

UITWERKINGEN

Examen Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van coördinerend deskundige

NRG PALLAS
Technische Universiteit Delft
Rijksuniversiteit Groningen
Radboudumc

NRG PALLAS
TUD
RUG
RUMC

Examendatum: 11 mei 2026

- 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

Uitwerkingen vraagstuk 1 - mei 2026 [15 punten]
Oplevering angiokamer

Vraag 1.1 [4 punten]

Laat zien dat het persoonsdosisequivalent $H_p(0,07)$ van een patiënt ter plaatse van het intreevlak bij een gemiddelde procedure ongeveer gelijk is aan 0,9 Sv.

Uit Bijlage blz. 3 volgt een output van 6,1 mGy per mA.min op 1 meter bij een buisspanning van 75 kV [1 punt]

$$K_{lucht} = 6,1 [mGy \cdot m^2 \cdot (mA \cdot min)^{-1}] \cdot 64 [mA \cdot min] \cdot \frac{1^2}{(1-0,3)^2} [m^{-2}] = 797 mGy = 0,8 Gy$$

[2 punten]

$$H_p(0,07) = K_{lucht} \cdot 1,1 [Sv \cdot Gy^{-1}] = 876 mSv = 0,9 Sv$$

[1 punt]

Vraag 1.2 [2 punten]

Beargumenteer of het waarschijnlijk is dat er patiënten zijn waarbij roodheid/erytheem van de huid ontstaat als gevolg van dit onderzoek.

De drempeldosis voor roodheid van de huid ligt in de orde van enkele Gy (voor vroeg erytheem 2 – 3 Gy, dieper erytheem ongeveer 6 Gy) [1 punt]
 De berekende equivalente huiddosis $H_p(0,07) = 0,9 Sv$.

De berekende $H_p(0,07)$ is een maat voor de equivalente huiddosis ter plaatse van de bestraalde huid. Deze blijft ruim onder de drempeldosis voor erytheem.

[1 punt]

Extra toelichtingen

De drempeldosis en equivalente huiddosis hebben een andere eenheid, maar zijn in dit geval vergelijkbaar. $H_p(0,07)/K_{lucht} = 1,1 Sv/Gy$.

De berekende $H_p(0,07)$ van 0,9 Sv is gebaseerd op gemiddelde belichtingsparameters. Voor sommige patiënten zijn deze parameters en dus de blootstelling hoger.

Voor een individuele patiënt kan de gevoeligheid voor straling hoger zijn en lagere drempeldosiswaarden zijn mogelijk door bestraling van een groter huidoppervlak. De genoemde drempeldosiswaarde moet in de orde grootte

van enkele Gy liggen. Het blijft onwaarschijnlijk dat roodheid van de huid zal optreden bij deze onderzoeken.

Wanneer men refereert naar de equivalente wettelijke dosislimiet van 0,5 Sv/jaar voor de huid dan mag men dit – afhankelijk van de verdere argumentatie – goed rekenen.

Vraag 1.3 [6 punten]

Toon met een berekening aan dat een afscherming van 1 mm lood in de richting van de bedieningsruimte voldoende is om te voldoen aan de interne dosisbeperking van het ziekenhuis.

Aflezen van de verstrooiingsfractie in bijlage blz. 4, geeft na middelen van 0,00261 en 0,00283 = 0,00272 [1 punt]

$$H^*(10) = 0,8 [Gy \cdot patiënt^{-1}] \cdot 1400 [patiënten] \cdot 0,00272 \cdot \frac{1^2 [m^2]}{2,7^2 [m^2]} \cdot 1,4 [Gy \cdot Sv^{-1}]$$

$$H^*(10) = 0,6 Sv = 583 mSv \quad [3 punten]$$

N.B. Alternatieve benadering (ook correct): rekenen met 0,9 Sv per patiënt, mits gecorrigeerd met factor 1,1/1,4 naar omgevingsdosisequivalent (1 punt).

De interne dosisbeperking voor H*(10) is 0,3 mSv. De benodigde transmissie is dan:

$$T = \frac{H^*(10)_{afgeschermd}}{H^*(10)_{onafgeschermd}} = \frac{0,3 [mSv]}{583 [mSv]} = 5,1 \cdot 10^{-4} \quad [1 punt]$$

$$k = 5,1 \cdot 10^{-4} \cdot 6,1 [mGy \cdot m^2 \cdot (mA \cdot min)^{-1}] = 3,1 \cdot 10^{-3} [mGy \cdot m^2 \cdot (mA \cdot min)^{-1}]$$

Aflezen geeft iets minder dan 1 mm lood. Een afscherming van 1 mm lood is dus voldoende. [1 punt]

Vraag 1.4 [3 punten]

Noem drie maatregelen die je kunt nemen om de stralingsveiligheid te waarborgen tijdens deze controle.

In beginsel zijn alle zinvolle maatregelen goed die ofwel de kans op het optreden van de vog verkleinen, dan wel de effecten daarvan beperken als deze toch optreedt.

Geschikte maatregelen zijn onder andere:

- Maak gebruik van een elektronische dosimeter met alarmfunctie

- Betreed de ruimte niet tijdens het meten
- Houd zoveel mogelijk afstand voor zover mogelijk en relevant
- Voer visuele inspecties uit tijdens de bouw
- Zet het gebied af, zodat er niemand bij kan komen
- Maak gebruik van waarschuwingssignalering in de vorm van stickers, linten etc. (bebording gecontroleerde zone voor röntgenstraling)
- Voer de metingen uit met twee personen: één bedient de röntgenbuis en houdt er toezicht op dat er niemand de ruimte betreedt, de ander doet de metingen.
- Zorg ervoor dat de röntgenbuis zo kort als mogelijk aan staat.
- Gebruik zo mogelijk een beletlamp

1 punt per goed argument tot een maximum van 3 punten

Puntenwaardering:

Vraag	Punten	Leerdoel(en)	KITPA
1	4	2, 10	T
2	2	7, 15	K
3	6	2, 5, 10	T
4	3	10	I
Totaal	15		

Uitwerkingen vraagstuk 2 - mei 2026 [16 punten]
RIVM waarschuwt voor quantumhanger

Vraag 2.1 [4 punten]

Bereken de ^{232}Th activiteit van de gebruikte referentiebron.

Berekening massieke activiteit referentiebron:

$$A_{\text{massiek}} = n \cdot f_{\text{atoom}} \cdot \lambda \cdot \left(\frac{N_A}{M}\right) = 1 \cdot 1 \cdot 1,56 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1} \cdot \left(\frac{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{570 \text{ g mol}^{-1}}\right) = 1648 \text{ Bq g}^{-1}$$

[3 punten]

Hierin is n het aantal ^{232}Th -atomen per molecuul thoriumpentahydraat en f_{atoom} de abundantie van het ^{232}Th isotoop in het aanwezige thorium. Het niet expliciet noemen van n en f_{atoom} wordt niet fout gerekend.

Gewicht thoriumzout: 0,8183 gram

Activiteit referentiebron:

$$A = A_{\text{massiek}} \cdot m = 1648 \text{ [Bq g}^{-1}] \cdot 0,8183 \text{ [g]} = 1348,7 \text{ Bq} \quad 1 \text{ punt}$$

Alternatief: de specifieke activiteit van ^{232}Th : 4,06 Bq/g (zie Handboek Radionucliden)

$$4,06 \cdot 10^3 \text{ [Bq} \cdot \text{g}^{-1}] \cdot \frac{232 \text{ [g} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ }^{232}\text{Th}]}{570 \text{ [g} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ bron}]} \cdot 0,8183 \text{ [g]} \cdot 0,001 \text{ [kBq} \cdot \text{Bq}^{-1}] = 1,35 \text{ kBq}$$

N.b. als n en f_{atoom} ongelijk 1 zijn zou het antwoord nog vermenigvuldigd moeten worden met $n \cdot f_{\text{atoom}}$.

Vraag 2.2 [4 punten]

Kies één geschikte fotonenergie uit Tabel 2.1 en bereken hiermee het fotopiekrendement van de gebruikte meetopstelling voor ^{228}Ac in counts per uitgezonden foton. Beargumenteer kort uw keuze voor deze fotonenergie.

Netto teltempo van een van de pieken, bv 338 keV

$$R_n = R_b - R_a = \frac{43669 \text{ counts}}{1 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}} - \frac{320 \text{ counts}}{1 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}} = 12,0 \text{ cps} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$A \text{ (Bq)} = \frac{R_n \text{ (cps)}}{y \text{ (foton} \cdot \text{desintegratie}^{-1}) \cdot \eta \text{ (counts} \cdot \text{foton}^{-1})}$$

$$1348,7 \text{ Bq} = \frac{12,0 \text{ cps}}{0,113 \cdot \eta}$$

fotopiekrendement $\eta = 0,079$ counts per foton [2 punten]

Om het fotopiekrendement zo nauwkeurig mogelijk te bepalen gebruikt men bij voorkeur de fotonenergie met het grootste aantal (netto) counts in de fotopiek – dat leidt tot de relatief kleinste fout. De keuze voor een fotonenergie van 338 of 911 keV ligt dan ook het meest voor de hand.

[1 punt]

Bij de keuze voor een energie van 911 keV bedraagt het fotopiekrendement $\eta = 0,031$ counts per foton.

Het beargumenteerd verwaarlozen van de achtergrond wordt goed gerekend.

Vraag 2.3 [5 punten]

Bereken de ^{232}Th activiteit van de quantumhanger en de onzekerheid hierin voor het 95%-betrouwbaarheidsinterval.

^{228}Ac is in seculair evenwicht met ^{232}Th dus beide activiteiten zijn gelijk aan elkaar.

Activiteit quantumhanger, piek 338 keV:

$$R_b = \frac{2318 \text{ counts}}{1 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}} = 0,64 \text{ cps}$$

$$R_a = \frac{320 \text{ counts}}{1 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}} = 0,09 \text{ cps}$$

$$R_n = R_b - R_a = 0,64 - 0,09 = 0,56 \text{ cps} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$A \text{ (Bq)} = \frac{R_n \text{ (cps)}}{y \text{ (foton} \cdot \text{desintegratie}^{-1}) \cdot \eta \text{ (counts} \cdot \text{foton}^{-1})}$$

$$A \text{ (Bq)} = \frac{0,56 \text{ cps}}{0,113 \cdot 0,079} = 62,2 \text{ Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

Betrouwbaarheidsinterval:

De standaarddeviatie in de activiteit wordt bepaald door de standaarddeviatie in het netto teltempo voor piek 338 keV:

$$s_{R_{netto}} = \sqrt{\frac{R_{bruto}}{t_{bruto}} + \frac{R_{achtergrond}}{t_{achtergrond}}} = \sqrt{\frac{0,64 \text{ cps}}{3600 \text{ (s)}} + \frac{0,09 \text{ cps}}{3600 \text{ (s)}}} = 0,014 \text{ cps}$$

Standaarddeviatie in de activiteit is dan

$$s_A = \frac{s_{R_{netto}} \text{ (cps)}}{y \text{ (foton} \cdot \text{desintegratie}^{-1}) \cdot \eta \text{ (counts} \cdot \text{foton}^{-1})} = \frac{0,014 \text{ cps}}{0,113 \cdot 0,079} = 1,6 \text{ Bq} \quad [2 \text{ punten}]$$

$A(^{228}\text{Ac}) = A(^{232}\text{Th})$ dus met 95% betrouwbaarheidsinterval ($2s_A$) bedraagt de activiteit in de hanger $62 \pm 3 \text{ Bq}$. [1 punt]

Bij de keuze voor een energie van 911 keV is het antwoord $60 \pm 3 \text{ Bq}$.

Vraag 2.4 [3 punten]

Is het voorhanden hebben en gebruiken van de quantumhanger in dat geval vrijgesteld of valt deze onder het controlestelsel van het Bbs?

^{232}Th activiteit quantumhanger is $62 \pm 3 \text{ Bq}$ per 19,06 gram.

Dit geeft $\frac{62 \text{ Bq}}{19,06 \text{ g}} = 3,3 \text{ Bq g}^{-1} = 3,3 \text{ kBq kg}^{-1}$.

In tabel B van de regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming zijn vrijstellingswaarden gegeven. Voor de toetsing aan deze vrijstellingswaarden dient gebruikt gemaakt te worden van de waarden voor ^{232}Th in seculair evenwicht ($^{232}\text{Th-sec}$). [1 punt]

In tabel B van deze regeling is een vrijstellingswaarde voor radioactieve stoffen in elk type materiaal in matige hoeveelheden. Voor $^{232}\text{Th-sec}$ is deze vrijstelling 1 kBq kg^{-1} .

De activiteitsconcentratie in de quantumhanger is hoger dan de wettelijke grenswaarde voor vrijstelling van 1 kBq kg^{-1} .

In tabel kolom 3 van deze regeling is een vrijstellingswaarde voor de totale activiteit gegeven. Voor ^{232}Th in seculair evenwicht is deze vrijstelling 1000 Bq. De activiteit van de quantumhanger is veel minder.

Omdat aan één van de twee eisen wordt voldaan, wordt de hanger vrijgesteld van het controlestelsel. [2 punten]

Puntenwaardering:

Vraagstuk			
Vraag	Punten	Leerdoel	KITPA
2.1	4	1	T
2.2	4	12	I
2.3	5	12	P
2.4	3	9	K
Totaal	16		

Uitwerkingen vraagstuk 3 - mei 2026 [15 punten]
Radonkur

Vraag 3.1 [2 punten]

Wordt op de gemiddelde werkplek (binnenshuis) in Nederland het referentieniveau voor de radonconcentratie uit het Bbs overschreden? Beargumenteer uw antwoord.

Alleen voor ²²²Rn is een referentieniveau gegeven – ²²⁰Rn moet dus buiten beschouwing blijven. [1 punt]

De radonconcentratie (²²²Rn) binnenshuis bedraagt 15,6 Bq·m⁻³, hetgeen lager is dan de referentiewaarde van 100 Bq·m⁻³. [1 punt]

Vraag 3.2 [3 punten]

Bereken de procentuele bijdrage van ²²⁰Rn aan de totale effectieve volgdosis per jaar door inhalatie van radonisotopen (inclusief dochters) binnenshuis in Nederland.

De bijdrage van ²²⁰Rn aan de effectieve jaardosis binnenshuis kan alleen worden uitgerekend wanneer de verblijftijd bekend is. Omdat die ontbreekt kan alleen een relatieve/procentuele bijdrage worden uitgerekend op basis van de effectieve (volg)dosistempi die met de gegevens uit tabel 1 kunnen worden berekend.

De procentuele bijdrage volgt uit

$$\frac{C_{220} \times DCC_{220}}{\sum_i C_i \times DCC_i} \times 100\%$$

[2 punten]

waarbij C_i de gemiddelde radonconcentratie is. Invullen van de waarden uit tabel 1 levert: 25,6/(25,6+56,2) × 100% = 31% [1 punt]

Ter info de berekening voor de effectieve dosis door radon o.b.v. het rapport van Smetsers & Bekhuis:

Nuclide	Locatie	Gemiddelde radonconcentratie (in Bq·m ⁻³)	DCC (in nSv·h ⁻¹ per Bq·m ⁻³)	t	E (mSv)
²²⁰ Rn – NL	binnenshuis	0,64	40	7884	0,20
	buitenshuis	0	-	876	0,00
²²² Rn – NL	binnenshuis	15,6	3,6	7884	0,44
	buitenshuis	3	6,3	876	0,017
Σ (NL)					0,66

Vraag 3.3 [3 punten]

Bereken de effectieve volgdozis door inhalatie van ^{222}Rn (inclusief dochters) in de mijngang voor zowel patiënten die een radonkuur ondergaan als voor personeel dat in de instelling werkt gedurende het jaar.

Patiënten verblijven 12 uur in de mijngang en lopen dus een effectieve volgdozis op van:

$$C_{222} \times \text{DCC} \times t = 3,7 \times 10^4 [\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}] \cdot 3,6 [\text{nSv} \cdot \text{h}^{-1} \text{ per } \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}] \cdot 12 [\text{h}] = 1,6 \times 10^6 \text{ nSv} = 1,6 \text{ mSv} \quad [2 \text{ punten}]$$

Personeel loopt een maximale jaardosis op gelijk aan

$$1,6 [\text{mSv}] \times 100 [\text{h} \cdot \text{j}^{-1}] / 12 [\text{h} \cdot \text{j}^{-1}] = 13 \text{ mSv} \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 3.4 [3 punten]

Geef voor zowel patiënten als personeel aan of in dat geval een in Nederland geldende limiet voor de effectieve jaardosis wordt overschreden.

De totale effectieve volgdozis voor inhalatie van radonisotopen is groter dan bij 3.3 berekend: de bijdrage van ^{220}Rn is nog niet meegerekend. Deze wordt verondersteld maximaal 30% te zijn. De effectieve volgdozis voor patiënten wordt daarmee $1,6 [\text{mSv}] / (1 - 0,3) = 2,3 \text{ mSv}$ per behandeling. De effectieve volgdozis voor het personeel wordt dan $13 [\text{mSv}] / (1 - 0,3) = 19 \text{ mSv}$. [1 punt]

N.B. De bijdrage van ^{220}Rn is vermoedelijk zwaar overschat – in Bad Kreuznach gaat het om een oude uraniummijn waarin je vooral exhalatie van ^{222}Rn verwacht.

Voor patiënten gelden geen dosislimieten en kan er dus ook geen limiet worden overschreden. [1 punt]

Voor werknemers gelden dosislimieten die afhankelijk zijn van de vraag of ze zijn ingedeeld als blootgestelde werknemer. De limiet voor niet-blootgestelde werknemers (1 mSv) wordt overschreden. [1 punt]

Een kandidaat die meldt dat de 'limiet' voor blootgestelde werknemers categorie-B wordt overschreden krijgt geen puntenaftrek. Deze 'limiet' (6 mSv) geldt als ondergrens voor de indeling als blootgesteld werknemer categorie A – mede op grond van de potentiële blootstelling – en is dus geen echte limiet.

Vraag 3.5 [4 punten]

Hoe groot moet het ventilatievoud $\lambda_{ventilatie}$ (in h^{-1}) ten minste zijn om ervoor te zorgen dat de radonconcentratie aan het referentieniveau kan voldoen?

Uit de gegeven formule volgt voor de evenwichtssituatie zonder ventilatie:

$$C_{evenwicht} = 37000 [Bq \cdot m^{-3}] = \frac{\dot{P}}{2,1 \cdot 10^{-6} [s^{-1}]}$$

omdat λ_{eff} dan gelijk is aan λ_{fys} .

Het productietempo \dot{P} is dan $0,078 Bq/m^3$ per seconde. [1 punt]

Om aan het referentieniveau te voldoen dient $C_{evenwicht}$ gelijk te zijn aan $100 Bq \cdot m^{-3}$. Met $\lambda_{eff} = \lambda_{fys} + \lambda_{vent}$ volgt dan:

$$100 [Bq \cdot m^{-3}] = \frac{0,078 [Bq \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}]}{(2,1 \cdot 10^{-6} [s^{-1}] + \lambda_{vent})}$$

$$\lambda_{vent} = \frac{0,078}{100} - 2,1 \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 10^{-4} s^{-1} \quad [2 \text{ punten}]$$

$$7,8 \cdot 10^{-4} [s^{-1}] \cdot 3600 [s \cdot h^{-1}] = 2,8 h^{-1} \quad [1 \text{ punt}]$$

Merk op dat de tussenstap waarin het productietempo wordt uitgerekend feitelijk overbodig is:

$$\frac{37.000}{100} = \frac{\dot{P}/\lambda_{fys}}{\dot{P}/\lambda_{eff}} = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{fys}}$$

Invullen van de vervalconstante levert als antwoord $\lambda_{eff} = 7,8 \cdot 10^{-4} (s^{-1})$.

Omdat $\lambda_{eff} \gg \lambda_{fys}$ mag geconcludeerd worden dat $\lambda_{vent} = \lambda_{eff}$.

Uiteraard wordt dit inzicht, mits verder goed en volledig uitgevoerd met 4 punten gewaardeerd.

Puntenwaardering:

Vraag	Punten	Leerdoelen	KITPA
1	2	6, 9	T
2	3	4, 6	I
3	3	4	T
4	3	9	K/T
5	4	1,10	T
Totaal	15		

Uitwerkingen vraagstuk 4 - mei 2026 [16 punten]

Radiografie-incident met ^{192}Ir

Vraag 4.1a (2 punten)

Bepaal de transmissie door de roestvrijstalen omhulling van de bron.

Uit het Handboek Radionucliden is te zien dat ^{192}Ir op 1 meter per MBq een dosistempo veroorzaakt van $0,14 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Vanuit de technische gegevens blijkt dat de ingekapselde bron met ^{192}Ir een dosistempo van $0,067 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ per MBq op 1 meter. [1 punt]

De transmissie door de roestvrijstalen omhulling van de bron is daarom

$$\text{Transmissie} = \frac{0,067[\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}]}{0,14[\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}]} = 0,48$$

[1 punt]

Vraag 4.1b (2 punten)

Bereken de activiteit van de bron op het moment van het incident.

Activiteit op 23 december 2011: 4366 GBq
Verstreken tijd tot incident: $(31-23) + 11 = 19$ dagen [1 punt]

Activiteit op 11 januari 2012: $4366 [\text{GBq}] \times 0,5^{19/73,83} = 4366 [\text{GBq}] \times 0,84$
 $= 3,7 \cdot 10^3 \text{ GBq}$ [1 punt]

Vraag 4.2 (4 punten)

Bereken de afstand die in dat geval in 2 uur geleid kan hebben tot een geabsorbeerde dosis van 4 Gy ter plaatse van het lichaam.

Luchtkermatempo op 1 meter van de onafgeschermdde bron:
 $0,11 [\mu\text{Gy}/\text{h per MBq}/\text{m}^2] \times 0,48 \times (3,7 \cdot 10^6 [\text{MBq}]/1 [\text{m}^2]) =$
 $0,053 [\mu\text{Gy}/\text{h per MBq}/\text{m}^2] \times (3,7 \cdot 10^6 [\text{MBq}]/1 [\text{m}^2]) = 2,0 \cdot 10^5 \mu\text{Gy}/\text{h}$ [1,5 punt]

De geabsorbeerde dosis kan gelijkgesteld worden aan de luchtkerma [0,5 punt]

De geabsorbeerde dosis op 1 meter in 2 uur is
 $2 \times 2,0 \cdot 10^5 [\mu\text{Gy}/\text{h}] \times 1 \cdot 10^{-6} [\text{Gy}/\mu\text{Gy}] = 0,39 \text{ Gy}$ [1 punt]

Met de kwadratenwet volgt dan dat een geabsorbeerde dosis van 4 Gy wordt ontvangen op een afstand van

$$1[m] \times \sqrt{0,39[Gy] / 4[Gy]} = 0,31 m \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 4.3 (2 punten)

Geef een mogelijke reden waarom de door de persoonsdosismeter geregistreerde waarde groter is dan de geschatte geabsorbeerde dosis van 4 Gy.

De persoonsdosismeter meet 7 Gy op één plaats aan de voorkant van het lichaam. De biologische effecten worden veroorzaakt door 4 Gy op het gehele lichaam. Als de afstand tussen de dosimeter en de bron kleiner is dan de gemiddelde afstand tussen de bron en het lichaam, zal de dosis in het lichaam lager zijn dan de geregistreerde dosis. [2 punten]

Het opmerken dat het lichaam geen puntbron is en dat daardoor de 'effectieve' afstand van de bron tot het lichaam groter kan zijn dan de afstand tussen bron en persoonsdosismeter is uiteraard ook goed.

Vraag 4.4 (6 punten)

Bereken de benodigde uraniumdikte (in hele mm's) voor de zijde met de kortste afstand tot de bron om op de kalibratiedatum te voldoen aan de transporteisen. Aanwijzing: start in uw berekening met een geschatte Build-upfactor van 2, en verifieer dat deze waarde een goede schatting is.

Eisen aan type GEEL_II:

- $H < 0,5 \text{ mSv/h}$ op oppervlak
- $H < 0,01 \text{ mSv/h}$ op 1 meter van oppervlak.

Als H op 7 cm = 0,5 mSv/h dan is H op 107 cm afstand van de bron $(7/107)^2 \times 0,5 \text{ mSv/h} = 0,002 \text{ mSv/h}$. En $0,002 \text{ mSv/h} < 0,01 \text{ mSv/h}$. De dosis op het oppervlak is daarom bepalend voor de dikte van de benodigde afscherming. [1 punt]

$$H_{\text{onafgeschermd}} \text{ op } 7 \text{ cm afstand} = 0,0672 [\mu\text{Sv/h per MBq/m}^2] \times (4366 [\text{GBq}] \times 10^3 [\text{MBq/GBq}] / 0,07 [\text{m}]^2) = 60 \cdot 10^6 [\mu\text{Sv/h}] = 60 \cdot 10^3 \text{ mSv/h} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\text{Benodigde transmissie} = 0,5 [\text{mSv/h}] / 60 \cdot 10^3 [\text{mSv/h}] = 8,4 \cdot 10^{-6} \\ T = e^{-\mu d} \times B = 8,4 \cdot 10^{-6} \quad [1 \text{ punt}]$$

Verwacht kan worden dat μd groot is; $B=2$ lijkt daarom gelet op de waarden in de tabel bij een fotonen-energie van 0,5 MeV een goede beginwaarde.

$$e^{-\mu d} \times 2 = 8,4 \cdot 10^{-6}$$

$$e^{-\mu d} = 8,4 \cdot 10^{-6} / 2$$

$$\ln e^{-\mu d} = \ln 4,2 \cdot 10^{-6}$$

$$\mu d = 12,4$$

[1 punt]

De tabel met build-up factoren gaat niet verder dan $\mu d = 10$, maar de waarde bij $\mu d = 10$ is 1,97 en is behoorlijk constant rond die waarde. $B=2$ is daarmee een goede schatting.

[1 punt]

$$\mu/\rho \text{ bij } 0,5 \text{ MeV} = 0,198 \text{ cm}^2/\text{g}$$

$$\rho = 19,050 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = \mu/\rho \times \rho = 0,198 \text{ [cm}^2/\text{g]} \times 19,050 \text{ [g/cm}^3] = 3,77 \text{ cm}^{-1}$$

$$d = \mu d / \mu = 12,4 / 3,77 \text{ [cm}^{-1}] = 3,3 \text{ cm} = 33 \text{ mm}$$

[1 punt]

er mag niet naar beneden worden afgerond, anders ½ punt aftrek

Meer over dit incident is te vinden op:

https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1776_web.pdf

Puntenwaardering:

Vraag	punten	eindtermen	niveau
1a	2	1	K
1b	2	1	K
2	4	2, 4	T
3	2	12	I
4	6	2	T
Totaal	16		