

Sädehoidon annosmittausten epävarmuuksien arviointi

Sädehoitofyysikoiden 39. neuvottelupäivät 6.-7.6.2024

Aarno Kärnä

Sisältö

1. Taustaa ja kertausta
2. Esimerkkejä absorboituneen annoksen mittauksen epävarmuusarvion laadinnasta, HYVAKS
3. Keskustelua

Taustaa ja kertausta

Määräys STUK S/7/2021

9 (16)

Säteilyturvakeskuksen määräys ionisoivan säteilyn mittauksista (STUK S/7/2021)

4 § Säteilymittausten luotettavuus

Säteilymittarin on sovelluttava mittaukseen mitattavan suureen arvoilla, säteilylajeilla ja säteilylaaduilla. Jos mitattavan säteilyn annosnopeus on pulssimuotoinen, on mittarilla ja mittausjärjestelmällä voitava mitata sekä jatkuvaa että pulssimuotoista säteilyä. Lisäksi säteilymittarin on sovelluttava käyttöpaikkansa ympäristöolosuhteisiin.

Mittaustuloksen metrologinen jäljitettävyys on voitava osoittaa mittarin ja mittausjärjestelmän kalibrointitodistuksessa olevien tietojen ja käytetyn mittausmenetelmän kuvauksen avulla.

Käyttömittarin mittaustuloksen metrologisen jäljitettävyyden osoittamiseksi käyttömittarin 14 §:ssä tarkoitetut kalibrointitiedot voidaan antaa kalibrointitodistuksen sijaan mittarin käyttäjän toimintajärjestelmän tiedoissa.

Säteilytoiminnan mittauksissa sekä työpaikan, asunnon ja muun oleskelutilan radonpitoisuuden mittauksissa mittaustuloksille **on tehtävä epävarmuusarvio.**

Säteilymittauksen luotettavuuden, mittarin ja mittausjärjestelmän on täytettävä liitteen 1 taulukoissa 1.1-1.4 määrätyt vaatimukset.

Taulukko 1.2. Lääketieteellisen altistuksen määrittämiseksi tehtävissä mittauksissa käytettävät suureet ja tarkkuusvaatimukset.

Mittauksen tarkoitus	Mittaussuure	Suurin sallittu mittausepävarmuus (%) ¹⁾	Säteilymittarin vaatimukset
Röntgentutkimukset ja -toimenpiteet. Röntgenlaitteen säteilyntuotto.	Ilmakerma Sähkömäärä	7	IAEA TRS 457:n ²⁾ tarkoittamat kriteerit täyttävä mittauslaite
Röntgentutkimukset ja -toimenpiteet	Ilmakerma pinnalla Ilmakerman ja pinta-alan tulo	25 ³⁾	IAEA TRS 457:n ²⁾ tarkoittamat kriteerit täyttävä mittauslaite
TT-tutkimukset ja -toimenpiteet	Ilmakerman ja pituuden tulo Tilavuuden TT-ilmakermaindeksi	25 ³⁾	IAEA TRS 457:n ²⁾ tarkoittamat kriteerit täyttävä mittauslaite
Ulkoisen sädehoito fotonisäteilyllä vertailuolosuhteissa ⁴⁾	Veteen absorboitunut annos	3	IAEA TRS 398:n ⁵⁾ tarkoittamat kriteerit täyttävä mittauslaite
Ulkoisen sädehoito elektronisäteilyllä vertailuolosuhteissa ⁴⁾	Veteen absorboitunut annos	4	IAEA TRS 398:n ⁵⁾ tarkoittamat kriteerit täyttävä mittauslaite
Ulkoisen sädehoito. Mittaus potilaassa	Veteen absorboitunut annos	5	
Tykössädehoito fotonisäteilylähteellä vertailuolosuhteissa ⁴⁾	Vertailuilmakermanopeus	5	Soveltuva kansainvälinen standardi
Tykössädehoito beetasäteilylähteellä vertailuolosuhteissa ⁴⁾	Veteen absorboituneen annoksen vertailuannosnopeus	15	Soveltuva kansainvälinen standardi

¹⁾ Laajennettu mittausepävarmuus kattavuuskertoimella 2.

²⁾ International atomic energy agency (IAEA). Dosimetry in diagnostic radiology: An international code of practice Technical report series no. 457. Vienna: IAEA, 2007.

³⁾ Samaa epävarmuuden enimmäisarvoa käytetään myös silloin, kun laitteessa on laskennallinen potilaan säteilyaltistuksen näyttö.

⁴⁾ Vertailuolosuhteilla tarkoitetaan mittausta vedessä, toistettavassa ja tunnetussa geometriassa ja ympäristöolosuhteissa ja jonka tulosta käytetään potilaan annosmäärityksen ja -suunnittelun perustana.

⁵⁾ 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. Technical reports series no. 398, V12, 05 June 2006 tai tätä myöhäisempi julkaisu.

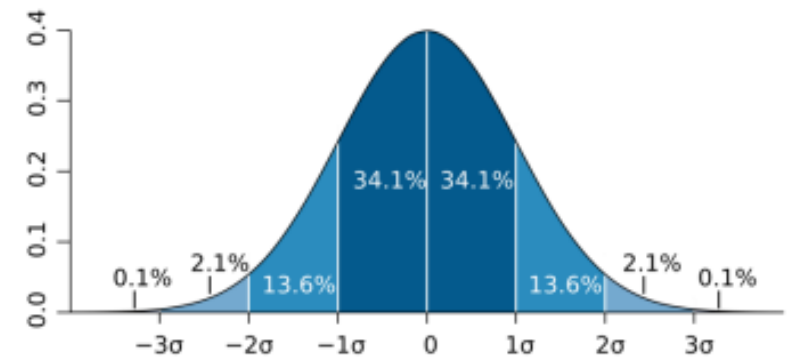
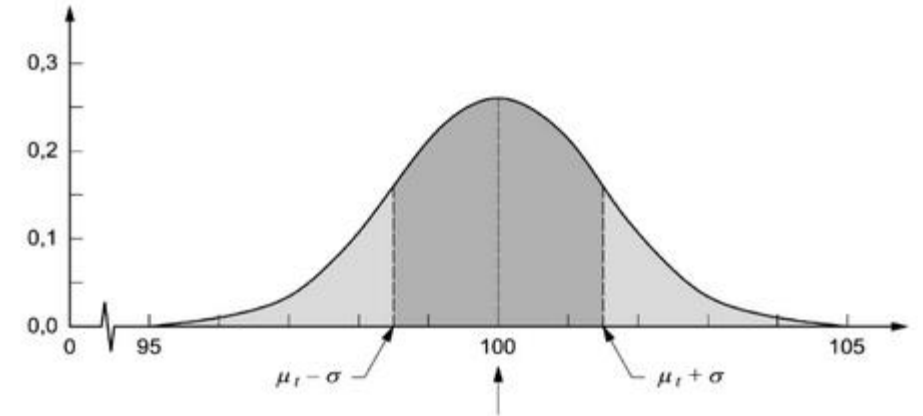
Taustaa ja kertausta

Mittausepävarmuus, ”virhe”

- Mittaustulos on arvio mitattavasta arvosta. Mittaustulokseen sisältyy aina epätarkkuutta.
 - Mahdollisia syitä epätarkkuuksiin: Mittausympäristö, mittalaitteet, mittaasetelma, mittaaja ym.
- Kuinka paljon mitattu tulos poikkeaa todellisesta arvosta? Millä todennäköisyydellä?
 - Systemaattiset ja satunnaiset virheet
- Helppo tapa: maksimi-minimi-menetelmä
- Virheen suuruutta ei kannata yliarvioida, joten epävarmuutena ilmoitetaan yleensä todennäköinen virhe.
- Epävarmuudet voidaan jakaa A-tyyppin ja B-tyyppin epävarmuuksiin
 - A-tyyppi: Voidaan käsitellä tilastollisin menetelmin
 - B-tyyppi: Muut kuin A-tyyppin epävarmuudet

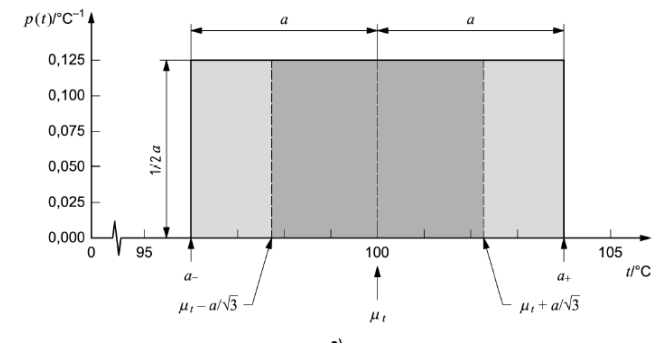
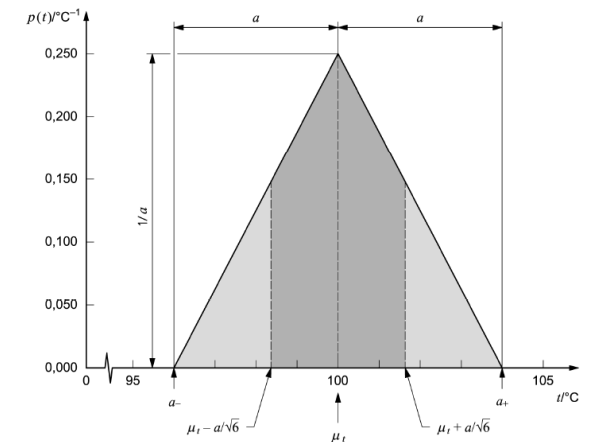
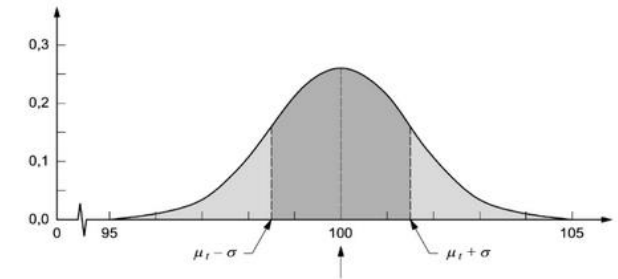
A-typin standardiepävarmuus, u_A

- Arvioidaan tilastollisesti
 - Toistomittauksia
 - Vähintään 10 toistoa olisi hyvä olla
 - Oletetaan normaalijakauma
 - Paras arvio jakauman huipun paikasta (tosiarvo) antaa **keskiarvo**
 - Mittaustulokset jakautuvat *tosiarvon* $\bar{x}$ ympärille siten, että 68 % havainnoista osuu välille $\bar{x} \pm$ **keskihajonta**
 - Keskihajonta on siis todennäköinen yksittäisen havainnon virhe
 - Keskiarvon todennäköisen virheen arvioimiseen sopii **keskiarvon keskivirhe**
- $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}$ keskihajonta
- $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$ keskiarvon keskivirhe



B-tyypin standardiepävarmuus u_B

- Arvioidaan muuten kuin tilastollisesti
 - Esimerkiksi julkaisut, laitevalmistajan toimittamat tiedot tai kalibroinnit
- Epävarmuuden vaihteluväli $\pm a$, missä a kattaa $\sim 100\%$ tuloksista
- Arvioidaan todennäköisyysjakauma, joka edustaa epävarmuuden todennäköisyyttä
 - Yleisimmin normaalijakauma, kolmiojakauma tai tasajakauma
 - Normaalijakauma $u = \text{keskihajonta } \sigma_x$
 - Kolmiojakauma $u = \frac{a}{\sqrt{6}}$ Esimerkiksi analoginen lämpömittari
 - Tasajakauma $u = \frac{a}{\sqrt{3}}$ Esimerkiksi digitaalinen lämpömittari
- Saadaan normaalijakautunutta A-tyypin epävarmuutta vastaava epävarmuus: A- ja B-tyyppi vastaamaan toisiaan



Epävarmuuksien yhdistäminen

Riippumattomat epävarmuuskomponentit voidaan yhdistää neliöllisesti.

Yhdistetty standardiepävarmuus $u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$.

Laajennettu epävarmuus $U = k \cdot u_C$, missä k on **kattavuuskerroin**.

Luotettavuustasot:

$k=1$: n. 68 %

$k=2$: n. 95 %

$k=3$: n. 99 %

Epävarmuuden esittäminen

- Epävarmuus pyöristyy ylöspäin
- Tulos ja epävarmuus esitetään samalla tarkkuudella
- Kattavuuskerroin ja luotettavuustaso aina arvioon mukaan
- Epävarmuus on aina positiivinen

Yleinen epävarmuuden etenemislaki /
Yleinen virheen etenemislaki /
Epävarmuuksien kasautumislaki

Epävarmuuksien kasautumislaki

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots) \quad u = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u^2(x_2) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^2 u^2(x_3) + \dots}$$

Herkkyyskerroin, c epävarmuuskomponentti

$$y = x_1^a \cdot x_2^b \cdot x_3^c \cdot \dots \quad \frac{u_C}{|x|} = \sqrt{\alpha^2 \cdot \left(\frac{u(x_1)}{|x_1|}\right)^2 + \beta^2 \cdot \left(\frac{u(x_2)}{|x_2|}\right)^2 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{u(x_3)}{|x_3|}\right)^2 + \dots}$$

Riippumattomat A- ja B-tyyppien standardiepävarmuudet u_A ja u_B yhdistetään neliöllisesti epävarmuuksien kasautumislain mukaisesti

A-tyyppien standardiepävarmuus, u_A B-tyyppien standardiepävarmuus, u_B

Yhdistetty standardiepävarmuus, $u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$

Laajennettu epävarmuus, $U = k \cdot u_C$

Absorboituneen annoksen mittaus - epävarmuudet

Ionisaatiovirran mittaus

- Toistettavuus
- Kalibrointikerroin
- Resoluutio
- Vuotovirta
- Kalibrointikertoimen pitkäaikaisstabiilisuus
- Lineaarisuus annoksen suhteen
- Lineaarisuus annosnopeuden suhteen
- ...

Absorboituneen annoksen mittaus - epävarmuudet

Korjaukset

- Lämpötila- ja painekorjaus
- Rekombinaatiokorjaus
- Elektrometrin herkkyyskorjaus
- Polariteettikorjaus
- Kalibrointikertoimen korjaustekijä
- Ionisaatiokammion tilavuuskorjauskerroin
- Kentän tasaisuus
- Mittarin asemointi
- ...

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Absorboituneen annoksen mittaustuloksen epävarmuusarvio, 6X Esimerkki

Laitteisto

Hoitokone:	TrueBeam H194544
Ionisaatiokammio	PTW Farmer TW30013 (1869)
Elektrometri:	NE 2570/1B (775)
Kaapeli:	PTW TNC/TNC T26002.1.001-20
Vesifantomi	PTW MP3
Lämpötilan mittalaite:	Analoginen lämpömittari, PTW L654006 (52113)
Ilmanpaineen mittalaite:	VWR TH 200 (34905975)



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Laskentayhtälö

$$D_{wQ} = M \cdot D_{wQ} \cdot N_{D,w,Q} \cdot k_{Tp} \cdot k_s \cdot 100/MU/DD$$

Malliyhtälö

$$D_{wQ} = M_a \cdot M_b \cdot M_r \cdot M_0 \cdot N_{D,w} \cdot N_{D,w,stab} \cdot k_Q \cdot k_T \cdot k_p \cdot k_s \cdot k_{pol} \cdot k_{elec} \cdot k_{vol} \cdot 100/MU \cdot SDD \cdot SSD \cdot FS/DD \cdot Muut$$

Mikä on kunkin tekijän epävarmuuden suhteellinen vaikutus annoksen epävarmuuteen?

Oletetaan riippumattomuus ja yhdistetään lopuksi suhteelliset epävarmuudet neliöllisesti.

Farmerin mittarissa T, p, CF def !!!

6 MV
X06

PTW MP3
p = 101.325 [kPa]
PTW 0.6cc BF, Farmer 0.6cc High
10 * 10 cm²
600 MU/min

T = 19.80 [°C]
p = 100.3 [kPa]
ks = 1.0029
ND,w,q = 0.8978 [Gy/Gy]
DD(Zref) = 0.6636 (10 cm)
Zref = 10.00 [cm]
kTp = 1.0095 T,p,CF def !

MU
annettu = 200 MU

1,460
1,460

M = 1,4600 [Gy]

[Gy / 100MU]
1,000

DwQ = M * kTp * ks * ND,w,q * 100 / MUannettu / DD = 1,015
STUK DwQ =

syötettävät
kalib raportti
linkitetyt
lasketut

Nämä arvot linkitetty
Rekombinaatio ja
Interpolointi
vällehdiltä

1,0029
0.8978
0.6636

Annos ennen annossäätöjä
1,482
1,482
1,480

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Ionisaatiovarauksen mittaus M_α

A-tyyppi

10 mittauksen sarja

Mittaustulos: Keskiarvo

Epävarmuus: Keskihajonta

Toistomittaukset	
Ionisaatiovarauksen mittaus	
NE 2570/1 -elektrometri ja PTW TW30013 (1869), mittaussuoritus 24.1.2024	
	Mittaus [Gy]
Mittaus 1	1,82
Mittaus 2	1,82
Mittaus 3	1,82
Mittaus 4	1,82
Mittaus 5	1,82
Mittaus 6	1,82
Mittaus 7	1,82
Mittaus 8	1,817
Mittaus 9	1,817
Mittaus 10	1,817
Keskiarvo	1,8191
Keskihajonta	0,0013748
Suhteellinen epävarmuus	0,08 %

Epävarmuus 0,08 %



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Ionisaatiovarauksen mittaus M_b

B-tyyppi

STUK
Dosimetrialaboratorio

Lisäinformaatio
Kalibrointitodistukseen

MN/21/23 3 (3)

Esimerkiksi:

Maksimipoikkeama virta-alueella
kalibrointitodistuksen k_{elec} -määrittämisessä

Oletetaan tasajakauma

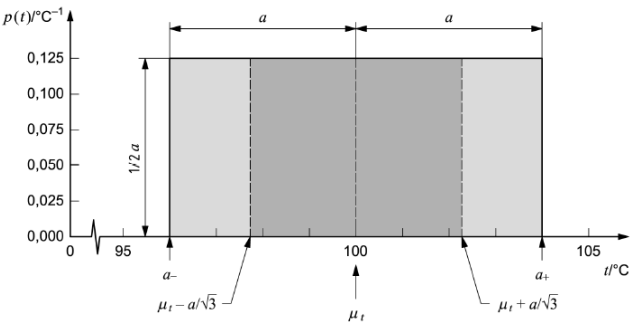
$$\frac{1,007 - 1,004}{\sqrt{3}} \approx 0,0017$$

Epävarmuus: 0,17 %

Tulevaisuudessa epävarmuus ilmoitetaan
kalibrointitodistuksessa, joten voi käyttää sitä.

Taulukko L2. Varausmittauksessa eri mittausalueilla ja eri virranarvoilla määritetty elektrometrin NE2570/1B-775 herkkyyskorjauskerroin k_{elec} .

Referenssivirta	k_{elec}	
	Low	High
20 pA	1,004	1,007
50 pA	1,005	1,006
100 pA	1,005	1,005
500 pA	1,005	1,005
1 nA	1,005	1,005
5 nA	-	1,005
10 nA	-	1,004



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Ionisaatiovarauksen mittauksen resoluutio M_r

B-tyyppi

Mittaustulos tyypillisesti 1,472 Gy

Laitteen speksit: mittalaitteen resoluutio 0,003 Gy

Oletetaan tasajakauma

Epävarmuus 0,12 %



3.2.1.2 Ranges and Resolution of Instrument Only 2570B (Gray Version)

Function Switch	Chamber Selector Switch	Range Switch	Full Scale	Resolution	Max. Contin. Input Rate	Max. Input/Pulse	Leakage
-10 V	X	X	-	0.25 V	-	-	-
POL V	X	X	-	0.25 V	-	-	-
ON	0.03 cc	LOW	20.475 Gy	0.005 Gy	5 Gy/s	3 Gy	$\pm 10 \mu\text{Gy/s}$
ON	0.03 cc	HIGH	204.75 Gy	0.05 Gy	50 Gy/s	3 Gy	$\pm 10 \mu\text{Gy/s}$
ON	0.6 cc	LOW	1.0237 Gy	0.0003 Gy	0.25 Gy/s	0.2 Gy	$\pm 0.5 \mu\text{Gy/s}$
ON	0.6 cc	HIGH	10.237 Gy	0.003 Gy	2.5 Gy/s	0.25 Gy	$\pm 0.5 \mu\text{Gy/s}$
ON	600 cc	LOW	1.0237 mGy	0.0003 mGy	0.25 mGy/s	0.2 mGy	$\pm 500 \text{ pGy/s}$
ON	600 cc	HIGH	10.237 mGy	0.003 mGy	2.5 mGy/s	0.25 mGy	$\pm 500 \text{ pGy/s}$
ON	CHARGE	LOW	20.475 nC	0.005 nC	6 nA	4 nC	$\pm 1 \times 10^{-14} \text{ A}$
ON	CHARGE	HIGH	204.75 nC	0.05 nC	60 nA	6 nC	$\pm 1 \times 10^{-14} \text{ A}$
	TIMER		4000.0 s	0.1 s	-	-	-

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Vuotovirta M_0

B-tyyppi

Kalibrointitodistuksen vuotovirta: < 0,0005 Gy/min

Vuotovirta mittauksen aikana / Tyypillinen mittaustulos

$$\frac{0,0005 \frac{Gy}{min} \cdot 200 MU/600 \frac{MU}{min}}{1,4557 Gy}$$

Oletetaan tasajakauma

Epävarmuus 0,007 %

KALIBROINNIN TULOKSET

Taulukko 1. Kalibrointitulokset veteen absorboituneelle annokselle ^{60}Co -säteilyllä perusolosuhteissa 20,0 °C, 101,325 kPa ja 50 % rh.

Ionisaatiokammio	PTW TW30013-1869	
Elektrometri	Laboration elektrometri	NE2570/1B-775 ¹⁾
Kaapeli	Laboration kaapeli	PTW TNC/TNC T26002.1.001-20
Kalibrointikerroin veteen absorboituneelle annokselle $N_{D,w}$	53,98 ± 0,65 MGy/C	0,9073 ± 0,011 Gy/Gy
Vuotovirta	< 10 fA	< 0,0005 Gy/min
Keräysjännitteen asetus	+250V kammion kuorella suhteessa keskielektrodiin	-250V
Kammion referenssipiste	Kammion ilmatilan keskipiste kammion pituusakselilla	

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Kalibrintikerroin $N_{D,w}$

B-tyyppi

Kalibrintitodistuksesta, normaalijakautunut suoraan

Epävarmuus 1,2 % (k=2) eli 0,6 % (k=1)

Jos käytetään kalibrintitodistuksen mittausketjua:

Elektrometrin herkkyysskorjauskerroin ja polariteettikorjaus (k_{elec} ja k_{pol}) sisältyvät kalibrintikertoiimeen ja niiden epävarmuudet kalibrintikertoimen epävarmuuteen.



Kalibrintitodistus

MN/21/23

1 (4)

Dosimetrialaboratorio

24.1.2023

Tilaaja
Keski-Suomen Sairaala Nova
Syöpätaudit ja sädehoito
Sairaalaafysikko Aarno Kärnä
Hoitajantie 3
40620 JYVÄSKYLÄ

Kalibrointi suoritettu, pvm
19.1.2023

KALIBROINNIN TULOKSET

Taulukko 1. Kalibrintitulokset veteen absorboituneelle annokselle ^{60}Co -säteilyllä perusolosuhteissa 20,0 °C, 101,325 kPa ja 50 % rh.

PTW TW30013-1869		
Ionisaatiokammio		
Elektrometri	Laboratorion elektrometri	NE2570/1B-775 ¹⁾
Kaapeli	Laboratorion kaapeli	PTW TNC/TNC T26002.1.001-20
Kalibrintikerroin veteen absorboituneelle annokselle $N_{D,w}$	53,98 ± 0,65 MGy/C	0,9073 ± 0,011 Gy/Gy
Vuotovirta	< 10 fA	< 0,0005 Gy/min
Keräysjännitteen asetus	+250V kammion kuorella suhteessa keskielektrodiin	-250V
Kammion referenssipiste	Kammion ilmatilan keskipiste kammion pituusakselilla	

1) Elektrometrin asetukset mittauksessa on annettu liitteessä 1. Elektrometrin mitta-alueeksi valittiin kalibrintikertoimen ja vuotonäyttämän määrityksissä "High" ja virta-alueena mittauksissa oli 100 pA.

Kalibrintikertoimen $N_{D,w}$ kokonaisepävarmuudeksi on arvioitu **1,2%** käyttäen kattavuuskerrointa $k=2$, joka normaalijakaumalla vastaa noin 95 % luotettavuustasoa. Epävarmuus on arvioitu ohjeen GUM:2008 mukaisesti [1]. Kalibroinnin tulos ja epävarmuus vastaavat laitteen kuntoa kalibrintihetkellä ja niissä ei ole otettu huomioon mahdollisia pidemmällä aikavälillä tapahtuvia muutoksia.

Taulukossa 1 annettu kalibrintikerroin määritettiin elektrometrin asetuksella "High" ja virta-alueella 100 pA. Käytettäessä kammiota ja elektrometriä yhdessä annosmittarina virta-alueella 100 pA ja taulukossa 1 annettua kalibrintikerrointa, sisältyy elektrometrin herkkyys kalibrintikertoiimeen. Muilla virta-alueilla tarkan tuloksen saamiseksi on virta-alueesta johtuva elektrometrin herkkyysmuutos huomioitava.



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Kalibrointikertoimen pitkäaikaisstabiilisuus $N_{D,w,stab}$

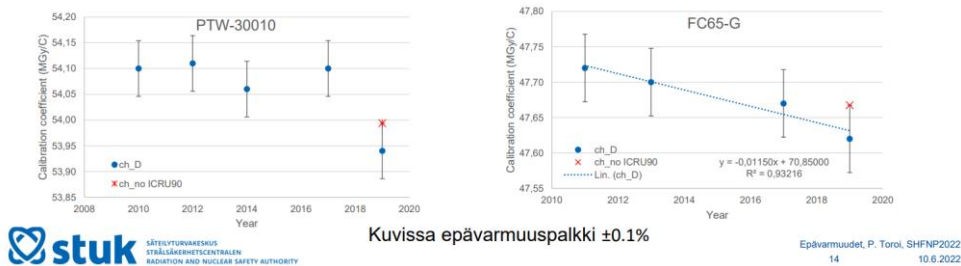
B-tyyppi

Speksit: PTW (Long-term stability) $\leq 0,5$ % per year

Oletetaan tasajakauma

Epävarmuus 0,29 %

Toinen vaihtoehto on seurata kertoimen muutoksia ja arvioida siitä:



75 Castro et al.: Study of the uncertainty in the determination... 75

TABLE 1. Estimated relative standard uncertainty of the electrometer reading and of its components, for two chambers types: a cylindrical PTW 30013 (PTW, Freiburg, Germany) and a plane-parallel Markus chamber (PTW)

Component	Photons, M30013		Electrons, Markus	
	Uncertainty type A (%)	Uncertainty type B (%)	Uncertainty type A (%)	Uncertainty type B (%)
Reproducibility	0.03		0.03	
Resolution		0.01		0.01
Linearity		0.03		0.03
Zero		0.01		0.01
Long-term stability		0.29		0.48
Leakage		0.01		0.01
Combined uncertainty ($k=1$)	0.29		0.48	

Nominal response	20 nC/Gy
Long-term stability	≤ 0.5 % per year
Chamber voltage	400 V nominal ± 500 V maximal

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Kalibrointikertoimen korjaustekijä (säteilynlaatukorjauskerroin) k_Q

B-tyyppi

TRS-398: 1,0 %

TRS-398 rev1: 0,62 %

Epävarmuus 0,62 %

TABLE 39. ESTIMATED RELATIVE STANDARD UNCERTAINTY OF THE CALCULATED VALUES FOR k_Q FOR HIGH ENERGY PHOTON BEAMS

Component	u_c (%)
$s_{w, air}$ relative to ^{60}Co	0.5
Assignment of $s_{w, air}$ to beam quality	0.2
W_{air}/e relative to ^{60}Co	0.3
p_{cav} in ^{60}Co and in high energy photons	<0.1
p_{dis} relative to ^{60}Co	0.4
p_{wall} relative to ^{60}Co	0.5
p_{cel} relative to ^{60}Co	0.1
Combined standard uncertainty in k_Q	1.0

TABLE 46. ESTIMATED RELATIVE STANDARD UNCERTAINTY OF k_Q VALUES FOR HIGH ENERGY PHOTON BEAMS (from Ref. 100)

Component	u_c (%)
Prediction uncertainty from fit using Eq. (97)	0.51
Net experimental uncertainty	0.28
Assignment of k_Q to TPR _{20,10}	0.20
Combined standard uncertainty in k_Q	0.62

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Lämpötilan mittaus ja korjaus k_T

B-tyyppi

Analoginen lämpömittari

Valmistajan ilmoittama epävarmuus 0,2 °C

Arvon lukemisen epävarmuusarvio 0,1 °C

Oletetaan molempiin kolmiojakauma ja yhdistetään neliöllisesti

Epävarmuus 0,031 %

 **Amarell GmbH & Co. KG**
97892 KREUZWERTHEIM

Werkprüfschein / Works-Certificate

Gegenstand: Laborthermometer, ähnlich DIN, Einschussform
Object: Precision Thermometer, similar DIN, Enclosed Scale

Fabrik-Nr.: 52113
Serial number:

Messbereich: - 5 + 50°C
Range:

Skalenwert: 0,2°C
Fractional division

Die Prüfung ergab folgende Werte in °C
The result of the test is as follows (in °C)

Thermometeranzeige °C Thermometer reading	Korrektur für die Thermometeranzeige °C Correction for thermometer reading	Messunsicherheit °C Uncertainty + -
0	-0,2	0,2
25	0,0	0,2
50	-0,1	0,2

Die Werte gelten für ganzen Eintauch bis Ende 2030
These values apply to total immersion until the end of

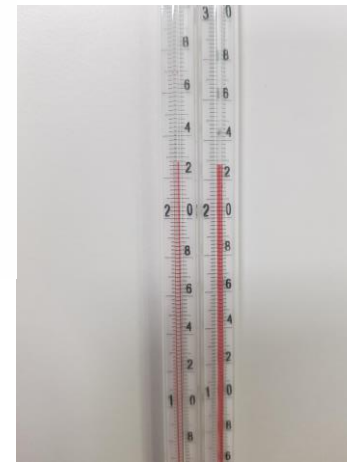
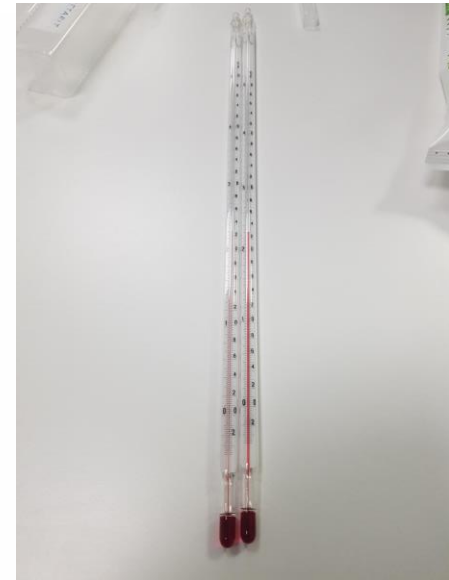
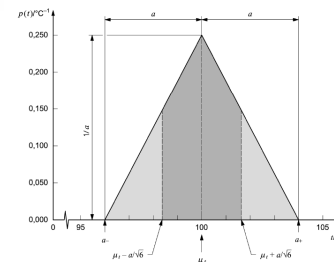
Mittlere Temperatur des herausragenden Fadens
Average temperature of emergent column

Geeichtes/Kalibriertes NORMALTHERMOMETER* Nr. 242
Verified/Calibrated STANDARD-THERMOMETER** No.

* Durch diese/s Normalthermometer sind die Angaben in obiger Tabelle rückführbar auf die Temperatur-Normale der PTB und damit auf die ITS '90.
** By this/these Standard-Thermometer/s the results indicated in above table are traceable to the temperature-standards of the PTB and therefore also to the ITS '90.

14.10.2020
Datum / Date


Prüfmeister / Gauger



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Ilmanpaineen mittaus ja korjaus k_p

B-tyyppi

Digitaalinen ilmanpainemittari

Valmistajan ilmoittama epävarmuus/toleranssi

” $\pm 1,5$ mbar $\pm$ Digit”, oletettu tämä
maksimiepävarmuudeksi.

Oletetaan tasajakauma

Epävarmuus 0,091 %



KALIBRIERZERTIFIKAT CALIBRATION CERTIFICATE CERTIFICAT DE CALIBRATION		VWR 	
Gerät / Device / Modèle		TH 200	
Seriennummer Serial Number N° Série		34905975	
Messgröße Meas. Unit Unité de mesure		Temperatur / rel. Feuchte / Luftdruck temperature / rel. humidity / air pressure température / humidité de l'air / pression de l'air	
Sollwert reference référence		Istwert actual value actuel	Toleranz tolerance tolérance
23,0 °C 51,0 % 981,4 mbar		22,9 °C 50,5 % 981,0 mbar	± 0,2 °C ± 1 Digit ± 2,5 % ± 1 Digit ± 1,5 mbar ± 1 Digit
Gerät optisch Visual inspection inspection visuelle		OK	✓
Datum/Date		16-11-2021	
Prüfer / Inspector / Verificateur			
VWR International Europe BVBA Researchpark Haasrode 2020 Geldenaaksebaan 464 B-3001 Leuven			

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Rekombinaatiokorjaus k_s

B-tyyppi

Julkaisusta: Castro et al.

Fotoneille:

Epävarmuus 0,16 %

80 Castro et al.: Study of the uncertainty in the determination... 80

TABLE 5. Estimated relative standard uncertainty of the recombination correction factor,^a for two chambers types: a cylindrical PTW 30013 (PTW, Freiburg, Germany) and a plane-parallel Markus chamber (PTW)

Component		Uncertainty (%)	
		Photons, M30013	Electrons, Markus
User	Two-voltage method	0.03	0.11
	Polynomial fit	0.06	0.06
	α, β^b	0.03	0.03
	Free electrons	0.10	0.05
Standards laboratory	Zankowski model	0.09	0.16
	α, β^b	0.03	0.03
Combined uncertainty ($k=1$)		0.16	0.21

^a All values arise from type B uncertainty analysis.

^b $\alpha = V_1 / V_2$, and $\beta = M_1 / M_2$.

Kun $k_s < 1,03$ voidaan rekombinaatiokorjaus-
kerroin laskea likiarvokaavaa käyttäen:

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

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

SSD, kenttäkoko, mittaussyvyys
 $SDD \cdot SSD \cdot FS$

B-tyyppi

Julkaisusta: Castro et al.

Oletus: SSD 1 mm epävarmuus
Kenttäkoko 2 mm epävarmuus
Syvyys 0,07 mm epävarmuus

Fotoneille 6X:
Epävarmuus 0,47 %

TAI itse arvioiden, ks. jatko

83 Castro et al.: Study of the uncertainty in the determination... 83

TABLE 7. Relative dose variation according to the possible error in the experimental setup of source-to-surface distance (SSD), field size (L), and measurement depth (z)^a

Nominal energy	Saturn 43							
	X6 MV	X25 MV	e6 MeV	e9 MeV	e12 MeV	e15 MeV	e18 MeV	e21 MeV
$(\Delta D_{w,u} / D_{w,u}) / \Delta d_{SSD} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	0.019	0.019	0.022	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021
$(\Delta D_{w,u} / D_{w,u}) / \Delta d_L \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	0.025	0.025	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
$(\Delta D_{w,u} / D_{w,u}) / \Delta d_z \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	0.049	0.074	0.101	0.061	0.034	0.027	0.034	0.042
Combined uncertainty (%)	0.47	0.62	0.72	0.55	0.47	0.45	0.47	0.49

^a The combined uncertainty is obtained using equation 9 (see text). The results obtained for the Saturn 40 are very similar.

- **Depth.** The possible error comes from the visual error when positioning the chamber and from the error of the movement array of the beam analyzer. Another source of uncertainty is the non-applied correction attributable to water density. For a typical measurement temperature of 20 °C, the water density amounts to approximately 0.9982 g/cm³. When the chamber is “placed” at the reference depth, the real position is some tenths of millimeters deeper (approximately 0.2 mm for photons and less than 0.1 mm for electrons at a temperature of 20 °C). In addition, an extra component has been considered in the case of electron beams, because the reference depth is specified in terms of R_{50} in TRS-398. Considering all these components, the estimated uncertainty is $u(d_z) = 0.07$ cm for photons and 0.06 cm for electrons.

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Lähteen ja fantomin pinnan etäisyys *SSD*

B-tyyppi

Vaikutus annokseen arvioituna kokeellisesti

0,15 % / 1 mm

Tarkkuusarvio 0,5 mm

Kolmiojakauma

$$\frac{0,5 \text{ mm} \cdot 0,15 \% / \text{mm}}{\sqrt{6}}$$

Epävarmuus 0,03 %



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Kenttäkoko *FS*

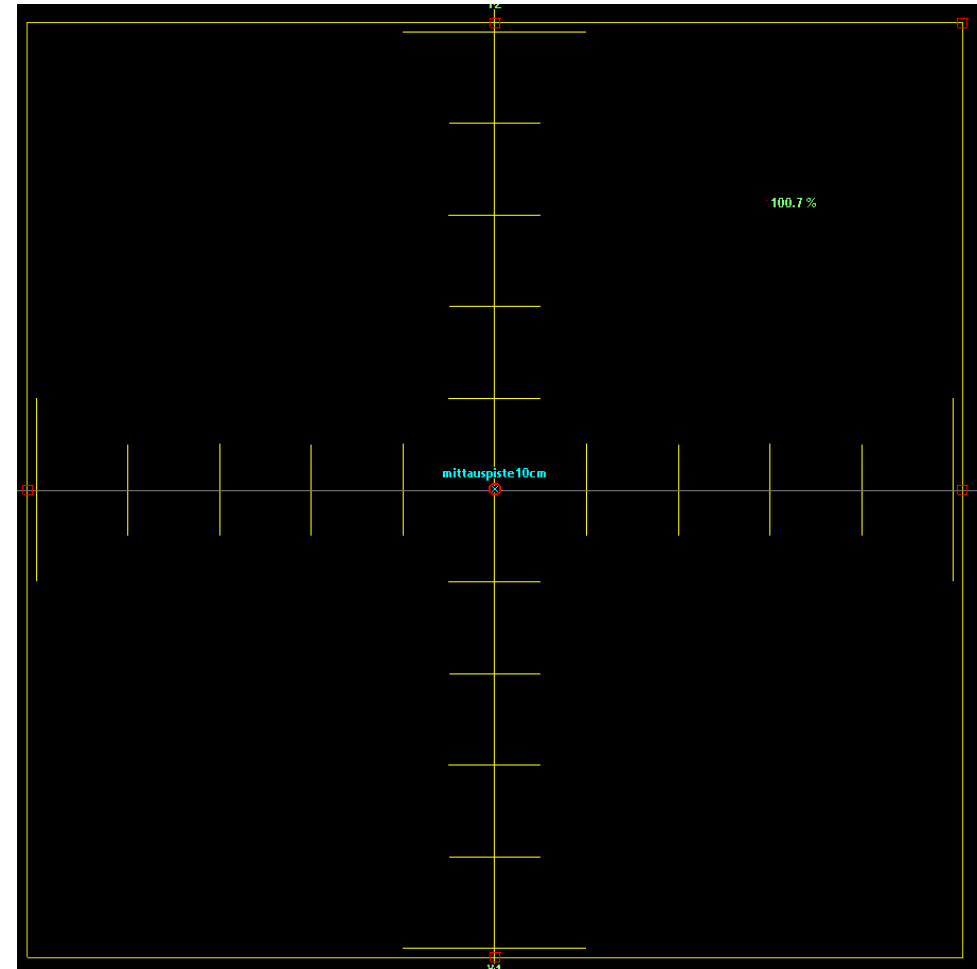
B-tyyppi

Vaikutus annokseen arvioituna kokeellisesti
n. 0,17 % / 1 mm

Tarkkuusarvio 2 mm

Kolmiojakauma

Epävarmuus 0,12 %



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Mittausvyvyys *SDD*

B-tyyppi

Tarkkuusarvio 0,5 mm

Vaikutus annokseen 0,6 %/mm

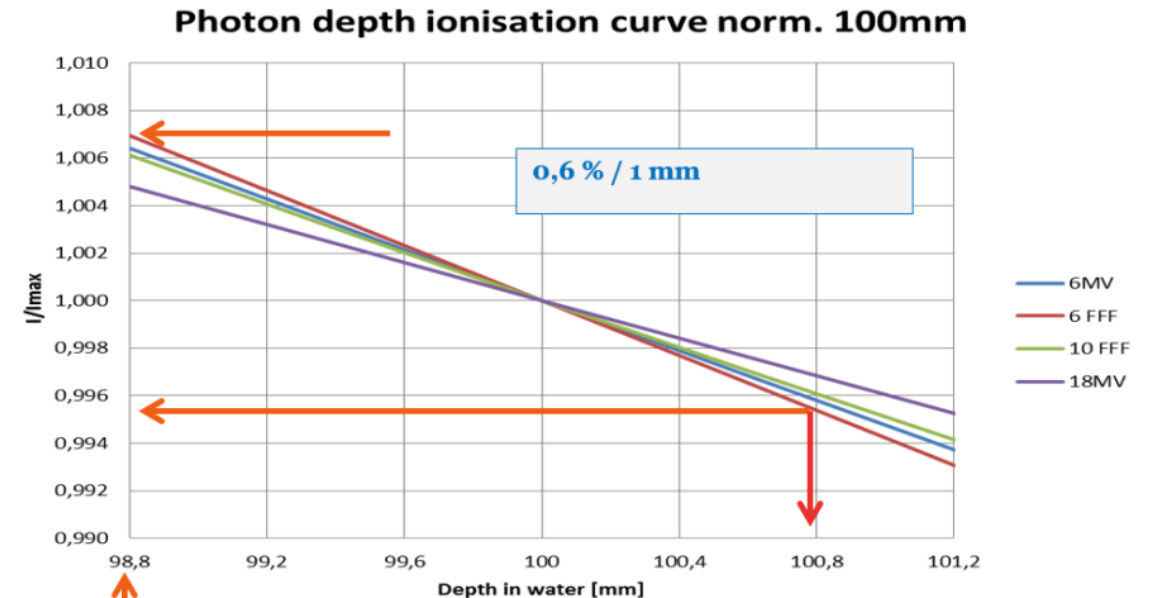
Oletetaan kolmiojakauma

Epävarmuus 0,12 %

Yhteensä "*SDD · SSD · FS*" epävarmuus 6X

Castro: 0,47 %

Oma arvio: 0,17 %



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Syväannoskäyrän prosentti DD

Mittausvyödyden annos -> Annosmaksimi

A-tyyppi vai B-tyyppi ?

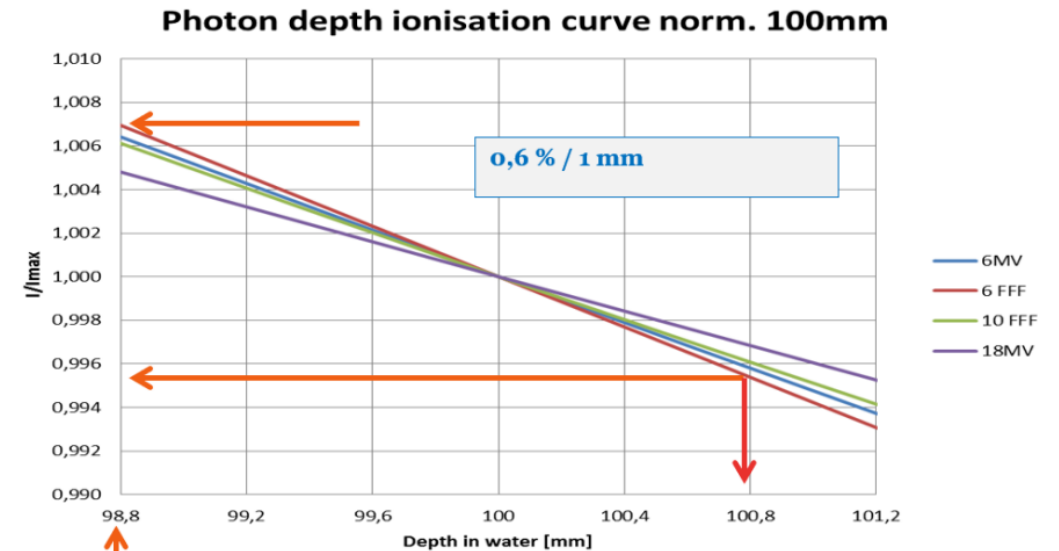
Uudelleen SDD-epävarmuus **0,12 %** (B-tyyppi) ?

Vai toistomittausten kautta A-tyyppi? Keskihajonta vai keskiarvon keskivirhe?

Keskihajonta: 0,20 %

Keskiarvon keskivirhe: 0,06 % (n=11)

Epävarmuus 0,06 %



Kuvasta kiitokset Ilkka Jokelaiselle

TB1							
mittauspäivämäärä:		29.9.2020	26.10.2020	24.11.2020	19.11.2021	23.5.2022	10.1.2023 keskisarv
R100 [mm]		14	15	15	14	14	14,3
j_100 [%]		66,24	66,65	66,45	66,22	66,3	66,41
j_200 [%]		38,08	38,36	38,16	37,86	37,93	38
j100 / j200		1,739	1,737	1,741	1,749	1,748	1,74
TB2							
mittauspäivämäärä:		1.12.2020	20.12.2021	21.3.2023			keskisarv
R100 [mm]		15	15	14			14,6
j_100 [%]		66,3	65,9	66,4			66,2
j_200 [%]		38,15	37,45	37,99			37,8
j100 / j200		1,738	1,760	1,748			1,7
TB3							
mittauspäivämäärä:		19.10.2023	2.11.2023				keskisarv
R100 [mm]		15	15				15,0
j_100 [%]		66,46	66,55				66,5
j_200 [%]		38,26	38,28				38,2
j100 / j200		1,737	1,739				1,7
Koneiden keskisarvo R100 [mm]							14,
Koneiden keskisarvo j100 [%]							66,3
Koneiden keskisarvo j200 [%]							38,0
Koneiden keskisarvo j100 / j200							1,74
Keskiahjonta j100							0,1986
Keskisarvon keskivirhe j100							0,0599
Keskiahjonta j100/j200							0,00707

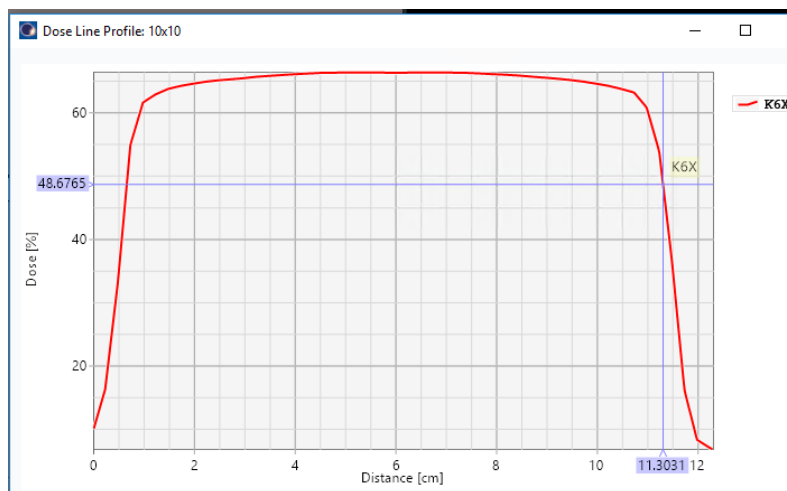


Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Muut epävarmuuslähteet

- Kentän tasaisuuden epävarmuus
- Varsivaikutus
- Ilman kosteuden vaikutus
- Lineaarisuus
- Riippuvuus annosnopeudesta
- Säteilyenergian vakioisuus
- Kammion asettelu epävarmuus (kierto, kallistukset, x-y-suunnan epävarmuus)
- ...

Yhdistetty epävarmuus 0,2 % (?)



A.5 Humidity (k_h)_Q

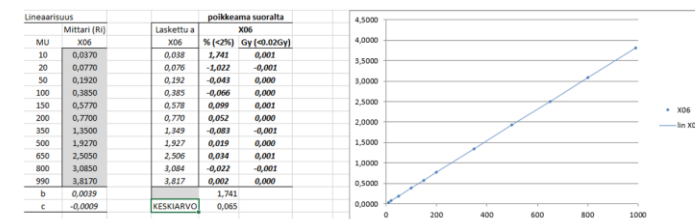
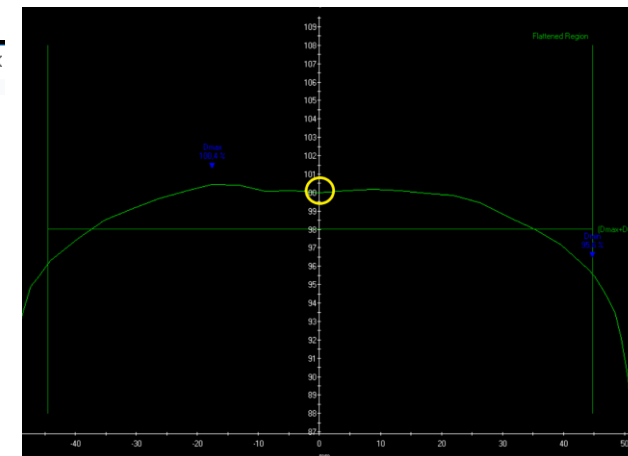
A.5.1 Values

No corrections for this factor are needed if relative humidity ranges between 20% and 80% (a condition satisfied in our measurements) and whenever the calibration factor refers to a relative humidity of 50%. For our chambers, the SSDL established measurement conditions between 40% and 60% relative humidity, and so a value of 1.000 can be assigned to this factor.

A.5.2 Uncertainties

As Das and Zhu⁽¹⁴⁾ state, if no correction is made for this effect, a maximum error of 0.3% can be reached in the range of 0% – 100% relative humidity. That value is considered more than enough to handle this non-applied correction. A rectangular distribution can be assumed, being 0.3% the variation limit. Thus, the uncertainty associated with this component is calculated to be 0.17% [$u(\%) = 0.3\% / 3^{1/2}$].

- **Electrometer linearity.** Linearity was evaluated using a ⁹⁰Sr check source, measuring charge at various times (dose is directly proportional to time and so to the charge reading). Maximum deviation of the linearity was found to be 0.06%. In consequence, considering a rectangular distribution, the uncertainty associated with this component is 0.03%.



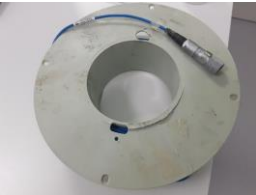
An Overall Stem Effect, including Stem Leakage and Stem Scatter, for a TM30013 Farmer-type Chamber

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Absorboituneen annoksen mittauksen suhteellinen epävarmuus yhteensä tälle mittausetjulle energialla 6X

Lasketaan kaikki standardiepävarmuudet yhteen neliöllisesti, kerrotaan kattavuuskertoimella $k=2$ ja pyöristetään ylöspäin.

Laajennettu epävarmuus 2,0 % ($k=2$)



Parametri	Tunnus	Yksikkö	Tunnettu/mitattu arvo	Virhe	Herkkyyserroin	Virhe [%]	A-tyyppin virhe [%]	B-tyyppin virhe [%]	B-tyyppin jakauma	Huomioita
Ionsaatiovarauksen mittausta, A-tyyppin epävarmuus	Ma	Gy	1,8191	0,00137477	1	0,07537433			0,07537433	Määritetään toistomittauksilla, virhe keskijonosta, tähän sisältyy myös säteilylähteen annoksen vaihtelu
Ionsaatiovarauksen mittausta, B-tyyppin epävarmuus	Ma	Gy			1	0,7			0,404145188	Tasajakauma
Ionsaatiovarauksen mittalaitteen resoluutio	Mr	Gy	1,4557	0,003	1	0,20608842			0,118984049	Tasajakauma
Ionsaatiovarauksen mittalaitteen vuotovirta	MD	Gy/min	1,4557	0,00016687	1	0,01144925			0,009610225	Tasajakauma
Ionsaatiovarauksen kalibrointikerroin	ND,w	Gy/Gy	0,8976		1	1,2			0,6	Kalibrointidistusta <0,0005 Gy/min, oletettu 20 s mittaus (200 MU/500 MU/min)
Ionsaatiovarauksen kalibrointikerroin	ND,w,stab	%			1	0,5			0,6	Kalibrointidistuksen arvo kalibrointikertoimen kokonaisepävarmuudeksi ($k=2$) 1,2 %, $k=1$ kokonaisepävarmuus 0,6 %
Kalibrointikertoimen korjauskerroin (säteilylaatu- ja korjauskerroin)	KQ			0,62 %	1	0,62 %			0,288675135	Tasajakauma
Kalibrointikertoimen korjauskerroin	KQ			0,62 %	1	0,62 %			0,62	TRS-398 rev1
Lämpötilan mittausta, analoginen	KT	K	293,15	0,2	1	0,06822446			0,027852519	Kolmiojakauma
Lämpötilan mittausta, analoginen, lukutarkkuus	KT1	K	293,15	0,1	1	0,03411223			0,012926259	Kolmiojakauma
Ilmanpaineen mittausta, digitaalinen	Kp	mbar (hPa)	1013,25	1,6	1	0,15790772			0,091168066	Tasajakauma
Rekombinaatiokerroin	ks		1,0029		1	0,16			0,16	Castro: 0,16 fotoneilla
Kammion aseointi, vaikutus annosmittaukseen	SDD	mm	100	0,5	0,6	0,3			0,122474487	Kolmiojakauma
Vesiläntönnön vedenpinnan aseointi, SSD	SSD	mm	1000	0,5	0,15	0,075			0,030618822	Kolmiojakauma
Kentän kaluus	FS	mm	100	2	0,15	0,3			0,122474487	Kolmiojakauma
Mittausvyöhykkeen syvänsuhteellisuuden virhe, syvyyden epävarmuudesta	DO	%	66,36				0,0599		0,2	Määritetty tilastollisesti eri aikojen ja eri koneiden (100-mittauksen perusteella, epävarmuusena keskiarvon keskiarvo, koska tässä t)
Muut	lmuat					0,2			0,2	"Muut" virhelähteet
Epävarmuus							0,096433863		1,054080825	
Yhdistetty epävarmuus									1,0584623818	
Laajennettu epävarmuus, $k=2$, pyöristys ylöspäin									2,2 % ($k=2$, 95 % luottamusväliä)	

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Tilavuuskorjaus FFF-kentille k_{vol}

B-tyyppi

6X-FFF

Kokeeksi: Virheen yleinen etenemislaki

Oletetaan epävarmuudet	$J_{10,20}$	0,17 %
	SDD	0,05 cm/ $\sqrt{6}$
	L	0,01 cm / $\sqrt{3}$

Epävarmuus 0,0058 %

Maksimi-minimi-menetelmällä: epävarmuus 0,02 %

Järkevä arvio? Riippumaton? Joka tapauksessa pieni/merkityksetön epävarmuus?

If no experimental data for the lateral dose profile are available (and no specific k_{vol} can be calculated), a generic value for the volume averaging correction factor in FFF beams at the reference point can be obtained from the numerical value equation (see equation (54) in Ref. [12]) as follows:

$$k_{vol} = 1 + \left(0.0062 \text{TPR}_{20,10} - 0.0036\right) \times \left(\frac{100}{SDD}\right)^2 \times L^2 \quad (22)$$

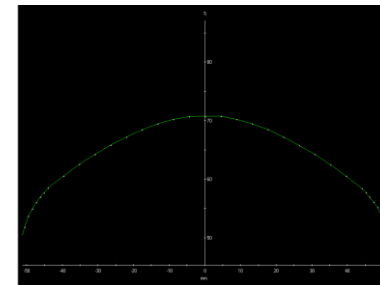
$$k_{vol} = 1 + \left(0.0062 \left(\frac{1,2661}{J_{10,20}} - 0,0595\right) - 0,0036\right) \cdot \left(\frac{100}{SDD}\right)^2 \cdot L^2$$

$$\frac{\partial k_{vol}}{\partial SDD} = -2 \left(0,0062 \left(\frac{1,2661}{J} - 0,0595\right) - 0,0036\right) \left(\frac{100}{SDD^3}\right) L^2$$

$$\frac{\partial k_{vol}}{\partial J} = -0,0062 \frac{1,2661}{J^2} \left(\frac{100}{SDD}\right)^2 L^2$$

$$\frac{\partial k_{vol}}{\partial L} = 2 \left(0,0062 \left(\frac{1,2661}{J} - 0,0595\right) - 0,0036\right) \left(\frac{100}{SDD}\right)^2 L$$

$$u(k_{vol}) = \sqrt{\left(\frac{\partial k_{vol}}{\partial J} u(J)\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{vol}}{\partial L} u(L)\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{vol}}{\partial SDD} u(SDD)\right)^2}$$



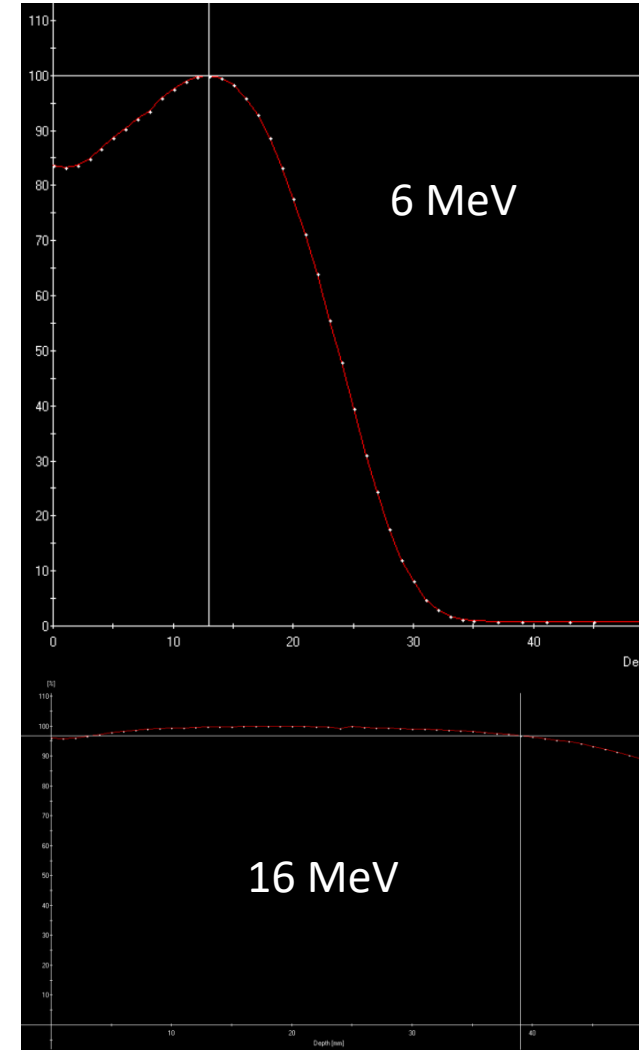
Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

Elektronit, 1. mittausketju

Epävarmuudet kuten fotoneilla, pienin eroin

- kQ: 0,73 % (TRS-398 rev1)
- ks: 0,21 % (Castro et al.)
- Syväionisaatiokäyrän muoto vs energia kokeellisesti noin 0,4 % / mm ($z_{ref} \leq 1$ mm epävarmuuksilla)
- SSD:n epävarmuuden vaikutus kokeellisesti noin 0,45 % / mm
- Kenttäkoolla ei käytännössä epävarmuutta(?)

Laajennettu epävarmuus 2,2 % (k=2)



Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

2. Mittausketjun epävarmuusarvio, fotonit

Laitteisto

Hoitokone:

TrueBeam

Ionisaatiokammio

PTW Semiflex TW31010

Elektrometri:

PWT Tandem

Kaapeli:

PTW TNC/TNC

Erot:

- A-tyyppin epävarmuus
- Pitkäaikaisstabiilisuus <1 %

Laajennettu epävarmuus 2,2 % (k=2)



Long-term stability	≤ 1 % per year
---------------------	----------------

Esimerkki epävarmuusarvion laadinnasta HYVAKS

2. Mittausketjun epävarmuusarvio, elektronit

Laitteisto

Hoitokone: TrueBeam

Ionisaatiokammio PTW Roos TW34001

Elektrometri: PTW Tandem

Kaapeli: PTW TNC/TNC

Erot:

- Elektrometriä ja kammiota ei kalibroitu yhdessä
 - Otetaan huomioon k_{elec} ja k_{pol} ja niiden epävarmuudet
- Kalibroitikertoimen epävarmuus 1,5 % ($k=2$)

Laajennettu epävarmuus 2,4 % ($k=2$)



CALIBRATION CERTIFICATE
No. 220389101



PTW-Freiburg, Lörracher Str. 7, 79115 Freiburg, Germany ☎ +49 (0)761-49055-0 FAX +49 (0)761-49055-70 E-Mail info@ptw-dosimetry.com

Calibration Object

Radiation Detector

Detector [REF] TW34001 [SN] 003574
Detector Type Ionization Chamber

Manufacturer PTW-Freiburg

Customer Yanmedi Oy

Order No. AU2203795 Wecksellentie 4
Order Date 2022-08-24 FIN-00150 Helsinki

Calibration Results

Measuring Quantity Absorbed Dose to Water (D_{w})
Detector Calibration Factor $N_{D,w} = 8.418 \cdot 10^7 \text{ Gy} / \text{C}$

Beam Quality Correction	Beam Quality	Correction Factor k_Q	Uncertainty
	^{60}Co	1.000	1.5 %

Reference Conditions

Beam Quality:	^{60}Co
Temperature:	293.2 K (20°C)
Air Pressure:	1013.25 hPa
Relative Humidity:	50%
Chamber Voltage / Polarity:	+ 200 V
Potential at inside of entrance window:	0 V
Potential at the Central Electrode:	- 200 V
Ion Collection Efficiency:	100 %

Calibration Date 2022-08-31

Freiburg, 2022-08-31

PTW-Freiburg
Physikalisch-Technische
Werkstätten Dr.-Pichler GmbH

(Signature)

Page 1 / 2

Lähteitä

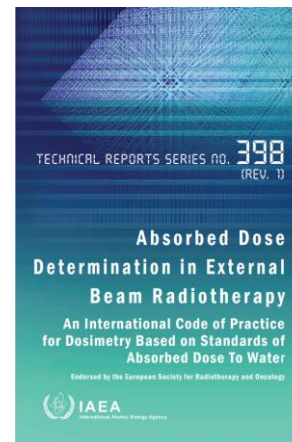
- Study of the uncertainty in the determination of the absorbed dose to water during external beam radiotherapy calibration, Pablo Castro et al. 2008
- JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement
- Measurement Uncertainty, IAEA
- Sätehoitofysikoiden neuvottelupäivät 2022, esitys, Paula Toroi, STUK
- FYSP110 Fysiikan kokeelliset menetelmät, luentomoniste, 2017
- TRS 398 rev1

JOURNAL OF APPLIED CLINICAL MEDICAL PHYSICS, VOLUME 9, NUMBER 1, WINTER 2008

Study of the uncertainty in the determination of the absorbed dose to water during external beam radiotherapy calibration

Pablo Castro,^a Feliciano García-Vicente, Cristina Mínguez, Alejandro Floriano, David Sevillano, Leopoldo Pérez, and Juan J. Torres
Servicio de Oncología Radioterápica, Departamento de Radiofísica, Hospital Universitario "La Princesa," Madrid, Spain
poltox@yahoo.es

Received 23 March 2007; accepted 21 August 2007



First edition September 2008

© JCGM 2008

