

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: 9 mei 2022

- 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. Vervoer van lutetium-177 [17 punten]

Vraag 1.1 [4 punten]

Bereken de maximale activiteit die per keer mag worden bereid in deze gesloten werkkast.

$$A_{\max,j} = (0,02 \text{ [Sv]} / e_{50}) \times 10^{p+q+r}$$

- inhalatieklasse M: $e_{\text{inh}(50)} = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
- eenvoudige chemische bewerkingen, labeling: $p=-2$
- B-laboratorium: $q=3$
- gesloten werkkast (klasse-III kabinet): $r=3$

$$A_{\max,j} = 0,02 \text{ [Sv]} / (1,0 \cdot 10^{-9} \text{ [Sv /Bq]}) \times 10^{-2+3+3} = 2,0 \times 10^{11} \text{ Bq (200 GBq)}$$

Correcte $e_{(50)}$ [1 punt]

Correcte parameters p , q en r [2 punten]

Correcte berekening [1 punt]

Vraag 1.2 [4 punten]

Bereken het dosistempo op het oppervlakte van het collo als u de spuit onafgeschermd zou vervoeren.

Op het oppervlak:

$$\dot{H} = h \times A / r^2 = 0,0063 \text{ [\mu Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}] \times 7,4 \cdot 10^3 \text{ [MBq]} / (0,12 \text{ [m]})^2$$

$$\dot{H} = 3238 \text{ \mu Sv/h oftewel } 3,2 \text{ mSv/h}$$

Correcte bronconstante [1 punt]

Correcte afstand [2 punten]

Correcte berekening [1 punt]

Vraag 1.3 [6 punten]

Bereken hoeveel lood nodig is om deze injectiespuit te mogen vervoeren in de gekozen verpakking. Houd rekening met beide dosisvoorwaarden. Geef het antwoord in hele millimeters. U mag beargumenteerde vereenvoudigingen toepassen.

Maximale waarden van het omgevingsdosisequivalenttempo

- op het oppervlak van een collo: 2 mSv/h
- op 1 m van het oppervlak: 0,1 mSv/h

Transmissie voor oppervlakte-eis: $T = 2 / 3,2 = 0,62$

\dot{H} op 1 meter = $3,2 \text{ [mSv/h]} \times (0,12 \text{ [m]}/1,12 \text{ [m]})^2 = 0,037 \text{ [mSv/h]}$

Het omgevingsdosisequivalenttempo op 1 meter van het oppervlak is dus al lager dan de eis. Hieruit volgt dat de eis voor het oppervlak het meest beperkend is.

Vereenvoudigingen:

- De transmissie wordt alleen voor de energie van 208 keV berekend. De lager energetische fotonen zullen makkelijker worden geabsorbeerd.
- μ/ρ voor 208 keV is gelijk aan μ/ρ voor 200 keV

Opzoeken in gegevens:

- μ/ρ bij 200 keV in tabel "Massieke verzwakkingscoëfficiënten voor lood":
 $\mu/\rho (2.00E-01 \text{ [MeV]}) = 9.985E-01 \text{ [cm}^2/\text{g]} = 9,985 \cdot 10^{-1} \text{ [cm}^2/\text{g]} = 0,9985 \text{ cm}^2/\text{g}$
- Opzoeken B bij 200 keV in tabel "Exposure absorption build up factors": gekozen beginwaarde 1,2
- Dichtheid lood = $11,3 \text{ g/cm}^3$

$$T = B \times e^{-\mu d} = B \times e^{-\mu/\rho \times d \times \rho}$$

$$0,62 = 1,2 \times e^{-0,9985 \text{ [cm}^2/\text{g}] \times d \times 11,3 \text{ [g/cm}^3\text{]}}$$

$$\ln(0,62/1,2) = \ln e^{-0,9985 \text{ [cm}^2/\text{g}] \times d \times 11,3 \text{ [g/cm}^3\text{]}}$$

$$-0,66 = -0,9985 \text{ [cm}^2/\text{g}] \times d \times 11,3 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$d = -0,66 / -0,9985 \text{ [cm}^2/\text{g}] \times 11,3 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,058 \text{ cm} = 0,58 \text{ mm}$$

naar boven afgerond op hele mm's: $d = 1 \text{ mm}$

Controle keuze build up factor:

$$\mu d = 0,9985 \text{ [cm}^2/\text{g}] \times 0,1 \text{ [cm]} \times 11,3 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 1,12$$

Bijbehorende B: 1,19 (bij $R(\text{mfp})=1,0$ en $E=0,2 \text{ MeV}$)

$$\dot{H} = 3,2 \text{ [mSv/h]} \times 1,19 \times e^{-1,12} = 1,24 \text{ mSv/h, dus ruim onder de maximale waarde}$$

Berekening transmissie	[1 punt]
Correcte afstand	[1 punt]
Benoemen vereenvoudigingen	[1 punt]
Berekening dikte en naar boven afronden	[2 punten]
Keuze en check build-up-factor	[1 punt]

Vraag 1.4 [3 punten]

Kies het juiste etiket op **de losse bijlage** en vul hierop de benodigde gegevens in.

Het dosistempo op het oppervlak bij vraag 1.3 is meer dan 0,5 mSv/h, dus het etiket III-geel moet worden gekozen. Hierop moet worden ingevuld:

- CONTENTS: Lu-177
- ACTIVITY: 7,4 GBq
- TRANSPORT INDEX: 1,5

Berekening transportindex:

$\dot{H} = 1,24$ mSv/h op 12 cm van bron, dus op 112 cm is dit

$$1,24 \text{ [mSv/h]} \times (12/112)^2 = 0,0142 \text{ mSv/h}$$

$$TI = 0,0142 \text{ [mSv/h]} \times 100 = 1,42 \rightarrow TI = 1,5$$

(vanwege de verplichte afronding naar boven)



Kiezen juiste sticker

[1 punt]

Berekenen en correct afronden TI

[1 punt]

Correct invullen activiteit en nuclide

[1 punt]

Vraagstuk 1	
Vraag	Punten
Vraag 1.1	4
Vraag 1.2	4
Vraag 1.3	6
Vraag 1.4	3
Totaal	17

Vraagstuk 2: Mobiel röntgentoestel [13 punten]

Vraag 2.1 [3 punten]

Toon met een berekening aan dat de luchtkerma in lucht ter plaatse van het intreevlak (op het paardenbeen) inderdaad 0,71 mGy per foto bedraagt.

Aflezend van de output, bij 73 kV en 3 mm Al filter in grafiek Bijlage blz. 2 "Output luchtkermatempo van röntgentoestellen met variërende filters en buisspanningen" geeft $3,4 \text{ mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

$$K_{luc} = 3,4 [\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \text{ op 1 meter}] \cdot 12,5 [\text{mA} \cdot \text{s}] \cdot \left(\frac{1}{60} [\text{min} \cdot \text{s}^{-1}]\right) = 0,7708 \\ = 0,71 \text{ mGy}$$

Aflezend output tussen 3,4 en 3,9 $\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ [1 punt]

NB. Doordat de schaalverdeling tussen de streepjes op de y-as logaritmisch is, geeft zeer exact aflezen de waarde 3,4. Zonder logaritmische schaalverdeling voorhanden wordt een hogere waarde afgelezen; vandaar het afleesbereik.

Toepassen buisstroom en belichtingstijd [1 punt]

Uitrekenen goede antwoord [1 punt]

Vraag 2.2 [4 punten]

Bereken de MID (multifunctionele individuele dosis).

Hiervoor kan gestart worden met de output of verder rekenen met 0,69 mGy.

$$MID = 0,71 [\text{mGy} \cdot \text{foto}^{-1}] \cdot \left(\frac{1 [\text{m}]}{3 [\text{m}]}\right)^2 \cdot 0,843 [T_{hout}] \cdot 1,5 [\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}] \\ \cdot 0,25 [\text{wooncorrectiefactor}] = 0,025 \text{ mSv} \cdot \text{jaar}^{-1} = 25 \mu\text{Sv} \cdot \text{jaar}^{-1}$$

Afstand [1 punt]

Transmissie [1 punt]

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

Wooncorrectiefactor [1 punt]

Vraag 2.3 – Vergunning [2 punten]

Noem één overtreding op de vergunning en geef daarvoor één oplossing.

Voorbeelden van zaken die niet volgens de vergunning lijken te gaan:

- De muur is niet gemaakt van staal, steen, beton of lood, maar van hout én de MID wordt overschreden.
- Het terrein is niet afgeschermd, er kunnen mensen naar binnen lopen of aan de buitenkant langs de stallen lopen.

Voorbeelden van hoe op te lossen in de praktijk:

- Extra afscherming gebruiken (meest pragmatisch is een loodflap achter de cassette).
- Het terrein afzetten met een bord/lint waarop staat aangegeven dat er röntgenstraling aanwezig is in de desbetreffende ruimte.

[Een overtreding met een daaraan gekoppelde oplossing is 2 punten waard]

[Antwoorden buiten dit antwoordmodel zijn ook mogelijk. Wanneer het niet gaat om een overtreding, maar de oplossing een ALARA-maatregel is, die gekoppeld is aan een niet optimale situatie kan daar 1 punt voor worden toegekend.]

Vraag 2.4 [4 punten]

Bereken de persoonsdosisequivalent $H_p(10)$ ter plaatse van de assistente als gevolg van één röntgenfoto.

Hiervoor kan gestart worden met de output of verder rekenen met 0,69 mGy.

Uit de bijlage blz.10: voor een hoek van 90° en een buisspanning van 100 kV wordt 0,019% verstrooid bij een veld van 100 cm² en een afstand van 1 m.

[1 punt]

$$H_p(10) = 0,71 [mGy \cdot foto^{-1}] \cdot 0,019 \cdot 10^{-2} [\%] \cdot \left(\frac{200 [cm^2]}{100 [cm^2]}\right) \cdot \left(\frac{100 cm}{50 cm}\right)^2 \cdot 1,5 [Sv \cdot Gy^{-1}]$$

$$= 1,62 \cdot 10^{-3} mSv = 1,6 \mu Sv$$

Afstand van het paardenbeen tot de assistente is 50 cm.

[1 punt]

Correctie voor veldgrootte is $10 \times 20 cm = 200 cm^2$

[1 punt]

$H_p(10)/K_a$

[1 punt]

Vraagstuk 2	
Vraag	Punten
Vraag 2.1	3
Vraag 2.2	4
Vraag 2.3	2
Vraag 2.4	4
Totaal	13

Vraagstuk 3: Het rendement van de MiniTRACE monitor [15 punten]

Vraag 3.1 [2 punten]

Bereken de activiteit van een ^{137}Cs -bron die op een afstand van 1 meter aanleiding geeft tot een omgevingsdosisequivalenttempo $H^*(10)$ van $1 \mu\text{Sv/h}$.

De bronconstante van ^{137}Cs is $h = 0,093 \mu\text{Sv/h}$ per MBq/m^2 (Bijlage 2).
De activiteit is dus $A = 1 [\mu\text{Sv/h}] / 0,093 [\mu\text{Sv/h per MBq/m}^2] = 10,8 \text{ MBq}$.

[2 punten]

Vraag 3.2 [5 punten]

Bereken het aantal γ -fotonen afkomstig uit de bij vraag 3.1 bedoelde bron dat het telgas van de detector per seconde bereikt.

$$N_{\gamma} = A \times \epsilon_{\text{em}} \times \epsilon_{\text{geo}} \times \epsilon_{\text{abs}}$$

[1 punt]

De emissiewaarschijnlijkheid (of eigenlijk het emissierendement) is
 $\epsilon_{\text{em}} = 0,946 \times 0,898 = 0,85$.

[1 punt]

De geometriefactor is $\epsilon_{\text{geo}} = (\text{effectieve oppervlak van monitor}) / (\text{oppervlak van bol met straal van 1 meter}) = 15,55 [\text{cm}^2] / (4\pi \times [100 \text{ cm}]^2) = 1,24 \cdot 10^{-4}$.

[2 punten]

De absorptiefactor is $\epsilon_{\text{abs}} = 1$ (weglaten van dit gegeven geeft geen aftrek).

$$\rightarrow N_{\gamma} = 10,8 \cdot 10^6 [\text{Bq}] \times 0,85 \times 1,24 \cdot 10^{-4} \times 1 = 1,14 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1} \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 3.3a [2 punten]

Bereken uit voorgaande gegevens (detectoropstelling en de respons van de MiniTRACE S5 voor gammafotonen uitgezonden door ^{137}Cs) het rendement van de MiniTRACE S5 (in tellingen per opvallend foton).

De respons van de MiniTRACE voor gamma's uitgezonden door ^{137}Cs bedraagt $4,3 \text{ tps}$ per $\mu\text{Sv/h}$ (zie gegevens).

In vraag 3.2 is berekend dat $1,14 \cdot 10^3$ fotonen per seconde op de detector aanleiding geeft tot een aanwijzing van $1 \mu\text{Sv/h}$.

Het intrinsieke detectorrendement is dus $4,3 / 1,14 \cdot 10^3 = 0,0038$ tellingen / foton

[2 punten]

Vraag 3.3b [4 punten]

Ga na of het rendement van de MiniTRACE S5 overeenkomt met het rendement voor de MiniTRACE CSDF, zoals gegeven in Bijlage, blz. 12. Beargumenteer uw antwoord.

Het intrinsieke detectorrendement van de MiniTRACE S5 is 0,0038 tellingen / foton.

Het rendement voor de MiniTRACE CSDF is 0,006 tps/Bq voor γ -fotonen uitgezonden door ^{137}Cs , dus met gesloten klepje. [1 punt]

Het rendement voor de MiniTRACE CSDF is bepaald door een puntbron op de plaats van het klepje te houden. In de 2π -geometrie leidt 1 Bq tot:

$$\epsilon_{\text{em}} \times \epsilon_{\text{geo}} = 0,85 \times 2\pi/4\pi = 0,425 \text{ fotonen s}^{-1} \text{ op de detector.}$$

De gevoeligheid van de MiniTRACE CSDF is dus:

$$\epsilon_{\text{det},\gamma} = 0,006 \text{ [tps/Bq]} / 0,425 \text{ [fotonen s}^{-1} / \text{Bq]} = 0,014 \text{ tellingen / foton.} \quad [2 \text{ punten}]$$

Beide waarden verschillen bijna een factor 4 (rekenen met onafgeronde getallen geeft een factor van 3,7) en komen dus niet overeen.

[1 punt]

Vraag 3.4 [2 punten]

Met het klepje dicht is de monitor volgens de leverancier alleen gevoelig voor γ -straling. Verwacht u dat dit klopt voor de bèta's van ^{137}Cs ?

De maximale energieën van de uitgezonden bèta's zijn volgens het Handboek Radionucliden respectievelijk 0,5 en 1,2 MeV.

$$0,5 \times E = R \cdot \rho, \text{ dus } R = (0,5 E) / \rho$$

$$R = (0,5 \times 0,5 \text{ [MeV]}) / 2,7 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,093 \text{ cm} = 0,93 \text{ mm}$$

$$R = (0,5 \times 1,2 \text{ [MeV]}) / 2,7 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 0,22 \text{ cm} = 2,2 \text{ mm} \quad [1 \text{ punt}]$$

Conclusie: de bèta's met een energie van maximaal 0,5 MeV worden volledig gestopt door 1 mm aluminium, maar die met een maximale energie van 1,2 MeV niet allemaal.

[1 punt]

Toelichting:

De gasgevulde detector zal gevoeliger zijn voor bèta-straling dan voor γ -straling. Een klein aantal bèta's kan daardoor al voor een grote invloed op het meetresultaat zorgen. De hogere gevoeligheid van type CSDF zou dus hierdoor geheel of gedeeltelijk kunnen worden verklaard.

Puntenwaardering:

Vraagstuk 3	
Vraag	Punten
3.1	2
3.2	5
3.3a	2
3.3b	4
3.4	2
Totaal	15

Vraagstuk 4: Toediening met koolstof-11 [16 punten]**Vraag 4.1 [4 punten]**

Bereken de toegediende ^{11}C -activiteit samen met het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval.

Het netto teltempo van de controlespuit is gelijk aan $33500 - 45 = 33455$ tps (de bijdrage van de in verhouding lage waarde van het teltempo in de achtergrond kan verwaarloosd worden).

De standaarddeviatie in het netto teltempo is:

$$S_{R_{\text{netto}}} = \sqrt{\frac{R_{\text{bruto}}}{t_{\text{bruto}}} + \frac{R_{\text{achtergrond}}}{t_{\text{achtergrond}}}} = \sqrt{\frac{33500[\text{tps}]}{15[\text{s}]} + \frac{45[\text{tps}]}{15[\text{s}]}} = 47 \text{ tps} \quad [2 \text{ punten}]$$

Het netto teltempo met 95%-betrouwbaarheidsinterval (2s) is dus:

$$33455 \pm 95 \text{ tps} \quad [1 \text{ punt}]$$

Als het telrendement als een foutloze waarde gezien wordt, dan kan de activiteit met het 95%-betrouwbaarheidsinterval worden gevonden door de waarden van het netto teltempo, inclusief de marges van het 95%-betrouwbaarheidsinterval, te delen door het telrendement ($9,0 \cdot 10^{-5}$ tps/Bq).

De activiteit met 95%-betrouwbaarheidsinterval (2s) is dus:

$$372 \text{ MBq} \pm 1 \text{ MBq.} \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 4.2 [3 punten]

Bereken het totaal aantal desintegraties U_s van het ^{11}C dat is geïnjecteerd in het spierweefsel.

Gezien de korte halveringstijd wordt de effectieve halveringstijd volledig bepaald door de fysische halveringstijd. [1 punt]

$$A = \lambda \cdot N$$

$$T_{1/2} = 20,39 \text{ min} = 20,39 \cdot 60 \frac{[\text{sec}]}{[\text{min}]} = 1223 \text{ sec} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 5,666 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$U_s = N = \frac{A}{\lambda} = \frac{372 \cdot 10^6 [\text{Bq}]}{5,666 \cdot 10^{-4} [\text{s}^{-1}]} = 6,56 \cdot 10^{11} \text{ desintegraties } ^{11}\text{C} \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 4.3a [3 punten]

Bijlage, blz. 14-15 toont een overzicht van de belangrijkste uitgezonden straling. Leg op basis van deze gegevens uit door welke soort straling de afgegeven dosis in het spierweefsel vooral gedomineerd wordt.

Positronen zijn geladen deeltjes en hebben een dracht, terwijl de annihilatiefotonen theoretisch oneindig doorgaan. [1 punt]

De afgeremde positronen komen lokaal tot stilstand en zijn zo verantwoordelijk voor een totale energieafgifte in de buurt van het geïnjecteerd gebied. [1 punt]

De bijdrage van de annihilatiefotonen is veel kleiner, vanwege het feit dat deze vooral ontsnappen uit het lichaam en zo een duidelijk mindere energieafgifte in het spierweefsel zullen veroorzaken. [1 punt]

Vraag 4.3b [4 punten]

Bereken de gemiddelde geabsorbeerde dosis in het injectievolume (5 cm^3) als gevolg van de straling zoals beredeneerd in vraag 4.3a.

$$\text{Energiedepositie} = \frac{Y \cdot E_{\text{gem}}}{m_{\text{T}}} (\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1}) \text{ per desintegratie} \quad [1 \text{ punt}]$$

β^+ :

- Emissiewaarschijnlijkheid $Y = 1,000$
- $E_{\text{gem}} = 385 \text{ keV}$
- massa $m_{\text{T}} = 5 [\text{cm}^3] \times 1,05 [\text{g/cm}^3] = 5,25 \text{ g}$

$$\frac{1,000 \cdot 0,385 [\text{MeV}]}{5,25 [\text{g}]} = 0,0733 (\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1}) \text{ per desintegratie}$$

[2 punten]

$$\text{gemiddelde geabsorbeerde dosis} = 0,0733 [\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1}] \cdot 6,56 \cdot 10^{11} [\text{desintegraties}] \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} [\text{J} \cdot \text{MeV}^{-1}] \cdot 1000 [\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}] = 7,7 [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] = 7,7 \text{ Gy door positronen}$$

[1 punt]

Vraag 4.4 [2 punten]

Bereken de effectieve volg dosis $E(50)$ wanneer de injectie wel direct in de ader was toegediend.

Indien de activiteit wel goed verspreid door het lichaam zou zijn terechtgekomen, kan de $E(50)$ worden uitgerekend met de binnengekregen activiteit (A_{in}) en de waarde van $e(50)$ behorende bij een injectie.

$$e(50)_{\text{injectie}} = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$A_{in} = 372 \text{ MBq}$$

$$E(50) = A_{in} \cdot e(50)_{\text{injectie}} = 372 \cdot 10^6 \text{ Bq} \times 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq} = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} = 8,9 \text{ mSv} \quad [1 \text{ punt}]$$

Puntenwaardering:

Vraagstuk 4	
Vraag	Punten
4.1	4
4.2	3
4.3a	3
4.3b	4
4.4	2
Totaal	16