

UITWERKINGEN

Gecoördineerd examen stralingsbescherming Deskundigheidsniveau 3

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave Nascholing/LUMC	BN/LUMC
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC
TU Eindhoven	TU/e

Examendatum: 14 december 2015

Vraagstuk 1 Stralingshygiënische maatregelen tijdens het gebruik van ^{18}F FDG

Vraag 1.1

Bepaal de minimale dikte van de polyethyleen wand van de injectiespuit, zodat alle β^+ -deeltjes worden afgeschermd.

De dikte van de wand van de spuit bedraagt minimaal (maximale dracht van β^+):

$$R = \frac{0,412 \times E^{1,265 - 0,0954 \times \ln(E)}}{\rho} = \frac{0,412 \times 0,634 \text{ (MeV)}^{1,265 - 0,0954 \times \ln(0,634 \text{ (MeV)})}}{0,94 \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3})}$$

$$= 0,24 \text{ cm}$$

Alternatief: Vuistregel: $R \cdot \rho = 0,5 \cdot E = 0,5 \cdot 0,634 \text{ (MeV)} = 0,317 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$

$\rho_{\text{polyethyleen}} = 0,94 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

$$R = \frac{0,317 \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-2})}{0,94 \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3})} = 0,34 \text{ cm}$$

Vraag 1.2

Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ op 50 cm van het toediensysteem ten gevolge van de 20 seconden durende toediening. Het toediensysteem mag op 50 cm afstand beschouwd worden als een puntbron. De bijdrage van de β^+ -deeltjes wordt in de berekening niet meegenomen.

Het omgevingsdosisequivalent op 50 cm bedraagt:

$$H^*(10) = \frac{h \times A}{r^2} = \frac{0,166 \text{ (}\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \times 400 \text{ (MBq)}}{0,5^2 \text{ (m}^2)} \times \frac{20 \text{ (s)}}{3600 \text{ (s} \cdot \text{h}^{-1})}$$

$$= 1,5 \mu\text{Sv}$$

Vraag 1.3

Bereken de $H^*(10)$ ter plaatse van de hand van de werknemer ten gevolge van de 20 seconden durende toediening, rekening houdend met de loodafscherming van de spuit.

De gemiddelde afstand van het centrum van de spuit tot aan de hand bedraagt 10 cm. Aflezen in de bijlage, voor een smalle-bundelgeometrie, een halveringsdikte voor lood van 4 mm (figuur 1).

Volgens $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \rightarrow \mu = \frac{\ln 2}{d_{1/2}} = \frac{\ln 2}{4 \text{ (mm)}} = 0,173 \text{ mm}^{-1}$. Bij een dikte van het lood van 15 mm $\mu \cdot d = 0,173 \cdot 15 = 2,6$. De bijbehorende build-up factor bij een energie van 0,5 MeV (benadert 0,511 keV) en μd van 2,60 bedraagt 1,5.

De transmissie voor lood in deze situatie bedraagt dan:

$$T = Be^{-\mu d} = 1,5 \times e^{-2,6} = 0,11$$

$$\begin{aligned} H^*(10) &= \frac{h \times A}{r^2} \times t \times T \\ &= \frac{0,166 (\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \times 400 (\text{MBq})}{0,10^2 (\text{m}^2)} \times \frac{20 (\text{s})}{3600 (\text{s} \cdot \text{h}^{-1})} \times 0,11 \\ &= 4,1 \mu\text{Sv} \end{aligned}$$

Vraag 1.4

Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ ter plaatse van deze werknemer gedurende de gehele PET-scan.

De activiteit op het moment dat het onderzoek wordt gestart bedraagt:

$$A(t) = A_0 \times e^{-\lambda \times t} = 400 (\text{MBq}) \times e^{-1,05 \cdot 10^{-4} (\text{s}^{-1}) \times 3600 (\text{s})} = 274 \text{ MBq}$$

Het omgevingsdosisequivalent kan via een benadering berekend worden. Op het tijdstip halverwege het onderzoek bedraagt de activiteit 238 MBq.

$$A(t) = A_0 \times e^{-\lambda \times t} = 274 (\text{MBq}) \times e^{-1,05 \cdot 10^{-4} (\text{s}^{-1}) \times 1350 (\text{s})} = 238 \text{ MBq}$$

$$\dot{H}^*(10) = \frac{h \times A}{r^2} = \frac{0,166 (\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \times 238 (\text{MBq})}{2,5^2 (\text{m}^2)} = 6,3 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$$

Het omgevingsdosisequivalenttempo op dit tijdstip bedraagt $6,3 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Gedurende 45 minuten bedraagt het omgevingsdosisequivalent op een afstand van 2,5 meter van de patiënt dan:
 $6,3 (\mu\text{Sv h}^{-1}) \times 0,75 (\text{h}^{-1}) = 4,7 \mu\text{Sv}$.

Puntenwaardering:

Vraagstuk 1	
Vraag	Punten
1.1	4
1.2	4
1.3	4
1.4	4
Totaal	16

Vraagstuk 2 Blootstelling bij het kalibreren van stralingsmeetapparatuur

Vraag 2.1

Bepaal of de beschreven kalibratiebron een hoogactieve bron is?

De activiteit van de ingekapselde bron is 22 GBq. De grens voor het hoogactief zijn van een ^{60}Co -bron is 4 GBq. De kalibratiebron is dus een hoogactieve bron.

Vraag 2.2

Bepaal de dikte van het benodigde lood om in de primaire bundel op punt A te voldoen aan de limiet van 1 mSv/j. Rond af op gehele cm.

$$T(10 \text{ cm beton}) = 6 \cdot 10^{-1}$$

$$H^*(10) = \frac{h \times A}{r^2} \times T \times t$$

$$= \frac{0,36 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot r^2 \right) \times 22 \cdot 10^3 (\text{MBq})}{(13,95 + 0,1)^2 (\text{m}^2)} \times 6 \cdot 10^{-1} \times (1 \times 5 \times 40 (\text{h/j}))$$

$$= 4,81 \cdot 10^3 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{j}} \right) = 4,8 \text{ mSv/j}$$

$$T(\text{lood}) = T(\text{lood}) = \frac{1 (\text{mSv/j})}{4,81 (\text{mSv/j})} = 0,21. \text{ Aflezen geeft minimaal } 2,8 \text{ cm lood.}$$

Afgerond is dit 3 cm lood.

Vraag 2.3

Bepaal of het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ aan de buitenkant van de lange muur op punt B voldoet aan de limiet van 1 mSv/j.

$$H^*(10) = \frac{h \times A}{r^2} \times t = \frac{0,36 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2 \right) \times 22 \cdot 10^3 (\text{MBq})}{13,95^2 (\text{m}^2)} \times (1 \times 5 \times 40 (\text{h/j}))$$

$$= 8,14 \cdot 10^3 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{j}} \right) = 8,1 \text{ mSv/j}$$

verstrooiingshoek is 90 graden;

verstrooiingsfractie van ^{60}Co is 0,002% per 100 cm² op 1 meter

$$T(10 \text{ cm beton}) = 6 \cdot 10^{-1}$$

$$H^*(10) = 8,1 (\text{mSv/j}) \times 6 \cdot 10^{-1} \times 0,002 \cdot 10^{-2} \times \frac{\pi \cdot (300/2)^2}{100} \times \frac{(1 \text{ m})^2}{(3,25 + 0,1 \text{ m})^2}$$

$$= 6,2 \mu\text{Sv/j}$$

De limiet van 1 mSv/j wordt niet overschreden.

Vraag 2.4

Bepaal of de operator op basis van alleen deze handelingen ingedeeld moet worden als blootgestelde werknemer-A of als blootgestelde werknemer-B of niet ingedeeld hoeft te worden als blootgestelde werknemer.

$$H^*(10) = \frac{h \times A}{r^2} \times t = \frac{0,36 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot r^2 \right) \times 22 \cdot 10^3 (\text{MBq})}{13,95^2 (\text{m}^2)} \times (1 \times 5 \times 40 (\text{h/j}))$$

$$= 8,14 \cdot 10^3 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{j}} \right) = 8,1 \text{ mSv/j}$$

verstrooiingshoek: $\tan^{-1} \frac{2}{13,95} = 8^\circ$; $180^\circ - 8^\circ = 172^\circ$ (indien beargumenteerd wordt 180° ook goedgerekend)

afstand $r = \sqrt{13,95^2 + 2^2} = 14 \text{ m}$

verstrooiingsfractie van ^{60}Co is 0,0125% per 100 cm^2 op 1 meter (bij 172°)

$$H^*(10) = 8,1 (\text{mSv/j}) \times 0,0125 \cdot 10^{-2} \times \frac{\pi(300/2)^2}{100} \times \frac{(1 \text{ m})^2}{(14 \text{ m})^2} = 3,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mSv}}{\text{j}}$$

$$= 3,6 \mu\text{Sv/j}$$

De door de operator opgelopen jaardosis wordt geschat op $3,5 \mu\text{Sv}$ en ligt daarmee lager dan 1 mSv. Op basis van deze ene handeling hoeft de operator niet worden geclassificeerd als blootgestelde werknemer. In de praktijk moeten ook de voorziene onbedoelde gebeurtenissen worden meegenomen.

Puntenwaardering:

Vraagstuk 2	
Vraag	Punten
2.1a	2
2.2	4
2.3	5
2.4	6
Totaal	17

Vraagstuk 3 Inwendige besmetting met ^{210}Po

Vraag 3.1

Toon aan dat de effectieve halveringstijd van ^{210}Po in de genoemde organen 37 dagen bedraagt.

De biologische halveringstijd voor alle organen bedraagt 50 d (Handboek Radionucliden):

$$\begin{aligned} 1 / T_{1/2,\text{eff}} &= 1 / T_{1/2,\text{fys}} + 1 / T_{1/2,\text{biol}} = 1 / 138,38 \text{ (d}^{-1}\text{)} + 1 / 50 \text{ (d}^{-1}\text{)} \\ &= 0,027 \text{ d}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{1/2,\text{eff}} &= 1 / (0,027 \text{ d}^{-1}) = 37 \text{ d} = 37 \text{ d} \times 24 \text{ (h}\cdot\text{d}^{-1}\text{)} \times 3600 \text{ (s}\cdot\text{h}^{-1}\text{)} \\ &= 3,2 \cdot 10^6 \text{ s} \end{aligned}$$

Vraag 3.2

Verifieer door berekening dat ingestie van 1 Bq ^{210}Po leidt tot een geabsorbeerde dosis van $1,3 \cdot 10^{-7}$ Gy in de nieren.

$$U_S = f_1 C_S A T_{1/2,\text{eff}} / 0,693$$

$$f_1 = 0,1$$

$$C_S = 0,3 \text{ (lever)}, 0,1 \text{ (nieren)} \text{ en } 0,1 \text{ (rood beenmerg)}$$

$$A = 1 \text{ Bq}$$

Gevraagd: berekening voor nieren

$$U_{\text{nieren}} = 0,1 \times 0,1 \times 1 \text{ (Bq)} \times 3,2 \cdot 10^6 \text{ (s)} / 0,693 = 4,6 \cdot 10^4 \text{ Bq}\cdot\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{SEE}_{\text{nieren}} &= 5,4^* \text{ (MeV}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\text{)} \times 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ (J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{g)} / 310 \text{ (g)} \\ &= 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ Gy}/(\text{Bq}\cdot\text{s}) \end{aligned}$$

$$D_{\text{nieren}} = 4,6 \cdot 10^4 \text{ (Bq}\cdot\text{s)} \times 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ (Gy}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\text{)} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Gy}$$

* Let op: inclusief terugstootenergie

Alternatief: D schaalt met C_S en $1/\text{massa}$ van het orgaan:

$$\begin{aligned} \text{Dus: } D_{\text{nieren}} &= D_{\text{lever}} \times [C_{\text{nieren}}/C_{\text{lever}}] \times [m_{\text{lever}}/m_{\text{nieren}}] \\ &= 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ (Gy)} \times [0,1/0,3] \times [1800 \text{ (g)}/310 \text{ (g)}] \\ &= 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Gy} \end{aligned}$$

Vraag 3.3

Geef voor elk van de in tabel 1 genoemde organen aan welke activiteit bij ingestie leidt tot een geabsorbeerde dosis gelijk aan de LD_{50} . Bepaal op grond van de uitkomsten welk van de drie genoemde organen als het kritieke orgaan moet worden aangemerkt.

Het kritieke orgaan is het orgaan waarvoor $(LD_{50} / D)_{\text{orgaan}}$ de kleinste waarde heeft.

$$(LD_{50} / D)_{\text{lever}} = 8 \text{ (Gy)} / 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ (Gy} \cdot \text{Bq}^{-1}) = 1 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

$$(LD_{50} / D)_{\text{nieren}} = 6 \text{ (Gy)} / 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ (Gy} \cdot \text{Bq}^{-1}) = 5 \cdot 10^7 \text{ Bq}$$

$$(LD_{50} / D)_{\text{rood beenmerg}} = 3 \text{ (Gy)} / 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ (Gy} \cdot \text{Bq}^{-1}) = 1 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

De nieren vormen dus het kritieke orgaan.

Vraag 3.4

Bereken voor deze persoon de effectieve volgdozis ten gevolge van ingestie.

$$e(50)_{\text{ing}} = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$$

Ingenomen activiteit bedraagt $A_{\text{ing}} = 2 \times 5 \cdot 10^7 \text{ (Bq)} \times 1 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^4 \text{ Bq}$.

$$E(50)_{\text{ing}} = e(50)_{\text{ing}} \times A_{\text{ing}} = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ (Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}) \times 1 \cdot 10^4 \text{ (Bq)} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} \\ = 2 \text{ mSv.}$$

N.B. Dit is vrijwel identiek aan de waarde die kan worden berekend uit de in dit vraagstuk gegeven en berekende geabsorbeerde doses (nieren leveren de grootste equivalente orgaandosis en hebben dus $w_T = 0,025$ – alle drie organen dragen ca. 0,7 mSv bij – n.b. $w_R = 20$).

Informatie over polonium als vergif kan gevonden worden in Harrison et al., Polonium-210 as a poison, J. Radiol. Prot. 27(2007)17-41.

Puntenwaardering:

Vraagstuk 3	
Vraag	Punten
3.1	4
3.2	5
3.3	4
3.4	4
Totaal	17

Vraagstuk 4 Activiteitsbepaling van zirkoonzand

Vraag 4.1

Bepaal met de gegevens van de ^{238}U en ^{232}Th vervalreeksen en efficiencykalibratie in figuur 1 wat er moet staan in de lege vakjes van tabel 1. Vul deze waarden in op je uitwerkblad (het fotopiekrendement per ROI en tot welke reeks het nuclide behoort).

Fotopiekrendement opzoeken in de efficiencycurve (let op, in curve is het geen percentage). Zoek de nucliden uit de reeks op in het handboekradionucliden.

ROI nr	Nuclide	Foton-energie [keV]	Bruto teltempo in ROI [cps]	Teltempo achtergrond in ROI [cps]	Yield [foton/desintegratie]	Fotopiekrendement [counts/foton]	Reeks (^{238}U of ^{232}Th)
1	^{234}Th	93	53,3	18,2	0,058	0,022	U-238
2	^{214}Pb	352	159,2	22,4	0,376	0,013	U-238
3	^{208}Tl	583	42,5	15,6	0,845	0,0087	Th-232
4	^{228}Ac	911	30,0	10,6	0,258	0,0072	Th-232

Tabel 1 Meetgegevens en nuclide-informatie

Vraag 4.2

Bereken de activiteiten van de gevonden thoriumreeksnucliden.

Bereken eerst het netto teltempo per piek door het teltempo van de achtergrond af te trekken van het bruto teltempo per ROI

Bereken elk van de activiteiten via

$$A (\text{Bq}) = \frac{R_{\text{netto}} (\text{counts} \cdot \text{s}^{-1})}{y (\text{foton} \cdot \text{desintegratie}^{-1}) \times \eta (\text{counts} \cdot \text{foton}^{-1})}$$

met de waarden uit de ingevulde tabel 1.

Nuclide	Netto teltempo [cps]	Activiteit [Bq]
^{208}Tl	26,9	$3,66 \cdot 10^3$
^{228}Ac	19,4	$10,4 \cdot 10^3$

Vraag 4.3a

Bereken het 95% betrouwbaarheidsinterval in de gevonden activiteiten van de nucliden van de thoriumreeks.

De standaarddeviatie in de activiteit wordt bepaald door de standaarddeviatie in het netto teltempo. Voor ^{208}Tl is dat:

$$s_{R_{netto}} = \sqrt{\frac{R_{bruto}}{t_{bruto}} + \frac{R_{achtergrond}}{t_{achtergrond}}} = \sqrt{\frac{42,5 (s^{-1})}{3600 (s)} + \frac{15,6 (s^{-1})}{3600 (s)}} = 0,127 s^{-1}$$

Standaarddeviatie in de activiteit is dan: $s_A = \frac{s_{R_{netto}}}{y \times \eta} = \frac{0,127 (s^{-1})}{0,845 \times 0,0087} = 17,3 Bq$

De activiteit van ^{208}Tl met 95% betrouwbaarheidsinterval (2s) is dus:
 $3,66 \pm 0,03 \text{ kBq}$

Voor ^{228}Ac is de standaarddeviatie in het netto teltempo:

$$s_{R_{netto}} = \sqrt{\frac{R_{bruto}}{t_{bruto}} + \frac{R_{achtergrond}}{t_{achtergrond}}} = \sqrt{\frac{30,0 (s^{-1})}{3600 (s)} + \frac{10,6 (s^{-1})}{3600 (s)}} = 0,106 s^{-1}$$

Standaarddeviatie in de activiteit is dan: $s_A = \frac{s_{R_{netto}}}{y \times \eta} = \frac{0,106 (s^{-1})}{0,258 \times 0,0072} = 57 Bq$

De activiteit van ^{228}Ac met 95% betrouwbaarheidsinterval (2s) is dus:
 $10,4 \pm 0,1 \text{ kBq}$

Vraag 4.3b

Beredeneer of de ^{232}Th reeks in seculier evenwicht is.

De ^{232}Th reeks is mogelijk in seculier evenwicht. Wanneer rekening wordt gehouden met de vertakking van de reeks in de voorlaatste stap (36% vervalt van ^{212}Bi naar ^{208}Tl en 64% naar ^{212}Po) blijkt dat de gevonden activiteit van $3,66 \text{ kBq}$ ^{208}Tl overeenkomt met $10,17 \pm 0,10 \text{ kBq}$ ^{212}Bi . Deze ^{212}Bi activiteit lijkt wat lager (dat zou geen seculier evenwicht betekenen) maar het 95% betrouwbaarheids-interval overlapt net met de ^{228}Ac activiteit van $10,5 \pm 0,1 \text{ kBq}$.

De kans is groot dat wanneer er afwijkende waarden worden afgelezen voor het telrendement er andere conclusies moeten worden getrokken.

Zo is de berekende ^{212}Bi activiteit $10,4 \text{ kBq}$ als er een fotopiekrendement van $0,0085$ wordt afgelezen.

Vraag 4.4

Overschrijdt 200 kg zirkoonzand de vrijstellingsgrenzen of kan het worden vrijgegeven? Beredeneer uw antwoord.

Zowel de ^{238}U reeks als de ^{232}Th reeks zijn in seculier evenwicht, of er wordt gerekend alsof deze in evenwicht zijn, dus gebruikt worden de vrijstellingsgrenzen van ^{238}U en ^{232}Th in evenwicht met alle dochters: een activiteitsconcentratie van 1 Bq/g en totale activiteit van 1 kBq (volgens Handboek Radionucliden).

Vrijgave is niet mogelijk:

De evenwichtsconcentratie U-238 bedraagt $14 \text{ kBq} / 1 \text{ kg} = 14 \text{ Bq/g}$.

De evenwichtsconcentratie Th-232 bedraagt $10,5 \text{ kBq} / 2 \text{ kg} = 5 \text{ Bq/g}$.
Beide groter dan 1 Bq/g .

Vrijgave van 200 kg is ook niet mogelijk:

De totale evenwichtsactiviteit U-238 bedraagt $2,8 \text{ MBq}$.

De totale evenwichtsactiviteit Th-232 bedraagt 1 MBq .

Beide veel groter dan 1 kBq .

Het afval overschrijdt dus de vrijstellingsgrenzen en kan niet worden vrijgegeven.

(Beide criteria moeten worden gecontroleerd, als ofwel de vrijgavegrens voor concentratie ofwel voor totale activiteit niet werd overschreden, kon het afval worden vrijgegeven.)

Puntenwaardering:

Vraagstuk 4	
Vraag	Punten
4.1	3
4.2	3
4.3a	4
4.3b	3
4.4	4
Totaal	17