

## **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: 10 mei 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. Inwendige besmetting met I-131

### Vraag 1.1 [4 punten]

Bereken de effectieve volg dosis voor de werknemer, als de besmetting met I<sub>2</sub>-damp op de vrijdagochtend van de voorgaande week – aan het begin van de werkdag – heeft plaatsgevonden.

Netto teltempo: 89 cps

Detectierendement schildkliertelling: 9,5 cps/kBq <sup>131</sup>I

Activiteit =  $R/\varepsilon = 89 \text{ [cps]}/9,5 \text{ [cps/kBq]} = 9,4 \text{ kBq} = 9,4 \cdot 10^3 \text{ Bq}$  in de schildklier

[1 punt]

Handboek Radionucliden:  $A_{\text{schildklier}}$  na 3 dagen bij inhalatie I<sub>2</sub>:  $2,0 \cdot 10^{-1} \text{ Bq per Bq}$  inname:

$A_{\text{inname}} = 9,4 \cdot 10^3 \text{ [Bq]} / 2,0 \cdot 10^{-1} \text{ [Bq per Bq inname]} = 4,7 \cdot 10^4 \text{ Bq}$  [2 punten]

$E_{50} = 4,7 \cdot 10^4 \text{ [Bq]} \times 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]} = 9,4 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} (= 0,94 \text{ mSv})$  [1 punt]

### Vraag 1.2a [2 punten]

Maak met behulp van een berekening een schatting van de geabsorbeerde dosis in de schildklier, uitgaande van de situatie uit vraag 1.1 en de weefselweegfactoren uit ICRP-60.

$$D_{R,T} = E/(W_R \times W_T)$$

$$W_R = 1 \quad [0,5 \text{ punt}]$$

$$W_T = 0,05 \quad [0,5 \text{ punt}]$$

$$D_{\text{schildklier}} = 9,4 \cdot 10^{-4} \text{ [Sv]} / (1 \times 0,05) = 0,0188 \text{ Gy} = 0,02 \text{ Gy} \quad [1 \text{ punt}]$$

### Vraag 1.2b [2 punten]

Beargumenteer of de geabsorbeerde dosis uit vraag 1.2a kan leiden tot schadelijke weefselreacties.

Bij een geabsorbeerde dosis van 0,02 Gy is het niet mogelijk dat in de schildklier weefselreacties optreden en in de andere weefsels is de geabsorbeerde dosis veel lager.

**Vraag 1.3 [2 punten]**

Bereken wat de waarde zou zijn van de effectieve volgdooscoëfficiënt voor inhalatie van  $I_2$ -damp, gebaseerd op de weefselweegfactoren uit ICRP-103.

Handboek Radionucliden:  $e(50)(w)$  voor inhalatie van  $I_2 = 2,0 \cdot 10^{-8}$  Sv/Bq.

De effectieve dosis wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de geabsorbeerde dosis in de schildklier.  $E = D_{R,T} \times W_R \times H_T$  waarbij  $D_{R,T}$  en  $W_R$  niet zijn veranderd. De weefselweegfactor voor de schildklier is verlaagd van 0,05 naar 0,04.

De effectieve dosiscoëfficiënt op basis van ICRP-103 is dus:

$$0,04/0,05 \times 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$$

Extra noot: uit ICRP-137 blijkt dat de waarde  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Sv/Bq is. De berekende waarde komt dus goed overeen.

**Vraag 1.4 [5 punten]**

Bereken zo goed mogelijk de effectieve volgdoos voor de werknemer.

Van de ingenomen activiteit gaat 30% naar de schildklier. [1 punt]

De effectieve halfwaardetijd is 7,35 dagen:

$$\frac{1}{T_{1/2,eff.}} = \frac{1}{T_{1/2,bio.}} + \frac{1}{T_{1/2,fys.}} \rightarrow T_{1/2,eff.} = \frac{1}{\left(\frac{1}{90} + \frac{1}{8}\right)} = 7,35 \text{ dagen} \quad [2 \text{ punten}]$$

Daarmee wordt de activiteit in de schildklier berekend:

$$A_{T(schildklier)}(t) = 0,30 \times A_{in} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2,eff}}$$

$$A_{in} = \frac{A_T(t)}{0,30 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2,eff}}} = \frac{9,4 \cdot 10^3 \text{ [Bq]}}{0,30 \times 0,059} = 5,31 \cdot 10^5 \text{ Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

De effectieve volgdoos wordt dan:

$$E_{50} = 5,31 \cdot 10^5 \text{ [Bq]} \times 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]} = 10,6 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} = 11 \text{ mSv} \quad [1 \text{ punt}]$$

NB. Als hier  $1,6 \cdot 10^{-8}$  [Sv/Bq], wordt gebruikt (uitkomst 1.3), dan goed rekenen.

Alternatieve uitwerking:

In het Handboek Radionucliden staan geen gegevens voor schildkliertelling 30 dagen na inname. Wel is de biologische halveringstijd in de schildklier gegeven, deze is effectief gelijk aan 90 dagen.

Om de waarde voor 30 dagen na inname te berekenen kunnen we uitgaan van de waarde van 3 dagen na inname:  $2,0 \cdot 10^{-1}$  Bq per Bq inname

$$A_{\text{inname}} = 9,4 \cdot 10^3 \text{ [Bq]} / 2,0 \cdot 10^{-1} \text{ [Bq per Bq inname]} = 4,7 \cdot 10^4 \text{ Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

Bij een tijdsduur van 30 dagen is nog  $30 - 3 = 27$  dagen resterend. Er moet worden gerekend met de effectieve halveringstijd, deze is:

$$\frac{1}{T_{1/2,eff.}} = \frac{1}{T_{1/2,bio.}} + \frac{1}{T_{1/2,fys.}} \rightarrow T_{1/2,eff.} = \frac{1}{\left(\frac{1}{90} + \frac{1}{8}\right)} = 7,35 \text{ dagen} \quad [2 \text{ punten}]$$

Vervalfractie in deze periode is  $\frac{1}{2}^{t/T_{1/2}} = \frac{1}{2}^{27/7,35} = 0,0784$

Correctie voor deze fractie:  $4,7 \cdot 10^4 \text{ [Bq]} / 0,0784 = 6,0 \cdot 10^5 \text{ Bq} \quad [1 \text{ punt}]$

$E_{50} = 6,0 \cdot 10^5 \text{ [Bq]} \times 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} (= 12 \text{ mSv}) \quad [1 \text{ punt}]$

NB. Als hier  $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]}$ , wordt gebruikt (uitkomst 1.3), dan goed rekenen.

Voor deze berekening mag ook van de gegevens van andere dagen, zoals dag 7 worden uitgegaan. Echter is de verdeling van de activiteit over de weefsels pas na 2 dagen volledig, waardoor 1 punt aftrek wordt gegeven voor een berekening vanaf 0,25 dag.

Puntenwaardering

Vraagstuk 1	Punten
1.1	4
1.2a	2
1.2b	2
1.3	2
1.4	5
<b>Totaal</b>	<b>15</b>

## Vraagstuk 2: Risicoanalyse kernfysisch experiment

### Vraag 2.1 [2 punten]

Bereken de effectieve dosis die de experimentator per keer oploopt tijdens het uitlijnen van de protonenbundel.

$$t_1 = 30 \text{ min} = 0,5 \text{ h}$$

$$E_1 \approx H_1^*(10) = 0,1 [\mu\text{Sv/h}] \times 0,5 [\text{h}] \times \frac{15^2 [\text{m}]}{0,5^2 [\text{m}]} = 45 \mu\text{Sv} \quad [2 \text{ punten}]$$

### Vraag 2.2a [6 punten]

Bereken het aantal neutronen dat in het trefplaatje wordt geproduceerd, terwijl de experimentator door het kijkvenster kijkt.

$$N_n = N_p \cdot N_{Se} \cdot \sigma \cdot \text{yield}$$

Het aantal protonen dat het trefplaatje treft: [2 punten]

$$N_p = \frac{I}{e} \cdot t = \frac{50 \cdot 10^{-9} [\text{C} \cdot \text{s}^{-1}]}{1,6 \cdot 10^{-19} [\text{C} \cdot \text{proton}^{-1}]} [\text{s}^{-1}] \times 10 [\text{min}] \times 60 [\text{s} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$= 1,9 \cdot 10^{14} \text{ protonen}$$

Het aantal seleniumatomen per  $\text{cm}^2$  in het trefplaatje: [2 punten]

$$N_{Se} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}] \times 6,0 \cdot 10^{23} [\text{mol}^{-1}]}{284 [\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}]} = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ seleniumatomen} \cdot \text{cm}^{-2}$$

De werkzame doorsnede voor kernreactie in  $\text{cm}^2$ , aflezen bijlage: [1 punt]

$$90 \text{ mbarn} = 0,090 \text{ barn} = 0,090 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

(waarden in bereik van 80 – 100 mbarn worden goed gerekend)

$\text{yield} = 1$  neutron per kernreactie, af te leiden uit de gegeven kernreactie.

Invullen en uitrekenen: [1 punt]

$$1,9 \cdot 10^{14} \times 2,5 \cdot 10^{18} \times 0,090 \cdot 10^{-24} \times 1 = 4,3 \cdot 10^7 \text{ neutronen}$$

**Vraag 2.2b [3 punten]**

Toon door berekening aan dat de equivalente ooglensdosis die de experimentator per keer oploopt tijdens het uitlijnen van de protonenbundel ongeveer 80  $\mu\text{Sv}$  is.

De fluentie van de isotroop uitgezonden neutronen: [2 punten]

$$\Phi_n = \frac{4,8 \cdot 10^7}{4\pi \times 5^2 [\text{cm}^2]} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$$

Berekenen  $H_{\text{ooglens}}$ : [1 punt]

$$H_{\text{ooglens}} \approx H_1^*(10)^1 = 500 \cdot 10^{-12} [\text{Sv} \cdot \text{cm}^2] \times 1,5 \cdot 10^5 [\text{cm}^{-2}] = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} = 75 \mu\text{Sv}$$

**Vraag 2.3 [2 punten]**

Bereken de effectieve dosis die de experimentator per keer oploopt tijdens het vervangen van het stikstofvat.

$$t_2 = 2 \times 15 \text{ (s)} + 2 \times 60 \text{ (s)} = 150 \text{ s} = 0,042 \text{ h} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$E_2 \approx H_2^*(10) = 110 \text{ (}\mu\text{Sv/h)} \times 0,042 \text{ (h)} = 4,6 \mu\text{Sv} \quad [1 \text{ punt}]$$

**Vraag 2.4 [5 punten]**

Concludeer op basis van een berekening van de jaarlijkse effectieve dosis en de equivalente ooglensdosis of de experimentator ingedeeld dient te worden als blootgestelde werknemer, en zo ja, in welke categorie.

Tijdens één experimenteerweek loopt de experimentator de volgende effectieve dosis op:

$$E_{\text{Handeling 1}} = 45 [\mu\text{Sv} \cdot \text{uitlijning}^{-1}] \times \frac{24 [\text{h} \cdot \text{d}^{-1}]}{8[\text{h}]} [\text{uitlijnen} \cdot \text{d}^{-1}] \times 7 [\text{d}]$$

$$= 0,9 \cdot 10^3 \mu\text{Sv} = 0,9 \text{ mSv} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$E_{\text{Handeling 2}} = 4,6 [\mu\text{Sv} \cdot \text{vatwissel}^{-1}] \times 2 [\text{wissels per dag}] \times 7 [\text{d}]$$

$$= 64,4 \mu\text{Sv} = 0,06 \text{ mSv} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$E_{\text{tot}} = 6[\text{jaar}^{-1}] \times (0,945 [\text{mSv}] + 0,064 [\text{mSv}]) = 6,1 \text{ mSv} \quad [1 \text{ punt}]$$

---

<sup>1</sup> In [dit artikel van Manger \(https://academic.oup.com/rpd/article/148/4/507/1609361\)](https://academic.oup.com/rpd/article/148/4/507/1609361) et al. wordt aangegeven dat de conversiefactor voor de ooglensdosis in AP geometrie in de orde van 60 pGy  $\text{cm}^2$  is voor 10 – 20 MeV neutronen. Met een  $w_R$  voor neutronen van ruwweg 8 zou  $H_{\text{ooglens}}/\Phi_n$  ongeveer 500 pSv  $\text{cm}^2$  bedragen.

Per jaar loopt de experimentator de volgende equivalente ooglensdosis op:

$$H_{\text{ooglens}} = 21 \text{ (keer uitlijnen)} \times 6 \text{ (per jaar)} \times 0,075 \text{ (mSv)}$$

$$= 9,5 \text{ mSv}$$

[1 punt]

Op grond van de effectieve jaardosis dient de experimentator ingedeeld te worden als blootgestelde werknemer (effectieve dosis > 1 mSv). Omdat de dosis meer kan zijn dan 30% van de dosislimiet (6 mSv) moet hij/zij als blootgestelde werknemer categorie-A worden ingedeeld. De ooglensdosis is GEEN reden voor indeling als blootgestelde werknemer (< 15 mSv).

[1 punt]

Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 2</b>	<b>Punten</b>
2.1	2
2.2a	6
2.2b	3
2.3	2
2.4	5
<b>Totaal</b>	<b>18</b>

### Vraagstuk 3: Afscherming bij een MRI-versneller

#### Vraag 3.1 [5 punten]

Bereken het jaarlijkse omgevingsdosisequivalent in punt P1.

Workload:  $8 \text{ [patiënten/dag]} \times 20 \text{ [Gy/ patiënten]} \times 250 \text{ [dagen]} = 40.000 \text{ Gy}$  [1 punt]

Transmissie 140 cm beton bij 6 MV =  $6,0 \cdot 10^{-5}$  (bijlage 1) [1 punt]

Afgelezen T tussen  $6 \cdot 10^{-5}$  en  $7 \cdot 10^{-5}$  worden goed gerekend; daarbuiten niet.

Fractie geabsorbeerde dosis =  $0,1\% = 0,001$

$H^*(10) = 40 \cdot 10^3 \text{ [Gy/j]} \times 0,001 \times (1\text{[m]}/5\text{[m]})^2 \times 6,0 \cdot 10^{-5} \times 1,0 \text{ [Sv/Gy]}$   
 $= 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/jaar} = 96 \text{ } \mu\text{Sv/jaar}$

Kwadratenwet [1 punt]

$H^*(10)/K$  [1 punt]

Uitrekenen  $H^*(10)$  [1 punt]

#### Vraag 3.2 [6 punten]

Bereken het jaarlijks omgevingsdosisequivalent in punt P2 via route a.

$H^*(10) = 40 \cdot 10^3 \text{ [Gy/j]} \times 0,001 \times (1\text{[m]}/6,5\text{[m]})^2 \times 0,0042 \cdot 10^{-2} \times (10 \cdot 10^4 \text{ [cm}^2\text{]}/100 \text{ [cm}^2\text{]}) \times (1\text{[m]}/8\text{[m]})^2 \times 0,5 \text{ [transmissie staal]}$   
 $\times 1 \text{ [Sv/Gy]} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ Sv/jaar} = 0,31 \text{ mSv/jaar}$

$40 \cdot 10^3 \text{ [Gy/j]} \times 0,001$  [1 punt]

Kwadratenwet (2x) [2 punten]

Aflezen bijlage 2 (0,0042% op 1 meter per 100 cm<sup>2</sup> bestraald opp.) [1 punt]

Juist toepassen fractie en oppervlak [1 punt]

$T_{\text{staal}}$  [1 punt]



**Vraag 3.3a [3 punten]**

*Beargumenteer op basis van de totale blootstelling of deze medewerkers ingedeeld dienen te worden als blootgestelde werknemers en zo ja, in welke categorie.*

Argument voor meerekenen als voorziene onbedoelde gebeurtenis:

De beschreven onbedoelde gebeurtenis is voorzien en moet daarom meegerekend worden voor de indeling van werknemers als potentiële dosis (alsof deze eens per jaar voorkomt).

Argument voor niet meerekenen als voorziene onbedoelde gebeurtenis:

Bij ruim minder dan eens per jaar kan beargumenteerd worden dat de potentiële dosis helemaal niet meegerekend wordt voor de indeling.

NB. In de leidraad risicoanalyse stralingstoepassingen van het RIVM (2010) staat deze argumentatie ook beschreven.

Argumentatie voorziene onbedoelde gebeurtenis en frequentie [1 punt]

Indeling bij wel meerekenen als potentiële dosis

Punt 1 = 0,096 mSv/jaar

Punt 2 = 0,31 mSv/jaar

VOG = 1,5 mSv

Totaal = 1,9 mSv

[1 punt]

→ indelen als blootgestelde werknemer, categorie B.

[1 punt]

Alternatieve indeling bij niet meerekenen van de potentiële dosis:

Punt 1 = 0,096 mSv

Punt 2 = 0,31 mSv/jaar

Totaal = 0,4 mSv

[1 punt]

→ indelen als niet-blootgestelde werknemer.

[1 punt]

**Vraag 3.3b [2 punten]**

*Beargumenteer op basis van de definitie van een stralingsincident of de stralingsbeschermingsdeskundige de gebeurtenis als incident moet melden bij de Autoriteit.*

Uit de definitie stralingsincident:

“**onbedoelde gebeurtenis** of situatie of ongewilde verspreiding **waarbij** gevaar bestaat, dan wel **gevaar is opgetreden voor**:

- een blootstelling aan ioniserende straling van werknemers van meer dan 2 millisievert;”

In deze onbedoelde gebeurtenis is de medewerker blootgesteld aan een effectieve dosis van 1,5 mSv. De gebeurtenis is snel opgemerkt en opgeheven. Het is dus ook mogelijk dat de blootstelling meer dan 2 mSv zou bedragen. Daarom is het een incident.

Afhankelijk van de argumentatie worden er punten toegekend.  
Antwoorden zonder argumentatie krijgen geen punten.

**Puntenwaardering**

<b>Vraagstuk 3</b>	<b>Punten</b>
3.1	5
3.2	6
3.3a	3
3.3b	2
<b>Totaal</b>	<b>16</b>

## Vraagstuk 4: Edelgasmonitor

### Vraag 4.1 [4 punten]

*Bewijs met een berekening dat het systeem lek is.*

De standaarddeviatie in het gemeten teltempo is:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{R}{t}} = \sqrt{\frac{532 \text{ [cps]}}{60 \text{ [s]}}} = 3,0 \text{ cps} \quad [1 \text{ punt}]$$

Het verwachte teltempo, berekend op basis van fysisch verval, is:

$$R(3,004) = R(0) \times \frac{t}{2T_{1/2}} = 1756 \text{ [cps]} \times \frac{1}{2} \times \frac{3,004 \text{ [h]}}{1,83 \text{ [h]}} = 563 \text{ cps} \quad [1 \text{ punt}]$$

Het verschil tussen het berekende en het gemeten teltempo:

$$563 \text{ [cps]} - 532 \text{ cps} = 31 \text{ cps} \quad [1 \text{ punt}]$$

De afwijking na 3 uur is groter dan  $2 \sigma$  ( $31 \text{ cps} > 6 \text{ cps}$ ). [1 punt]

### Vraag 4.2 [3 punten]

*Bepaal met behulp van de laatste meetwaarde de effectieve verwijderingsconstante ( $h^{-1}$ ) van het meetsysteem.*

Systeem gevuld met  $^{41}\text{Ar}$ :

$$A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda_{eff} \cdot t}$$

$$83 \text{ [cps]} = 1756 \text{ [cps]} \cdot e^{-\lambda_{eff} \cdot 7,511 \text{ [h]}} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\lambda_{eff} = \frac{\ln\left(\frac{83}{1756}\right)}{-7,511 \text{ [h]}} = 0,41 h^{-1} \quad [1 \text{ punt}]$$

Berekening van juiste verwijderingsbijdrage. [1 punt]

### Vraag 4.3 [2 punten]

*Toon met een berekening aan dat de kalibratiefactor, voor het gasmeetvat op basis van de meting op  $t=0$ , gelijk is aan  $0,068 \text{ Bq/cm}^3$  per cps.*

$$A(t) = 4,0 \text{ MBq}$$

$$R_n = 1756 \text{ cps}$$

$$K = \frac{A(t)}{V \times R_n(t)} = \frac{4,0 \cdot 10^6 \text{ [Bq]}}{33,3 \cdot 10^3 \text{ [cm}^3\text{]} \cdot 1756 \text{ [cps]}} = 0,068 \text{ Bq/(cm}^3 \cdot \text{cps)} \quad [2 \text{ punten}]$$

**Vraag 4.4 [3 punten]**

Bereken met de kalibratiefactor van vraag 4.3 wat de edelgasmonitor voor en na deze verdunning aangeeft; verwaarloos het radioactief verval tijdens het spoelen.

Voor verdunning:

$$C_{voor}(7,5h) = R_n(7,5h) \times K = 83 \text{ [cps]} \times 0,068 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cps}} \right] = 5,7 \text{ Bq/cm}^3 \quad [1 \text{ punt}]$$

Na verdunning:

$$\lambda_{spoel} = \frac{33,3[\text{L} \cdot \text{min}^{-1}]}{33,3[\text{L}]} = 1[\text{min}^{-1}] \text{ en } t = 10 \text{ min} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$C_{na} = 5,7 \left[ \frac{\text{Bq}}{\text{cm}^3} \right] \times e^{-1 \cdot 10} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3 \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraagstuk 4	Punten
4.1	4
4.2	3
4.3	2
4.4	3
<b>Totaal</b>	<b>12</b>