

## **UITWERKINGEN**

### **Examen Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van coördinerend deskundige**

---

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC

---

Examendatum: 9 december 2024

- De uitwerkingen zijn een richtlijn voor correctoren. De corrector kan hiervan per subvraag beredeneerd afwijken. De examenkandidaat kan aan de voorgestelde puntenonderverdeling geen rechten ontleen

## Vraagstuk 1: Afscherming van een röntgentoestel

### Vraag 1.1 [4 punten]

Bereken de luchtkerma vrij-in-lucht in punt A in mGy per jaar.

De focus-huidafstand is 85 cm. Luchtkerma vrij-in-lucht op 85 cm afstand van het focus is 0,2 mGy per opname. De afstand tussen focus en punt A is 135 cm.

$$\dot{K}_a = \left(\frac{85 \text{ [cm]}}{135 \text{ [cm]}}\right)^2 \cdot 0,2 \text{ [mGy} \cdot \text{opn}^{-1}] \cdot 100 \text{ [opn} \cdot \text{w}^{-1}] \cdot 52 \text{ [w/j]} \cdot \frac{0,5\%}{100\%} = 2,1 \text{ mGy/j}$$

N.B. 50 in plaats van 52 weken wordt uiteraard ook goed gerekend.

### Vraag 1.2 [3 punten]

Welke dikte aan lood (in halve mm) moet worden geplaatst om in punt A te voldoen aan de vergunning?

$$E = 2,1 \left[\frac{\text{mGy}}{\text{j}}\right] \cdot 1,3 \text{ [Sv/Gy]} = 2,68 \text{ mSv/j} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\text{Benodigde transmissie: } T = \frac{1 \text{ [mSv/jaar]}}{2,68 \text{ [mSv/jaar]}} = 0,37 \quad [1 \text{ punt}]$$

Aflezen in figuur Transmissie van röntgenstraling door lood: 0,5 mm Pb geeft bij 125 kVp een transmissie van ongeveer  $6 \cdot 10^{-2}$  en is dus al ruim voldoende.

[1 punt]

N.B. Deze figuur is relatief lastig af te lezen. De minimaal benodigde looddikte op grond van de benodigde transmissie is 0,1 – 0,2 mm. Op basis van de afgelezen waarde is de conclusie onomstotelijk 0,5 mm lood.

### Vraag 1.3 [6 punten]

Bereken de effectieve jaardosis in punt B en geef aan of aanvullende afschermende maatregelen nodig zijn.

Aflezen in figuur Verstrooiingspercentages voor beton bij verschillende verstrooiingshoeken bij 135° (aflezen op rechter verticale as voor 100 kV - 300 kV):  $5,5 \cdot 10^{-2}$  procent op 1 m per 100 cm<sup>2</sup>.

[Aflezen tussen 0,052 en 0,056 1 punt]

De afstand van de patiënt tot muur punt B is 205 cm

$$E = 0,2 \text{ [mGy} \cdot \text{opn}^{-1}] \cdot 100 \text{ [opn} \cdot \text{w}^{-1}] \cdot 52 \left[\frac{\text{w}}{\text{j}}\right] \cdot \frac{5,5 \cdot 10^{-2}\%}{100\%} \cdot \left(\frac{30 \times 40 \text{ [cm}^2\text{]}}{100 \text{ [cm}^2\text{]}}\right) \cdot \left(\frac{100 \text{ [cm]}}{205 \text{ [cm]}}\right)^2 \cdot 1,4 \left[\frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}\right] = 2,29 \text{ mSv/j} \quad [4 \text{ punten}]$$

Deze waarde is hoger dan de toegestane waarde van 1 mSv/j. Er zijn dus aanvullende maatregelen nodig (b.v. loodglas).

[1 punt]

**Vraag 1.4 [2 punten]**

*Beargumenteer of het nodig is om de deur van het patiëntentoilet met lood te bekleden.*

Loodafscherming in de deur van het patiëntentoilet is niet nodig omdat:

- het röntgentoestel niet gebruikt wordt wanneer de patiënt naar het toilet is;
- de patiënt geen jaar op het toilet aanwezig zal zijn en daardoor slechts een fractie van de toegestane jaardosis kan ontvangen.

[1 correct argument is voldoende voor 2 punten]

**Puntenwaardering**

<b>Vraagstuk 1</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
1	4
2	3
3	6
4	2
<b>Totaal</b>	<b>15</b>

## Vraagstuk 2: Biomedisch onderzoek met $^{14}\text{C}$

### Vraag 2.1 [2 punten]

Bereken de effectieve volgdosis voor de proefpersoon op grond van bovenstaande gegevens.

$$E_{50,\text{ing}} = e(50)_{\text{ing}} \cdot A$$

$$E_{50,\text{ing}} = 5,8 \cdot 10^{-10} [\text{Sv/Bq}] \times 2,0 \cdot 10^6 [\text{Bq}] = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} = 1,2 \text{ mSv}$$

[2 punten]

### Vraag 2.2 [2 punten]

Beargumenteer dat de effectieve volgdosis op basis van deze afwijkende biologische halveringstijd in dit geval geschat kan worden met de verhouding van de biologische halveringstijden.

De effectieve volgdosis is evenredig met het aantal desintegraties ( $U_s$ ) in het lichaam [1 punt]

en  $U_s$  is evenredig met de effectieve halveringstijd wanneer de effectieve halveringstijd  $\ll$  de volgtijd van 50 jaar. [1 punt]

Merk op dat de effectieve halveringstijd in dit geval gelijk is aan de biologische halveringstijd vanwege de grote fysische halveringstijd.

Noemen van alleen het volgende argument levert 1 punt op:  
"Alle andere uitgangspunten van de berekening zijn gelijk."

Extra informatie (geen onderdeel van de gevraagde uitwerking):

De gegeven biologische halveringstijd (40 h) en de biologische halveringstijd die ten grondslag ligt aan de  $e(50)_{\text{ing}}$  uit het Handboek (40 d), schelen een factor 24. Omdat de uitgangspunten voor de berekening verder identiek zijn zou men een  $E_{50}$  verwachten van  $1,2 \text{ mSv} / 24 = 0,05 \text{ mSv} = 50 \text{ } \mu\text{Sv}$  bij een inname van  $2,0 \text{ MBq}$ .

Het is goed om te noemen dat in dit model een fractie van  $m_{\text{lever}}/m_{\text{totale\_lichaam}} = 1800 / 70000 = 0,026$  (2,6%) van de activiteit naar de lever gaat in plaats van de in vraag 2.3a genoemde 10% die uit proefdieronderzoek is gebleken. Dit leidt tot een kleine afwijking die we hier buiten beschouwing laten.

**Vraag 2.3a [3 punten]**

Bereken het aantal desintegraties  $U_s$  in de lever.

De biologische halveringstijd is veel kleiner dan de fysische halveringstijd, waardoor de effectieve halveringstijd gelijk is aan de biologische.

$$U_s = f_1 \times C_s \times A \times T_{1/2}(\text{eff}) / 0,693$$

waarin  $f_1$  de fractie die vanuit het maag-darmkanaal in het bloed wordt opgenomen ( $f_1 = 1$ ), en  $C_s$  de fractie is die vanuit het bloed in het desbetreffende orgaan terechtkomt.

Lever:

$$U_s = 1 \times 0,1 \times 2,0 \cdot 10^6 \text{ [Bq]} \times 40 \text{ [h]} \times 3600 \text{ [s/h]} / 0,693 = 4,2 \cdot 10^{10} \text{ [Bq}\cdot\text{s]}$$

Methode/formule [1 punt]

Het weglaten van de factor  $f_1$  wordt niet fout gerekend

Uitwerking [2 punten]

Uiteraard wordt een berekening via  $U_s = \int A_s(t)dt$ , waarbij  $A_s$  de activiteit in het lichaam is, goed gerekend.

Extra informatie (geen onderdeel van de gevraagde uitwerking):

Lichaam (m.u.v. de lever):

$$U_s = 1 \times 0,9 \times 2,0 \cdot 10^6 \text{ [Bq]} \times 40 \text{ [h]} \times 3600 \text{ [s/h]} / 0,693 = 3,7 \cdot 10^{11} \text{ [Bq}\cdot\text{s]}$$

**Vraag 2.3b [3 punten]**

Toon aan dat de specifieke effectieve energie  $SEE(\text{lever} \leftarrow \text{lever})$  in dit geval gelijk is aan  $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ MeV}\cdot\text{g}^{-1}$  per desintegratie.

$$\begin{aligned} SEE(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) &= \text{yield}_\beta \times E_{\beta,\text{gem}} \times \text{SAF}(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) \\ &= \text{yield}_\beta \times E_{\beta,\text{gem}} \times \text{AF}(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) / m_{\text{lever}} \end{aligned}$$

$\text{AF}(S \leftarrow S) = 1$  voor  $\beta$ -deeltjes, ongeacht het orgaan

$$\text{SAF}(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) = 1 / 1800 \text{ [g]} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ [g}^{-1}\text{]}$$

$$\text{SEE} = 1,0 \times 0,049 \text{ [MeV]} \times 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ [g}^{-1}\text{]} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ MeV}\cdot\text{g}^{-1} \text{ per desintegratie}$$

Methode [1 punt]

Uitwerking [2 punten]

**Vraag 2.3c [4 punten]**

Bereken de bijdrage van de equivalente orgaandosis van de lever aan de effectieve volgdosis  $E_{50}$ .

$$\begin{aligned} H_{\text{lever}} &= 1,6 \cdot 10^{-10} [\text{J} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}] \times U_S \times w_R \times \text{SEE (lever} \leftarrow \text{lever)} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-10} [\text{J} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}] \times 4,2 \cdot 10^{10} [\text{Bq} \cdot \text{s}] \times 1 [\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}] \\ &\quad \times 2,7 \cdot 10^{-5} [\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (\text{Bq} \cdot \text{s})^{-1}] = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,18 \text{ mSv} \end{aligned}$$

Bijdrage aan  $E_{50}$ :

$$w_{\text{lever}} \times H_{\text{lever}} = 0,04 \times 0,18 [\text{mSv}] = 0,0072 \text{ mSv} = 7,2 \mu\text{Sv}$$

Methode (formule)

[1 punt]

Uitwerking

[3 punten]

**Vraag 2.4 [4 punten]**

Schat de bijdrage aan de effectieve volgdosis  $E_{50}$  (in mSv) ten gevolge van de blootstelling van het maag-darmkanaal op grond van ICRP-30 én beschrijf kwalitatief de gevolgen van de overgang naar ICRP-100 voor deze bijdrage.

70% van de ingenomen activiteit verlaat het lichaam uiteindelijk via excretie:

$$2,0 \text{ MBq} \times 0,70 = 1,4 \text{ MBq}$$

Gebruikmakend van de vuistregel leidt dit tot een bijdrage aan  $E_{50}$  van

$$E_{50} = 1,4 [\text{MBq}] \times 0,2 [\text{mSv/MBq}] = 0,28 \text{ mSv.}$$

Deze bijdrage – die veel groter is dan de eerder berekende bijdragen – komt in ICRP-30 tot stand doordat men aanneemt dat de stralingsgevoelige cellen in het maag-darmkanaal blootstaan aan de helft van de dosis van de inhoud van het maag-darmkanaal. In ICRP-100 is de SAF voor het overgrote deel van de uitgezonden  $\beta$ -deeltjes echter 0 ( $E_{\beta, \text{gem}} = 0,049 \text{ MeV}$ ) omdat aannemelijk is dat deze  $\beta$ -deeltjes volledig in de inhoud van het maag-darmkanaal worden geabsorbeerd. De bijdrage zal dus (veel) lager worden. In de praktijk blijkt dat de bijdrage verwaarloosbaar is.

Uitwerking

[2 punt]

Kwalitatieve argument

[2 punt]

## Puntenwaardering

<b>Vraagstuk 2</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
1	2
2	2
3a	3
3b	3
3c	4
4	4
<b>Totaal</b>	<b>18</b>

### Vraagstuk 3: Handbesmetting bij een cyclotron

#### Vraag 3.1 [2 punten]

Geef een activeringsreactie met een cyclotron die  $^{81}\text{Rb}$  oplevert.

In een cyclotron worden protonen versneld en op een target gericht.

Door de vrijkomende bindingsenergie ontstaat altijd een prompte gamma, dus:



#### Vraag 3.2 [3 punten]

Noem drie stralingshygiënische stappen die je moet nemen wanneer de HVK-monitor in alarm gaat? Let hierbij – indien relevant – op de volgorde.

- Handen wassen [1 punt]
- Nogmaals meten. [1 punt]
- Indien schoon:
  - nadenken over besmettingen (oorzaak en locaties), [1 punt]
  - ruimte/werkplek (opnieuw) controleren. [1 punt]
- Indien niet-schoon:
  - TMS en collega's inlichten. [1 punt]
  - Checken externe factoren die meetresultaat beïnvloeden. [1 punt]

[1 punt per goed antwoord, 1 punt aftrek voor een onlogische volgorde.]

#### Vraag 3.3 [2 punten]

Beargumenteer waarom de waarden van kolom HPR wèl geschikt zijn om de grootte van de huidbesmetting (in Bq) te bepalen en die van kolom HRR niet.

Bij de meting van de handrug (kolom HRR) klopt de efficiëntie niet, omdat de bètadeeltjes door de hand worden geabsorbeerd. Dit speelt niet bij het meten van de handpalm (kolom HPR). [2 punten]

[1 punt voor noemen absorptie straling]

[1 punt voor noemen invloed op efficiëntie]

**Vraag 3.4 [4 punten]**

Toon door middel van een berekening aan dat de gemeten waarde op de HVK van 1 december overeenkomt met het verwachte teltempo op grond van de effectieve halveringstijd.

Bereken eerst de effectieve halveringstijd van een huidbesmetting met  $^{81}\text{Rb}$ .

$$\frac{1}{T_{1/2,eff}} = \frac{1}{T_{1/2,fysisch}} + \frac{1}{T_{1/2,hand}} = \frac{1}{4,58} + \frac{1}{72} = \frac{1}{4,3} \rightarrow \quad [1 \text{ punt}]$$

$$T_{1/2,eff} = 4,3 \text{ h} \quad [1 \text{ punt}]$$

Tussen 30 november 12:00 uur en 1 december 8:43 uur, zit 20 uur en 43 minuten. De effectieve halveringstijd is 4,3 uur:

$$868 \text{ [cps]} \cdot 0,5^{\frac{20+\frac{43}{60}[\text{h}]}{4,3[\text{h}]}} = 30,8 \text{ cps} \approx 30 \text{ cps} \quad [2 \text{ punten}]$$

N.B. Om het effectieve verval aan te tonen, wordt elk tijdsinterval tussen november en december goed gerekend, mits niet voor 30 november 11:58 wordt gekozen (toen had de operator z'n handen nog niet gewassen).

Ook goed gerekend wordt een gemiddeld teltempo, gerekend op 14:15 uur, waarbij er 18 uur en 28 minuten zijn verstreken:

$$\frac{868 + 753 + 610 + 420}{4} \text{ [cps]} \cdot 0,5^{\frac{18+\frac{28}{60}[\text{h}]}{4,3[\text{h}]}} = 33,8 \text{ [cps]} \approx 30 \text{ cps}$$

**Vraag 3.5a [5 punten]**

Bereken de equivalente huiddosis voor de restbesmetting, uitgaande van 868 cps direct na het handen wassen.

$$\text{Aflezen } H_{\text{huid}} = 3 \cdot 10^{-10} [\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{cm}^2] \quad [1 \text{ punt}]$$

868 cps over een oppervlak van  $10 \text{ cm}^2$ , met een efficiëntie van de detector van  $0,1 \text{ cps/Bq}$ , geeft beginactiviteit per  $\text{cm}^2$  van:

$$\frac{868[\text{cps}]}{10[\text{cm}^2] \cdot 0,1[\text{cps} \cdot \text{Bq}^{-1}]} = 868 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2} \quad [2 \text{ punten}]$$

Uitgaande van volledig verval, geldt:

$$H_{\text{huid}} = DCC_{\text{huid}} \times A_{\text{hand}}(0) \times \frac{T_{1/2,eff}}{\ln(2)}$$

$$= 868 [\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}] \cdot \frac{4,3 [\text{uur}] \cdot 3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}}\right]}{\ln(2)} \cdot 3 \cdot 10^{-10} [\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{cm}^2] = 5,8 \text{ mSv} \quad [2 \text{ punten}]$$

Beargumenteerd (conservatief) uitgaan van  $T_{1/2,fys}$  wordt goed gerekend.

**Vraag 3.5b [2 punten]**

*Beargumenteer of u op grond van het antwoord bij vraag 3.5a kunt concluderen of de limiet van de huiddosis van deze blootgestelde werknemer is overschreden.*

De huiddosislimiet voor blootgestelde werknemers is 500 mSv gemiddeld over enig cm<sup>2</sup>. [1 punt]

De bij 3.5a berekende huiddosis zit hier ruim onder. De hand was echter al voor het handen wassen besmet en het is niet bekend hoe lang deze besmetting aanwezig is geweest. Een definitieve conclusie is dus niet te trekken op grond van alleen het antwoord op vraag 3.5a. [1 punt]

**Puntenwaardering**

<b>Vraagstuk 3</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
3.1	2
3.2	3
3.3	2
3.4	4
3.5a	5
3.5b	2
<b>Totaal</b>	<b>18</b>

## Vraagstuk 4: Detectierendement voor Ir-192

### Vraag 4.1 [2 punten]

Bereken het detectierendement, uitgedrukt in cps/Bq, van de AD-17 voor een besmetting van Cl-36 die homogeen verspreid is over een oppervlak van 6,2 cm<sup>2</sup>.

De besmettingsgraad voor Cl-36 is volgens de tabel 0,79 Bq/cm<sup>2</sup> per cps.  
 Voor een besmet oppervlak van 6,2 cm<sup>2</sup> is de besmetting per geregistreerde cps:  
 0,79 [Bq/cm<sup>2</sup> per cps] x 6,2 [cm<sup>2</sup>] = 4,898 Bq per cps [1 punt]

Het rendement is dus 1/(4,898 [Bq per cps]) = 0,20(4) cps/Bq [1 punt]

### Vraag 4.2a [2 punten]

Beargumenteer op basis van de tabel in de bijlage welke nucliden gebruikt kunnen worden voor het vaststellen van het verband tussen de maximale bètaenergie en het detectierendement (in counts per uitgezonden bètadeeltje)?

Enkel zuivere bètastralers kunnen worden gebruikt, [1 punt]  
 die alleen bètadeeltjes uitzenden met één enkele eindpuntenergie.  
 Dit zijn in bijlage blz. 10: C-14, P-32, Cl-36 en Ni-63.

Wanneer tevens fotonen worden uitgezonden heeft dat invloed op het detectierendement. [1 punt]

Het niet noemen van één eindpuntenergie voor de bètadeeltjes geeft geen aftrek, omdat het in dit geval niets verandert aan de keuze uit de selectie.

Tritium kan in feite niet worden gebruikt omdat deze bèta's door het venster van de GM-buis volledig worden geabsorbeerd (de tabel bevat dan ook geen waarde voor het detectierendement van tritium). Het noemen van tritium hoeft echter niet fout gerekend te worden.

### Vraag 4.2b [4 punten]

Bereken het detectierendement (cps/Bq) van de AD-17 voor de bètastraling van Ir-192.

Er zijn 2 bèta's:

Yield = 0,415 per desintegratie en  $E_{\beta, \max} = 0,536$  MeV [1 punt]

Yield = 0,481 per desintegratie en  $E_{\beta, \max} = 0,672$  MeV [1 punt]

$\epsilon_{AD-17} = 0,23E_{\beta, \max} + 0,034$

$\epsilon_{AD-17} = 0,415(0,23 \times 0,536 \text{ [MeV]} + 0,034) + 0,481(0,23 \times 0,672 \text{ [MeV]} + 0,034) = 0,06527 + 0,09070 = 0,156 \text{ cps/Bq} = 0,16 \text{ cps/Bq}$  [2 punten]

**Vraag 4.3a [2 punten]**

*Maak aannemelijk dat dit detectierendement in goede benadering ook geldt voor de fotonenstraling van Ir-192.*

De energie van de uitgezonden fotonen ligt voor vrijwel alle door Ir-192 uitgezonden fotonen in het gebied tussen de 300 en 600 keV.

Uit de figuur in de bijlage (blz. 12) blijkt dat de relatieve detectorrespons tussen circa 300 keV en 800 keV nagenoeg constant is met een waarde van 1 (let op de logaritmische schaalverdeling op de horizontale (energie) as).

De respons van de AD-17 voor fotonen uitgezonden door Cs-137/Ba-137 zal dus gelijk zijn aan die voor fotonen uitgezonden door Ir-192. [2 punten]

**Vraag 4.3b [3 punten]**

*Bereken het totale detectierendement (in cps/dps) van de AD-17 voor Ir-192.*

Het detectierendement voor fotonen is 0,01 counts/foton. Het aantal fotonen per desintegratie is:

$$0,828 + 0,290 + 0,297 + 0,478 + 0,082 + 0,033 + 0,032 = 2,04 \quad [1 \text{ punt}]$$

Het detectierendement voor de fotonen van Ir-192 is dus:

$$2,04 \text{ [fotonen/desintegratie]} \times 0,01 \text{ [counts/foton]} = 0,02 \text{ counts/desintegratie} \\ = 0,02 \text{ cps/Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

Het totale detectierendement is  $0,16 \text{ cps/Bq} + 0,02 \text{ cps/Bq} = 0,18 \text{ cps/Bq}$  [1 punt]

**Vraag 4.4 [2 punten]**

*Geef aan of een activiteit van 18,5 Bq Ir-192 aan te tonen is met behulp van deze detector. Geef expliciet aan welk criterium u hierbij hanteert.*

18,5 Bq levert een netto teltempo van  $18,5 \text{ [Bq]} \times 0,18 \text{ cps/Bq} = 3,3 \text{ cps}$ .

Antwoord opties:

- 3,3 cps is meer dan het achtergrondteltempo en aantoonbaar. [2 punten]
- 3,3 cps is meer dan 2x het achtergrondteltempo, dus significant. [2 punten]
- Antwoorden met  $\sqrt{N}$  of  $\sqrt{(R/t)}$  leveren geen punten op omdat N en t onbekend zijn.

### Puntenwaardering

<b>Vraagstuk 4</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
1	2
2a	2
2b	4
3a	2
3b	3
4	2
<b>Totaal</b>	<b>15</b>