



IAEA:n teknisten raporttien TRS398 Rev 1 ja TRS492 heijastuksia klinikoiden annos- ja aktiivisuusmäärittelyyn

SH-fyysikoiden 40. neuvottelupäivät
5.-6.6.2025, Home Hotel Jugent, Helsinki

Ilkka Jokelainen
Ilkka.jokelainen@stuk.fi

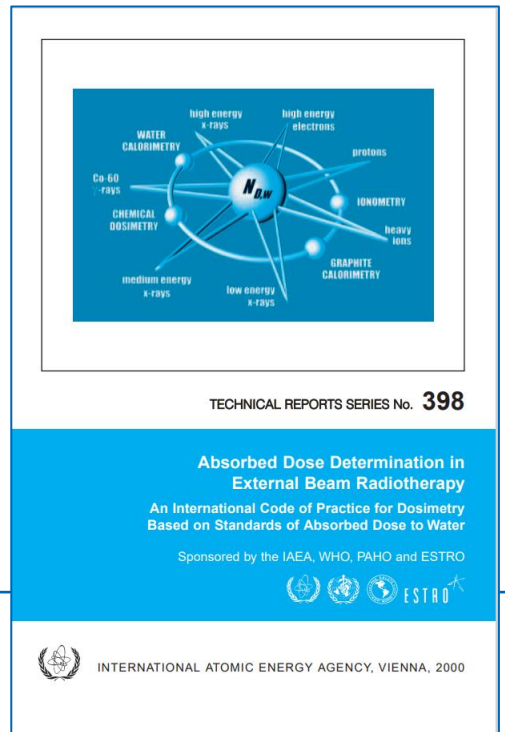
Kansallinen sädehoidon ulkoisen säteilyn annosmittausprotokolla

Pohjautuu kansainväliseen ohjeistukseen, IAEA TRS398.

- Lineaarikiihdyttimien fotoni- ja elektroneikat
- Suurena veteen absorboitunut annos D_w
- Mittaukset ^{60}Co -keilassa kalibroiduilla ionisaatiokammioilla vedessä

$$N_{Dw,Co60} * k_{Q,Q_0} = N_{Dw,Q} \quad ({}^{60}\text{Co} \rightarrow \text{MV})$$

- Kiihdyttimen annosmonitorin kalibrointi referenssigeometriassa
- Menetelmät
- Laitteisto



SÄDEHOIDON ANNOSMITTAUKSET

STUK-STO-TR 1 / HELMIKUU 2005

Ulkoisen sädehoidon suurenergisten fotoni- ja elektronisäteilykeilojen kalibrointi

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

Uudet laitteet – uudet ohjeet

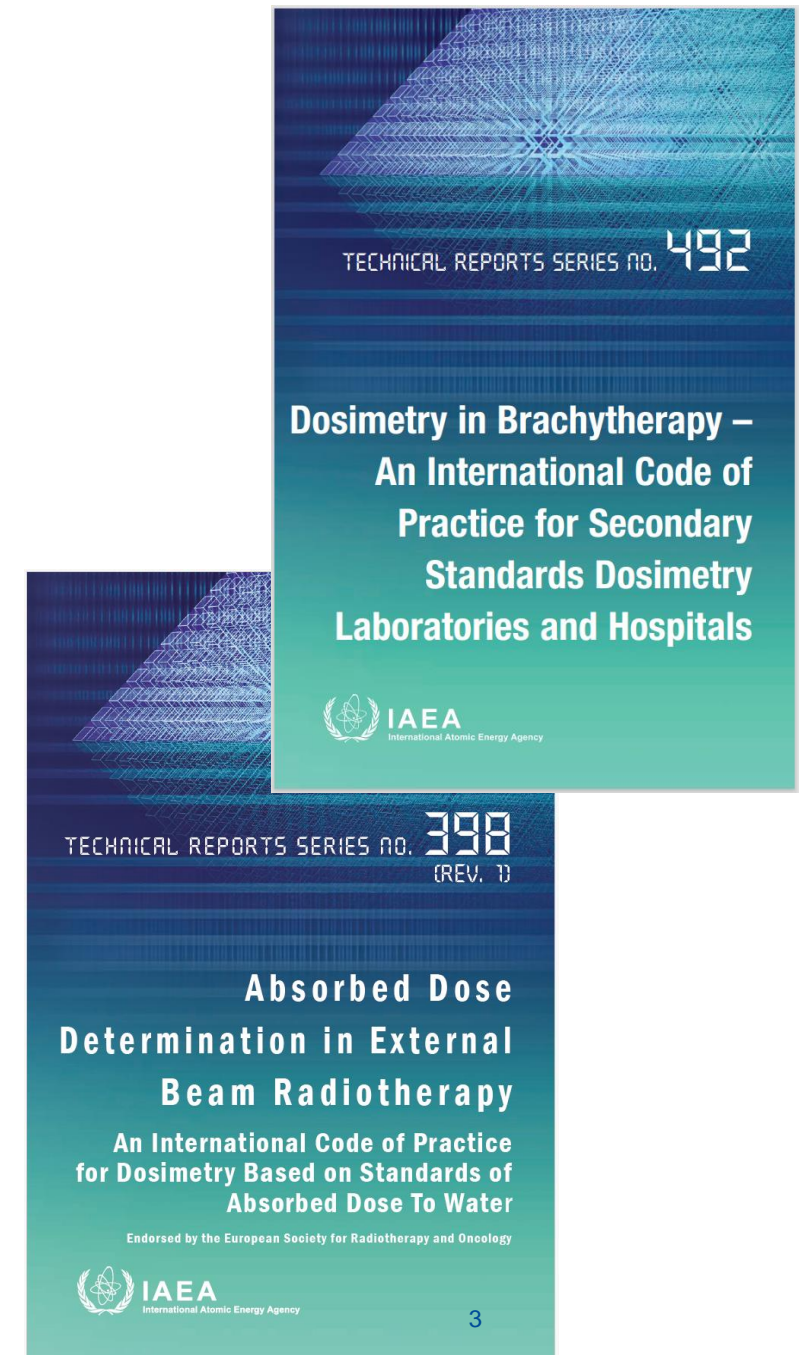
Kansainvälisen ohjeistuksen uudistuksen myötä myös kansallinen annosmittausprotokolla päivittyy ja täydentyy

❑ TRS492 (December 2023) - Sisäisen sädehoidon dosimetria

- HDR ^{192}Ir –lähteet + kaivokammio ($K_R \rightarrow A$)
- [Dosimetry in Brachytherapy – An International Code of Practice for Secondary Standards Dosimetry Laboratories and Hospitals | IAEA](#)
- Sairaaloiden nykyinen käytäntö protokollan mukainen!

❑ TRS398 (Rev 1, February 2024) - Ulkoiset MV fotoni- ja elektronikeilat

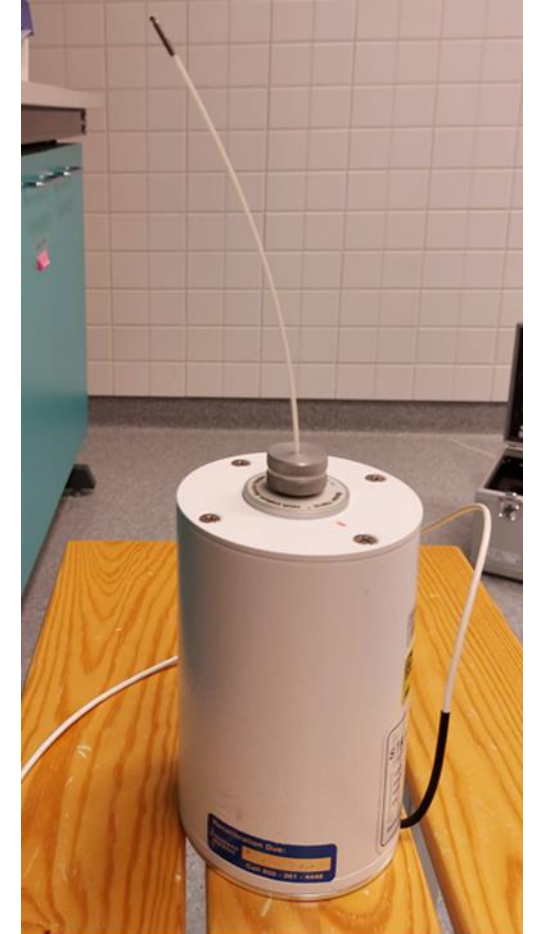
- [Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy | IAEA](#)



Jälkilatauslaitteet ja ^{192}Ir -lähteet

Eri kammiotyyppejä Suomessa:

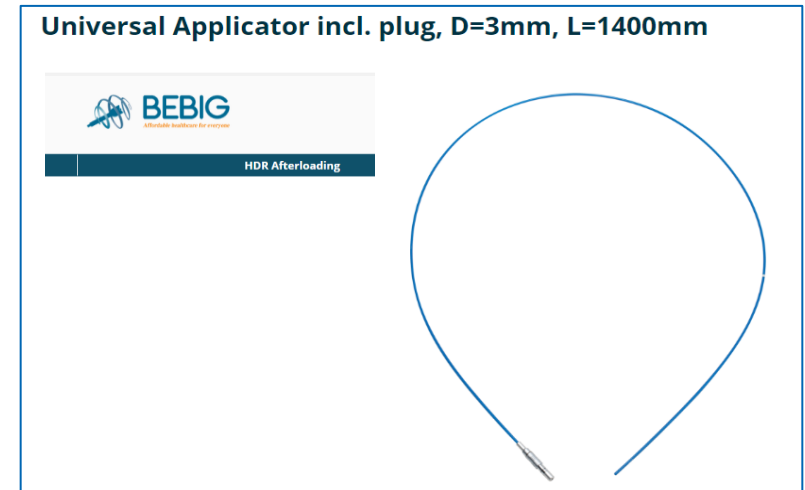
- PTW33005**
 - Useita adaptoreita eri katetreille
- Standard Imaging (SI) HDR 1000 Plus**
 - Useita adaptoreita eri katetreille



Eri katetri-tyyppejä

Katetrit, joille PTW-Freiburg:n laboratorio antaa vaimennuskertoimet eri tyypisillä ^{192}Ir -lähteillä:

- LAA 1400-GYN Ø 3 mm (≈ BEBEG Universal Appl.)
- Varian GM11002070 ø 3 mm (löytyy, Varian yhteensopiva)
- 4.7Fr VariSource Plastic Tipped Catheter (??)
- Steel needle ø 1.7 mm (??)



Eri katetri-tyyppejä

Lisäksi klinikoilta löytyy BEBIG:n ”Universal applicator” – muovikatetria vastaavia katetreja:

- ”Nucletron muovikatetri” ø 1,5 mm (Elekta yhteensopiva)
- Nucletron Round Needle -muovikatetri ø 2,0 mm (Elekta yhteensopiva)
- Varian GM11010750 ø 2,0 mm (Varian yhteensopiva)

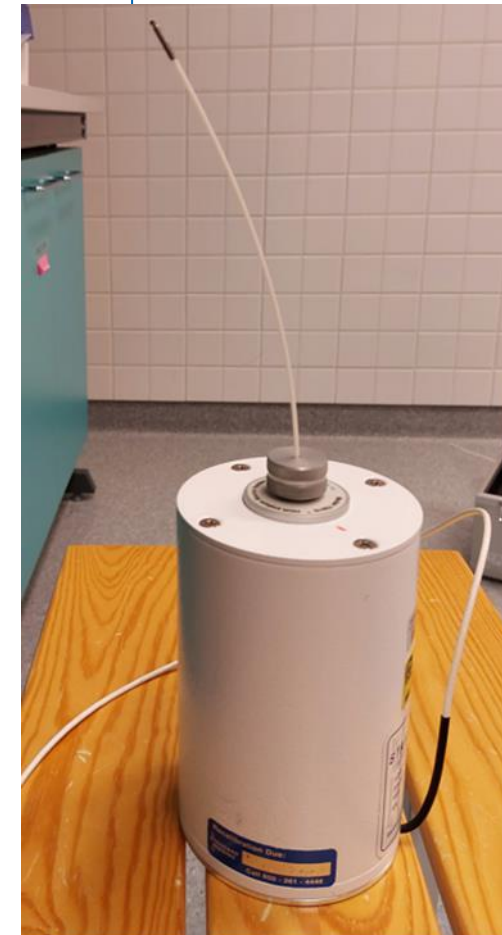
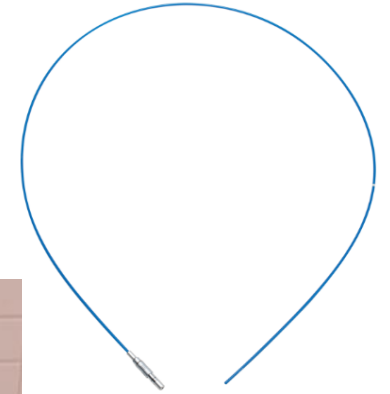
Standard Imaging -kaivokammiot on laitetoimittajan toimesta kalibroitu Wisconsinin yliopiston labrassa:

- Muovinen ø 2,0 mm bronchus-aplikaattori
- BEBIGin ^{192}Ir –lähde & kammion oma adapteri
- Muiden katetrien vaimennuskertoimet tälle kammiolle & adapterille ???

Universal Applicator incl. plug, D=3mm, L=1400mm



HDR Afterloading



Kaivokammioiden kalibroinnit

Kalibrointeja

- eri lähde-tyypeille
- eri adapteri-tyypeille
- eri aplikaattori-tyypeille

Reference Air Kerma Rate	$N_{\text{RAKR}} = 9.192 \cdot 10^5 \text{ Gy m}^2 \text{ h}^{-1} \text{ A}^{-1}$
Apparent Activity	$N_{\text{AA}} = 8.356 \cdot 10^{18} \text{ Bq A}^{-1}$ or $N_{\text{AA}} = 2.258 \cdot 10^8 \text{ Ci A}^{-1}$

Source Type Correction Table

Isotope	Source Type	Correction Factor (k_{Source})
^{192}Ir	Eckert&Ziegler BEBIG Ir2.A85-2	1.0000
^{192}Ir	MDS Nordion GammaMed / Varian GammaMedPlus	0.9961
^{192}Ir	Varian Varisource	0.9829
^{60}Co	Nucletron Flexisource Co60	1.0330
^{60}Co	Eckert&Ziegler BEBIG Co0.A86 / Eckert&Ziegler BEBIG GK60M21	1.0340

Source type correction according: $N_{\text{Source}} = N_{\text{RAKR}} \times k_{\text{Source}}$

Adapter/Applicator Correction

Adapter	Applicator	$k_{\text{Applicator}}(^{192}\text{Ir})$	$k_{\text{Applicator}}(^{60}\text{Co})$
T33002.1.009	-	1.000	1.000
T33004.1.013	LAA 1400-GYN \varnothing 3 mm	1.019	1.024
T33004.1.012	4.7Fr VariSource Plastic Tipped Catheter	1.019	1.024
T33004.1.013	Varian GM11002070 \varnothing 3 mm	1.029	1.027
T33004.1.013	11-00207 3 mm \varnothing steel applicator	1.029	1.027
-	Steel needle \varnothing 1.7 mm	0.986	0.976

Adapter/Applicator correction according: $N_{\text{Appl}} = N_{\text{Source}} \times k_{\text{Applicator}}$

Kaivokammioiden kalibroinnit

Selvittäkää kaivokammion kalibroinnissa käytetyt

- Lähteen tyyppi
- Adapterin tyyppi
- Aplikaattorin tyyppi

Mitä klinikalla on käytössä?

- HDR-laitteen lähteen tyyppi
 - Löytyykö korjauskerroin kalibrointilähteeseen?
- HDR-laitteeseen yhteensopivat aplikaattorit
 - Löytyykö korjauskerroin (vaimennuskerroin) kaivokammion kalibroinnissa käytettyyn?
- Onhan kaivokammion adapteri samaa tyyppiä, kuin kalibroinnissa käytetty?

IAEA TRS492

Korjauskertoimet eri lähde- tyypeille

- Vain SI HDR Plus –kammiolle!!
- Vain yhdelle holderille
- Mille katetrille??
 - Ilmeisesti muoviselle \varnothing 2,0 mm bronchus-aplikaattorille

TABLE 8. SOURCE MODEL CORRECTION FACTORS, k_{sm,sm_0} , FOR DIFFERENT TYPES OF HDR AND PDR ^{192}Ir SOURCES FOR USE WITH A STANDARD IMAGING HDR 1000 PLUS WELL-TYPE CHAMBER WITH HDR IRIDIUM SOURCE HOLDER MODEL 70010, BASED ON MONTE CARLO CALCULATED CORRECTION FACTORS FROM [157] WITH AN EXPANDED UNCERTAINTY OF 0.4% ($k = 2$).

sm	sm_0	Elekta Flexisource HDR Ir-192	Elekta microSelectron mHDR-v1 (classic)	Elekta microSelectron mHDR-v2	BEBIG HDR Ir-192 GI192 M11	Varian GammaMed Plus HDR	Varian VariSource VS2000	Varian GammaMed Plus PDR ^a
Elekta Flexisource HDR Ir-192	1.000	1.000	0.996	0.996	0.997	0.999	1.013	1.043
Elekta microSelectron mHDR-v1 (classic)	1.004	1.004	1.000	1.001	1.001	1.004	1.018	1.047
Elekta microSelectron mHDR-v2	1.004	1.004	0.999	1.000	1.001	1.003	1.017	1.047
BEBIG HDR Ir-192 GI192M11	1.003	1.003	0.999	0.999	1.000	1.002	1.016	1.046
Varian GammaMed Plus HDR	1.001	1.001	0.996	0.997	0.998	1.000	1.014	1.043
Varian VariSource VS2000	0.987	0.987	0.983	0.983	0.984	0.986	1.000	1.029
Varian GammaMed Plus PDR ^a	0.959	0.959	0.955	0.955	0.956	0.958	0.972	1.000

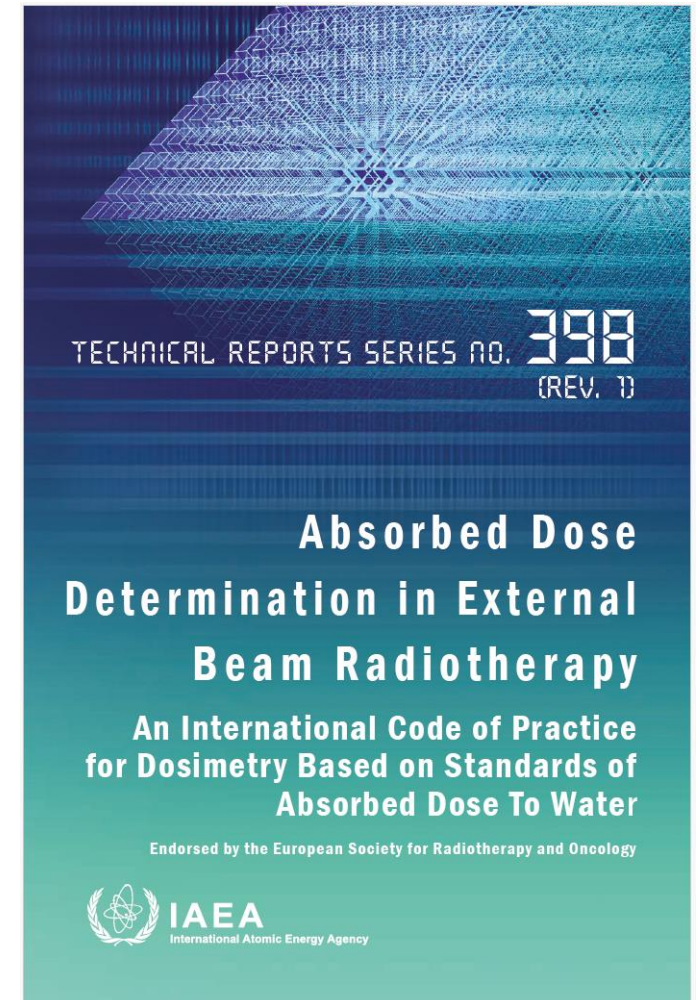
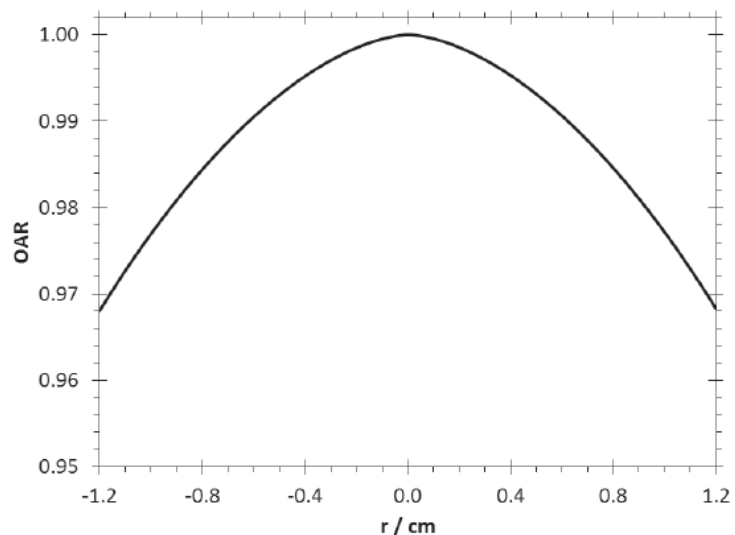
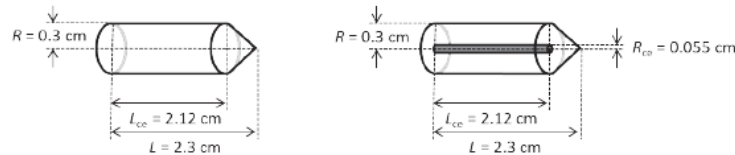
IAEA TRS398 (Rev 1)

Raporttiin päivitetty ja lisätty mm

- ❑ k_Q –data päivitetty eri kammiotyypeille
 - uutena kammiotyyppinä Sun Nuclear SNC600c (Farmer)
 - Sun Nuclear SNC350p (tasolevy) – EI DATAA
- ❑ Ion.kammioiden tilavuuskorjaus FFF fotonikeiloille k_{vol}

$$k_{Q,Q_0} = \frac{(s_{w,air})_Q (W_{air})_Q P_{ch,Q}}{(s_{w,air})_{Q_0} (W_{air})_{Q_0} P_{ch,Q_0}}$$

$$(k_{vol})_Q^{f_{ref}} = \frac{\iint_A w(x,y) dx dy}{\iint_A w(x,y) OAR(x,y) dx dy}$$



IAEA TRS398 (Rev 1)

Raporttiin päivitetty ja lisätty mm

- k_Q -data eri kammiotyypeille esitetty taulukoituna

TABLE 16. CALCULATED VALUES^a OF k_Q FOR HIGH ENERGY PHOTON BEAMS FOR VARIOUS CYLINDRICAL IONIZATION CHAMBERS AS A FUNCTION OF THE BEAM QUALITY INDEX $TPR_{20,10}$ (see Eq. (34)) (cont.)

Ionization chamber type	Beam quality index, $TPR_{20,10}$											
	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82
PTW 30013 Farmer	1.0007	0.9984	0.9956	0.9920	0.9876	0.9840	0.9800	0.9753	0.9699	0.9636	0.9565	0.9484
IBA FC65-G Farmer	1.0004	0.9990	0.9972	0.9946	0.9912	0.9882	0.9846	0.9802	0.9748	0.9683	0.9603	0.9507
NE 2571 Farmer	1.0004	0.9991	0.9974	0.9951	0.9919	0.9891	0.9856	0.9813	0.9761	0.9697	0.9618	0.9522
Sun Nuclear SNC600c Farmer	1.0004	0.9993	0.9978	0.9957	0.9926	0.9899	0.9866	0.9823	0.9770	0.9703	0.9620	0.9517

IAEA TRS398 (Rev 1)

Raporttiin päivitetty ja lisätty mm

- ❑ k_Q –data eri kammiotyypeille esitetty taulukoituna, sekä eksponenttiyhälön muodossa fotonikeiloille

$$k_Q(\text{TPR}_{20,10}) = \frac{1 + \exp\left(\frac{a - 0.57}{b}\right)}{1 + \exp\left(\frac{a - \text{TPR}_{20,10}}{b}\right)} \quad (97)$$

TABLE 45. CHAMBER TYPES AND NUMBER OF MONTE CARLO DERIVED AND EXPERIMENTAL k_Q DETERMINATIONS FOR HIGH ENERGY PHOTON BEAMS OF DIFFERENT QUALITIES (adapted from Ref. [100]) (cont.)

Ionization chamber type	Number of data points		Chamber type specific parameters ^a	
	Monte Carlo	Experimental	<i>a</i>	<i>b</i>
IBA FC65-G Farmer	64	20	1.09752	-0.09642
NE 2571 Farmer	126	28	1.08918	-0.09222
PTW 30013 Farmer	65	23	1.18273	-0.13256
Sun Nuclear SNC600c Farmer ^d	25	5	1.06800	-0.08485

IAEA TRS398 (Rev 1)

Raporttiin päivitetty ja lisätty mm

- ❑ k_Q –data eri kammiotyypeille esitetty taulukoituna, sekä eksponenttiyhtälön muodossa elektroneille

TABLE 20. CALCULATED k_Q VALUES^a FOR ELECTRON BEAMS, FOR VARIOUS CHAMBER TYPES CALIBRATED IN ⁶⁰Co GAMMA RADIATION, AS A FUNCTION OF BEAM QUALITY INDEX R_{50}

Ionization chamber type ^b	Beam quality index, R_{50} (g/cm ²)													
	1.0 ^c	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0
PTW 34001 Roos	0.9743	0.9645	0.9518	0.9428	0.9349	0.9281	0.9222	0.9171	0.9127	0.9088	0.9055	0.9001	0.8960	0.8907
IBA NACP-02	0.9679	0.9580	0.9451	0.9360	0.9281	0.9214	0.9155	0.9104	0.9061	0.9023	0.8990	0.8938	0.8899	0.8848

$$k_{Q,PP} = a + be^{-\frac{R_{50,D}}{c}} \quad (98)$$

TABLE 47. FITTING PARAMETERS FOR k_Q FOR ELECTRON BEAMS FOR VARIOUS CHAMBER TYPES CALIBRATED IN ⁶⁰Co GAMMA RADIATION

Ionization chamber type ^a	a	b	c
Plane parallel chambers			
PTW 34001 Roos	0.884	0.120	3.511
IBA NACP-02	0.879	0.120	3.398

IAEA TRS398 (Rev 1)

Raporttiin päivitetty ja lisätty mm

- ❑ k_Q –data eri kammiotyypeille esitetty taulukoituna, sekä eksponenttiyhtälön muodossa elektroneille

Entä Sun Nuclearin tasolevykammio??
- SNC350p 1045

TABLE 20. CALCULATED k_Q VALUES^a FOR ELECTRON BEAMS, FOR VARIOUS CHAMBER TYPES CALIBRATED IN ⁶⁰Co GAMMA RADIATION, AS A FUNCTION OF BEAM QUALITY INDEX R_{50}

Ionization chamber type ^b	Beam quality index, R_{50} (g/cm ²)													
	1.0 ^c	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0
PTW 34001 Roos	0.9743	0.9645	0.9518	0.9428	0.9349	0.9281	0.9222	0.9171	0.9127	0.9088	0.9055	0.9001	0.8960	0.8907
IBA NACP-02	0.9679	0.9580	0.9451	0.9360	0.9281	0.9214	0.9155	0.9104	0.9061	0.9023	0.8990	0.8938	0.8899	0.8848

$$k_{Q,PP} = a + be^{-\frac{R_{50,D}}{c}} \quad (98)$$

TABLE 47. FITTING PARAMETERS FOR k_Q FOR ELECTRON BEAMS FOR VARIOUS CHAMBER TYPES CALIBRATED IN ⁶⁰Co GAMMA RADIATION

Ionization chamber type ^a	a	b	c
Plane parallel chambers			
PTW 34001 Roos	0.884	0.120	3.511
IBA NACP-02	0.879	0.120	3.398

IAEA TRS398 (Rev 1)

Raporttiin päivitetty ja lisätty mm

- ❑ Ion.kammioiden tilavuuskorjaus FFF fotonikeiloille k_{vol}

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

TABLE 11. GENERIC VALUES FOR THE VOLUME AVERAGING CORRECTION FACTOR IN FLATTERING FILTER FREE BEAMS OF CLINICAL ACCELERATORS

Cavity length, L (cm)	Beam quality index, $\text{TPR}_{20,10}$					
	0.6	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75
0.5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.0	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001	1.001
1.5	1.000	1.001	1.001	1.001	1.002	1.002
2.0	1.000	1.001	1.002	1.002	1.003	1.004
2.5	1.001	1.002	1.003	1.004	1.005	1.006

It can be seen from Table 11 that the volume averaging effect is most pronounced for ionization chambers with a long cavity (e.g. Farmer type chambers with $L \approx 2.5$ cm) and in FFF beams of higher energy. Therefore, it is recommended to use ionization chambers with a short cavity for dose measurements in FFF beams for which the correction factor k_{vol} is close to 1.0 and can often be neglected.

IAEA TRS398 (Rev 1)

Raporttiin päivitetty ja lisätty mm

- ❑ Ion.kammioiden tilavuuskorjaus FFF fotonikeiloille k_{vol}
- ❑ Mallinnuksessa käytetty viiden eri kiihdytinmallin 6 MV:n ja 10 MV:n keiloista määritettyjä lateraaliprofiileita

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

- ❑ PTW30013 Farmer-kammiolle $L = 2,3 \text{ cm}$

TABLE 32. GENERIC VOLUME AVERAGING CORRECTION FACTORS ($k_{va}^{V_{ref}}$) (cont.)

Ion chamber	$TPR_{20,10}(10) =$	0.63	0.66	0.69	0.72	0.75	CyberKnife	(TomoTherapy HiArt) ^a
PTW 23333 (3 mm cap)		1.002	1.003	1.003	1.004	1.005	1.009	1.002
PTW 30001 Farmer		1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.010	1.002
PTW 30010 Farmer		1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.010	1.002
PTW 30002/30011 Farmer	6 MV FFF	1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.010	1.002
PTW 30004/30012 Farmer		1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.010	1.002
<u>PTW 30006/30013 Farmer</u>		1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.010	1.002
PTW 31003/31013 Semiflex		1.001	1.001	1.002	1.002	1.003	1.005	1.001
SNC 100700-0 Farmer	10 MV FFF	1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.011	1.003
SNC 100700-1 Farmer		1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.011	1.003
Victoreen Radocon III 555		1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.010	1.002
Victoreen 30-348		1.001	1.002	1.002	1.003	1.003	1.006	1.001
Victoreen 30-351		1.002	1.003	1.004	1.005	1.006	1.010	1.002

IAEA TRS398 (Rev 1) - $k_{Sw,air}$

Minne katosi IAEA TRS483 –raportissa esitelty FFF-keilojen k_Q –kertoimen laskennassa käytetty ”spektrinkorjaus” –kerroin ??

□ $k_{Sw,air}$ - vesi-ilma jarrutuskyky-suhteiden korjauskerroin WFF- ja FFF-keilojen välillä

$$D_{w,Q} = M_Q * N_{D,w,Q_0} * k_Q * k_{T,p} * k_{rec} * k_{elec} * k_{vol} * \cancel{k_{Sw,air}}$$

- Vuonna 2024 julkistetussa TRS398 Rev 1:ssä FFF-keiloille ei anneta omia ”spesifisiä” k_Q -kertoimia, vaan ohjeistetaan laskemaan annos sekä WFF- että FFF-keiloissa käyttäen tasoitetuille keiloille (WFF) simuloituja k_Q -kertoimia (Eq 34, Table 13), ja FFF-keiloille lisäksi k_{vol} -kertoimia (Eq 2, Table 11).
- $k_{Sw,air}$ –kertoimia ei TRS398 Rev 1:stä enää löydy.
- FFF- ja WFF-keilojen spektrin eroavuus huomioidaan keilasta määritetyn säteilylaatuparametrin $TPR_{20,10}$ kautta.

TABLE 30. RATIOS OF WATER TO AIR STOPPING-POWER RATIOS FOR FFF AND WFF BEAMS USED AS CORRECTION FACTORS IN THIS CODE AS A FUNCTION OF THE BEAM QUALITY INDICES $TPR_{20,10}(10)$ AND $\%dd(10,10)_x$

	6 FFF			10 FFF	
$TPR_{20,10}(10)$	0.630	0.660	0.690	0.720	0.750
$(S_{w,air})_{TPR_{20,10}(10)}^{FFF} / (S_{w,air})_{TPR_{20,10}(10)}^{WFF}$	0.999	0.998	0.997	0.996	0.994

IAEA TRS398 (Rev 1) - $k_{sw,air}$

- TRS398:n aikaisemmissa versioissa k_Q -kertoimet on määritetty erillisten Monte Carlo –simuloitujen säteilylaatukohtaisten jarrutuskyky-suhteiden ($S_{w,air}$) ja kammiotyyppikohtaisten häiriökorjauskertoimien (p_{ch}) avulla.

$$k_{Q,Q_0} = \frac{(S_{w,air})_Q (W_{air})_Q P_{ch,Q}}{(S_{w,air})_{Q_0} (W_{air})_{Q_0} P_{ch,Q_0}}$$

- TRS398 Rev1:ssä k_Q -kertoimien määrittäminen perustuu ”pisteannoksen” Monte Carlo –simulointeihin, annokselle kammion ilmatilaan (keskiarvoannos kammio-onteloon, D_{ch-air}) ja annokselle veteen (pisteannos veteen, pieni tilavuus, $D_w(P)$).

$$f_{ch}(Q) = \left[\frac{D_w(P)}{\bar{D}_{ch-air}} \right]_Q$$

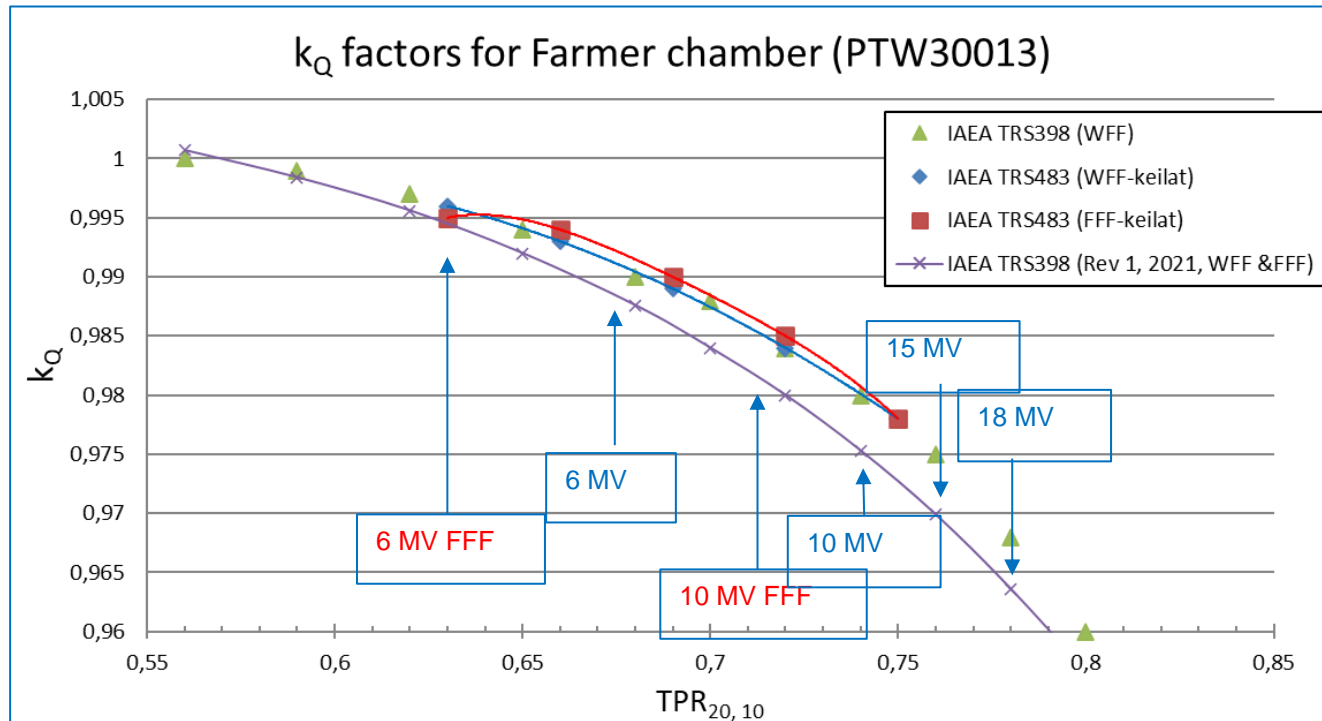
$$k_{Q,Q_0} = \frac{f_{ch}(Q)}{f_{ch}(Q_0)}$$

$$k_Q = \frac{f_{ch}(Q) (W_{air})_Q}{f_{ch}(^{60}Co) (W_{air})_{^{60}Co}}$$

- Poiketen aikaisemmasta lähestymistavasta, jossa vesiansios laskettiin kammion onteloon $D_w(vol)$, simuloidaan nyt se pisteannoksena $D_w(P)$.
- Termi $f_{ch}(Q) \approx (S_{w,air} p_{ch})_Q$ simuloidaan yhtenä suureena. Tämä pienentää k_Q –kertoimien epävarmuutta (IAEA TRS398 Rev 1, Appendix II).

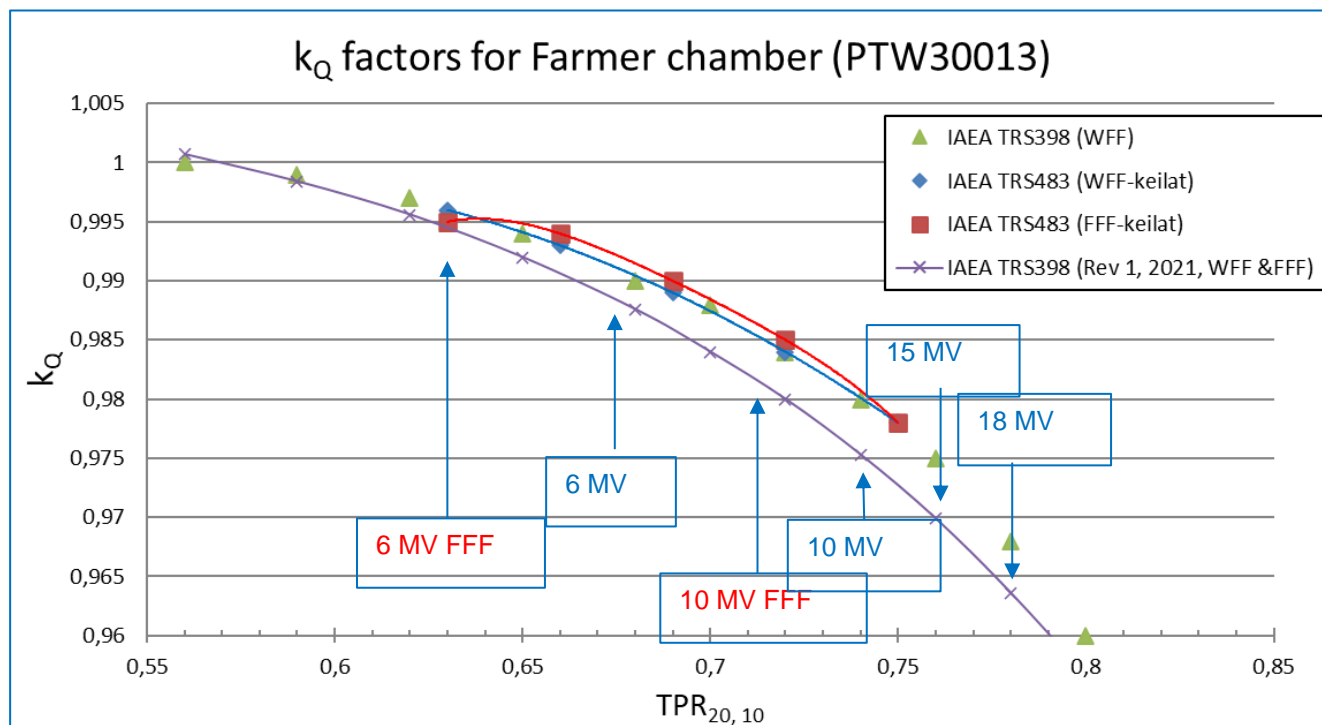
IAEA TRS398 (Rev 1)

Mikä muuttui ja minkä verran?



IAEA TRS398 (Rev 1)

Mikä muuttui ja minkä verran?

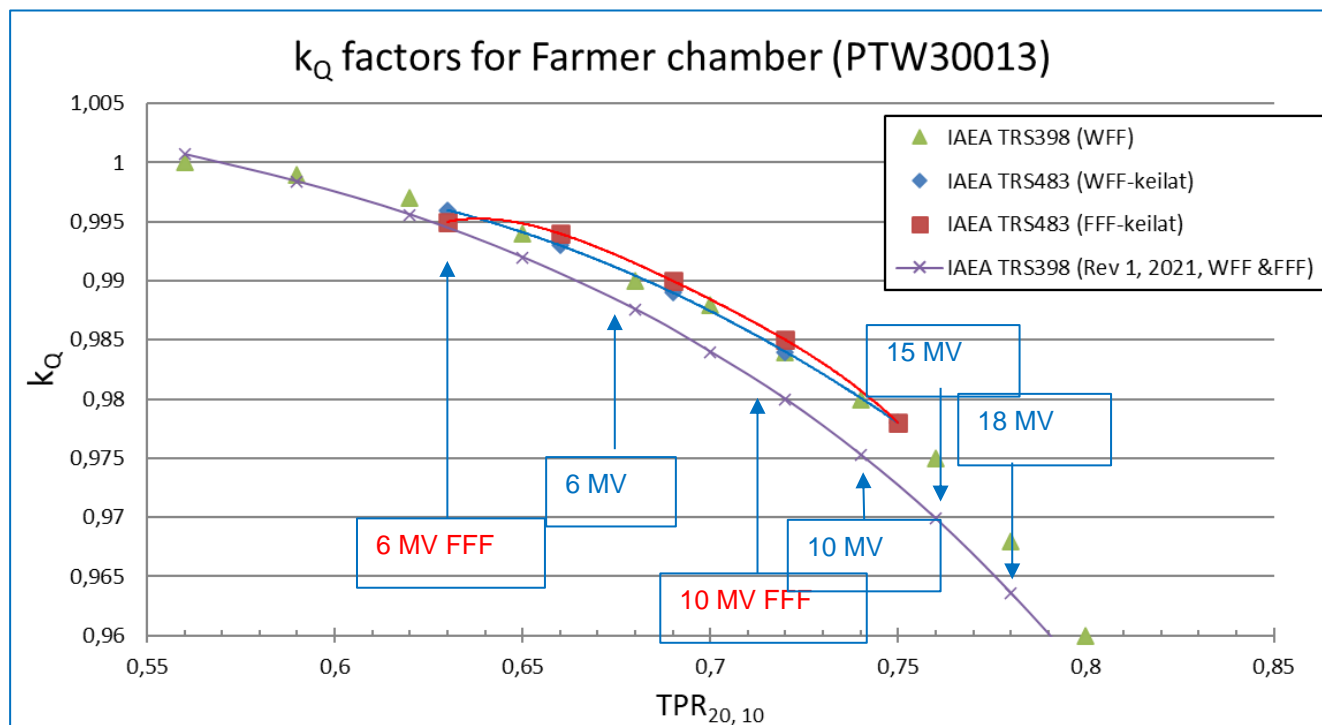


E	J_{100}/J_{200}	$TPR_{20,10}$	Δk_Q *) (%)
6 MV	1,731	0,6719	-0,2
10 MV	1,589	0,7372	-0,5
15 MV	1,539	0,7631	-0,4
6 MV FFF	1,840	0,6286	-0,1
10 MV FFF	1,656	0,7052	-0,4

*) IAEA TRS398 2006- ja 2024-versioiden k_Q -datan välinen ero (2024/2006)

IAEA TRS398 (Rev 1)

Mikä muuttui ja minkä verran?



E	J_{100}/J_{200}	$TPR_{20,10}$	Δk_Q *) (%)
6 MV	1,731	0,6719	-0,2
10 MV	1,589	0,7372	-0,5
15 MV	1,539	0,7631	-0,4
6 MV FFF	1,840	0,6286	-0,1
10 MV FFF	1,656	0,7052	-0,4

*) IAEA TRS398 2006- ja 2024-versioiden k_Q -datan välinen ero (2024/2006)

E	$R_{50,ion}$ (cm)	$R_{50,dose}$ (cm)	Δk_Q *) (%)
6 MeV	2,35	2,36	0,5
9 MeV	3,58	3,62	0,3
12 MeV	4,94	5,02	0,2
16 MeV	6,52	6,65	0,3

*) IAEA TRS398 2006- ja 2024-versioiden k_Q -datan välinen ero (2024/2006)



Kiitokset mielenkiinnostanne