

**UITWERKINGEN**

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

---

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave Nascholing/LUMC	BN/LUMC
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC

---

Examendatum: 8 juli 2020

## Vraagstuk 1: Jodiumcapsule

### Vraag 1.1 [2 punten]

Welke  $^{131}\text{I}$ -activiteit in de maag komt overeen met het dosistempo bij naleving van de ontslagregel (aanbeveling 1)?

$$\dot{H}^*(10) = h \times A / r^2$$

$$20 [\mu\text{Sv/h}] = 0,066 [\mu\text{Sv/h} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}] \times A [\text{MBq}] / 1^2 [\text{m}^2] \quad [1 \text{ punt}]$$

Bij een activiteit van 303 MBq in de maag mag de patiënt naar huis. [1 punt]

### Vraag 1.2 [2 punten]

Wat is een reden dat de berekende activiteit bij vraag 1.1 niet overeenkomt met de maximale toe te dienen activiteit van 400 MBq?

De berekende activiteit is lager dan de maximaal toe te dienen activiteit/dosis. Na inname zit de capsule in de maag, waardoor de afstand tot de dosistempometer groter is dan 1 meter. Bovendien is er zelfabsorptie van de uitgezonden straling in het lichaam.

Het noemen van één goede reden volstaat. Het noemen van evident foute redenen kan leiden tot aftrek.

### Vraag 1.3a [4 punten]

Stel dat een patiënt na inname van een  $^{131}\text{I}$ -capsule met 400 MBq, thuis toch de eerste 24-uurs-urine opspaart. Wat zal de activiteit in de 24-uurs-urine van deze patiënt zijn, dus 1 dag na inname van de capsule?

$$400 \text{ MBq} \times 0,3 = 120 \text{ MBq in de schildklier van een gezond persoon} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$1,2 \times 120 \text{ MBq} = 144 \text{ MBq in de schildklier deze patiënt} \quad [1 \text{ punt}]$$

De resterende activiteit wordt direct uitgescheiden en zit dus in de 24-uurs-urine ( $f_1 = 1$ ). In de urine zit dus  $400 \text{ MBq} - 144 \text{ MBq} = 256 \text{ MBq}$  [1 punt]

Deze activiteit moet nog voor radioactief verval gecorrigeerd worden. Met

$$\lambda = \frac{\ln 2}{8,021 \text{ d}} = 0,0864 \text{ d}^{-1} = 3,60 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1} \text{ volgt}$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = 256 \cdot e^{-0,0864 \cdot 1} = 235 \text{ MBq} \quad [1 \text{ punt}]$$

### Vraag 1.3b [4 punten]

Bereken, uitgaande van uw antwoord op vraag 1.3a, wat de effectieve dosis zou zijn voor een huisgenoot wanneer deze gedurende 2 weken op 1 meter afstand van deze opgespaarde urine zou verblijven.

$$H^*(10) = \frac{h \cdot A_0}{r^2} \cdot \int_0^T e^{-\lambda \cdot t} dt = \frac{h \cdot A_0}{r^2} \cdot \left( \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \cdot T}) \right) \quad [1 \text{ punt}]$$

$$H^*(10) = \frac{0,066 \mu \frac{Sv}{h} \cdot MBq^{-1} \cdot h^{-1} \cdot 235 MBq}{(1 m)^2} \times \left( \frac{1}{0,0036 h^{-1}} (1 - e^{-0,086 d^{-1} \times 14 d}) \right) = 3,0 mSv$$

Hieruit volgt E = 3,0 mSv [3 punten]

**Vraag 1.4 [5 punten]**

*Is deze lozing formeel toegestaan? Beargumenteer uw antwoord met een berekening.*

Op grond van artikel 10.3 van het Bbs geldt een vrijstelling van het verbod op lozing in het oppervlaktewater (de sloot) zonder vergunning voor lozingen kleiner dan 0,1 Re<sub>ing</sub>, gewogen voor de fysische halveringstijd.

De weggegooide urine bevat nog:

$$A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} = 235 MBq \times e^{-0,0864 \cdot 14} = 70 MBq \text{ } ^{131}I \quad [1 \text{ punt}]$$

$$0,1 Re = 0,1 \times \frac{1 Sv}{e(50)_{ing}} = 0,1 \times (1 Sv / 2,2 \cdot 10^{-8}) = 4,5 MBq \quad [2 \text{ punten}]$$

(andersom de weggegooide urine naar Re omrekenen mag ook)

Correctiefactor CR voor lozing: T<sub>1/2</sub> <sup>131</sup>I: 8,021 d, CR is 0,1

Er mag per jaar worden geloosd: 4,5 MBq / CR = 45 MBq <sup>131</sup>I

De lozing is formeel niet toegestaan (we laten buiten beschouwing wie in overtreding is). [2 punten]

**Puntenverdeling**

<b>Vraagstuk 1</b>	
Vraag 1.1	2 punten
Vraag 1.2	2 punten
Vraag 1.3a	4 punten
Vraag 1.3b	4 punten
Vraag 1.4	5 punten
<b>Totaal</b>	<b>17 punten</b>

## Vraagstuk 2: Tandheelkundige röntgenopnames

### Vraag 2.1 [3 punten]

*Welke geabsorbeerde dosis zal het bestraalde huidoppervlak van een patiënt per opname ontvangen, bij elk van de hierboven genoemde opstellingen met de gegeven instellingen?*

#### Opstelling uit figuur 1:

Uit figuur 1: intreedosis (entrance dose) is 3000  $\mu\text{Sv}$

Uit gegevens: De verhouding tussen persoonsdosisequivalent  $H_p(10)$  en geabsorbeerde dosis in de huid bij 50 keV fotonen is:  $H_p(10)/D = 1,766$ .

$$D_{\text{huid}} = 3000 \cdot 10^{-6} [\text{Sv}] / 1,766 \text{ Sv/Gy} = 1,699 \cdot 10^{-3} \text{ Gy} = 1,7 \text{ mGy} \quad [1 \text{ punt}]$$

#### Opstelling tandartspraktijk:

De intree-huidosis wordt lager door de langere tubus (het kleinere bestraalde huidoppervlak heeft geen invloed op de intree-huidosis):

Bij een focus-huidafstand van 30 cm is dit:

$$1,7 [\text{mGy}] \times (20 [\text{cm}]/30 [\text{cm}])^2 = 0,76 \text{ mGy} \quad [2 \text{ punten}]$$

### Vraag 2.2 [4 punten]

*Geef op basis van de bij vraag 2.1 berekende doses voor elk van de hierboven genoemde opstellingen aan of de intra-orale röntgenopnames zich qua dosisniveau boven, in, of beneden deze twee gegeven DRN-gebieden bevinden.*

#### Opstelling uit figuur 1:

De huidosis mag gelijk gesteld worden aan kerma in lucht. Daardoor valt de berekende intree-huidosis van 1,7 mGy binnen de genoemde DRN-waarden.

De DOP-waarde is  $1,7 \text{ mGy} \times 30 \text{ cm}^2 = 51 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ . Deze waarde valt binnen de DRN-waarden. [2 punten]

#### Opstelling tandartspraktijk:

De berekende intree-huidosis is 0,755 mGy en omdat huidosis gelijk mag worden gesteld aan kerma in lucht, valt de berekende intree-huidosis binnen de genoemde DRN-waarden.

De DOP-waarde is  $0,755 \text{ mGy} \times (3,5 \times 4,5) \text{ cm}^2 = 12 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2$ . Dit getal zit onder het gebied waarin de DRN-waarden vallen. [2 punten]

**Vraag 2.3 [5 punten]**

*Aan welk persoonsdosisequivalent  $H_p(10)$  zal de tandarts in zijn praktijk jaarlijks blootstaan, bij gebruik van de rechthoekige collimator en de hierboven genoemde instellingen en gegevens?*

Uit figuur 1 kan een hoogste persoonsdosisequivalent van 0,5  $\mu\text{Sv}$  per opname worden afgelezen.

Deze stroostralingsdosis kan evenredig worden geschaald met het bestraalde huidoppervlak en de intree-huidosis:

$$0,5 [\mu\text{Sv}] \times (3,5 [\text{cm}] \times 4,5 [\text{cm}])/30 [\text{cm}^2] \times (0,755 [\text{mGy}]/1,7 [\text{mGy}]) =$$
$$(of: 0,5 [\mu\text{Sv}] \times (3,5 [\text{cm}] \times 4,5 [\text{cm}])/30 [\text{cm}^2] \times (20 [\text{cm}]/30 [\text{cm}])^2 =)$$
$$0,117 \mu\text{Sv op 1 meter afstand.}$$

$$\text{Op 50 cm afstand is dit: } 0,117 [\mu\text{Sv}] \times (100 [\text{cm}]/50 [\text{cm}])^2 = 0,47 \mu\text{Sv}$$

[4 punten]

Jaarlijks worden 2000 opnamen gemaakt. De ontvangen  $H_p(10)$  per jaar bedraagt dus  $0,47 \times 2000 = 933 \mu\text{Sv/j} = 0,93 \text{ mSv/j}$ . [1 punt]

**Vraag 2.4a [4 punten]**

*Schat op basis van een berekening de transmissie van het scherm en loodglas voor fotonen met een energie van 50 keV.*

$$\text{Transmissie } T = B \cdot e^{-\mu d}$$

$\mu/\rho$  in lood bij 50 keV stroostralings:  $7,71 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  (Bos, p.381)

$$\mu = 7,71 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \times 11,34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 87,4 \text{ cm}^{-1}$$

$$d = 0,15 \text{ cm}$$

$$\mu d = 13,1$$

[2 punten]

De dosisopbouwfactor B is op basis van tabel 11.1 (Bos) in elk geval kleiner dan ongeveer 2,5, maar zal in werkelijkheid gewoon 1 zijn (omdat foto-effect bij 50 keV veruit dominant is). *Goed beargumenteerde* waarden tot 2,5 worden geaccepteerd (b.v.: 'conservatieve aanname'). [1 punt]

$$T = B \cdot e^{-\mu d} = 1 \times e^{-87,4 \times 0,15} = 2 \times 10^{-6}$$

[1 punt]

**Vraag 2.4b [1 punt]**

*Formuleer op basis van de berekening uit vraag 2.4a uw evaluatie van de RI&E voor deze tandarts.*

De jaardosis voor de tandarts is bij gebruik van het verrijdbare scherm acceptabel (ongeveer 2 nSv/jaar). Verdere invulling van ALARA is niet nodig. Of het verrijdbare scherm in de praktijk handig is, is overigens zeer twijfelachtig.

Uiteraard worden ook andere aspecten van de evaluatie goed gerekend (geen indeling als blootgestelde werknemer, geen zonering etc).

**Puntenverdeling**

<b>Vraagstuk 2</b>	
Vraag 2.1	3 punten
Vraag 2.2	4 punten
Vraag 2.3	5 punten
Vraag 2.4a	4 punten
Vraag 2.4b	1 punt
<b>Totaal</b>	<b>17 punten</b>

### Vraagstuk 3: Wetenschappelijk experiment met jodium in zuur milieu

#### Vraag 3.1 [4 punten]

Ga door berekening na of en zo ja, onder welke condities de hierboven beschreven jodering volgens de 'Bijlage radionucliden-laboratorium' is toegestaan. Ga hierbij uit van de meest ongunstige longzuiveringsklasse.

Labelen vluchtig nuclide  $\rightarrow p = -3$  (zie ook opmerking hieronder).

De grootste waarde van  $e(50)_{w,inhalatie} = 1,4 \cdot 10^{-8}$  Sv/Bq (voor  $I_2$ ).

$$A_{max} = 0,02 \text{ (Sv)} \times 10^{p+q+r} / e(50)_{w,inhalatie} \\ = 0,02 \text{ (Sv)} \times 10^{-3+q+r} / 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ (Sv/Bq)} = 1,43 \times 10^{3+q+r} \text{ Bq} \quad [2 \text{ punten}]$$

Er wordt gewerkt met  $110 \text{ MBq} = 1,1 \cdot 10^8 \text{ Bq} < A_{max}$ .

Hieruit volgt dat  $q+r \geq 5$  moet zijn. Aangezien  $r$  nooit groter dan  $q$  genomen mag worden betekent dit dat  $q = 3$  en  $r$  ten minste 2. De jodering dient dus plaats te vinden in een B-laboratorium ( $q = 3$ ), in ten minste een gekeurde zuurkast ( $r = 2$ ). Een gesloten kast ( $r = 3$ ) is dan natuurlijk ook toegestaan. [2 punten]

*Opmerking:* een kandidaat die benoemt dat het hier om een eenvoudige handeling / labeling in een gesloten systeem gaat en daarom  $p = -1$  hanteert, kan, mits goed uitgewerkt, uiteraard ook alle punten voor vraag 1 (en 2a en 2b) halen.

#### Vraag 3.2a [3 punten]

Bereken de maximaal mogelijke effectieve volg dosis voor de onderzoeker als de ampul tijdens het experiment breekt. Ga ervan uit dat de zuurkast goed functioneert (d.w.z. zoals bedoeld in de Vergunningsbijlage, blz.12).

Het meest ongunstige scenario is dat bij het breken van de ampul alle activiteit in de vorm van jodiumdamp is omgezet en 1% daarvan vrijkomt (corresponderend met een DIN-gekeurde zuurkast,  $r = 2$ ).

[1 punt]

Het wederom meest ongunstige scenario is dat de radiochemicus alle vrijgekomen activiteit inademt.

$$\rightarrow A_{inhalatie,max} = 1\% \times 110 \text{ MBq} = 1,1 \text{ MBq} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ Bq.}$$

$$E(50) = e(50)_{w,inhalatie} \times A_{inhalatie,max} \\ = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ (Sv/Bq)} \times 1,1 \cdot 10^6 \text{ (Bq)} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv} = 15 \text{ mSv} \\ [2 \text{ punten}]$$

Een persoon die bij vraag 1 een gesloten kast ( $r = 3$ ) hanteert, mag uitgaan van het vrijkomen van 0,1% van de activiteit of een fictieve waarde kleiner of gelijk aan 1%.

**Vraag 3.2b [2 punten]**

*Geef aan of de onderzoeker uitsluitend op grond van uw antwoord op vraag 3.2a als blootgestelde werknemer moet worden aangemerkt en zo ja, in welke categorie hij moet worden ingedeeld. Benoem tevens één stralingsbeschermingsmaatregel die u voor dit specifieke experiment kunt nemen.*

De dosislimiet voor een niet-blootgestelde werknemer is 1 mSv. Deze wordt overschreden (zie vraag 2a), waardoor een indeling als blootgestelde werknemer noodzakelijk is.

Omdat bovendien de berekende waarde meer dan 6 mSv is, moet betrokkene als categorie A-werknemer worden ingedeeld. [1 punt]

Men kan de experimentator vooraf expliciet nog eens extra instrueren m.b.t. de gevaren van het werken met vluchtige nucliden. Ook kan worden geadviseerd gebruik te maken van een gesloten werkkast ( $r = 3$ ) in plaats van een gewone, gekeurde zuurkast, als die ten minste beschikbaar is. Monitoren van de luchtactiviteit of het dragen van adembescherming zijn ook opties. Het monitoren van de schildklierdosis van de experimentator wordt ook goed gerekend hoewel dit feitelijk een controlemiddel achteraf is. Elk goed alternatief levert het punt op.

Let op: evident foute argumenten leiden tot aftrek! [1 punt]

**Vraag 3.3 [5 punten]**

*Bereken de  $^{125}\text{I}$ -activiteit in de schildklier van de onderzoeker en de standaarddeviatie van deze activiteit.*

$$T_{\text{netto}} = T_{\text{bruto}} - T_{\text{achtergrond}} = (15 - 7) \text{ (cps)} = 8,0 \text{ cps} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\sigma_{T_{\text{netto}}}^2 = (T_{\text{bruto}} + T_{\text{achtergrond}})/t, \text{ waarin } t \text{ de meettijd is.}$$

$$\sigma_{T_{\text{netto}}}^2 = (15 + 7) \text{ (cps)} / 2 \text{ (s)} = 11,0 \text{ cps/s} \rightarrow \sigma_{T_{\text{netto}}} = \sqrt{11,0} \text{ cps} = 3,3 \text{ cps}$$

[2 punten]

$$A_{\text{schildklier}} = 100 \text{ (cm}^2\text{)} \times 8,0 \text{ (cps)} / [0,3 \text{ (cps per Bq/cm}^2\text{)}] = 2,7 \cdot 10^3 \text{ Bq}$$

$$\sigma_{A_{\text{schildklier}}} = 100 \text{ (cm}^2\text{)} \times 3,3 \text{ (cps)} / [0,3 \text{ (cps per Bq/cm}^2\text{)}] = 1,1 \cdot 10^3 \text{ Bq}$$

[2 punten]



**Vraag 3.4 [4 punten]**

Bereken de effectieve volgdozis voor de onderzoeker uitgaande van deze conservatieve inschatting. Als u geen antwoord op vraag 3.3 heeft, moet u zelf plausibele aannames maken.

Uit de gegevens voor schildkliertelling één dag na inname (Handboek Radionucliden) volgt voor inhalatie van I<sub>2</sub>:

$$A_{\text{schildklier}} = 0,24 \times A_{\text{inhalatie}}.$$

$$A_{\text{inhalatie}} < (A_{\text{schildklier}} + 2 \times \sigma_{A_{\text{schildklier}}}) / 0,24 \\ = (2,7 \cdot 10^3 + 2,2 \cdot 10^3) \text{ (Bq)} / 0,24 = 2,0 \cdot 10^4 \text{ Bq} \quad [3 \text{ punten}]$$

$$E(50) < e(50)_{w,\text{inhalatie}} \times A_{\text{inhalatie}} \\ = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ (Sv/Bq)} \times 2,0 \cdot 10^4 \text{ (Bq)} = 28 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} = 0,28 \text{ mSv} \\ [1 \text{ punt}]$$

Plausibele aannames voor de activiteit in de schildklier zijn in beginsel waardes kleiner dan een fractie van 1% van de te hanteren activiteit, ofwel een fractie van 1,1 MBq. Voor de standaarddeviatie kan gedacht worden aan een waarde in dezelfde orde van grootte als de aangenomen activiteit, waarbij wordt verondersteld dat een kandidaat moet weten dat wanneer achtergrond- en nettoteltempo in dezelfde orde van grootte liggen, de standaarddeviatie relatief groot is.

**Puntenverdeling**

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

## Vraagstuk 4: Historische stenencollectie

### Vraag 4.1 [6 punten]

Bereken de totale activiteit van alle nucliden tot en met  $^{226}\text{Ra}$  in een gemiddelde steen.

Omdat  $^{238}\text{U}$  in evenwicht is met haar dochters, moet allereerst de activiteit van  $^{238}\text{U}$  in de steen worden bepaald:

$$m = 780 \times 0,95 = 741 \text{ gram } \text{UO}_2$$

$$N = \frac{741}{238+2 \times 16} \times N_A = 1,65 \cdot 10^{24} \text{ deeltjes } \text{UO}_2 \text{ (bijdrage } ^{235}\text{U mag verwaarloosd worden)}$$

Met de halveringstijd uit Bijlage 1 volgt voor de vervalconstante van  $^{238}\text{U}$ :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{4,51 \cdot 10^9 \text{ jaar} \times 365 \text{ d/j} \times 24 \text{ h/d} \times 3.600 \text{ s/h}} = 4,87 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

Als alternatief mag de halveringstijd uit de Nuklidkarte of direct de waarde van  $\lambda$  uit het Handboek Radionucliden worden gebruikt:  $\lambda = 4,92 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ .

$$A = N \cdot \lambda$$

$$A = 4,87 \cdot 10^{-18} \times 1,65 \cdot 10^{24} = 8,04 \text{ MBq} \quad [4 \text{ punten}]$$

Uit bijlage 1 (of bijlage 2) kan eenvoudig worden afgeleid dat er in totaal 6 dochters zijn in de uraniumreeks tot en met  $^{226}\text{Ra}$ . Merk op dat  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  twee dochternucliden heeft ( $^{234}\text{Pa}$  en  $^{234}\text{U}$ ), maar dat de activiteit van  $^{234}\text{Pa}$  verwaarloosbaar is (0,13% van de activiteit van elk van de andere dochters). Uit de Nuklidkarte is dit gegeven ook te distilleren (het witte driehoekje bij  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  geeft aan dat het isomere verval naar  $^{234}\text{Pa}$  voor minder dan 5% bijdraagt aan het verval van  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ).

$$A_{\text{totaal}} = 6 \times A_{\text{U238}} = 6 \times 8,04 \text{ MBq} = 48,2 \text{ MBq} \quad [2 \text{ punten}]$$

### Vraag 4.2 [3 punten]

Met welk tempo (in  $\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ ) wordt  $^{222}\text{Rn}$ -activiteit gevormd?

Uit het verval van  $^{226}\text{Ra}$  ontstaan  $8,04 \cdot 10^6$   $^{222}\text{Rn}$ -atomen per seconde.

$$\lambda_{\text{Rn-222}} = \frac{\ln 2}{3,823 \times 24 \times 3600} = 2,10 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{A} = \dot{N} \cdot \lambda$$

$$\dot{A} = 8,04 \cdot 10^6 \times 2,10 \cdot 10^{-6} = 16,9 \text{ Bq} \cdot \text{s}^{-1}$$

**Vraag 4.3 [4 punten]**

*Wat is de evenwicht-activiteitsconcentratie (in Bq·m<sup>-3</sup>) van het <sup>222</sup>Rn in de expositieruimte ten gevolge van een gemiddelde steen?*

1% van het gevormde radon ontsnapt naar de lucht in museum = 0,169 Bq·s<sup>-1</sup>

$$\lambda_{\text{ventilatie}} = \frac{50[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]}{150[\text{m}^3]} \times \frac{1}{3600} [\text{h} \cdot \text{s}^{-1}] = 9,26 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$A_{\text{evenwicht}} = \frac{\dot{p}}{\lambda_{\text{eff}}}$$

$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{fys}} + \lambda_{\text{vent}}$  (beredeneren dat  $\lambda_{\text{vent}}$  vrijwel gelijk is aan  $\lambda_{\text{eff}}$ , is ook goed)

Berekening  $\lambda_{\text{eff}}$ : [2 punten]

$$A_{\text{evenwicht}} = \frac{0,169}{(2,10 \cdot 10^{-6} + 9,26 \cdot 10^{-5})} = 1,78 \text{ kBq}$$

Dus de evenwicht-activiteitsconcentratie is

$$\frac{1,78 \cdot 10^3 \text{ Bq}}{150 \text{ m}^3} = 11,9 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 0,0119 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Berekening  $C_{\text{evenwicht}}$ : [2 punten]

Alternatief:

Per uur wordt  $0,169 \times 3600 = 608 \text{ Bq}$  geproduceerd. Als dit ook in  $50 \text{ m}^3(\text{/h})$  wordt afgevoerd is – onder verwaarlozing van het fysisch verval – de situatie in evenwicht:  $608/50 = 12,2 \text{ Bq/m}^3 = 0,0122 \text{ kBq/m}^3$

**Vraag 4.4a [3 punten]**

*Bereken de effectieve volgdozis voor een bezoeker die de expositieruimte eenmalig bezoekt. Bedenk daarbij zelf een reële blootstellingsduur.*

De collectie bevat 20 stenen uraniniet.

De evenwichtsconcentratie zou dan  $20 \times 0,0119 \text{ kBq/m}^3 = 0,238 \text{ kBq/m}^3$  zijn.

Het ademvolumetempo van bezoekers bedraagt =  $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Een reële blootstellingsduur ligt ruwweg tussen een kwartier en een uur. In beginsel zouden alle blootstellingsduren tussen 5 minuten en 8 uur (maximale openingstijd op een dag) geaccepteerd kunnen worden.

$$V_{\text{max}} = 1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \times 8 \text{ h} = 9,6 \text{ m}^3$$

$$A_{\text{inh}} = 9,6 \text{ m}^3 \times 0,238 \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3} = 2,3 \text{ kBq} \quad [2 \text{ punten}]$$

$$E(50) = A_{\text{inh}} \cdot e(50)$$

$$E(50) = 2,3 \cdot 10^3 \times 1,3 \cdot 10^{-8} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} = 30 \mu\text{Sv} \quad [1 \text{ punt}]$$

Een blootstellingsduur van een kwartier leidt tot een blootstelling van  $1 \mu\text{Sv}$ .

N.B. De in deze opgave gehanteerde  $e(50)$  is ter wille van de eenvoud ontleend aan de meest conservatieve waarde uit Tabel A.11 (ICRP-137) voor de effectieve dosis ten gevolge van blootstelling aan de dochters van  $^{222}\text{Rn}$ :  $1,5 \cdot 10^{-5}$  mSv per  $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**Vraag 4.4b [1 punt]**

*Geef een maatregel waarmee de blootstelling van bezoekers (en werknemers) verminderd kan worden.*

Een gangbare maatregel is om ervoor te zorgen dat het geëmaneerde radon niet of nauwelijks in de ruimte kan komen. Dit kan b.v. door de stenen 'luchtdicht' op te slaan of door ervoor te zorgen dat de vitrine rechtstreeks wordt afgezogen waardoor het grootste deel van het radon niet meer in de ruimte terecht kan komen.

Elke zinvolle maatregel wordt met een punt gehonoreerd, tot een maximum van 1 punt. Het noemen van 'beperken van de blootstellingsduur' is in theorie een geschikte maatregel, maar in de praktijk niet realistisch en wordt daarom met 0,5 punt gewaardeerd. Onzinmaatregelen kunnen leiden tot aftrek.

**Puntenverdeling**

<b>Vraagstuk 4</b>	
Vraag 4.1	6 punten
Vraag 4.2	3 punten
Vraag 4.3	4 punten
Vraag 4.4a	3 punten
Vraag 4.4b	1 punten
<b>Totaal</b>	<b>17 punten</b>