

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: 13 mei 2024

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.

Uitwerking vraagstuk 1: Interventiecardiologie

Vraag 1.1 [3 punten]

Bereken de luchtkerma vrij-in-lucht op de plaats van het intreepunt, dus op 65 cm afstand van het focus, ten gevolge van één behandeling.

Uit het onderschrift van de figuur "Output- en transmissiegegevens van brede bundels röntgenstraling door lood" voor de gebruikte röntgenbuis volgt het luchtkermatempo:

$9,6 \text{ mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ op 1 m bij 100 kV. Hiermee wordt de luchtkerma voor één behandeling op 1 m:

$$K = 9,6 \left[\frac{\text{mGy}}{\text{mA} \cdot \text{min}} \right] \cdot 10 \text{ [min]} \cdot 1 \text{ [mA]} = 96 \text{ mGy} \quad [1,5 \text{ punten}]$$

Luchtkerma op 65 cm:

$$K = 96 \text{ [mGy]} \cdot \frac{1^2 \text{ [m}^2\text{]}}{0,65^2 \text{ [m}^2\text{]}} = 227 \text{ mGy} = 0,23 \text{ Gy} \quad [1,5 \text{ punten}]$$

Vraag 1.2 [3 punten]

Bereken de gemiddelde geabsorbeerde entreedosis (uitgaande van geladen-deeltjesevenwicht) voor de cardioloog voor één behandeling, zonder rekening te houden met persoonlijke beschermingsmiddelen.

Op 1 meter van het focus is het oppervlak van het röntgenveld $22 \text{ [cm]} \cdot 22 \text{ [cm]} = 484 \text{ cm}^2 = 0,0484 \text{ m}^2$. Op 65 cm is het oppervlak van het röntgenveld dan $0,0484 \cdot (0,65/1,00)^2 = 0,020 \text{ m}^2$ [1 punt]

Gebruikmakend van de vuistregel volgt:

$$K_S = 0,1 \cdot \frac{0,23 \text{ [Gy]} \cdot 0,020 \text{ [m}^2\text{]}}{0,8^2 \text{ [m}^2\text{]}} = 0,00073 \text{ Gy} = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ Gy} = 0,73 \text{ mGy} \quad [2 \text{ punten}]$$

Vanwege het geladen-deeltjesevenwicht mag gesteld worden dat $K_{\text{lucht}} \approx D_{\text{weefsel}}$ en daarom bedraagt de geabsorbeerde dosis tevens 0,73 mGy.

Achterwege laten van deze laatste opmerking levert 0,5 punt aftrek op.

Omdat $K_p \cdot A = \text{DOP}$, wordt een berekening met 96 mGy en $0,0484 \text{ m}^2$ ook goed gerekend.

Vraag 1.3 [3 punten]

Bereken de transmissie van de verstrooide straling door het loodschort. Neem aan dat voor de verstrooide straling de transmissiecurve voor primaire straling uit de bijlage mag worden gebruikt.

Volgens de transmissiecurve bedraagt het luchtkermaptempo op 1 meter afstand tot het focus, bij 100 kV en gebruik van 0,35 mm lood: $0,6 \text{ mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Waarden van $0,4 - 0,8 \text{ mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ worden goed gerekend.

Zonder de aanwezigheid van lood (bij 0 cm) bedraagt het luchtkermaptempo op 1 meter afstand tot het focus bij 100 kV: $9,6 \text{ mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

De transmissie T wordt hiermee $T = \frac{0,6 \text{ [mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}]}{9,6 \text{ [mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}]} = 0,06$.

Voor beide waarden van het luchtkermaptempo en voor T elk [1 punt]

Vraag 1.4 [3 punten]

Bereken de effectieve dosis voor de cardioloog ten gevolge van één behandeling.

Voor deze situatie volgt de effectieve dosis uit:

$$E = \sum_T T_T \cdot w_T \cdot \sum_R (w_R \cdot D_{R,T}) = w_R \cdot D_R \sum_T (T_T \cdot w_T)$$

met T_T de transmissie door het loodschort voor orgaan T.

De stralingsweegfactor w_R is steeds gelijk aan 1. [1 punt]

Omdat $D_{R,T}$ voor alle organen gelijk is, en de transmissie 0,06 is voor alle organen met uitzondering van de schildklier, speekselklieren en hersenen, wordt de effectieve dosis:

$$E = 1 \text{ [mSv/mGy]} \cdot 0,73 \text{ [mGy]} \cdot (1 \cdot (0,04 + 0,01 + 0,01) + 0,06 \cdot (1 - (0,04 + 0,01 + 0,01))) \\ = 0,0438 \text{ [mSv]} + 0,0412 \text{ [mSv]} = 0,085 \text{ mSv} = 85 \text{ } \mu\text{Sv.} \quad [2 \text{ punten}]$$

Vraag 1.5 [3 punten]

Hoeveel behandelingen mag de cardioloog jaarlijks uitvoeren? Houd in uw beantwoording rekening met de grenswaarden voor zowel de effectieve dosis als de equivalente ooglensdosis.

Voor blootgestelde werknemers in categorie-A gelden de volgende limieten:

- effectieve dosis: 20 mSv/jaar.
- equivalente ooglensdosis: 20 mSv/jaar
- equivalente dosis van huid (gemiddeld over enig cm^2) en extremiteiten: 500 mSv/jaar

De effectieve dosis per behandeling bedraagt zonder loodschort:

$$E = \sum_T w_T \cdot \sum_R (w_R \cdot D_{R,T}) = 0,73 \text{ [mGy]} \cdot 1 \text{ [mSv/mGy]} \cdot 1 = 0,73 \text{ mSv} \quad [1 \text{ punt}]$$

De equivalente dosis voor de ooglenzen is hier aan gelijk. Dit is meer beperkend dan de effectieve dosis per behandeling, vanwege de afscherpende werking van het loodschort. [1 punt]

Hier trekken we de bijdrage van de VOG aan de effectieve dosis van af.

$$\text{De cardioloog mag } \frac{(20-1,5) \text{ [mSv/j]}}{0,73 \text{ [mSv]}} = 25 \text{ behandelingen per jaar uitvoeren. [1 punt]}$$

Vraag	Punten
1.1	3
1.2	3
1.3	3
1.4	3
1.5	3
Totaal	15

Uitwerking vraagstuk 2: Een ijzer-55 kalibratiebron

Vraag 2.1a [2 punten]

Wat verwacht de stralingsbeschermingsdeskundige te meten en waarom?

^{55}Fe heeft 100% EC-verval naar stabiel ^{55}Mn waarbij alleen laag-energetische karakteristieke röntgenfotonen worden uitgezonden. Deze fotonen zullen door de loden pot (dikte 2 mm) volledig worden geabsorbeerd en niet leiden tot een dosistempo boven de achtergrond. De stralingsbeschermingsdeskundige verwacht daarom alleen achtergrondstraling te meten. [2 punten]

Vraag 2.1b [2 punten]

Verklaar dat ^{55}Fe kan ontstaan door natuurlijke ijzerisotopen ^{54}Fe en ^{56}Fe te bestralen met neutronen. Geef beide hierbij horende reactievergelijkingen.

Voor de productie van ^{55}Fe door bestraling met neutronen zijn de volgende varianten mogelijk: $^{54}\text{Fe}(n,\gamma)^{55}\text{Fe}$ en $^{56}\text{Fe}(n,2n)^{55}\text{Fe}$ [2 punten]

Vraag 2.2 [1 punt]

Leg uit waarom in de tabel geen enkele σ_N gelijk is aan de bijbehorende \sqrt{N}

In de tabel is voor geen van de nuclidemetingen σ_N gelijk aan \sqrt{N} , omdat de foutwaarde van de achtergrond al is verdisconteerd in σ_N . [1 punt]

Vraag 2.3 [2 punten]

Bereken de ^{54}Mn -activiteit in de bron en de onzekerheid hierin, voor het 68%-betrouwbaarheidsinterval.

Voor de ^{54}Mn -piek geldt: $R_{\text{netto}} = (4056 \pm 141) / 3600 \text{ [s]} = (1,13 \pm 0,04) \text{ cps}$. [1 punt]

Rendement bij deze piek is: 0,88% cps/Bq

$A = (1,13 \pm 0,04) \text{ [cps]} / 0,0088 \text{ [cps/Bq]} = 128 \pm 5 \text{ Bq}$. [1 punt]

Vraag 2.4 [3 punten]

Verifieer of de bewering van de leverancier juist is, rekening houdend met een 95%-betrouwbaarheidsinterval van de bij vraag 4.3 berekende activiteit.

De totale activiteit van ^{55}Fe is 200 MBq. De onzuiverheid van ^{54}Mn die zich hierin mag bevinden is 0,0001%, oftewel, $200 \cdot 10^6 \text{ [Bq]} \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 200 \text{ Bq}$. [1 punt]

De berekende waarde van de ^{54}Mn -activiteit bedraagt 128 Bq.
 De fout hierin is 5 Bq. Rekening houdend met een onzekerheidsmarge tweemaal deze fout varieert de ^{54}Mn -activiteit dus tussen 118 Bq en 138 Bq. [1 punt]

Deze waarde is lager dan 200 Bq, waarmee de bewering van de leverancier klopt. [1 punt]

Vraag 2.5 [3 punten]

Wat zal de transportindex zijn? Licht uw antwoord toe. Geef ook aan of het juiste etiket op het collo is geplakt.

De fotonen uitgezonden door ^{55}Fe zullen door de loden pot (dikte 2 mm) nagenoeg volledig worden geabsorbeerd en dus niet leiden tot een verhoogd dosistempo op 1 meter afstand van het oppervlak van het collo (zie ook vraag 2.1a) $\rightarrow \text{TI} = 0$. [1 punt]

Op grond van het voorgaande zou men direct hebben kunnen concluderen dat er ten hoogste een etiket I-wit op het collo zou moeten worden geplakt (ook het dosistempo op het oppervlak is verwaarloosbaar). [1 punt]

Op basis van het ADR is het een vrijgesteld collo ($A < 0,001 \cdot (A_1\text{- of } A_2\text{-waarde})$), waarvoor etikettering überhaupt niet verplicht is. Het aangebrachte etiket is niet juist en daarom ook niet toegestaan. [1 punt]

Puntenwaardering:

Vraag	Punten
2.1a	2
2.1b	2
2.2	1
2.3	2
2.4	3
2.5	3
Totaal	13

Uitwerking vraagstuk 3: Prikincident met fluor-18

Vraag 3.1a [3 punten]

Bereken de besmettingsgraad van het besmette deel van de huid, vóóordat de handen werden gewassen in Bq/cm².

$$\text{Netto teltempo is } 1900 \text{ [cps]} - 30 \text{ [cps]} = 1870 \text{ cps} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\text{Besmettingsgraad is } \frac{1870 \text{ [cps]}}{25 \text{ [cps per Bq/cm}^2\text{]}} = 75 \text{ Bq/cm}^2 \quad [1 \text{ punt}]$$

Correctie is nodig omdat de besmetting niet op 100 cm² maar op slechts 2 cm² zit:

$$\text{Besmettingsgraad } \frac{100 \text{ [cm}^2\text{]}}{2 \text{ [cm}^2\text{]}} \cdot 75 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{cm}^2} \right] = 3,7 \cdot 10^3 \text{ Bq/cm}^2 \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 3.1b [2 punten]

Bereken de equivalente huiddosis van het besmette deel van de huid als gevolg van de 5 minuten dat de huid besmet is geweest.

Gegevens voor huidbesmetting van ¹⁸F uit het Handboek Radionucliden (bijlage):
5 · 10⁻¹⁰ Sv/s per Bq/cm² [1 punt]

$$H_{\text{besmette huid}} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ [Sv/s per Bq/cm}^2\text{]} \cdot 3,7 \cdot 10^3 \text{ [Bq/cm}^2\text{]} \cdot 5 \text{ [min]} \cdot 60 \text{ [s/min]} = 0,00056 \text{ Sv (= 0,56 mSv)} \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 3.2 [5 punten]

Bereken de totale activiteit van de verzamelde urine.

$$\text{Teltempo is } \frac{539 \text{ [pulsen]}}{10 \text{ [min]}} = 53,9 \text{ cpm} \quad [1 \text{ punt}]$$

Meetrendement uit bijlage "Meetrendement van NaI-putkristal voor ¹⁸F" is het best te bepalen door richtingscoëfficiënt van de raaklijn te bepalen. Met een teltempo van 53,9 cpm heeft de activiteit een waarde ver onder 50kBq en kan gesteld worden dat men hier duidelijk in het geldigheidsgebied van de raaklijn zit. [1 punt]

$$\text{Richtingscoëfficiënt: } \frac{5 \cdot 10^6 \text{ [cpm]}}{240 \cdot 10^3 \text{ [Bq]}} = 20,83 \text{ cpm/Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\text{Activiteit in 10 mL is } \frac{53,9 \text{ [cpm]}}{20,8 \text{ [cpm/Bq]}} = 2,59 \text{ Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\text{Totale activiteit is } \frac{300 \text{ [mL]}}{10 \text{ [mL]}} \cdot 2,6 \text{ Bq} = 78 \text{ Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 3.3 [2 punten]

Toon met behulp van de bijlage "PSMA uitscheiding in urine" aan dat na 180 minuten nog maar 5,2% van de activiteit van de ^{18}F -PSMA uitscheiding in de urine aanwezig is.

Na 180 minuten zijn $\frac{300 [\text{min}]}{109,7 [\text{min}]} = 1,6$ halveringstijden verstreken en de totale activiteit is dan vervallen tot ongeveer 32%. [1 punt]

Uit **bijlage blz. 9** kan gehaald worden dat een cumulatieve activiteit van 16,3% na 180 min bereikt wordt als niet voor verval is gecorrigeerd. Na 180 minuten is daarom nog meetbaar in de urine:

$$16,3\% \cdot (1/2)^{1,6} = 5,2\% \quad [1 \text{ punt}]$$

Alternatieve juiste redeneringen worden uiteraard ook met max. 2 punten gehonoreerd.

Vraag 3.4 [3 punten]

Bereken de effectieve volg dosis als gevolg van de totale activiteit van het ^{18}F -PSMA die tijdens het incident in het lichaam terecht is gekomen.

In vraagstuk 3.3 is gevonden dat na 3 uur (180 minuten) 5,2% van de activiteit meetbaar is in de urine.

De totale activiteit die op $t = 0$ in het lichaam is gekomen bedraagt dan:

$$A = \frac{78 [\text{Bq}]}{0,052} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Bq} \quad [1 \text{ punt}]$$

De e_{50} voor wondbesmetting en injectie is $1,4 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$ [1 punt]

$$E_{50} = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq} \cdot 1,5 \cdot 10^3 \text{ Bq} = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ Sv} = 21 \text{ nSv} \quad [1 \text{ punt}]$$

Puntenwaardering:

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

Uitwerking Synthese van FDG in een hot cell

Vraag 4.1 [5 punten]

Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo $\dot{H}^*(10)$ ten gevolge van de annihilatiefotonen op het oppervlak aan de voorzijde van de hot cell op tijdstip $t = 0$.

$$\dot{H}^*(10) = \frac{h \cdot A}{r^2} \cdot B \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho \cdot d}$$

$$h = 0,166 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1}$$

$$A(0) = 500 \text{ GBq} = 5 \cdot 10^5 \text{ MBq}$$

$$r = \frac{75 [\text{cm}]}{2} = 37,5 \text{ cm} = 0,375 \text{ m}$$

Opzoeken en omrekenen van deze 3 invoergegevens [1 punt]

Om de build-up factor B te bepalen, moet eerst $(\mu \cdot d)_{\text{lood}}$ worden bepaald.

Bijlage blz. 12, geeft $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{lood}} = 0,1614 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ en $\rho_{\text{lood}} = 11,34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

$$(\mu \cdot d)_{\text{lood}} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{lood}} \cdot \rho_{\text{lood}} \cdot d = 0,1614 [\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}] \cdot 11,34 [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}] \cdot 10 [\text{cm}] = 18,3$$

[2 punten]

Berekening van de opbouwfactor B m.b.v. bijlage 2: interpolatie tussen B (E = 0,5 MeV en $\mu d = 15$) en B (E = 0,5 MeV en $\mu d = 20$) geeft een waarde voor B van 2,70:

$$B = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) + y_1 = \frac{2,73 - 2,65}{20 - 15} \cdot (18,3 - 15) + 2,65 = 2,70 \quad [1 \text{ punt}]$$

Een onderbouwde keuze van 2,73 (worst case) of gemiddelde waarde mag ook.

Uitrekenen omgevingsdosisequivalenttempo:

$$\begin{aligned} \dot{H}^*(10) &= \frac{h \cdot A}{r^2} \cdot B \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho \cdot d} = \frac{0,166 [\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1}] \cdot 5 \cdot 10^5 [\text{MBq}]}{0,375^2 [\text{m}^2]} \cdot 2,70 \cdot e^{-18,3} \\ &= 0,018 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} = 18 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1} \quad [1 \text{ punt}] \end{aligned}$$

Vraag 4.2 [3 punten]

Bereken de dracht van de bètadeeltjes in glas en stel vast of deze bijdragen aan de huidosis.

$\rho_{\text{glas}} = 2,23 \text{ g/cm}^3$, diameter van het flesje is 24 mm en de dikte is 2 mm.

Uit bijlage blz. 6 (blz. 26 Handboek Radionucliden) volgt dat de maximale bèta-energie 634 keV is. [1 punt]

Bepaling dracht bètadeeltjes m.b.v. de vuistregel $\rho \cdot R = 0,5 \cdot E_{\beta, \max}$

$$R = \frac{0,5 \cdot 0,634}{2,23} = 0,14 \text{ cm} < 0,2 \text{ cm} = d_{\text{glas}} \quad [1 \text{ punt}]$$

Conclusie: bètastraling wordt volledig afgeschermd door het glas en geeft geen bijdrage aan de huid dosis. [1 punt]

Alternatieve berekeningen voor dracht:

Feather: $\rho R = 0,542 \cdot E_{\beta, \max} - 0,133 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$
 $\rightarrow R = 0,94 \text{ mm} < 2 \text{ mm}$

Flammersfeld: $\rho R = 0,11 \cdot ((1 + 22,4 \cdot E_{\beta, \max}^2)^{0,5} - 1) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$
 $\rightarrow R = 1,1 \text{ mm} < 2 \text{ mm}$

Bos (3.10): $\rho R = 0,412 \cdot E^{(1,265 - 0,0954 \cdot \ln(E))} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, met $E = E_{\beta, \max}$
 $\rightarrow R = 1,0 \text{ mm} < 2 \text{ mm}$

Handdosis dus alleen t.g.v. annihilatiestraling.

Vraag 4.3a [3 punten]

Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ ter hoogte van de handen voor scenario 2.

$$H^*(10) = \dot{H}^*(10) \cdot t = \frac{h \cdot A}{r^2}$$

$$= \frac{0,166 [\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1}] \cdot 4,5 \cdot 10^3 [\text{MBq}]}{0,2^2 [\text{m}^2]} \cdot \frac{6 [\text{s}]}{3600 [\text{s} \cdot \text{h}^{-1}]} = 31 \mu\text{Sv}$$

[2 punten]

N.B. Hetzelfde antwoord wordt gevonden als vanuit scenario 1 gerekend wordt, met nodige correcties voor wat betreft de tijd, de afstand en de geometrie:

$$H^*(10) = 5,8 \text{ mSv} [\text{scenario 1}] \cdot \frac{6 \text{ s}}{2 \text{ s}} [\text{tijdcorrectie}] \cdot \left(\frac{1,2 \text{ cm}}{20 \text{ cm}}\right)^2 [\text{afstandscorrectie}]$$

$$\cdot \frac{1}{2} [\text{geometriecorrectie}] = 0,031 \text{ mSv} = 31 \mu\text{Sv}$$

Vraag 4.3b [1 punt]

Wat zou u als stralingsbeschermingsdeskundige op basis van de uitkomst van de beide scenario's adviseren en waarom?

Gezien de dosis is overstickeren toegestaan, maar dan wel gebruikmakend van een pincet. Overstickeren met de hand is geen ALARA, zelfs al zou dat 10x zo snel zijn. [1 punt]

Vraag 4.4 [4 punten]

Bereken de lokale huiddosis ten gevolge van de berekende activiteit van de radioactieve besmetting.

Opzoeken in bijlage bladzijde 6 geeft:

$$h_{\text{huid}} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$$

$$\lambda = 1,05 \cdot 10^{-4} [\text{s}^{-1}]$$

[1 punt]

De activiteit A van het besmette oppervlak O = 0,18 MBq/cm²

Het huiddosis tempo op tijdstip $t_{\text{besmetting}}$ van de besmetting is derhalve:

$$5 \cdot 10^{-10} [\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Bq}^{-1}] \cdot 1,8 \cdot 10^5 [\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}] = 9,0 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} \cdot \text{s}^{-1} = 90 \mu\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$$

[1 punt]

$$H_{\text{huid}} = \frac{\dot{H}_{\text{huid}}(t_{\text{besmetting}})}{\lambda} (e^{\lambda \cdot t_{\text{besmetting}}} - 1)$$

$$= \frac{90 [\mu\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}]}{1,05 \cdot 10^{-4} [\text{s}^{-1}]} \cdot (e^{1,05 \cdot 10^{-4} [\text{s}^{-1}] \cdot 1800 [\text{s}]} - 1)$$

$$= 1,78 \cdot 10^5 \mu\text{Sv} = 178 \text{ mSv}$$

[2 punten]

Vraag	Punten
4.1	5
4.2	3
4.3a	3
4.3b	1
4.4	4
Totaal	16