

## 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: 11 mei 2015

## Vraagstuk 1 Inwendige besmettingscontrole

### Vraag 1.1

Toon aan dat het geoorloofd is om de labeling buiten de zuurkast uit te voeren.

$$A_{\max} = \frac{0,02 \cdot 10^{p+q+r}}{e(50)} = \frac{0,02 \cdot 10^{-2+2+0}}{1,1 \cdot 10^{-9} \text{ (Sv/Bq)}} = 18 \cdot 10^6 \text{ Bq} = 18 \text{ MBq}$$

Het is geoorloofd om een labeling met 1 MBq buiten de zuurkast uit te voeren

### Vraag 1.2a

Bereken de activiteit van het nuclide  $^{32}\text{P}$  die een werknemer moet inhaleren om een effectieve volgdosis van  $10 \mu\text{Sv}$  te ontvangen.

$$e(50)_{\text{inhalatie, F-klasse}} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$$

$$10 \mu\text{Sv} \text{ wordt ontvangen bij: } \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{ (Sv)}}{1,1 \cdot 10^{-9} \text{ (Sv/Bq)}} = 9,1 \cdot 10^3 \text{ Bq}$$

### Vraag 1.2b

Bereken welke activiteit hiervan in het urinemonster zou terecht komen.

In urine op dag 7:

$5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Bq/d}$  per Bq inname (Handboek Radionucliden, blz.33)

In deze situatie:  $5,6 \cdot 10^{-3} \text{ (Bq)} \times 9,1 \cdot 10^3 \text{ (Bq/d per Bq)} = 51 \text{ Bq}$

In monster van 2,5 mL:  $51 \text{ (Bq)} \times 2,5 \text{ (mL)}/1400 \text{ (mL)} = 0,091 \text{ Bq}$

### Vraag 1.3

Zou de hierboven berekende activiteit in het betreffende urinemonster te meten zijn? Als significant wordt aangehouden: een betrouwbaarheidsinterval van  $3\sigma$  boven het achtergrondteltempo.

Het monster geeft bij 10 minuten meettijd in de LSC een nettowaarde van:

$0,091 \text{ (Bq)} \times 600 \text{ (sec)} \times 0,80 \text{ (cpm/dpm)} = 44 \text{ counts}$

Het achtergrondteltempo veroorzaakt in 10 minuten een meetwaarde van 100 counts

een betrouwbaarheidsinterval van  $3\sigma$  boven het achtergrondteltempo is:

$3\sigma = 3 \times \sqrt{100} = 30 \text{ counts}$

Conclusie: De netto meetwaarde (44 counts) is groter dan  $3\sigma$ , de activiteit is dus goed meetbaar.

#### Vraag 1.4

*Bereken de activiteit in het urinemonster en de spreiding in dit antwoord. Levert berekening van de volgdozis vanuit deze activiteit een waarde die aan het NDRIS gemeld dient te worden?*

Het netto teltempo is:  $R_s = R_t - R_b = 13,1 \text{ cpm} - 9,3 \text{ cpm} = 3,8 \text{ cpm}$

$$\sigma_s = \sqrt{(R_t/T_t + R_b/T_b)} = \sqrt{(13,1/10 + 9,3/10)} = 1,50 \text{ cpm}$$

$$A_s = (R_s \pm \sigma_s) / \epsilon = (3,8 \pm 1,50 \text{ (cpm)})/0,80 \text{ (cpm/dpm)} \times 1/60 = 0,079 \text{ Bq} \pm 0,031$$

Deze besmetting hoeft niet in NDRIS opgenomen te worden, omdat de gemeten activiteit minder is dan 0,11 Bq (uitkomst vraag 1.2a)

Alternatief met langdurig gemeten achtergrondteltempo:

Het netto teltempo is:  $R_s = R_t - R_b = 13,1 \text{ cpm} - 10,0 \text{ cpm} = 3,1 \text{ cpm}$

$$\sigma_s = \sqrt{(R_t/T_t)} = \sqrt{(13,1/10)} = 1,1 \text{ cpm}$$

$$A_s = (R_s \pm \sigma_s) / \epsilon = (3,1 \pm 1,1 \text{ (cpm)})/0,80 \text{ (cpm/dpm)} \times 1/60 = 0,065 \text{ Bq} \pm 0,024$$

Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 1</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
1.1	2
1.2a	2
1.2b	4
1.3	4
1.4	6
<b>Totaal</b>	<b>18</b>

## Vraagstuk 2      Mobiele versneller voor IORT

### Vraag 2.1

*Verklaar hoe een therapeutische dosis van 20 Gy, afkomstig van een 10-MeV-elektronenbundel, een significant omgevingsdosisequivalent ( $H^*(10)$ ) kan opleveren voor andere personen dan de patiënt.*

De elektronen zullen bij absorptie in het weefsel van de patiënt een deel van hun energie verliezen in de vorm van remstraling. Remstraling is fotonenstraling en dat verklaart waarom er buiten de patiënt een omgevingsdosisequivalent als gevolg van fotonen ( $H^*(10)$ ) kan worden ontvangen.

Bij beoordeling moet gelet worden op het voorkomen van de volgende drie punten in de verklaring:

- Proces: remstraling
- Locatie: in de patiënt
- Stralingssoort: fotonen

### Vraag 2.2

*Toon gebruik makende van **Tabel 2 (bijlage blz. 8)** aan dat de build-up factor in beton, voor fotonen die ontstaan bij gebruik van een elektronenversnelspanning van 10 MV, 1 is voor diktes tot en met de tiendewaardedikte. Doe dit door te bewijzen dat er een exponentieel verband bestaat tussen de transmissie van de fotonenstraling en de dikte van het beton.*

De transmissie  $T$  van een brede bundel fotonenstraling door beton wordt

$$\text{gegeven door: } T = \left(\frac{1}{2}\right)^{d/HVL} \cdot B$$

Bij een exponentieel verband tussen de transmissie van de fotonenstraling en de dikte van het beton zal bij invullen van een  $d$  gelijk aan 1 TVL en een  $B$  van 1 een transmissie  $T$  gevonden moeten worden van 0,1.

Uit **Tabel 2** blijkt dat respectievelijk de  $HVL$  en de TVL voor brede bundels fotonenstraling voor beton 11,9 cm en 39,6 cm bedragen. NB: het gaat hier om fotonenstraling met een energie van 6 MeV die ontstaan bij een elektronenversnelspanning van 10 MeV.

$$T = \left(\frac{1}{2}\right)^{TVL/HVL} \cdot B = \left(\frac{1}{2}\right)^{(39,6 \text{ (cm)})/(11,9 \text{ (cm)})} \times 1 = 0,10 \text{ (0,0996)}$$

Uit de berekening volgt vrijwel exact een tiende, wat wijst op een exponentieel verband tussen de transmissie en de dikte van het beton (tot en met de tienwaardedikte).

### Vraag 2.3

*Hoeveel patiënten kunnen per jaar bestraald worden zonder de geldende dosisbeperking voor personen in de onderliggende ruimte te overschrijden?*

Het omgevingsdosisequivalent onder de patiënt is 187,77  $\mu\text{Sv}$  op 3 meter afstand bij een therapeutische dosis van 10 Gy. Uit **Tabel 1** blijkt dat de kwadratenwet geldig is.

De halfwaardedikte *HVL* voor beton is 11,9 cm bij een toegepaste elektronenversnelling van 10 MV.

$H^*(10)$  op 3,5 meter (= minimale afstand) afstand is dan:

$$187,77 (\mu\text{Sv}) \times (3/3,5)^2 (\text{m/m}) \times (20 (\text{Gy})/10 (\text{Gy})) \times 0,5^{(30/11,9)} = 48,1$$

Bij een dosisbeperking van 1 mSv/j komt dit overeen met:

$$1000 (\mu\text{Sv}) / 48,1 (\mu\text{Sv}) = 20,8 \text{ patiënten.}$$

Naar beneden afronden, dus 20 patiënten kunnen per jaar worden bestraald.

### Vraag 2.4

*Bereken de extra benodigde looddikte om te voldoen aan de geldende dosisbeperking, wanneer 200 patiënten per jaar worden behandeld.*

Bij 200 patiënten is  $H^*(10)$  zonder aanvullende afscherming:

$$48,1 (\mu\text{Sv}) \times 200 = 9620 \mu\text{Sv}$$

Bij een halfwaardedikte *HVL* van 16,6 mm lood is de benodigde dikte:

$$I_d/I_0 = 0,5^{(d/d^{1/2})} \mu\text{Sv}$$

$$1000 (\mu\text{Sv}) / 9620 (\mu\text{Sv}) = 0,5^{(d/16,6)}$$

$$d = 16,6 (\text{mm}) \times \log (1000 (\mu\text{Sv}) / 9620 (\mu\text{Sv})) / \log 0,5$$

$$d = 16,6 (\text{mm}) \times 3,27 = 55 \text{ mm}$$

*Alternatief en sneller antwoord dat ook goed gerekend wordt:*

20 patiënten komt overeen met 1 mSv. Als er 200 patiënten moeten worden behandeld, dan moet de transmissie een factor 10 omlaag. Dit kan bereikt worden door toevoegen van lood ter dikte van 1 *TVL*, dus 55 mm (volgens **Tabel 2**).

Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 2</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
2.1	4
2.2	4
2.3	5
2.4	4
<b>Totaal</b>	<b>17</b>

### Vraagstuk 3 Hout uit Letland

#### Vraag 3.1

Toon aan dat de activiteit van het  $^{137}\text{Cs}$  in/op het hout gelijk is aan 0,22 MBq. Gebruik hiervoor het scenario van een plaatbron.

$$\dot{H}^*(10) = \frac{4 \cdot A}{(L_{\min})^2} \cdot h(10) \cdot \ln\left(\frac{(L_{\min})^2}{4g^2} + 1\right) \cdot T$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{(L_{\min})^2 \cdot \dot{H}^*(10)}{4 \cdot h(10) \cdot T} \cdot \left(\ln\left(\frac{(L_{\min})^2}{4g^2} + 1\right)\right)^{-1} \\ &= \frac{(0,2 \text{ (m)})^2 \times 0,45 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}\right)}{4 \times 0,093 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{MBq}}\right) \times 1} \times \left(\ln\left(\frac{(0,2 \text{ (m)})^2}{4 \times (0,2 \text{ (m)})^2} + 1\right)\right)^{-1} = 0,22 \text{ MBq} \\ &= 2,2 \cdot 10^5 \text{ Bq} \end{aligned}$$

#### Vraag 3.2

Toon aan dat de AGS geen meting volgens het puntbronbenaderingmodel had kunnen uitvoeren. Ga er hierbij vanuit dat een meting pas significant verschillend ten opzichte van de achtergrond is wanneer het achtergrond omgevingsdosisequivalenttempo ten minste één maal verhoogd is.

De puntbronbenadering geldt vanaf een afstand gelijk aan vijf keer de grootste afmeting van de zak hout.

$$r = 5 \times 0,70 \text{ m} = 3,50 \text{ m}$$

$$\dot{H}^* = \frac{h \cdot A}{r^2} = \frac{0,093 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{MBq}}\right) \times 0,22 \text{ (MBq)}}{(3,50 \text{ m})^2} = 1,7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}\right) = 1,7 \text{ nSv/h}$$

Het omgevingsdosisequivalenttempo op 3,50 meter van de zak hout (1,7 nSv/h) is (veel) lager dan dat van de gemiddelde achtergrond in Nederland (70 nSv/h). Het gemeten omgevingsdosisequivalenttempo zal op deze plek niet meetbaar zijn boven de schommelingen in de meting van de achtergrond; er zal geen significante verhoging van het achtergrond omgevingsdosisequivalenttempo waar te nemen zijn.

**Vraag 3.3**

*Is de voorraad hout vrijgesteld volgens de vrijstellingsgrenzen van het Besluit stralingsbescherming?*

Vrijstellingsgrenzen:

- Activiteitsconcentratie 10 Bq/g
- Totale activiteit 10 kBq

Werkelijk:

- Activiteitsconcentratie =  $A / m = 0,22 \text{ (MBq)} / 15 \cdot 10^3 \text{ (g)} = 15 \text{ Bq/g}$
- Totale activiteit  $A_{\text{Tot}} = 12 \text{ zakken} \times 0,22 \text{ MBq/zak} = 2,6 \text{ MBq}$

De zakken hout zijn niet vrijgesteld, omdat zowel de totale activiteit als de activiteitsconcentratie van het hout groter zijn dan de vrijstellingsgrens.

**Vraag 3.4**

*Bepaal in het geval dat het hout geheel in de haard was verstoekt de grootte van de effectieve volgdozis voor de buurman.*

$$E(50)_{\text{inh,b}} = 4,8 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$$

$$A_{\text{in}} = 0,1\% \text{ van } A_{\text{Tot}} = 10^{-3} \times 2,6 \text{ (MBq)} = 2,6 \text{ kBq}$$

$$E(50) = e(50)_{\text{inh,b}} \cdot A_{\text{in}} = 4,8 \cdot 10^{-9} \text{ (Sv/Bq)} \times 2,6 \text{ (kBq)} = 12 \text{ } \mu\text{Sv}$$

Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 3</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
3.1	4
3.2	5
3.3	4
3.4	3
<b>Totaal</b>	<b>16</b>



**Vraagstuk 4 Bismut-207 kalibratiebron****Vraag 4.1**

Bereken voor de onafgeschermdde situatie (spectrum 1) het totale meetrendement van de fotopiek van gamma 2 in cps/Bq.

ROI II geeft netto 40.849 counts in 600 s. Dit is 68,1 cps.

De bron was 10,0 kBq op 10 april 1995.

10 augustus 2013 is 18 jaar en 4 maanden later, dus 18,33 jaar.

$$A_t = A_0 \cdot 0,5^{t/T_{1/2}} = 10,0 \text{ (kBq)} \cdot 0,5^{18,33(\text{jaar})/31,55(\text{jaar})} = 6,69 \text{ kBq}$$

Het totale meetrendement =  $68,1 \text{ cps}/6685 \text{ Bq} = 0,0102 \text{ cps/Bq}$ .

**Vraag 4.2**

Bereken de lineïeke verzwakkingscoëfficiënt  $\mu$  voor lood in  $\text{cm}^{-1}$  voor de piek in ROI II. Voor de build-up factor bij deze energie en deze looddikte geldt:  $B = 1,1$ .

Netto counts in ROI II	
Onafgeschermd	40.849
Met 2,0 mm lood	31.630

$$I_d = I_0 \cdot e^{-\mu d} \cdot B$$

$$31.630 \text{ (counts/10 min)} = 40.849 \text{ (counts/10 min)} \cdot e^{-\mu \cdot 0,20 \text{ (cm)}} \cdot 1,1$$

$$e^{-\mu \cdot 0,20 \text{ (cm)}} = 0,7039;$$

$$\ln \text{ van beide kanten geeft: } -\mu \cdot 0,20 \text{ (cm)} = \ln 0,7039 = -0,351$$

$$\mu = 0,351/0,20 \text{ cm} = 1,76 \text{ cm}^{-1}$$

**Vraag 4.3a**

Verklaar de 'uitgesmeerde' verhoging van het spectrum.

Het verschil tussen spectrum 2B en spectrum 1 is het lood dat bovenop de bron ligt. De straling die van de bron komt, gaat alle kanten op, dus ook richting lood. In het lood vinden ionisaties en excitaties plaats, waarbij K-elektronen uit hun baan worden gestoten. Bij opvullen van de ontstane gaten ontstaat karakteristieke röntgenstraling. De energie van de karakteristieke röntgenstraling van lood wordt geteld in ROI I, net als de karakteristieke röntgenstraling die ontstaat bij het verval van van Bi-207.

[N.B.1: Op basis van de getallen uit het Handbook is de energie van de lood-röntgens uit de K-schil resp.  $88,0 - 15,9 = 72,1$  keV,  $88,0 - 15,2$  keV =  $72,8$  keV en  $88,0 - 13,4 = 74,6$  keV.

Als kandidaten als parate kennis hebben (of in een andere bron gevonden hebben) dat de  $K\alpha$  van lood 74 keV is en als zij dus de gegevens van het Handbook niet gebruiken, wordt dat goedgekeurd, mits de rest van de verklaring klopt].

[N.B.2: Het is zelfs precies dezelfde karakteristieke röntgenstraling als onderaan in de lijst van het verval van Bi-207. Het vervalschema van Bi-207 begint met electron capture. Daarna is de kern al Pb-207 geworden. Dus de vervolprocessen: karakteristieke röntgen na EC en ook karakteristieke röntgen als secundair proces na interne conversie, zijn die behoren bij lood].

### **Vraag 4.3b**

*Verklaar deze verhoging van ROI I.*

In het lood boven de bron zal ook het Compton-effect optreden, met als gevolg Compton-verstrooiing. De Compton-verstrooide straling kan alle energieën hebben (lager dan de hardste gamma van de bron) en gaat natuurlijk alle kanten op. Een deel hiervan zal geregistreerd worden in de detector. Dit proces wordt *back-scatter* genoemd (deze term hoeft niet genoemd te worden, maar het noemen van deze term kan worden gezien als deel van het antwoord).

### **Vraag 4.4**

*Verklaar op basis van de vervalgegevens in de bijlage, blz. 14, hoe het mogelijk is, dat de totale yield van karakteristieke röntgenstraling en Auger-elektronen voor  $^{207}\text{Bi}$  groter is dan 1.*

Het verval vindt plaats in 2 stappen: EC gevolgd door gamma-emissie. '1<sup>e</sup> stap'. In het vereenvoudigde vervalschema staat electron capture aangegeven; uit dit vereenvoudigde schema volgt 100% EC. EC geeft als vervolproces karakteristieke röntgen plus Auger-elektronen. Dus vanwege de EC aangegeven in het vervalschema is de yield karakteristieke röntgen plus Auger-elektronen bij elkaar 1.

*Alternatief antwoord dat ook goed gerekend wordt:*

In de lijst 'Uitgezonden straling' staat  $\beta^+$  aangegeven, maar met een yield van slechts  $1,2 \cdot 10^{-4} = 0,00012$ . Met het vervalschema erbij beschouwd, moet er dus vrijwel 100 % EC zijn geweest.

EC geeft als vervolproces karakteristieke röntgen plus Auger-elektronen. Dus vanwege de EC is de yield karakteristieke röntgen plus Auger-elektronen  $1 - 1,2 \cdot 10^{-4} = \text{bijna } 1 (0,99988)$ ].

'2<sup>e</sup> stap'. Daarbij komt dat in de bijlage '83-Bismut-207 uitgezonden straling' op meerdere plekken bij de vermelding van de gamma's ook ce staat, ce betekent dat er interne conversie optreedt. Ook interne conversie geeft als vervolproces karakteristieke röntgen en Auger-elektronen. Doordat de karakteristieke röntgenstraling plus Auger-elektronen zowel bij de [vrijwel] 100% EC ontstaan ('1<sup>e</sup> stap') als na de interne conversie ('2<sup>e</sup> stap'), is de yield groter dan 1 (in de tabel is de yield van karakteristieke X-ray en Auger gesommeerd 1,65).

Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 4</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
4.1	4
4.2	4
4.3a	2
4.3b	2
4.4	4
<b>Totaal</b>	<b>16</b>