myös sekundaarisäteilyn hiukkaskertymä on tasainen ja riippumaton aineen tiheydestä ja tiheyden muutoksista eri paikoissa. Tämän mukaan ontelon koolla ei siis ole merkitystä, jos ontelon sisältämän aineen koostumus on sama kuin ympäristön. Fanon teoreema pätee äärettömälle aineelle, mutta se ei päde

lähellä kahden aineen rajapintaa, jossa elektronitasapaino ei ole toteutunut. Fanon teoreemalla on tärkeä merkitys muun muassa neutronisäteilyn dosimetriassa, jossa onteloita ei voida tehdä riittävän pieneksi.

Spencer ja Attix tarkastelivat ensimmäisinä Braggin-Grayn teorian oletuksen (3) paikkansapitävyyttä. Todellisuudessa elektronit menettävät ontelossa energiaa myös suurina erinä: elektronin radalta lähtee toisinaan törmäyksissä uusia elektroneja, joilla on niin paljon energiaa, että ne kulkeutuvat kauas syntyapaikaltaan ja muodostavat oman radan. Näiden niin kutsuttujen  $\delta$ -elektronien energia ei absorboitu alkuperäisen elektronin radan välittömaan läheisyyteen, vaan osa energiasta karkaa ontelosta.  $\delta$ -elektronien vaikutus otetaan huomioon käyttämällä rajallista massajarrutuskykyä  $L_{\Delta}/\rho$  (Spencerin-Attixin teoria). Energiaraja  $\Delta$  valitaan ontelon koon perusteella siten, että energialla  $\Delta$  elektronin kantama ontelon täyttävässä aineessa vastaa ontelon kokoa. Spencer kehitti myöhemmin teoriaansa ottamalla huomioon myös tiheysefektin (katso luku 1).

Kun ontelo on suuri, fotonien vuorovaikutukset ontelon täyttävän aineen kanssa ovat merkittäviä, eikä oletus (2b) ole voimassa. Kun pallon muotoisen ontelon säde ylittää ympäröivästä aineesta tulevien elektronien maksimikantaman ontelon täyttävässä aineessa, fotonien vuorovaikutukset ontelon täyttävän aineen kanssa määräävät täysin absorboituneen annoksen ontelon keskustassa. Kun ontelon kokoa suurennetaan, ympäröivään aineeseen ja ontelon täyttävään aineeseen absorboituneiden annosten suhde muuttuu asteittain massajarrutuskykyjen suhteesta,  $s_{m,g}$ , energia-absorption massakerrointen suhteeksi,  $(\mu_{en/\rho})_m/(\mu_{en/\rho})_g$ . Onteloionisaatioteoriaa on kehitetty edelleen siten, että se soveltuu kaikenkokoisille onteloille (yleinen onteloionisaatioteoria).

Säteilytyksen ( $X$ ) määrittämiseksi onteloionisaatiokammiolla tarvitaan yhteys väliaineeseen absorboituneen annoksen ( $D_m$ ) ja säteilytyksen välille. Ilmassa massa-alkiossa  $dm$  syntyneet sekundaarielektronit luovuttavat ilmaan energian  $(dQ/e)W_{ilma}$  eli  $(Xd_m/e)W_{ilma}$  säteilytyksen määrittämän (kaava 2.13) mukaan. Tämä energia ei tule samaan massa-alkioon, josta elektronit lähtivät, mutta elektronitasapainon vallitessa kuhunkin massa-alkioon tulee kuitenkin sama energia. Luovutettu energia jaettuna massalla eli ilmaan absorboitunut annos on siten  $(X/e)W_{ilma}$ . Absorboitunut annos eri aineisiin, joihin kohdistuu sama energiakertymä, on verrannollinen aineiden energia-absorption massakertoimiin. Aineeseen  $m$  absorboitunut annos saadaan siten ilmaan absorboituneesta annoksesta (elektronitasapainon vallitessa) seuraavasti:

$$D_m = X \frac{W_{ilma}}{e} \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{ilma}}. \quad (3.3)$$

Käyttämällä Braggin-Grayn suhdetta (3.2) ja absorboituneen annoksen ja säteilytyksen suhdetta (3.3), saadaan säteilytykselle seuraava yhtälö:

$$X = J_g s_{m,g} \frac{W_g}{W_{ilma}} \frac{(\mu_{en}/\rho)_{ilma}}{(\mu_{en}/\rho)_m}. \quad (3.4)$$

Kun ontelon seinämä ja täytekaasu ovat ilmaa,  $X=J_{ilma}$ , eli kyseessä on avoionisaatiokammio.

Täysin ilmaekvivalentin kiinteän seinämän valmistaminen on käytännössä mahdotonta, mutta täytekaasuna voidaan hyvin käyttää ilmaa. Tällöin

$$X = J_{ilma} s_{m,ilma} \frac{(\mu_{en}/\rho)_{ilma}}{(\mu_{en}/\rho)_m}. \quad (3.5)$$

Mittanormaalilaboratoriot ovat lähes poikkeuksetta valinneet seinämateriaaliksi grafiitin, jolloin suhteet  $s_{m,ilma}$  ja  $(\mu_{en}/\rho)_{ilma} / (\mu_{en}/\rho)_m$  ovat lähellä ykköstä ja tarkoin tunnettuja.

Yhtälöä (3.5) joudutaan käytännössä täydentämään erällä korjaustekijöillä. Esimerkiksi elektronitasapainon aikaansaamiseksi  $^{60}\text{Co}$ -gamma säteilyn mittauksessa kammion seinämän paksuuden tulee olla vähintään kolme millimetriä. Seinämä aiheuttaa primaarisäteilyn vaimennusta ja sirontaa, jotka on korjaustekijöiden avulla otettava huomioon (tämän korjauksen suuruus on noin 1,5 prosenttia).

Sekundaarielektronien kantama pitenee nopeasti, kun fotonisäteilyn energia kasvaa lähelle yhtä megaelektronivolttia. Samalla mittauksen epätarkkuus suurenee ja korjaustekijöiden käyttö vaikeutuu. Onteloionisaatioteoriaan perustuvaa säteilytyksen mittanormaalia ei tämän vuoksi käytetä yli noin 3 MeV fotonienenergioilla.

## Kalorimetri

Säteilyn absorboitumisesta aiheutuva kalorimetrin ilmaisinosan, sydämen eli absorbaattorin, lämpötilan nousu on verrannollinen sydämeen absorboituneeseen annokseen. Kalorimetrin sydän tehdäänkin aineesta, jossa absorboitunut annos on tarkoitus määrittää. Sydäntä ympäröi samasta aineesta tehty vaippa, joka on tyhjiön avulla termisesti eristetty

sydäimestä. Vaippaa ympäröi usein vielä suojakerros, joka on tyhjiön avulla eristetty vaipasta. Tämä kokonaisuus on vielä eristetty tyhjiön avulla kalorimetrin runko-osasta. Kalorimetrin toimintaperiaatteesta riippuen sydämessä, vaipassa ja suojakerroksessa tai jossakin näistä on lämpötilanilmaisimet – termistorit tai lämpöparit – ja sähköiset lämmittimet.

Useimmissa sovelluksissa vaikeutena on hallita lämmönsiirtymistä varsinaisen ilmaisinosan ja sen ympäristön välillä. Adiabaattisessa kalorimetrissa sydämen ja sen ympäristön välillä ei teoriassa ole lämmönvaihtoa. Absorboituneen energian määrä saadaan kertomalla sydämen lämpötilan nousu sen lämpökapasiteetilla. Semiadiabaattisessa kalorimetrissa sydämen lämpövuodosta johtuvaa korjausta ei voida pitää merkityksettömänä. Kun vaipan ja sydämen massat ovat yhtä suuret, sydämen lämpöhäviö otetaan huomioon lisäämällä vaipan lämpötilan nousu sydämen lämpötilan nousuun. Lämpöhäviöllä vaipasta suojaan on pienempi merkitys kuin lämpöhäviöllä sydäimestä vaippaan. Kalorimetrin kalibrointi tapahtuu syöttämällä lämmittimen avulla sydämeen tietty määrä sähköenergiaa.

Kalorimetrinen menetelmän epävarmuutta lisää lämpöhäiriö, jonka vuoksi säteilyn lämpövaikutus ei olekaan täsmälleen verrannollinen absorboituneeseen annokseen. Säteily voi saada aikaan aineessa lämpöä sitovia (endotermisiä) tai lämpöä vapauttavia (eksotermisiä) kemiallisia reaktioita, tai energia voi varastoitua kidehilaan. Yksinkertaisissa aineissa, kuten grafiitissa ja metalleissa, lämpöhäiriö on merkityksettömän pieni. Vedessä lämpöhäiriön vaikutus voi kuitenkin olla useita prosentteja, ja veden puhtaus vaikuttaa oleellisesti häiriön suuruuteen. Nykytietämyksen mukaan lämpöhäiriö vedessä voidaan parhaiten hallita suljetussa rakenteessa, jossa mahdollisimman puhdas vesi voidaan kyllästää sopivilla kaasulla siten, että lämpöhäiröllä on seoksessa tunnettu ja stabiili arvo.

## Sekundaarinormaalit

Edellä kuvatut primaarinormaalit korjaustekijöineen ovat teknisesti vaativia ja kalliita laitteita, jonka vuoksi useimmat kansalliset mittanormaalilaboratoriot tyytyvät hankkimaan ja ylläpitämään niitä vastaan kalibroituja sekundaarinormaaleja (luku 3.3). Säteililytyksen ja ilmakehän sekundaarinormaalit ovat hyvälaatuisia ionisaatiokammioita, joissa kammion seinämä on tehty grafiitista ja on riittävän paksu elektronitasapainon saavuttamiseksi. Koska seinämämateriaali on järjestysluvultaan lähellä ilmaa, kammion vaste muuttuu vain vähän energian funktiona, eikä fotonisäteilyn energijakaumaa tarvitse tuntea kovin tarkasti. Kammion koko

valitaan sen mukaan, mikä on sekundaarinormaalilla realisoitavan suureen mittausalue: sädehoidon kalibrointitarpeisiin käytetään pienikoista (tilavuus noin  $1 \text{ cm}^3$ ) kammiota, kun taas diagnostisen radiologian ja säteilysuojelun kalibrointitarpeisiin soveltuvat keski- ja suurikokoiset kammiot (tilavuus noin  $10\text{--}1\,000 \text{ cm}^3$ ).

Tykosädehoidon kalibrointitarpeita varten ylläpidetään primaarinormaalien avulla kalibroituja säteilylähteitä ja niin kutsuttuja kaivokammioita sekundaarinormaaleina. Kalibroidulla kaivokammioilla kalibroitavan fotonilähteen tuottama ilmakermanopeus tai beetalähteen absorptioannosnopeus mitataan lähes  $4\pi$ -geometriassa.

Säteilysuojelumittareiden kalibrointitarpeisiin ylläpidettävät beeta- ja neutronisäteilyn sekundaarinormaalit ovat yleensä primaarinormaalien avulla kalibroituja säteilylähteitä. Beetalähteiden kalibrointiavoksi on määritetty absorptioannosnopeus tietyllä syvyydellä kudoksessa, tietyllä etäisyydellä lähteestä. Neutronilähteiden kalibrointiavoksi on määritetty neutronituotto tai neutronikertymänopeus tietyllä etäisyydellä lähteestä.

### 3.5 | Mittaustarkkuus

#### Yleistä

Monen tekniikan alan mittauksissa, esimerkiksi pituuden mittauksissa, saavutettavissa oleva tarkkuus on paljon parempi kuin mitä käytännössä useimmiten tarvitaan. Tämä ei kuitenkaan päde ionisoivan säteilyn mittauksiin: saavutettavissa olevat mittaustarkkuudet ovat usein samaa tasoa tai jopa huonommat kuin mitä vaadittaisiin. Säteilymittaukset perustuvat monimutkaisiin fysikaalisiin ilmiöihin. Säteilyn ja aineen vuorovaikutuksia ei ole helppoa kvantifioida, ja mitattavien suureiden arvot riippuvat aina lukuisista eri tekijöistä. Periaatteessa yksinkertaisessakin säteilymittarissa, ilmatäytteisessä ionisaatiokammiossa, mittaustulokseen vaikuttavat muun muassa säteilylaji ja energia, säteilyn suuntajakauma, hiukkaskertymänopeus sekä ilmanpaine ja lämpötila. Tarkassa mittauksessa on otettava huomioon nämä ja usein vielä muitakin tekijöitä. Syntyvä ionisaatiovirta on vain muutamia piko- tai nanoampeereja, ja näin pienen virran tarkka mittaus on vaikeaa.

Kansainvälinen paino- ja mittakomitea (CIPM) on antanut suosituksen mittausten epätarkkuuden ilmoittamisesta. Tässä suosituksessa ei enää



määritellä aikaisemmin paljon käytettyjä käsitteitä, systemaattista ja satunnaista epävarmuutta. Suosituksessa määritellään sen sijaan kaksi epävarmuustyyppiä, joita suosituksessa kutsutaan nimillä tyyppin A epävarmuus ja tyyppin B epävarmuus. Epävarmuus on tyyppiä A tai B sen mukaan, miten se on määritetty: Tyyppin A epävarmuus määritetään tilastollisesti ja tyyppin B epävarmuus muilla keinoin. Tyyppin A epävarmuus ilmoitetaan tilastollisesti arvioitun varianssin (keskiarvon keskihajonnan neliön) sekä vapausasteiden lukumäärän avulla. Tyyppin B epävarmuus ilmoitetaan muulla tavoin saadun varianssin arvion avulla. Epävarmuudet voidaan yhdistää laskemalla yhteen epävarmuuskomponenttien varianssit, jolloin saadun summan neliöjuuri on yhdistetty epävarmuus. Yhdistetty epävarmuus voidaan haluttaessa vielä kertoa jollakin luvulla, kattavuuskerroin on tällöin ilmoitettava. Esimerkiksi kattavuuskerroin 2 vastaisi noin 95 %:n varmuutta eli 95 %:n luotettavuustasoa aikaisemmin käytetyn virheterminologian mukaan, kun mittaustulosten lukumäärä on suuri ja kyseessä on normaalijakautunut satunnaissuure. Klassista varmuus- tai luotettavuustasojattelua ei voida soveltaa, koska yhdistämisen tuloksena saadun satunnaissuureen jakaumaa ei tunneta eikä sen vapausasteita voida määritellä. Kokonaisepävarmuuteen ei siten liity selvästi määriteltyä tai tunnettua varmuutta. Tarkimmissa virhearvioissa on esitettävä epävarmuuskomponentit erittelevä luettelo. On siis selvitettävä tapa, jolla epävarmuuden suuruus on laskettu tai arvioitu.

## Mittausepävarmuudet primaarinormaaleilla

Taulukossa 3.1 on esitetty CIPM:n suosituksen mukaan arvioituja suhteellisia yhdistettyjä epävarmuuksia ionisoivan säteilyn suureille, kun suuren arvo määritetään primaarinormaalilla. Fotonisäteilyllä (fotonienergia yli noin 50 keV) yhdistetyt epävarmuudet ovat alle prosentin muille paitsi veteen absorboituneelle annokselle, jonka mittausepävarmuudeksi vesikalorimetrillä yli 1 MeV fotonisäteilyllä arvioidaan tyypillisesti noin yksi prosentti.

Kansainvälisissä mittausvertailuissa mittanormaalien yhtäpitävyys eri laboratorioden kesken on yleensä ollut parempi kuin suureille arvioitu absoluuttinen epävarmuus. Tämä pätee erityisesti säteilytyksen mittausvertailuihin, koska laboratoriot käyttävät toimintaperiaatteiltaan samanlaisia mittanormaaleja ja samoja lukuarvoja säteilytyksen laskennassa tarvittaville fysikaalisille parametreille. Eri primaarinormaalilaboratorioiden kehittämien veteen absorboituneen annoksen mittanormaalien yhtäpitävyys

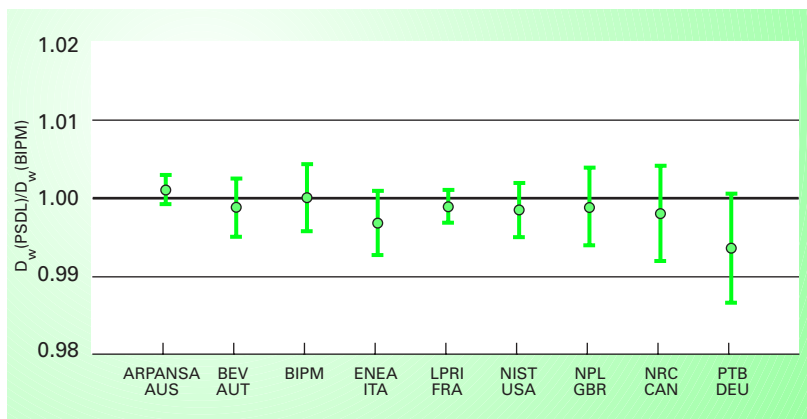
Suure	Säteilylaji ja energia	Primaarinormaali	Suhteellinen yhdistetty epävarmuus, %
Ilmakerma	Alle 50 keV fotonisäteily	Avoionisaatiokammio	0,1 – 0,4
Ilmakerma	50-300 keV fotonisäteily	Avoionisaatiokammio	0,1 – 0,3
Ilmakerma	<sup>60</sup> Co gamma-säteily	Onteloionisaatio-kammio	0,25 – 0,8
Grafiittiin absorboitunut annos	<sup>60</sup> Co gamma-säteily	Grafiittikalorimetri	0,25 – 0,35
Veteen absorboitunut annos	Yli 1 MeV fotonisäteily	Vesikalorimetri	1,0 – 1,1

**TAULUKKO 3.1** Ionisoivan säteilyn suureiden mittausepävarmuus, kun suureen arvo määritetään primaarinormaaleilla.

<sup>60</sup>Co-gammasäteilyllä on noin 0,5 % (tulosten suhteellinen keskihajonta; Kuva 3.3). Veteen absorboituneen annoksen mittanormaalien katsotaan antavan vankemman pohjan suureen ”oikean” arvon määrittämiseen, koska mittanormaalit ovat paljon riippumattomampia toisistaan ja tuntemattoman systemaattisesti vaikuttavan epävarmuuden todennäköisyys on pienempi.

### Mittausepävarmuudet käytännön säteilymittauksissa

Käytännön säteilymittauksissa voidaan erottaa kolme tarkkuustasoa. Säteilytyöpaikan ja ympäristön säteilyturvallisuuden tarkkailussa vaaditaan käytännöllisiä ja yksinkertaisia mittausten menetelmiä. Näissä säteilysuojelumittauksissa voidaan tyytyä toisinaan jopa kymmenien prosenttien epävarmuuksiin. Diagnostisen radiologian säteilymittauksissa, joilla pyri-



**KUVA 3.3** Veteen absorboituneen annoksen primaarinormalien vertailu BIPM:n <sup>60</sup>Co-gamma-säteilykeilassa

Epävarmuusjanat tarkoittavat kunkin laboratorion ilmoittamaa suhteellista yhdistettyä epävarmuutta.

Toimenpide	Suhteellinen yhdistetty epävarmuus, %			
	Kalibrointi-säteily	<sup>60</sup> Co-gamma-säteily	Yli 1 MeV fotonisäteily	Yli 1 MeV elektroni-säteily
Käytettävän annosmittarin kalibrointi	0,6			
Veteen absorboituneen annoksen epävarmuus		0,8	1,5	2,1

### TAULUKKO 3.2 Epävarmuusarvio sädehoitolaiteiden kalibrointiin liittyville annosmittauksille

Annosmittari on kalibroitu suoraan veteen absorboituneelle annokselle.

tään arvioimaan kuvauslaitteiden kuntoa ja kuvattavan potilaan saamia säteilyannoksia, vaaditaan pienempää epävarmuutta, yleensä enintään 5–10 prosenttia. Suurinta mittaustarkkuutta vaaditaan sädehoidon annosmittauksissa, joissa potilaan saama annos olisi tunnettava keskimäärin alle viiden prosentin tarkkuudella. Koska sädehoitoprosessiin liittyy monia virhelähteitä, hoitolaitteen kalibroinnissa annoksen mittausepävarmuus saisi olla enintään muutamia prosentteja.

Taulukossa 3.2 on esimerkkinä arvioitu suhteellinen yhdistetty epävarmuus sädehoitolaitteen kalibrointiin liittyvissä annosmittauksissa (annosmittaukset referenssioloissa vesifantomissa), kun mittauksessa käytettävä annosmittari on kalibroitu suoraan veteen absorboituneelle annokselle <sup>60</sup>Co-gammasäteilykeilassa. Potilaan hoitokohteen saaman annoksen epävarmuus on suurempi, sen riippuessa lisäksi hoitolaitteen säteilykeilan ominaisuuksista ja annosjakauman laskentaohjelman tarkkuudesta.

## KIRJALLISUUTTA

Metrologia, perus- ja yleistermien sanasto. SFS 3700, 1999.

International Organization for Standardization (ISO). Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO. Geneva, 1993.

International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Dosimetry of beta rays and low-energy photons for brachytherapy with sealed sources. ICRU Report (tullaan julkaisemaan).

Allisy-Roberts PJ. Comparisons and calibrations at the BIPM, Report CCEMRI(I)/99-1, BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sevres, 1999.

International Committee for Weights and Measures (CIPM). Recommendation 1 (CI-1981).

Jacob A. IAEA Symp. On Dosimetry in Radiotherapy, Wien, 1987.

International Atomic Energy Agency (IAEA). Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: An international Code of Practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. IAEA Technical Report Series No 398. IAEA, Vienna, 2000.

Williams AJ, Rosser KE. A status report on the NPL water calorimeter. NPL REPORT CIRM 22, 1998.