

## Examen Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van coördinerend deskundige

---

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

---

examendatum: 11 december 2023

examenduur: 13.30 - 16.30 uur

<b>Instructie:</b>
--------------------

- ❑ **Dit examen omvat 12 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 11 pagina's. Controleer dit!**
- ❑ Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Maak voor elk vraagstuk gebruik van een apart, bij dat vraagstuk horend uitwerkblad. Lever ook alle niet gebruikte uitwerkbladen in.
- ❑ Vermeld **alleen uw examenummer** op de uitwerkbladen (dus niet uw naam en adres).
- ❑ Het is geoorloofd boeken, persoonlijke aantekeningen en ander documentatiemateriaal te raadplegen voor het beantwoorden van de vragen.
- ❑ Geef aan via welke **berekeningsmethode** en/of volgens welke **beredenering** u tot de oplossing komt.
- ❑ Indien u een onderdeel van een vraagstuk niet kunt uitrekenen en het antwoord nodig is voor het oplossen van de rest van het vraagstuk, mag u uitgaan van een fictief antwoord.
- ❑ Voor sommige vraagstukken behoeven niet alle gegevens noodzakelijkerwijs te worden gebruikt.
- ❑ Besteed aandacht aan het vermelden en juist toepassen van grootheden én eenheden.
- ❑ In totaal kunt u 62 punten behalen bij het goed oplossen van de vraagstukken. De puntenverdeling over de vraagstukken is als volgt:
  - Vraagstuk 1: 15 punten    Vraagstuk 2: 17 punten
  - Vraagstuk 3: 16 punten    Vraagstuk 4: 14 punten
- ❑ U bent voor dit examen geslaagd als u minstens 55% van het totaal aantal punten hebt behaald. Dit komt overeen met een score van ten minste 34,5 punten.

## Vraagstuk 1: Inwendige besmetting met I-131 [15 punten]

Vroeger kwam het voor dat voor het bereiden van een "jodiumslok" poedervormig  $^{131}\text{I}$  werd opgelost in water. Deze jodiumslok werd vervolgens als therapie gebruikt bij patiënten met een overactieve schildklier. Bij een van deze bereidingen ging wat mis waardoor een besmetting op de vloer, op de tafel en op de kleding van een werknemer ontstond.

Om na te gaan of de werknemer een inwendige besmetting had opgelopen werd hem gevraagd direct de neus te snuiten. Meting van de activiteit van het snuitsel leverde een waarde van 9,3 kBq.

24 uur na het incident werd een schildkliermeting uitgevoerd. Hierbij werd een detector op 10 cm afstand van de schildklier gehouden. Bij de meting werd een netto teltempo van 20 cps gemeten.

### Gegevens:

- **Bijlage blz. 3-4:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3<sup>e</sup> druk 2015), blz. 164 en 165, gegevens  $^{131}\text{I}$
- **Bijlage blz. 5:** Depositiefraction (in %) van de geïnhaleerde activiteit voor twee AMAD-waarden
- **Bijlage blz. 6:** Equivalente volg dosis voor de schildklier en effectieve volg dosis door inhalatie van I-131 door werknemers
- Het totale detectierendement voor de meetopstelling met de detector op 10 cm afstand van de schildklier: 9,5 cps/kBq  $^{131}\text{I}$

Bij het beantwoorden van de vragen mag u veronderstellen dat de inwendige besmetting is ontstaan door inhalatie van poedervormig  $\text{Na}^{131}\text{I}$ . Aangenomen wordt dat bij het snuiten van de neus 60% van de op dat moment in de neus aanwezige activiteit in het snuitsel is gekomen.

### Vraag 1.1 [3 punten]

Bereken uit de activiteit van het snuitsel de totale geïnhaleerde activiteit.

### Vraag 1.2 [3 punten]

Bereken uit de schildkliermeting de totale geïnhaleerde activiteit.

### Vraag 1.3 [3 punten]

Bereken de effectieve volg dosis voor de werknemer. Beargumenteer expliciet welke waarde u voor de geïnhaleerde activiteit kiest.

**Vraag 1.4 [3 punten]**

Maak een onderbouwde schatting van de geabsorbeerde dosis voor de schildklier.

**Vraag 1.5 [3 punten]**

Toon door berekening aan dat de procentuele bijdrage van alle andere organen dan de schildklier aan de effectieve volgdosis kleiner is dan 10%.

**Puntenwaardering:**

<b>Vraagstuk 1</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
1.1	3
1.2	3
1.3	3
1.4	3
1.5	3
<b>Totaal</b>	<b>15</b>

## Vraagstuk 2: Leerlingenproject "Radioactieve straling" [17 punten]

In het kader van het project "Radioactieve straling" krijgen leerlingen de opdracht om de halveringsdikte van aluminium voor  $\gamma$ -straling te bepalen. In het practicumlokaal hebben de leerlingen de volgende middelen tot hun beschikking: een  $^{226}\text{Ra}$ (radium)-bron, een Geiger-Müllertelbuis met bijbehorende telapparatuur en een set aluminiumplaatjes met elk een dikte van 0,1 mm (zie Figuur 2.1).



**Figuur 2.1:** De meetopstelling

Het resultaat van hun metingen is een halveringsdikte van 0,3 mm aluminium. Om hun bevindingen te controleren raadplegen zij het internet en vinden een gammaspectrum van  $^{226}\text{Ra}$  met daarin een fotoniek bij ongeveer 100 keV en voor deze fotonen een halveringsdikte van 1,5 cm aluminium. Zij zijn van mening dat dit significant afwijkt van hun meetresultaat en vragen u als ervaren stralingsbeschermingsdeskundige om uit te zoeken wat zij fout doen.

### Gegevens:

- **Bijlage blz. 7:** Vereenvoudigd overzicht van de energie  $E$  (in MeV) en emissiewaarschijnlijkheid  $\gamma$  van de meest relevante  $\alpha$ -,  $\beta$ - en  $\gamma$ -overgangen in het verval van  $^{226}\text{Ra}$  in evenwicht met haar dochters
- **Bijlage blz. 8:** Interactiecoëfficiënten voor fotonen in aluminium (ontleend aan Inleiding tot de Stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al, 2<sup>e</sup> druk, 2007, p.380)
- De luchtkermatempoconstante van  $^{226}\text{Ra}$  in evenwicht met haar dochters is  $k = 0,28 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{m}^2$

- Als vuistregel voor de luchtkermatempoconstante mag gebruikt worden:  $k = 1/7 \cdot E_{\gamma, \text{totaal}}$ , waarbij  $k$  uitgedrukt is in  $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$  en  $E_{\gamma, \text{totaal}}$  de totaal uitgezonden fotonenenergie in MeV per desintegratie van  $^{226}\text{Ra}$  in evenwicht met haar dochters
- Bij de gebruikte meetgeometrie mag build-up worden verwaarloosd
- Het massagetal  $A$  van aluminium is 27; het soortelijk gewicht  $\rho$  van aluminium bedraagt  $2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- De Geiger-Müllertelbuis is gevoelig voor zowel  $\alpha$ -,  $\beta$ - als  $\gamma$ -straling
- Aangenomen mag worden dat de respons van de Geiger-Müllertelbuis niet afhankelijk is van de energie van de op de telbuis invallende straling

### Vraag 2.1 [3 punten]

Verifieer dat de halveringsdikte van aluminium voor fotonen met een energie van 100 keV ongeveer 1,5 cm is.

De vuistregel voor de luchtkermatempoconstante (zie gegevens) kan worden gebruikt om een schatting te maken van de totale uitgezonden  $\gamma$ -energie per desintegratie door  $^{226}\text{Ra}$ , waarbij  $^{226}\text{Ra}$  in evenwicht is met haar dochters.

### Vraag 2.2 [5 punten]

Welk nuclide in de vervalreeks van  $^{226}\text{Ra}$  veroorzaakt de grootste bijdrage aan de totaal uitgezonden  $\gamma$ -energie? Beargumenteer uw antwoord en bepaal de hoogte van deze bijdrage (in %).

### Vraag 2.3 [2 punten]

Beargumenteer dat de leerlingen in elk geval NIET de halveringsdikte van aluminium voor fotonen uitgezonden bij het verval van  $^{226}\text{Ra}$ , in evenwicht met haar dochters, hebben gemeten.

In het verval van  $^{226}\text{Ra}$  + dochters worden behalve  $\gamma$ -fotonen ook  $\alpha$ - en  $\beta$ -deeltjes uitgezonden.

### Aanvullende gegevens

- De dracht  $R_A$  (in cm) van  $\alpha$ -deeltjes in materie met atoommassa  $A$  en soortelijk gewicht  $\rho$  volgt uit de Regel van Bragg-Kleeman:  

$$R_A = 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{AR_L}}{\rho}$$
, met  $R_L$  de dracht (in cm) van  $\alpha$ -deeltjes in lucht
- Als vuistregel voor de dracht (in cm) van  $\alpha$ -deeltjes in lucht mag gebruikt gemaakt worden van de formule  $R_L = 0,3\sqrt{E_\alpha^3}$ , waarbij  $E_\alpha$  de energie van het  $\alpha$ -deeltje in MeV is

- Uit de literatuur is bekend dat de transmissie van  $\beta$ -deeltjes door absorberend materiaal als functie van de dikte van dat materiaal een nagenoeg exponentieel verloop heeft totdat de dikte in de buurt komt van de maximale dracht van de  $\beta$ -deeltjes.
- Als vuistregel voor de halveringsdikte voor  $\beta$ -straling mag gebruikt worden:  $d_{1/2} = 0,07 E_{\beta, \max} / \rho$  waarbij  $d_{1/2}$  uitgedrukt is in cm,  $E_{\beta, \max}$  in MeV en  $\rho$  in  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

### Vraag 2.4 [3 punten]

Beargumenteer dat de leerlingen in elk geval ook NIET de halveringsdikte van aluminium voor  $\alpha$ -deeltjes uitgezonden bij het verval van  $^{226}\text{Ra}$ , in evenwicht met haar dochters, hebben gemeten. Ondersteun uw antwoord met een berekening.

### Vraag 2.5 [4 punten]

Wat is de transmissie van 0,3 mm aluminium voor  $\beta$ -deeltjes die door  $^{210}\text{Bi}$ (bismut) worden uitgezonden?

### Puntenwaardering:

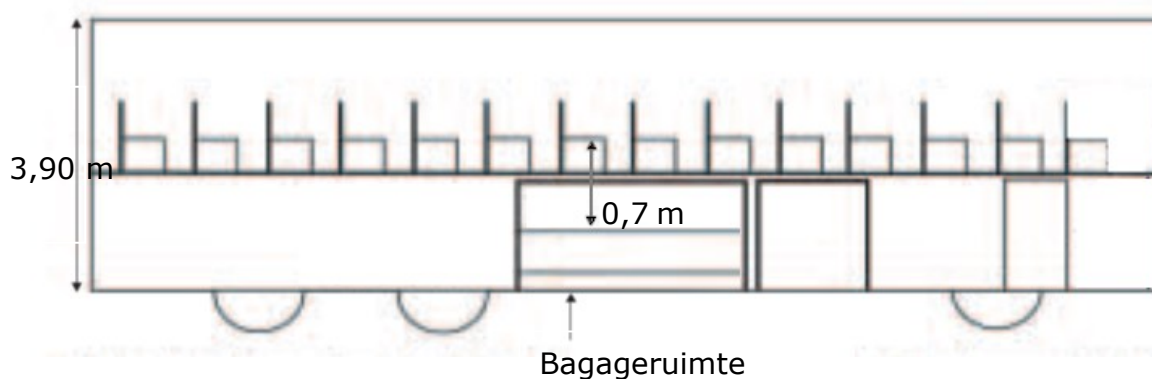
<b>Vraagstuk 2</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
2.1	3
2.2	5
2.3	2
2.4	3
2.5	4
<b>Totaal</b>	<b>17</b>

### Vraagstuk 3: Blootstelling van buspassagiers in het Andesgebergte [16 punten]

Begin 2002 werd een  $^{75}\text{Se}$ (selenium)-bron, die werd gebruikt voor niet-destructief onderzoek (NDO), aan de voet van het Andesgebergte vervoerd in de bagageruimte van een personenbus. Bij ontvangst van de bron op locatie bleek dat de bron losgeraakt en buiten de afscherming terechtgekomen was. Hierdoor ontstond de angst dat de passagiers en ook de NDO-werknemers een (zeer) hoge stralingsdosis hadden opgelopen. Het IAEA werd geïnformeerd en gevraagd om te helpen met het bepalen van de door de passagiers opgelopen dosis.

#### Gegevens:

- **Bijlage blz. 9:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3<sup>e</sup> druk 2015), blz. 90, gegevens  $^{75}\text{Se}$
- De  $^{75}\text{Se}$  bron had volgens de door de IAEA gegeven informatie een activiteit van 10 Ci op het moment van het incident
- Het onderlichaam van de passagiers bevond zich op minstens 0,7 m van de bron; zie figuur 3.1
- De transmissie van de vloer van de bus voor de door  $^{75}\text{Se}$  uitgezonden fotonen bedroeg ten hoogste  $T = 0,8$
- De reisduur was 8 uur
- Voor de conversie van omgevingsdosis-equivalent naar effectieve dosis mag een factor  $E/H^*(10) = 0,8 \text{ Sv/Sv}$  genomen worden



**Figuur 3.1:** Zijaanzicht van de bus waar de radiografie-apparatuur in werd vervoerd.

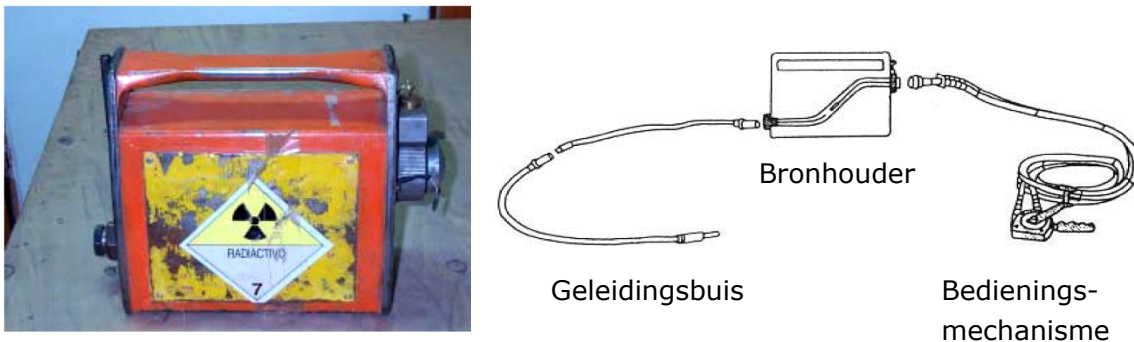
**Vraag 3.1 [4 punten]**

Bereken de effectieve dosis voor de dichtstbijzijnde passagier als de bron zich buiten de afscherming bevindt.

**Vraag 3.2 [3 punten]**

Geef een schatting van de mogelijke biologische effecten bij deze passagier. Onderbouw het antwoord met relevante risicogetallen en/of drempeldosiswaarden.

De bron zat oorspronkelijk in een bronhouder zoals weergegeven in Figuur 3.2. Bij transport zijn de geleidingsbuis en het bedieningsmechanisme losgehaald van de bronhouder; deze worden samen met de bronhouder vervoerd.



**Figuur 3.2:** Bronhouder en radiografie-apparatuur

De bron zit vast aan een stalen voerdraad die via een geleidingsbuis de bronhouder in of uit kan worden gedraaid. De bron bleek te zijn losgekomen van de stalen voerdraad en was blijven hangen in de geleidingsbuis. Eén van de werknemers heeft de bron uit deze buis geschud en de bron opgevangen in de handen. U wordt gevraagd een schatting te maken van de huiddosis die de betrokken medewerker heeft opgelopen.

De bron heeft een lengte van 100 mm en mag in dit vraagstuk als een lijnbron worden beschouwd. Het persoonsdosisequivalenttempo op 70  $\mu\text{m}$  weefseldiepte in de huid ten gevolge van een (oneindig lange) lijnbron met een lineïeke activiteit  $a$  (in MBq/m) is gelijk aan:

$$\dot{H}_p(0,07) = \frac{\pi \cdot h_p(0,07) \cdot a}{r} \mu\text{Sv/h}$$

waarbij  $r$  de afstand (in m) tot de lijnbron is en  $h_p(0,07)$  de persoonsdosisequivalenttempoconstante van de huid (in  $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  per MBq op



1 m, ofwel  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{m}^2$ ). Deze formule geeft voor een eindige lijnbron een overschatting.

#### Aanvullende gegevens:

- De handen van de werknemer zijn naar schatting 30 seconden blootgesteld
- De afstand tussen bron en handen wordt geschat op 1 mm
- In de literatuur is de volgende waarde voor  $h_p(0,07)$  te vinden:  
 $h_p(0,07) = 15,1 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$  per GBq op 10 cm
- De absorptie van door  $^{75}\text{Se}$  uitgezonden fotonen in bronmateriaal en -omhulling mag verwaarloosd worden

#### Vraag 3.3 [6 punten]

Bereken het persoonsdosisequivalent  $H_p(0,07)$  ter plaatse van de bestraalde huid van de werknemer.

Indien u het antwoord op vraag 3.3 schuldig bent gebleven mag u uitgaan van 10 Sv.

#### Vraag 3.4 [3 punten]

Geef een beschrijving van het verloop van de mogelijke biologische effecten op de handen van de werknemer als gevolg van de bij vraag 3.3 bepaalde waarde.

#### Puntenwaardering:

<b>Vraagstuk 3</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
3.1	4
3.2	3
3.3	6
3.4	3
<b>Totaal</b>	<b>16</b>

## Vraagstuk 4: Efficiëntiebepaling van een gammacamera [14 punten]

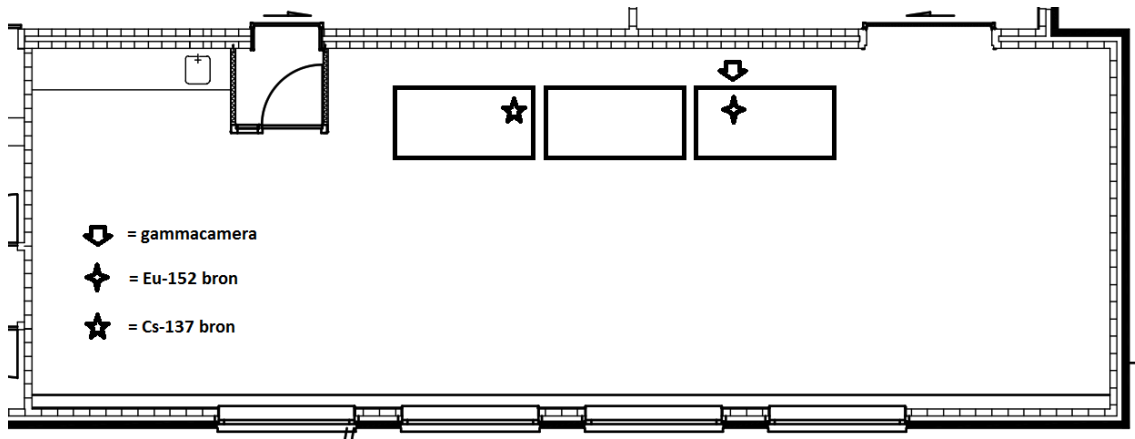
In een laboratoriumruimte wordt een scheidingsmethode voor een nieuw therapeutisch radionuclide ontwikkeld. Deze scheidingsmethode bestaat uit een aantal chemische bewerkingen die worden uitgevoerd in een gesloten handschoenenkast (glovebox). De afgescheiden oplossing wordt opgevangen in een monsterflesje dat op een vaste positie in de handschoenenkast wordt geplaatst voor metingen.

Om de efficiëntie van de scheidingsmethode te controleren maakt de hoofdonderzoeker gebruik van een nieuwe gammacamera die zowel het gammaspectrum als de locatie van een bron kan opnemen.

Om de efficiëntie van de gammacamera te bepalen, wordt een  $^{152}\text{Eu}$ (europium)-bron op de beoogde meetpositie in de handschoenenkast geplaatst. De bron heeft op het moment van de meting een gekalibreerde activiteit van 206,8 kBq.

### Gegevens:

- **Figuur 4.1:** Situatieoverzicht van het laboratorium
- De afstand tussen de gammacamera en de  $^{152}\text{Eu}$ -bron bedraagt 445 mm
- De meettijd van de kalibratiemeting bedraagt 1 uur
- In dit vraagstuk wordt onder achtergrond verstaan: fotonen afkomstig uit de natuurlijke achtergrond en fotonen die het gevolg zijn van comptonverstrooiing
- Met de dode tijd van de detector in de camera hoeft geen rekening te worden gehouden
- **Bijlage blz. 10:** Gammaspectrum van de kalibratiemeting  $^{152}\text{Eu}$ -bron,  $A = 206,8$  kBq
- **Bijlage blz. 11:** Resultaten kalibratiemeting  $^{152}\text{Eu}$ -bron,  $A = 206,8$  kBq



**Figuur 4.1:** Situatieoverzicht van het laboratorium.

Het bruto aantal counts  $N_B$  in de piek van 121,78 keV bedraagt 9036.

**Vraag 4.1 [4 punten]**

Bepaal het netto teltempo en de standaarddeviatie hierin voor de piek van 121,78 keV.

De minimaal detecteerbare activiteit is bij deze opgave die activiteit die nog meetbaar is met een betrouwbaarheidsinterval van 3 standaarddeviaties in het achtergrondteltempo.

**Vraag 4.2 [5 punten]**

Bereken met uitsluitend de gegevens van de 121,78 keV piek de minimaal detecteerbare activiteit (MDA) voor  $^{152}\text{Eu}$  in deze opstelling.

In het spectrum is duidelijk een 662-keV-energiepiek aanwezig. Deze is afkomstig van een  $^{137}\text{Cs}$ (cesium)-bron van een ander experiment.

**Vraag 4.3 [2 punten]**

Beargumenteer welk effect de aanwezigheid van  $^{137}\text{Cs}$  heeft op de in vraag 4.2 bepaalde minimaal detecteerbare activiteit van  $^{152}\text{Eu}$ .

Men kan aantonen dat met de keuze voor de 121,78 keV piek in vraag 4.2 de optimale MDA bepaald is.

**Vraag 4.4 [3 punten]**

Beschrijf welke factoren de optimale piekkeuze bepalen, en wat hun effect is op de MDA.

**Puntenwaardering:**

<b>Vraagstuk 4</b>	
<b>Vraag</b>	<b>Punten</b>
4.1	4
4.2	5
4.3	2
4.4	3
<b>Totaal</b>	<b>14</b>