

UITWERKINGEN

Examen Coördinerend Deskundige Stralingsbescherming

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: 12 december 2016

Vraagstuk 1 Afscherming van een PET-scanner

Vraag 1.1a

Bepaal de bijdrage aan de effectieve jaardosis, ten gevolge van alle patiënten (P2 en P3) in beide wachtruimten, in punt A op de gang. Laat de afscherpende werking van de wanden buiten beschouwing.

Wachtruimte 1 en 2:

- Afstand tot punt A: $r = 2,46$ m. (Pythagoras)
- Gemiddelde activiteit per 1 uur wachtende patiënt:

$$A_{\text{gem}} = A_0 \times \text{cf}_{\text{verval}} = 750 \times 0,832 = 624 \text{ MBq}$$

- Per patiënt: $H^*(10)_A = A_{\text{gem}} \times h(10) \times t \times \text{cf}_{\text{afscherming lichaam}} / r^2 =$
 $624 \times 0,166 \times 1 \times 0,64 / 2,46^2 = 10,95 \text{ } \mu\text{Sv}$
- Bijdrage wachtruimte 1:
 $[\text{Aantal patiënten}] \times H^*(10)_A = 750 \times 10,95 = 8213 \text{ } \mu\text{Sv/j}$
- Bijdrage wachtruimte 2 = $8213 \text{ } \mu\text{Sv/j} = 8,2 \text{ mSv/j}$.

effectieve dosis in A door beide wachtruimten:

$$= 8,2 + 8,2 = 16,4 \text{ mSv/j.}$$

Vraag 1.1b

Bepaal ook de bijdrage aan de effectieve jaardosis in punt A, ten gevolge van de patiënten die gescand worden met de PET-scanner, onder dezelfde voorwaarden als bij vraag 1.1a.

Scannerruimte:

- Afstand tot punt A = $2,50$ m
- Gemiddelde activiteit per patiënt gedurende 30 min. onderzoek:

$$A_{\text{gem}} = A_{\text{start}} \times \text{cf}_{\text{verval}}$$

$$A_{\text{start}} (\text{na 1 uur}) = A_0 \times e^{(-0.693 \times 60 / 109.7)} (= \text{verval na 1 uur}) \times \text{cf}_{\text{uitplassen}} =$$

$$750 \times 0,685 \times 0,70 = 359,6 \text{ MBq}$$

$$A_{\text{gem}} = 359,6 \times 0,911 = 327,6 \text{ MBq}$$

- Per patiënt:

$$H^*(10)_A = A_{\text{gem}} \times h(10) \times t \times \text{cf}_{\text{afsch. lichaam}} \times \text{cf}_{\text{afsch. scanner}} / r^2 =$$

$$327,6 \times 0,166 \times 0,50 \times 0,64 \times 0,90 / 2,5^2 = 2,51 \text{ } \mu\text{Sv}$$

Bijdrage scannerruimte:

$$[\text{Aantal patiënten}] \times H^*(10)_A = 1500 \times 2,51 = 3765 \mu\text{Sv/j}$$

$$= 3,8 \text{ mSv/j}$$

Vraag 1.1c

Toon aan dat de totale bijdrage aan de effectieve dosis voor een persoon in punt A, bij een bezettingsgraad van 0,2, gelijk is aan 4 mSv/j.

Totale effectieve dosis in A:

$$(16,4[\text{vraag 1a}] + 3,8[\text{vraag 1b}]) \times 0,2[\text{verblijfsfactor}] = 4(,0) \text{ mSv/j}$$

Vraag 1.2

Toon aan dat de hoeveelheid loodafscherming (in hele mm) die nodig is in de muren aan de gangzijde om de bijdrage aan de effectieve jaardosis voor een persoon in punt A beneden 1 mSv te houden ongeveer 10 mm bedraagt. Houd hierbij rekening met de bezettingsgraad van deze gang. U neemt daarbij als uitgangspunt dat de transmissie vanuit de scannerruimte gelijk is aan die vanuit de wachtruimten.

Gebruik voor de transmissiefactoren tabel 1 (brede bundel).

Benodigde transmissiefactor: $T = 1 / (4) = 0,25$

Aflezen in tabel 1: 10 mm lood.

Vraag 1.3

Bereken met behulp van figuur 2 en tabel 2 de transmissie bij 10 mm loodafscherming en bepaal of deze transmissie meer of minder dan 10% afwijkt van de eerder bepaalde waarde bij vraag 1.2.

In figuur 2 lezen we af dat de halveringsdikte voor smalle bundels bij 511 keV ca 4 mm lood is.

$$\mu \cdot d_{1/2} = \ln 2 = 0,693$$

$$d_{1/2} = 4 \text{ mm}$$

$$\text{Dus: } \mu = 0,173 \text{ mm}^{-1}$$

Bij 10 mm looddikte is $\mu \cdot d = 0,173 \times 10 = 1,73$

De build-up factor is volgens tabel 2 en interpolatie:

$$B = 1,24 + 0,73 (1,42 - 1,24) = 1,37$$

De transmissie voor lood in deze situatie bedraagt:

$$T = B \cdot e^{-\mu \cdot d} = 1,37 \cdot e^{-1,73} = 0,24$$

Tien procent van de onder vraag 1.2 gevonden waarde bedraagt 0,025. Het verschil tussen de gevonden transmissies is 0,01. Conclusie: afwijking is minder dan 10 % en beide methoden geven dus nagenoeg dezelfde transmissiewaarde.

Vraag 1.4

Beredeneer dat, wanneer ook de wand tussen de bedieningsruimte en de ruimte met de PET-scanner dezelfde transmissie heeft als de wanden in de gang, de totale bijdrage aan de effectieve jaardosis in punt B in de bedieningsruimte de 1 mSv overschrijdt.

In punt A (2,5 m) werd ten gevolge van de scannerruimte 3,8 (3,77) mSv/j gevonden (vraag 1a).

- Afstand tot punt B is 1,5 m
- Er wordt 1 maal een muur gepasseerd, dus $T = 0,25$

$$3,77 \text{ mSv/j} \times 0,25 \times (2,5/1,5)^2 = 2,6 \text{ mSv/j}$$

Dit is al meer dan 1 mSv – bijdragen uit wachtkamers verhogen dit nog.

Puntenwaardering

Vraagstuk 1	
Vraag	Punten
1a	4
1b	3
1c	2
2	2
3	4
4	2
Totaal	17

Vraagstuk 2 Dieetzout

Vraag 2.1

Geef op basis van de belangrijkste uitgezonden stralingssoorten van ^{40}K een mogelijke verklaring, waarom de meting met de GM-buis een duidelijke verhoging laat zien.

Geef tevens een mogelijke verklaring waarom de meting met het NaI-kristal geen verhoging geeft.

De belangrijkste uitgezonden straling is:

β^- met een yield = 0,893 = 89,3% en een $E_{\text{max}} = 1312$ keV

γ_1 met een yield = 0,107 = 10,7% en een $E = 1461$ keV

[De in Keverling Buisman genoemde Auger-elektronen met een $E = 3$ keV zullen sowieso niet gedetecteerd worden met dit soort detectie 'op afstand'].

GM-buis, gasgevuld. De β 's hebben een hoge E_{max} , iets lager dan bijvoorbeeld ^{32}P . Dit soort geladen deeltjes wordt prima gedetecteerd met een GM-buis. Dit verklaart het signaal van de GM-buis.

NaI-kristal, geen signaal:

De massieke activiteit is al erg laag, maar toch gaf de GM buis wel een verhoging.

De β 's, geladen deeltjes, hebben geen interactie in het NaI-kristal. De meeste β 's zullen al tegengehouden worden in de omhulling van het kristal. De enkele (oorspronkelijk hardste) β die mogelijk nog door de omhulling komt, heeft al veel energie verloren. Veroorzaakt geen/nauwelijks scintillaties. Het NaI-signaal zou van de 10,7% γ met een energie van 1461 keV moeten komen. 1^e. Deze yield is laag, maar 10,7%. 2^e. En deze gamma-energie is erg hoog, nog hoger dan bijvoorbeeld die van ^{60}Co . Het doordringende vermogen van deze gamma-energie is heel hoog. Kennelijk vinden er zo weinig interacties plaats, dat dit geen signaal oplevert.

Essentieel in de beantwoording is dat gezien wordt dat

1) de GM-buis de β 's detecteert. En dat

2) te verwachten is dat de NaI-handmonitor de γ 's meet, maar dat

3) dit door het kleine aantal en de zeer hoge energie, kennelijk niet gebeurt.

Er zijn te weinig interacties in het NaI-detectormateriaal.

Vraag 2.2

Bereken het meetrendement van deze meting in cps/Bq. Bereken tevens de standaarddeviatie in dit meetrendement.

De dode tijd correctie hoeft niet gedaan te worden bij een telsnelheid van ongeveer 1,00 cps (994 counts in 999 seconden).

$$R_{\text{netto}} = \frac{994 \text{ (counts)}}{999 \text{ (s)}} - \frac{499 \text{ (counts)}}{999 \text{ (s)}} = 0,995 \text{ (cps)} - 0,499 \text{ (cps)} = 0,496 \text{ cps}$$

$$A = 0,535 \text{ (g dieetzout)} \times 0,973 \text{ (g KCl/g dieetzout)} \times 16,2 \text{ (Bq/g KCl)} = 8,43 \text{ Bq}$$

$$\text{Meetrendement } \varepsilon = \frac{0,496 \text{ (cps)}}{8,43 \text{ (Bq)}} = 0,0588 \text{ cps/Bq}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{R_a}{t_a} + \frac{R_b}{t_b}} = \sqrt{\frac{0,995}{999} + \frac{0,499}{999}} = \sqrt{\frac{0,995+0,499}{999}} = 0,0387 \text{ cps}$$

$$\sigma \text{ in } \varepsilon = \frac{0,0387 \text{ (cps)}}{8,43 \text{ (Bq)}} = 0,0046 \text{ cps/Bq}$$

Extra:

$$1 \sigma = 0,0046 \text{ (cps/Bq)} / 0,0588 \text{ (cps/Bq)} \times 100\% = 7,8\%$$

Alternatief:

$$1 \sigma = 0,0387 \text{ (cps)} / 0,496 \text{ (cps)} \times 100\% = 7,8\%$$

Procentueel is de standaarddeviatie in het meetrendement van 0,0588 cps/Bq gelijk aan 7,8%.

Vraag 2.3

Laat aan de hand van een berekening zien dat de NaI-meting aan het dieetzout in de vaste opstelling nu wél significant (met een betrouwbaarheidsinterval van 99,7%) hoger is dan de achtergrondmeting.

De achtergrondmeting geeft 104.589 counts; $\sigma = \sqrt{104.589} = 323 \text{ counts}$

De achtergrondmeting + 1 σ = 104.912 counts

De achtergrondmeting + 3 σ = 105.558 counts

De meting met dieetzout geeft 121.526 counts

De meting aan het dieetzout is veel hoger dan de [achtergrond + 3 σ].
Dus significant verhoogd, significant aantoonbaar.

Vraag 2.4

Bepaal het rendement van de meting met deze vaste NaI-opstelling in counts per seconde/fotonen per seconde (cps/fps).

$$R_{\text{netto}} = 121.526 \text{ (counts)} - 104.589 \text{ (counts)} = 16.937 \text{ (counts) per } 72.000 \text{ (s)} = 0,235 \text{ cps.}$$

$$A = 3,08 \text{ (g dieetzout)} \times 0,973 \text{ (g KCl/g dieetzout)} \times 16,2 \text{ (Bq/g KCl)} = 48,5 \text{ Bq} = 48,5 \text{ desintegraties per s}$$

$$0,107 \text{ (fotonen/desintegratie)} \times 48,5 \text{ (desintegraties/s)} = 5,19 \text{ fps}$$

$$\varepsilon = 0,235 \text{ (cps)}/5,19 \text{ (fps)} = 0,045 \text{ cps/fps}$$

Puntenwaardering

Vraagstuk 2	
Vraag	Punten
1	3
2	5
3	3
4	4
Totaal	15

Vraagstuk 3 Onvoorzien gevolg van jodiumtherapie

Vraag 3.1

Hoeveel dagen na toepassing van de jodiumtherapie zal de monitor op het vliegveld nog een alarm genereren? Afscherming door lichaamsweefsel van de man mag worden verwaarloosd.

$$1/T_{1/2,eff} = 1/T_{1/2,biol} + 1/T_{1/2,fys} = 1/90 \text{ (d)} + 1/8,021 \text{ (d)} = 0,136 \text{ d}^{-1}$$

$$\rightarrow T_{1/2,eff} = 7,36 \text{ d}$$

directe uitscheiding = 70% = 0,70

$$\begin{aligned} H^* &= 0,066 \text{ (}\mu\text{Sv/h per MBq/m}^2\text{)} \times 400 \text{ (MBq)} \times (1 - 0,70) \times e^{-0,693 \times t/7,36 \text{ (d)}} \\ &\quad / (0,5 \text{ m})^2 \\ &= 32 \times e^{-0,693 \times t/7,36 \text{ (d)}} \mu\text{Sv/h} \\ &= 0,005 \mu\text{Sv/h} \end{aligned}$$

$$t = (7,36 \text{ (d)} / 0,693) \times \ln(32 / 0,005) = 93 \text{ d}$$

Vraag 3.2a

Bereken het aantal desintegraties $U_{\text{schildklier}}$ (in Bq·s) in de schildklier.

$$T_{1/2,eff} = 7,36 \text{ d}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{schildklier}} &= A_{\text{ingestie}} \times f_{\text{schildklier}} \times \int_0^{\infty} e^{-0,693 \times t/T_{1/2,eff}} dt = A_{\text{ingestie}} \times f_{\text{schildklier}} \times T_{1/2,eff} \\ &\quad / 0,693 \\ &= 400 \cdot 10^6 \text{ (Bq)} \times 0,30 \times 7,36 \text{ (d)} \times 24 \text{ (h/d)} \times 3600 \text{ (s/h)} / 0,693 \\ &= 1,10 \cdot 10^{14} \text{ Bq}\cdot\text{s} \end{aligned}$$

Vraag 3.2b

Bereken met het antwoord van vraag 3.2a de door de schildklier geabsorbeerde dosis $D_{\text{schildklier}}$. Indien u het antwoord op vraag 3.2a schuldig bent gebleven kunt u uitgaan van 10^{14} desintegraties.

$$D_{\text{schildklier}} = U_{\text{schildklier}} \times SEE_{\text{schildklier}}$$

$$\begin{aligned} SEE_{\text{schildklier}} &= 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ (J/eV)} \times [E_{\beta, \text{gem}} \times \gamma] \text{ (eV/Bq}\cdot\text{s)} / m_{\text{schildklier}} \text{ (kg)} \\ &= 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ (J/eV)} \times 0,192 \cdot 10^6 \times 0,894 \text{ (eV/Bq}\cdot\text{s)} / 20 \cdot 10^{-3} \text{ (kg)} \\ &= 1,37 \cdot 10^{-12} \text{ Gy per Bq}\cdot\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{\text{schildklier}} &= U_{\text{schildklier}} \times SEE_{\text{schildklier}} \\ &= 1,10 \cdot 10^{14} \text{ (Bq}\cdot\text{s)} \times 1,37 \cdot 10^{-12} \text{ (Gy/Bq}\cdot\text{s)} \\ &= 1,5 \cdot 10^2 \text{ (Gy)} \end{aligned}$$

Het fictieve aantal desintegraties levert $D_{\text{schildklier}} = 1,4 \cdot 10^2 \text{ (Gy)}$

Vraag 3.3

Bepaal de effectieve volg dosis voor de man. Toon tevens door berekening aan dat de in de schildklier geabsorbeerde dosis het overgrote deel van deze effectieve volg dosis bepaalt (maak hiervoor onder meer gebruik van het antwoord op vraag 3.2b).

Verondersteld mag worden dat de gegevens uit het Handboek Radionucliden ook voor deze patiënt gebruikt mogen worden. Op basis hiervan volgt

$$E(50)_{\text{ing}} = A \times e(50)_{\text{ing}}(b) = 400 \text{ MBq} \times 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq} = 8,8 \text{ Sv}$$

(Merk op dat effectieve volgdozes van de orde van 8 Sv niet de gebruikelijke betekenis hebben, maar dat de berekening voor kleinere activiteiten identiek verloopt.)

De bijdrage van de schildklier aan $E(50)_{ing}$ volgt uit $D_{\text{schildklier}}$ door vermenigvuldiging met de weefselweegfactor voor de schildklier: $w_T = 0,05$.
 $E(50)_{ing, \text{schildklier}} = 1,5 \cdot 10^2 \text{ (Gy)} \times 0,05 = 7,5 \text{ Sv}$. Deze bijdrage is 86% van de hierboven berekende waarde van $E(50)_{ing}$.

Vraag 3.4

Schat de effectieve dosis die de vrouw gedurende de nachten volgend op de jodiumtherapie oploopt ten gevolge van de ^{131}I -activiteit. Schrijf daarbij de gebruikte aannames op die u nodig heeft voor het maken van deze schatting. De te maken aannames. Transmissie schatten ($T = 1$ goed rekenen). Afstand schatten (alles in de range 0,3 – 1,2 m goed rekenen). Puntbronbenadering toepassen. Alle aannames voor 'slaapmomenten' goed rekenen. Alleen onzin afstraffen.

Voorbeeld:

$$T = 0,8$$

$$H^* = h \times A(t=0) \times \int_0^\infty e^{-0,693 \times t / 7,35 \text{ (d)}} dt \times (1 - 0,70) \times f \times B \times T / r^2$$

hierin is f de fractie van de tijd dat de vrouw is blootgesteld

$$\int_0^\infty e^{-0,693 \times t / 7,36 \text{ (d)}} dt = 7,36 \text{ (d)} \times 24 \text{ (h/d)} / 0,693 = 255 \text{ h}$$

blootstelling is 8 uur per dag, dus $f = 8 \text{ (h)} / 24 \text{ (h)} = 0,33$

$$H^* = 0,066 \text{ (}\mu\text{Sv/h per MBq/m}^2\text{)} \times 400 \text{ (MBq)} \times 255 \text{ (h)} \times 0,3 \times 0,33 \times 0,80 / (0,5 \text{ m})^2 = 2,1 \cdot 10^3 \text{ }\mu\text{Sv} = 2,1 \text{ mSv}$$

Puntenwaardering

Vraagstuk 3	
Vraag	Punten
1	4
2a	3
2b	3
3	3
4	4
Totaal	17

Vraagstuk 4 Dierenartspraktijk

Vraag 4.1

Toon aan dat de intreedosis van één opname ter hoogte van het verstrooiend oppervlak gelijk is aan 2,8 mGy.

$V = 75 \text{ kV}$; $k = 6,1 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{min})$;

$I \times t = 10 \text{ mA} \cdot \text{s} = 10 (\text{mA} \cdot \text{s}) \times 1 (\text{min}) / 60 (\text{s}) = 0,17 \text{ mA} \cdot \text{min}$;

$r = 0,6 \text{ m}$;

$$D \approx K_{\text{in}} = \frac{k \times I \times t}{r^2} = \frac{6,1 (\text{mGy} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{min})) \times 0,17 (\text{mA} \cdot \text{min})}{(0,6 (\text{m}))^2} = 2,8 \text{ mGy}$$

Vraag 4.2

Bepaal de maximale effectieve dosis per jaar achter het loodschoort ter hoogte van de dierenarts.

$K_{\text{in}} = 2,8 \text{ mGy}$;

verstrooiingshoek is 90 graden; verstrooiend oppervlak is 500 cm^2 ;

verstrooiingsfractie van luchtkerma: (bij $75 \text{ kV} = 0,075 \text{ MV} =$) $0,15\%$ per 100 cm^2 op $0,5 \text{ m}$ (water). Dit is gelijk aan een verstrooiingsfractie van $0,038\%$ per 100 cm^2 op 1 meter .

Aantal foto's: 1000

Transmissie:

$k_{0,5 \text{ mm Pb}} = k_{0,05 \text{ cm Pb}} = 0,1 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{min})$;

$k_{0 \text{ mm Pb}} = 6,1 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{min})$;

$T = 0,1 / 6,1 = 0,016$;

$$\begin{aligned} K &= \frac{K_{\text{in}} \times 0,038 \cdot 10^{-2} (\text{m}^2) \times T \times \frac{500 (\text{cm}^2)}{100 (\text{cm}^2)} \times 1000}{r^2} \\ &= \frac{2,8 (\text{mGy}) \times 0,038 \cdot 10^{-2} (\text{m}^2) \times 0,016 \times \frac{500 (\text{cm}^2)}{100 (\text{cm}^2)} \times 1000 (\text{j}^{-1})}{(0,20 (\text{m}))^2} \\ &= 2,1 \text{ mGy/j} \end{aligned}$$

Stralingsweegfactor röntgenstraling: 1

Weefselweegfactor totale lichaamsbestraling: 1

$$E = D \times w_R \times w_T \approx K \times w_R \times w_T = 2,1 [\text{mGy}] \times 1 \times 1 = 2,1 \text{ mSv}$$

Vraag 4.3

Bepaal de equivalente jaardosis als gevolg van deze voorziene onbedoelde gebeurtenis voor de beide handen van de dierenarts bij gebruik van genoemde loodhandschoenen en geef aan of de wettelijke limiet voor een blootgestelde werknemer wordt overschreden.

$$D \approx K_{in} = 2,8 \text{ mGy (vraag 1);}$$

$$T = 100\% - 40\% \text{ (beschermingsfactor)} = 60\%;$$

Stralingsweegfactor röntgenstraling: 1;

$$\text{Frequentie: } 1000/10 = 100 \text{ jaar}^{-1}$$

$$H_{\text{huid}} = D \times T \times w_R \approx K \times T \times w_R \times f = 2,8 \text{ (mGy)} \times 0,60 \times 1 \times 100 = 170 \text{ mSv}$$

Deze equivalente huiddosis ligt onder de wettelijke limiet van 500 mSv.

Vraag 4.4

Leg uit waarom de beschermingsfactor van de loodhandschoen bij blootstelling aan de primaire bundel (40%) lager is dan die bij blootstelling aan de strooistraling (80%).

Compton-verstrooide straling heeft een lagere gemiddelde energie dan straling in de primaire bundel, omdat de primaire bundel interactie ondergaat met het materiaal, waardoor het energie kwijt raakt terwijl het verstrooid wordt.

Primaire straling is door zijn hogere gemiddelde energie slechter af te schermen dan strooistraling met zijn lagere gemiddelde energie. Gebruik van loodhandschoenen in de primaire bundel heeft daarom een lagere beschermingsfactor dan bij het gebruik van loodhandschoenen in strooistraling.

Puntenwaardering

Vraagstuk 4	
Vraag	Punten
1	3
2	5
3	4
4	2
Totaal	14