

**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: 13 december 2021

- 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: Risico-inventarisatie en –evaluatie (RI&E) dierenkliniek [19 punten]

### Vraag 1.1 [5 punten]

Bereken het dosisoppervlakteproduct per foto [in Gy·cm<sup>2</sup>].

Aflezen onderschrift bijlage 1, geeft: 6,1 mGy·m<sup>2</sup>·mA<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup> [1 punt]

$$6,1 [mGy \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1} \text{ op } 1 \text{ meter}] \times \frac{1^2 [m^2]}{1,1^2 [m^2]} \times 8,0 [mA \cdot s] \times \frac{1}{60} [min \cdot s^{-1}] \times 10^{-3} \left[ \frac{Gy}{mGy} \right] \times 600 [cm^2] = 0,4 Gy \cdot cm^2$$

Overige bewerkingen; 1 punt per bewerkingsstap [3 punten]  
Uitrekenen (incl. omrekenen eenheden) [1 punt]

### Vraag 1.2a [2 punten]

Beargumenteer waarom alle curves bij toenemende looddikte naderen tot een waarde die aanzienlijk lager is dan 100%.

Met het beschermingsrendement wordt het effect van het loodschort op de effectieve dosis weergegeven. Delen van het lichaam (waaronder de schildklier, speekselklieren een deel van de huid en de hersenen) worden niet beschermd, waardoor een schort dat helemaal geen straling door zou laten geen 100% bescherming biedt.

### Vraag 1.2b [4 punten]

Bereken de effectieve jaardosis voor de dierenarts.

Aflezen beschermingsrendement iets onder de 70 kV lijn: range 80-83% wordt goed gerekend. [1 punt]

$$0,4 [Gy \cdot cm^2 \cdot foto^{-1}] \times 1000 [foto's \cdot jaar^{-1}] \times 16,0 [\mu Gy \cdot (Gy \cdot cm^2)^{-1}] \times 0,8 [Sv \cdot Gy^{-1}] \times (1 - 0,83) = 8,7 \cdot 10^2 \mu Sv = 0,9 mSv \cdot jaar^{-1}$$

Correctie beschermingsrendement dosisverlaging: (1 - 0,83) [1 punt]  
Overige bewerkingen; 1 punt per bewerkingsstap. [2 punten]

**Vraag 1.3 [4 punten]**

Bereken de equivalente huiddosis van de hand, gemiddeld over enig  $cm^2$  bestraald huidoppervlak, als gevolg van de beschreven voorziene onbedoelde gebeurtenis.

Methode 1

Aflezen bijlage 1.1 bij 0,5 mm lood:  $4 \cdot 10^{-2} [mGy \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1} \text{ op 1 meter}]$  [1 punt]  
 Alle afgelezen waarden tussen  $2,5 \cdot 10^{-2}$  en  $5 \cdot 10^{-2}$  worden goed gerekend.

$$0,4 [Gy \cdot cm^2] \times 1,25 \times \frac{4 \cdot 10^{-2} [mGy \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1} \text{ op 1 meter}]}{6,1 [mGy \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1} \text{ op 1 meter}]} \times \frac{1}{600 [cm^2]} \times 1,0 [Sv \cdot Gy^{-1}]$$

$$= 5,5 \cdot 10^{-6} [Sv] = 6 \mu Sv$$

Normeren (delen door  $6,1 [mGy \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1} \text{ op 1 meter}]$ ) [1 punt]  
 Overige bewerkingen: 1 punt per bewerkingsstap. [2 punten]

Methode 2 (via de berekeningsmethodiek van vraag 1.1, startend bij het toestel)

$$4 \cdot 10^{-2} [mGy \cdot mA^{-1} \cdot min^{-1} \text{ op 1 meter}] \times \frac{1^2 [m^2]}{1,1^2 [m^2]} \times 8,0 [mA \cdot s] \times \frac{1}{60} [min \cdot s^{-1}]$$

$$\times 1,25 \times 1,0 \left[ \frac{Sv}{Gy} \right] \times 10^3 \left[ \frac{\mu Sv}{mSv} \right] = 5,5 \cdot 10^{-6} [Sv] = 6 \mu Sv$$

**Vraag 1.4 [4 punten]**

Concludeer op basis van voorgaande berekeningen, gegevens en relevante dosiscriteria in welke blootstellingscategorie de dierenarts moet worden ingedeeld.

De effectieve dosis ten gevolge van de reguliere blootstelling bedraagt:

$$\frac{0,9 [mSv]}{(1-0,83)} = 5,3 mSv \quad [1 \text{ punt}]$$

Argument of berekening: de invloed van de voorziene onbedoelde gebeurtenis op de effectieve dosis is irrelevant. [0,5 punt]

Argument: de potentiële blootstelling van de voorziene onbedoelde gebeurtenis geeft een dermate kleine toename van de effectieve dosis dat deze niet relevant is.

Berekening: de voorziene onbedoelde gebeurtenis vindt  $1000/50 = 20$  keer per jaar plaats, dus:

$$\frac{20 [vog's]}{1000 [foto's]} \times 0,25 [extra \text{ belichtingstijd}] \times 5,3 [mSv] + 5,3 [mSv] = 5,3 mSv$$

De equivalente huiddosis per vog: 0,7 mSv; dit gebeurt 20 keer per jaar.

$$H_{\text{huid}} = 20 \times 0,7 = 14 mSv. \quad [1 \text{ punt}]$$

Conclusies:

Op basis van onafgeschermd effectieve dosis ( $5,3 \text{ mSv} < 6 \text{ mSv}$ ) en de onafgeschermd equivalente huiddosis ( $14 \text{ mSv} \ll 150 \text{ mSv}$ ) is de juiste indeling die van blootgesteld werknemer categorie B. [1,5 punt]  
0,5 punt per dosiscriterium en 0,5 punt voor de conclusie.

NB Wanneer beargumenteerd wordt dat er veel onzekerheden in de berekening zitten (zoals de afstand) die ervoor kunnen zorgen dat de berekende jaarlijkse blootstelling groter kan zijn dan 6 mSv en waardoor voor de indeling categorie A wordt gekozen, dan wordt dit goed gerekend.

Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 1</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
1.1	5
1.2a	2
1.2b	4
1.3	4
1.4	4
<b>Totaal</b>	<b>19</b>

## Vraagstuk 2: Activering fixatiemaskers bij protonetherapie [15 punten]

### Vraag 2.1 [2 punten]

Geef een mogelijke kernreactie die optreedt bij het ontstaan van  $^{11}\text{C}$  tijdens de bestraling van het masker met protonen.

De gevraagde reactie (verkorte notatie) is:  $^{12}\text{C}(p,pn)^{11}\text{C}$  [2 punten]

In de lange notatie:  $^1_1\text{H} + ^{12}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_6\text{C} + ^1_1\text{H} + ^1_0\text{n}$

Ook goed te rekenen:  $^{12}\text{C}(p,d)^{11}\text{C}$  of  $^1_1\text{H} + ^{12}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_6\text{C} + ^2_1\text{H}$

### Vraag 2.2 [4 punten]

Toon met een berekening aan dat de kans dat een interactie van een proton met het fixatiemasker plaatsvindt (en waarbij een  $^{11}\text{C}$ -kern ontstaat), gelijk is aan  $2,3 \cdot 10^{-4}$ .

De werkzame doorsnede voor deze reactie met 150 MeV-protonen kan uit tabel 1 bepaald worden: 46 mbarn (dit mag door lineaire interpolatie, waarbij het antwoord 46,4 mbarn ook goed wordt gerekend, maar het beargumenteerd weglaten van lineaire interpolatie omdat de getabelleerde waarde dicht bij 150 MeV ligt, wordt goed gerekend). [1 punt]

De kans dat een interactie plaatsvindt is:  $1 - e^{-\sigma nd}$ , waarbij  $\sigma$  de werkzame doorsnede,  $n$  het aantal atoomkernen per volume-eenheid en  $d$  de dikte van het te passeren materiaal is.

$$\sigma = 46 \text{ mbarn} = 46 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$$

$$n = \frac{\rho \cdot N_A}{M} = \frac{1,0 [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}] \times 6,022 \cdot 10^{23} [\text{atomen} \cdot \text{mol}^{-1}]}{12 [\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}]} = 5,02 \cdot 10^{22} \text{ atomen} \cdot \text{cm}^{-3}$$

[1 punt]

$$d = 1,0 \text{ mm} = 0,10 \text{ cm}$$

En dus:

$$\sigma nd = 46 \cdot 10^{-27} [\text{cm}^2] \times 5,02 \cdot 10^{22} [\text{atomen} \cdot \text{cm}^{-3}] \times 0,1 [\text{cm}] = 2,3 \cdot 10^{-4}$$

Invullen levert als antwoord dat de kans gelijk is aan  $2,3 \cdot 10^{-4}$ . [2 punten]

NB De benadering  $\sigma nd$ , die voor kleine waarden van de kans geldt, wordt uiteraard ook goed gerekend – het masker zal immers nooit een grote invloed op de dosis(verdeling) in de patiënt mogen veroorzaken.

**Vraag 2.3 [3 punten]**

Bereken de door een bestraling geïnduceerde  $^{11}\text{C}$ -activiteit in het masker.

Slechts 0,50% van de geproduceerde protonen valt in op het masker, ofwel  $5,0 \cdot 10^{-3} \times 1,8 \cdot 10^{13} = 9,0 \cdot 10^{10}$  protonen.

Het totaal aantal in het masker geproduceerde  $^{11}\text{C}$ -kernen wordt dan:

$$N = 9,0 \cdot 10^{10} \times 2,31 \cdot 10^{-4} = 2,1 \cdot 10^7 \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{20,39 [\text{min}] \times 60 [\text{s} \cdot \text{min}^{-1}]} = 5,67 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

De activiteit =  $A = \lambda \cdot N$ , dus:

$$5,67 \cdot 10^{-4} [\text{s}^{-1}] \times 2,1 \cdot 10^7 = 11,8 \cdot 10^3 \text{ Bq} = 12 \text{ kBq} \quad [2 \text{ punten}]$$

NB In de praktijk moet men zelf op basis van 'de totale lading' per bestraling nog het aantal geproduceerde protonen uitrekenen. In deze opgave wordt per bestraling een bundel protonen met een totale lading van 0,8 nAh (= 0,8 (nC/s)h) geproduceerd. De elementaire lading bedraagt  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , dus bedraagt het aantal geproduceerde protonen:  
 $0,8 \text{ (nC/s)h} \times 3600 \text{ (s/h)} / 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ (C per proton)} = 1,8 \cdot 10^{13}$ .

**Vraag 2.4 [3 punten]**

Bereken het aantal uren dat nodig is om het masker te mogen vrijgeven.

De activiteitsconcentratie direct na de bestraling bedraagt:

$$C(0) = A(0)/40 = 11,8 \cdot 10^3 [\text{Bq}] / 40 [\text{g}] = 294 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1} = 2,9 \cdot 10^2 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1} \quad [1 \text{ punt}]$$

Om het masker te mogen vrijgeven moet de activiteitsconcentratie minder dan 1 Bq/g zijn.

De benodigde tijd wordt nu berekend uit:  $C(t) = C(0) \cdot e^{-\lambda t}$

Met  $\lambda = 5,67 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , vinden we:

$$t = \ln(C(0) / C(t)) / \lambda = \ln(294 [\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}] / 1 [\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}]) / 5,67 \cdot 10^{-4} [\text{s}^{-1}] = 1,0 \cdot 10^4 \text{ s}$$

$$t = 1,0 \cdot 10^4 [\text{s}] / 3600 [\text{s/h}] = 2,8 \text{ h.} \quad [2 \text{ punten}]$$

Uitgaande van 10 kBq geldt  $C(0) = 10 \cdot 10^3 / 40 = 250 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$

$$t = \ln(250 [\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}] / 1 [\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}]) / 5,67 \cdot 10^{-4} [\text{s}^{-1}] = 9,7 \cdot 10^3 \text{ s} = 2,7 \text{ h}$$

**Vraag 2.5 [3 punten]**

Verifieer dat het door het therapiecentrum gehanteerde criterium voldoet aan de wettelijke vrijgavegrens.

Bij operationele vrijgave bedraagt het bruto teltempo tweemaal het achtergrondteltempo, ofwel 20 tps.

Het netto teltempo is dan  $20 - 10 = 10$  tps. [1 punt]

Het meetinstrument heeft een totaal detectierendement van 0,3 telpulsen per desintegratie van  $^{11}\text{C}$ . De activiteit bij vrijgave bedraagt dan

$$10 \text{ [tps]} / 0,30 \left[ \frac{\text{pulsen}}{\text{desintegratie}} \right] = 33 \text{ Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

De activiteitsconcentratie in het masker is dan  $33 \text{ [Bq]} / 40 \text{ [g]} = 0,83 \text{ Bq/g}$ .

Het criterium voldoet dus aan de wettelijke vrijgavegrens. [1 punt]

Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 2</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
2.1	2
2.2	4
2.3	3
2.4	3
2.5	3
<b>Totaal</b>	<b>15</b>

### Vraagstuk 3: Inwendige besmetting met I-125 [18 punten]

#### Vraag 3.1 [4 punten]

Bereken de activiteit van het in het filter geabsorbeerde jodium op het moment dat het filter wordt vervangen.

Na 1 jaar zijn 6 halveringstijden verstreken, men kan er dus vanuit gaan dat een evenwicht is ingesteld (ofwel:  $A_{\text{evenwicht}} = \frac{\dot{P}}{\lambda}$ ). [1 punt]

1 jaar is 52 weken

$$A_{\text{evenwicht}} = \frac{\dot{P}}{\lambda} = \frac{0,01 [1\%] \times 50 [MBq \cdot \text{week}^{-1}]}{1,35 \cdot 10^{-7} [s^{-1}] \times 3600 [s \cdot h^{-1}] \times 24 [h \cdot d^{-1}] \times 7 [d \cdot \text{week}^{-1}]}$$

$$= 6,1 \text{ MBq}$$

Productietempo [1 punt]

Vervalconstante [1 punt]

Uitrekenen [1 punt]

Een berekening van de activiteit gebruik makend van de algemene formule

$A(t) = \frac{\dot{P}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \cdot t})$  wordt uiteraard ook goed gerekend.

Aan een beredenering van de evenwichtsactiviteit, zonder berekening, kunnen deels punten worden toegekend.

#### Vraag 3.2a [3 punten]

Bereken de effectieve volg dosis, veroorzaakt door deze inwendige besmetting.

$$A_{\text{schildklier}} = 5,7 \text{ kBq}$$

$$A_{\text{inname}} = 5,7 \text{ [kBq]} / 2,6 \cdot 10^{-1} [\text{Bq/Bq}_{\text{inname}}] = 22 \text{ kBq} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$E_{50} = A_{\text{inname}} \times e(50)_{\text{inh}} = 22 [\text{kBq}] \times 1,4 \cdot 10^{-8} [\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}] = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,31 \text{ mSv}$$

[2 punten]

Uitgaan van 30% opname in de schildklier wordt ook goed gerekend:

$$A_{\text{inname}} = 5,7 \text{ [kBq]} / 3,0 \cdot 10^{-1} = 19 \text{ kBq} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$E_{50} = A_{\text{inname}} \times e(50)_{\text{inh}} = 19 [\text{kBq}] \times 1,4 \cdot 10^{-8} [\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}] = 2,66 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,27 \text{ mSv}$$

[2 punten]



**Vraag 3.2b [2 punten]**

*Beargumenteer aan de hand van de gegevens uit het Handboek Radionucliden (zie bijlage) dat het in dit specifieke geval voor de effectieve volg dosis nauwelijks uitmaakt in welke chemische vorm de besmetting heeft plaatsgevonden.*

Inhalatie van SR-1 (I<sub>2</sub> damp) heeft ten opzichte van klasse F (overige verbindingen) een 2x hogere e<sub>50</sub>. Volgens de gegevens voor schildkliertelling leidt inname van 1 Bq I<sub>2</sub> damp na 3 dagen ook tot een ongeveer 2x hogere opname in de schildklier dan inhalatie van klasse F. Hieruit volgt dat bij *meting van 1 Bq in de schildklier* t.g.v. I<sub>2</sub> damp, de geïnhaleerde activiteit dus ruwweg de helft van de activiteit is die geïnhaleerd zou zijn van een klasse F verbinding. Beide zullen daardoor ongeveer dezelfde effectieve volg dosis geven.

Bij ongevallen is het verstandig om een *worst case* berekening te doen – daarom wordt normaliter van de meest conservatieve e<sub>inh/ing</sub>(50) uitgegaan – bij de beantwoording van deze vraag is dit antwoord NIET voldoende (1 punt aftrek).

NB Standaard wordt bij inwendige besmetting in het radionuclidenlaboratorium uitgegaan van inhalatie, omdat ingestie niet mogelijk is als aan de standaard veiligheidseisen wordt voldaan. Ingestie zou in dit specifieke geval overigens ook ongeveer dezelfde effectieve volg dosis geven.

**Vraag 3.3a [4 punten]**

*Bereken het aantal desintegraties in de schildklier (U<sub>schildklier</sub>) gedurende de 50 jaar na het optreden van de inwendige besmetting.*

De activiteit in de schildklier bedraagt 5,7 kBq.

De biologische halveringstijd is 90 dagen, de fysische halveringstijd is 60 dagen.

$$T^{1/2}_{eff} = 1 / \left( \frac{1}{90} [d^{-1}] + \frac{1}{60} [d^{-1}] \right) = 36 [d] = 36 [d] \times 24 [h \cdot d^{-1}] \times 3600 \left[ \frac{s}{h} \right] = 3,1 \cdot 10^6 s$$

[2 punten]

$$U_s = A / \lambda_{eff} = \frac{5,7 [kBq]}{\left[ \frac{\ln(2)}{3,1 \cdot 10^6 [s]} \right]} = 5,7 \cdot 10^3 / 2,23 \cdot 10^{-7} = 26 \cdot 10^9 \text{ desintegraties}$$

[2 punten]

**Vraag 3.3b [5 punten]**

Bereken welk percentage van de bij vraag 3.2a berekende effectieve volgdozis wordt veroorzaakt door de opname van  $^{125}\text{I}$  in de schildklier.

$$H_{\text{schildklier}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [J/eV]} \times \sum_i U_{\text{schildklier}} \cdot w_{R,i} \cdot y_i \cdot E_i \cdot AF_i(\text{schildklier} \leftarrow \text{schildklier}) / m_{\text{schildklier}} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [J/eV]} \times 26 \cdot 10^9 \times (1 \times 41 \cdot 10^3 \text{ [eV]} \times 0,18 + 1 \times 16,5 \cdot 10^3 \text{ [eV]} \times 1) / 0,020 \text{ [kg]} = 4,9 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = 4,9 \text{ mGy} \quad [2 \text{ punten}]$$

elke 'gemiste' of fout ingevulde factor levert een aftrek van 0,5 punt op.

$$\text{Bijdrage aan } E_{50} = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ [Gy]} \times 1 \text{ [Sv/Gy]} \times 0,05 = 0,24 \text{ mSv.} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\text{Het deel is dan } 0,24 \text{ [mSv]} / 0,31 \text{ [mSv]} = 0,79 = 79\% \\ \text{òf } 0,24 \text{ [mSv]} / 0,266 \text{ [mSv]} = 0,92 = 92\% \quad [1 \text{ punt}]$$

NB1 In deze opgave is voor een weefselweegfactor van 0,05 gekozen om in lijn te blijven met de gegevens uit het Handboek Radionucliden die ook op deze weefselweegfactor gebaseerd zijn.

NB2 De werkelijke waarde ligt heel dicht tegen 100% aan. Het rekenen met de gemodelleerde 30% opname in de schildklier is daarmee het best in overeenstemming.

NB3 Rekenen met de fictieve waarde levert getallen op die ongeveer 25% lager zijn dan hier berekend.

Puntenwaardering:

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

## Vraagstuk 4: Meting laagdikte met $^{85}\text{Kr}$ [13 punten]

### Vraag 4.1 [5 punten]

Bereken het meetrendement in cps/Bq van de gebruikte meetopstelling wanneer een laagdikte van  $50 \text{ mg/cm}^2$  wordt gemeten. Geef aan welke aanname(s) u doet met betrekking tot parameters die invloed hebben op het rendement.

De totale laagdikte tussen bron en detector bedraagt:  $10 \text{ [mg/cm}^2\text{]}$  van het venster +  $50 \text{ [mg/cm}^2\text{]}$  van het folie =  $60 \text{ [mg/cm}^2\text{]}$ .

Aflezen van de absorptie van de totale laagdikte op bladzijde 7 van de bijlage bij een elektronenenergie van iets minder dan  $0,7 \text{ MeV}$  geeft ongeveer 85% (tussen 80 en 90% wordt goed gerekend). De transmissie bedraagt dan  $1 - 0,85 = 0,15$   
[2 punten]

De detector kan niet meer dan 50% van de uitgezonden straling meten bij een isotrope puntbron. Het geometrisch rendement is daarom hooguit 0,50. [1 punt]

De yield van de bèta's is 100% (of 0,996 uit het handboek radionucliden) het rendement waarmee deeltjes die het venster passeren worden gemeten is 1 en aangenomen wordt dat tussenliggende lucht in deze korte afstand geen bèta's absorbeert.

Het meetrendement van de meetopstelling is afhankelijk van de positie van de detector, de eerder genoemde aannames en de transmissie, dit levert:

$$\varepsilon = \text{yield} \cdot \varepsilon_{\text{geo}} \cdot \varepsilon_{\text{detector}} \cdot T$$

$$\varepsilon = 0,996 \cdot 0,50 \cdot 1 \cdot 0,15 = 0,075 \quad [2 \text{ punten}]$$

### Vraag 4.2 [4 punten]

Bereken de minimale meettijd (in ms) bij een telling van een foliedikte van  $50 \text{ mg/cm}^2$  om aan de gewenste relatieve standaarddeviatie te voldoen.

Het aantal benodigde pulsen voor een relatieve standaarddeviatie van 0,1% is:

$$\frac{\sqrt{N}}{N} = 0,1\% \rightarrow \frac{1}{\sqrt{N}} = 0,001 \rightarrow N = 1 \cdot 10^6 \quad [2 \text{ punten}]$$

$$\text{Het teltempo wordt } R_{\text{netto}} = A \cdot \varepsilon = 3,7 \cdot 10^9 \cdot 0,075 = 2,8 \cdot 10^8 \text{ cps} \quad [1 \text{ punt}]$$

De benodigde tijd om met een relatieve standaarddeviatie van 0,1% te meten is dan

$$t = \frac{N}{R} = \frac{1 \cdot 10^6 [c]}{2,8 \cdot 10^8 [cps]} = 0,0036 \text{ s} = 3,6 \text{ ms} \quad [1 \text{ punt}]$$

**Vraag 4.3 [2 punten]**

*Beredeneer of bereken hoeveel jaar de bron gebruikt kan worden totdat de meettijd is verdubbeld.*

Beredenatie vanuit het aantal benodigde pulsen: tweemaal langere meettijd, dus halvering van de activiteit bij gelijk aantal pulsen. Eén halveringstijd is 10,7 jaar. [2 punten]

Berekenen mag ook:

Indien je maximaal 7,2 ms wil meten, moet het netto teltempo minimaal

$$R = \frac{N}{t} = \frac{1 \cdot 10^6 [c]}{0,0072 [s]} = 1,4 \cdot 10^8 [cps] \text{ zijn.} \quad [1 \text{ punt}]$$

Dat betekent dat de benodigde activiteit

$$A = \frac{R_{\text{netto}}}{\epsilon} = \frac{1,4 \cdot 10^8 [cps]}{0,075} = 1,9 \cdot 10^9 Bq \text{ moet zijn.} \quad [1 \text{ punt}]$$

Dat is de helft van de huidige activiteit. Er is dan 1 halveringstijd verstreken. Dat is 10,7 jaar.

**Vraag 4.4 [2 punten]**

*Beschrijf welke informatie met betrekking tot de stralingsveiligheid van dit soort bronnen van belang is voor de bedrijfsbrandweer tijdens een brand. Betrek hierin in elk geval informatie over het risico op uitwendige bestraling en het risico op inwendige besmetting.*

Inwendige besmetting:  $^{85}\text{Kr}$  is een gasvormig nuclide en krypton is een edelgas. Indien de afscherming kapot gaat zal er geen of een zeer gering risico zijn op inwendige besmetting. Er zal geen losse bron in het bedrijf liggen. Tijdens brand is de bron waarschijnlijk weg voordat de brandweer er is. [1 punt]

Indien wordt opgemerkt dat men onvoldoende gegevens heeft om hier een gefundeerde uitspraak over te doen, mag dit ook goed worden gerekend (de dosisconversiecoëfficiënt van  $^{85}\text{Kr}$  is immers niet gegeven).

Uitwendige bestraling: zolang de houder en detector intact zijn, is er geen (of zeer gering) risico, want de dikte van de houder (en de detector) zal groter zijn dan de dracht van de bèta's. [1 punt]

Ook een opmerking over het houden van enige afstand kan worden gehonoreerd. De maximale dracht van de uitgezonden bèta's in lucht is enkele meters.

Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 4</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
4.1	5
4.2	4
4.3	2
4.4	2
<b>Totaal</b>	<b>13</b>