

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: 12 december 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: Inwendige besmetting bepalen met LSC

Vraag 1.1 [5 punten]

Bereken de binnengekregen activiteit ^{36}Cl .

De berekeningen in vraag 1.1 en 1.2 mogen zowel in cpm als in cps worden uitgevoerd.

$$R_n = R_b - R_a = 7571 - 45 = 7526 \text{ cpm} \quad \left(= \frac{7526 [\text{cpm}]}{60 [\text{s min}^{-1}]} = 125,4 \text{ cps} \right) \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\varepsilon = 42 \text{ cpm Bq}^{-1} \quad \left(= \frac{42 \text{ cpm Bq}^{-1}}{60 \text{ s min}^{-1}} = 0,70 \text{ cps Bq}^{-1} \right)$$

$$A_{\text{meting}} = \frac{R_n}{\varepsilon} = \frac{7526 [\text{cpm}]}{42 [\text{cpm Bq}^{-1}]} \quad \left(= \frac{125,4 [\text{cps}]}{0,70 [\text{cps Bq}^{-1}]} \right) = 179 \text{ Bq} = 0,18 \text{ kBq} \quad [1 \text{ punt}]$$

$$A_{\text{uit,dag 5}} = \frac{1400 [\text{mL}]}{6 [\text{mL}]} \cdot 179 [\text{Bq}] = 41811 \text{ Bq} = 0,042 \text{ MBq} \quad [1 \text{ punt}]$$

Uitscheidingstempo op dag 5 (opzoeken): $0,025 \text{ Bq per Bq}_{\text{in}}$ [1 punt]

$$A_{\text{in}} = \frac{A_{\text{uit,dag 5}}}{0,025 \text{ Bq/Bq}} = \frac{0,042 \text{ MBq}}{0,025 \text{ Bq/Bq}} = 1,67 \text{ MBq} \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 1.2 [5 punten]

Bereken op basis van de gemeten teltempi het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de binnengekregen activiteit.

$$s_{R_n} = \sqrt{\frac{R_b}{t_b} + \frac{R_a}{t_a}} = \sqrt{\frac{7571}{2} + \frac{45}{10}} = \sqrt{3790} = 61,6 \text{ cpm, of}$$

$$s_{R_n} = \sqrt{\frac{R_b}{t_b} + \frac{R_a}{t_a}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{7571}{60}\right)}{120} + \frac{\left(\frac{45}{60}\right)}{600}} = \sqrt{\frac{126,2}{120} + \frac{0,75}{600}} = 1,03 \text{ cps} \quad [2 \text{ punten}]$$

$$s_{\text{rel}} = \frac{s_{R_n}}{R_n} = \frac{61,6}{7526} \quad \left(= \frac{1,03}{125,4} \right) = 0,0082 = 0,82\% \quad [1 \text{ punt}]$$

$$\rightarrow s_{A_{\text{in}}} = s_{\text{rel}} \cdot A_{\text{in}} = 0,82\% \cdot 1,67 \text{ MBq} = 0,014 \text{ MBq}$$

Gevraagde betrouwbaarheidsinterval is 95%, overeenkomend met twee standaarddeviaties. [1 punt]

$$\rightarrow A_{\text{in}} = 1,67 \text{ MBq} \pm 2 \cdot 0,014 \text{ MBq} = 1,67 \text{ MBq} \pm 0,03 \text{ MBq} \quad [1 \text{ punt}]$$

De cursist mag de correctie van de achtergrond *beargumenteerd* weglaten.

Vraag 1.3 [3 punten]

Bereken de effectieve volg dosis voor de laborant, inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval.

Opzoeken $e(50)(w)$: $e(50)(w) = 4,9 \cdot 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$ [1 punt]

$E(50) = e(50) \cdot A_{in} = 4,9 \cdot 10^{-10} [\text{Sv Bq}^{-1}] \cdot (1,67 \cdot 10^6 [\text{Bq}] \pm 0,03 \cdot 10^6 [\text{Bq}])$
 $= (0,82 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \text{ Sv} = 0,82 \pm 0,01 \text{ mSv}$ [2 punten]

Indien gerekend wordt met de gegeven waarde $A_{in} = 2,00 \pm 0,02 \text{ MBq}$:

$E(50) = e(50) \cdot A_{in} = 0,98 \pm 0,01 \text{ mSv}$

Vraag 1.4 [3 punten]

Noem drie relevante acties die de stralingsbeschermingsdeskundige na dit incident moet of zal ondernemen.

Mogelijke goede antwoorden zijn: [1 punt per antwoord]

- Analyse van het incident, leidend tot verbeterpunten en/of aanpassingen RI&E. In het bijzonder kan gevraagd worden waarom niet direct actie is ondernomen.
- Melden incident bij Nederlandse Arbeidsinspectie (NLA) en ANVS
- Registreren van de effectieve volg dosis in het NDRIS
- Contact met de stralingsarts
- Gesprek met laborant (geruststelling)

Puntenwaardering

Vraagstuk 1	
Vraag	Punten
1.1	5
1.2	5
1.3	3
1.4	3
Totaal	16

Vraagstuk 2: Röntgentoestel in een toetjesfabriek

Vraag 2.1 [3 punten]

Bereken de effectieve jaardosis voor een werknemer onder deze condities.

Afstand medewerker tot aan de loodflappen is 1,0 meter → de afstand tot aan de verstrooide röntgenbundel is dan 1,4 meter.

Het meetpunt bevindt zich op 0,5 meter van het focus.

$$E = 0,08 [\mu Sv h^{-1}] \times 1 [h d^{-1}] \times 200 [d y^{-1}] \times \left(\frac{0,5 [m]}{1,4 [m]} \right)^2 \times 1 \left[\frac{Sv}{Sv} \right] = 2,0 \mu Sv y^{-1}$$

Correctie afstand [1 punt]

Correctie verblijfstijd [1 punt]

Correct uitvoeren berekening [1 punt]

Het niet noemen van de w_T levert geen aftrek op omdat in de opgave expliciet is gegeven dat het omgevingsdosisequivalent als een conservatieve schatter voor de effectieve dosis mag worden gebruikt.

NB: In werkelijkheid heeft de röntgenbundel bij deze toepassing de vorm van een lijn, waarmee de stroostralingsbron een dunne volumebron (of plaatbron) is.

Vraag 2.2a [4 punten]

Bereken het geabsorbeerde dosistempo (Gy/h) in de primaire bundel op 1 meter afstand van het focus.

Aflezen grafiek: 75 kV met 0,5 mm Al filter geeft ongeveer 15 mGy/(mA·min) op 1 meter. [1 punt]

Waarden van 13 – 17 mGy/mA·min mogen worden goed gerekend.

Uitrekenen aantal mA:

$$I = P/U = 600 [W] / 75 \cdot 10^3 [kV] = 8,0 \cdot 10^{-3} A = 8,0 mA \quad [1 punt]$$

Het dosistempo op 1 meter bedraagt dan

$$15 [mGy/(mA \cdot min)] \times 8,0 [mA] \times 60 [min/h] \times 10^{-3} Gy/mGy = 7,2 Gy/h$$

Correct uitvoeren berekening [2 punten]

Vraag 2.2b [3 punten]

Bereken de equivalente extremitendosis voor de werknemer als gevolg van deze voorziene onbedoelde gebeurtenis wanneer zijn hand zich in de primaire bundel op 30 cm van het focus bevindt.

$$7,2 \left[\frac{\text{Gy}}{\text{h}} \right] \times \left(\frac{1,0 \text{ [m]}}{0,3 \text{ [m]}} \right)^2 \times \frac{5 \text{ [s]}}{3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right]} = 0,11 \text{ Gy per voorziene onbedoelde gebeurtenis.}$$

[2 punten]

$w_R = 1 \text{ [Sv/Gy]}$; de equivalente extremitendosis komt overeen met 0,11 Sv.

[1 punt]

Het alleen aanpassen van de eenheid naar Sv zonder het expliciet noemen van de stralingsweegfactor wordt bestraft met maximaal een halve punt aftrek.

Vraag 2.3 [2 punten]

Leg aan de hand van bovenstaande tabel van de meetapparatuur uit waarom de stralingsbeschermingsdeskundige de meting verricht met de besmettingsmonitor.

Het energiebereik van de dosistempomonitor verschilt met die van de besmettingsmonitor.

De röntgenbuis is ingesteld op 75 kV. De maximale energie van de geproduceerde remstraling zal 75 keV zijn, maar een groot deel van de fotonen heeft een (veel) lagere energie in verband met de energieverdeling van het remstralingspectrum.

De dosistempomonitor heeft een energiebereik vanaf 70 keV; je zult dan dus maar een klein deel geproduceerde remstralingsfotonen meten. Het energiebereik van de besmettingsmonitor voor fotonenstraling begint al bij 20 keV, waardoor deze monitor het grootste en meest relevante deel van de uitgezonden fotonen zal meten.

Remstralingspectrum [1 punt]

Energiebereik [1 punt]

Vraag 2.4 [5 punten]

Bereken de jaarlijkse equivalente extremitendosis als gevolg van deze voorziene onbedoelde gebeurtenis.

Correctie achtergrond:

$$R_{\text{netto}} = R_{\text{bruto}} - R_{\text{achtergrond}} = 134 \text{ cps} - 5 \text{ cps} = 129 \text{ cps}$$

Gegeven: 75 kV geeft effectief 30 keV fotonen. Overschatting is een factor 3, zie energieresponscurve bijlage blz. 6. Dus in werkelijkheid $129/3 = 43 \text{ cps}$.

Omrekenen cps naar equivalente extremitendosis: 100 $\mu\text{Sv/h}$ per cps geeft dan 4300 $\mu\text{Sv/h} = 4,3 \text{ mSv/h}$

$$H_{\text{extremiteten}} = 4,3 \left[\text{mSv h}^{-1} \right] \times \frac{5 \text{ [s]}}{3600 \text{ [s h}^{-1}]} \times 50 \text{ [y}^{-1}] = 0,30 \text{ mSv y}^{-1}$$

Correctie achtergrond	[1 punt]
Correctie overschatting	[1 punt]
Correctie omrekenfactor naar dosis	[1 punt]
Correctie tijd	[1 punt]
Correctie frequentie	[1 punt]

Puntenwaardering

Vraagstuk 2	
Vraag	Punten
2.1	3
2.2a	4
2.2b	3
2.3	2
2.4	5
Totaal	17

Vraagstuk 3: Besmette schoen

Vraag 3.1 [3 punten]

Bereken de ^{131}I -activiteit (in Bq) van de besmetting.

Gemeten is 11500 dps ^{32}P . De afneembare besmettingsdetector heeft een rendement R van 25% voor ^{32}P en 20% voor ^{131}I . Het aantal Bq voor ^{131}I is dus:

$$11500[\text{dps}] \times \left(\frac{R_{\text{P-32}}}{R_{\text{I-131}}} \right) = 11500 [\text{dps}] \times \left(\frac{0,25 \left[\frac{\text{cps}}{\text{dps}} \right]}{0,20 \left[\frac{\text{cps}}{\text{dps}} \right]} \right) = 14375 \text{ dps} = 14 \text{ kBq}$$

Correct aflezen en invullen detectierendement van ^{32}P en ^{131}I [2 punten]

Invullen van (0,20/0,25) levert dus 2 punten aftrek op.

Correct uitrekenen formule [1 punt]

Vraag 3.2 [3 punten]

Bereken de equivalente huiddosis ter plaatse van de bestraalde huid onder deze aanname.

Radioactief verval in 5 uur mag worden verwaarloosd.

Voor huidbesmetting met ^{131}I geldt een conversiecoëfficiënt van $4 \cdot 10^{-10}$ Sv/s per Bq/cm².

$$H_{\text{huid}} = \frac{14375 [\text{Bq}]}{10 [\text{cm}^2]} \times 4 \cdot 10^{-10} \left[\frac{\text{Sv}}{\text{s}} \text{ per } \frac{\text{Bq}}{\text{cm}^2} \right] \times 3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right] \times 5 [\text{h}] = 10,35 \text{ mSv} = 1 \cdot 10^1 \text{ mSv}$$

[3 punten]

Vraag 3.3 [3 punten]

Bepaal de equivalente huiddosis ter plaatse van de bestraalde huid, rekening houdend met de afschermende werking van de schoen.

Uit de diepte-dosis-curve is af te lezen dat de dosis op 0,1 cm diepte nog 200 cGy is indien de dosis op het oppervlak 2750 cGy is. Deze verhouding kan worden gebruikt om de transmissie door de schoen te bepalen en de berekende dosis uit vraag 3.2 aan te passen:

$$H_{\text{huid}} = 10,35 \cdot 10^{-3} [\text{Sv}] \times \left(\frac{200 [\text{cGy}]}{2750 [\text{cGy}]} \right) = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,8 \text{ mSv}$$

Aflezen diepte-dosis-curve:

Diepte = 0,1 cm: waarden tussen de 150 - 250 cGy worden goed gerekend.

Oppervlak: waarden tussen de 2700 - 2900 cGy worden goed gerekend.

Correct aflezen grafiek	[2 punten]
Correct uitvoeren berekening	[1 punt]

Vraag 3.4 [4 punten]

Beargumenteer op basis van een berekening expliciet of u het risico op kansgebonden effecten ten gevolge van deze equivalente huiddosis verwaarloosbaar vindt of niet.

De effectieve dosis is een maat voor het risico op kansgebonden effecten.

Voor een volwassen vrouw is het gemiddelde huidoppervlak $1,66 \text{ m}^2$, oftewel $16,6 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$. De bestraalde huid heeft een oppervlak van 10 cm^2 . De equivalente orgaandosis is dus

$$10 [\text{cm}^2] / 16,6 \cdot 10^3 [\text{cm}^2] \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} [\text{Sv}] = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ Sv}$$

$$E = H_T \cdot W_T = 4,5 \cdot 10^{-7} [\text{Sv}] \cdot 0,01 = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} = 5 \text{ nSv}$$

Bij deze effectieve dosis is het risico op kansgebonden effecten verwaarloosbaar – 5 nSv is vergelijkbaar met de dosis die van nature in enkele minuten wordt opgelopen.

Een vergelijking met de risico-percentages (4 – 7% per Sv) kan ook worden gebruikt om de risico's te duiden.

Beoordeling:

Benoemen relatie kansgebonden effecten - effectieve dosis	[1 punt]
Correcte berekening effectieve dosis	[2 punten]

De corrector kan de punten voor de berekening ook geheel of gedeeltelijk toekennen als deze beperkt blijft tot een tussenresultaat waarvoor de cursist expliciet beargumenteert dat hij het daarmee samenhangende risico verwaarloosbaar vindt.

Duiding van het risico op kansgebonden effecten, bijvoorbeeld op basis van een vergelijkend voorbeeld	[1 punt]
---	----------

Note bij vraag 3.4: Volgens ICRP is er een relatie tussen de blootstelling aan ioniserende straling en aan UV-blootstelling (zie paragraaf 6.2 van ICRP-59 over Stochastic effects). De stralingsgevoeligheid voor UV-afgeschermde huid is aanzienlijk lager dan de stralingsgevoeligheid van UV-blootgestelde huid.

Puntenwaardering

Vraagstuk 3	
Vraag	Punten
3.1	3
3.2	3
3.3	3
3.4	4
Totaal	13

Vraagstuk 4: Transport van een ^{147}Nd -oplossing

Vraag 4.1 [3 punten]

Verifieer door middel van een berekening dat de specifieke activiteit van zuiver ^{147}Nd gelijk is aan $2,99 \cdot 10^{18} \text{ Bq kg}^{-1}$.

Vervalconstante is $\lambda = 7,31 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

Aantal atomen per 1 kg (= $1 \cdot 10^3 \text{ g}$) zuiver ^{147}Nd is:

$$N = (1 \cdot 10^3 [\text{g}] / 147 [\text{g mol}^{-1}]) \times 6,022 \cdot 10^{23} [\text{mol}^{-1}] = 4,10 \cdot 10^{24} [\text{kg}^{-1}] \quad [2 \text{ punten}]$$

Specifieke activiteit is:

$$A_{sp} = \lambda \cdot N = 7,31 \cdot 10^{-7} [\text{s}^{-1}] \times 4,10 \cdot 10^{24} [\text{kg}^{-1}] = 2,99 \cdot 10^{18} [\text{Bq kg}^{-1}] \quad [1 \text{ punt}]$$

Vraag 4.2 [6 punten]

Bereken de minimaal benodigde wanddikte van de loodpot (afgerond op een halve cm) zodat voldaan wordt aan de twee transporteisen die gesteld worden aan het omgevingsdosisequivalenttempo rond het collo. Kies daarbij een fotonenenergie van ^{147}Nd voor bepaling van $d_{1/2}$ die vanuit het oogpunt van stralingsbescherming aan de veilige kant is.

Omgevingsdosisequivalenttempoconstante is $h = 0,029 \mu\text{Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Bronsterkte is $A = 100 \text{ GBq} = 100 \cdot 10^3 \text{ MBq}$.

Afstand bron tot oppervlak is $r_1 = 40 \text{ (cm)} / 2 = 20 \text{ cm} = 0,20 \text{ m}$.

Voor de transporteisen moeten de gegevens voor een etiket III-geel uit de bijlage worden gebruikt.

Transporteis voor oppervlak is $T_1 \times hA / r_1^2 < 2 \text{ mSv h}^{-1} = 2000 \mu\text{Sv h}^{-1}$.

Minimaal benodigde transmissie is dus

$$T_1 = \frac{2000 [\mu\text{Sv h}^{-1}]}{0,029 [\mu\text{Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}]} \times \frac{0,20^2 [\text{m}^2]}{100 \cdot 10^3 [\text{MBq}]} = 0,028$$

Afstand bron tot punt op 1 m vanaf oppervlak is $r_2 = 1 + 0,20 = 1,20 \text{ m}$

Transporteis voor 1 m vanaf oppervlak is $T_2 \times hA / r_2^2 < 100 \mu\text{Sv h}^{-1}$.

Benodigde transmissie is dan

$$T_2 = \frac{100 [\mu\text{Sv h}^{-1}]}{0,029 [\mu\text{Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}]} \times \frac{1,20^2 [\text{m}^2]}{100 \cdot 10^3 [\text{MBq}]} = 0,050$$

Transmissie wordt dus bepaald door de transporteis voor het oppervlak.

[3 punten]

Aflezen van figuur 1 bij 531 keV (hoogste γ -energie) geeft:

$$d_{1/2} = 5 \text{ (g cm}^{-2}\text{)} / 11,34 \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = 0,44 \text{ cm.}$$

Uitlezingen tussen 4,3 en 5,0 (g cm⁻²) worden goed gerekend.

$$T1 = 0,028 = B \times 0,5d/0,44.$$

$$d = 0,44 \text{ (cm)} \times \ln(0,028/2) / \ln(0,5) = 0,44 \text{ (cm)} \times 1,85 / 0,30 = 2,7 \text{ cm.}$$

Dus dikte van de loodpot moet tenminste 3,0 cm bedragen. [3 punten]

Uitlezing van $d_{1/2}$ lager dan ongeveer 4,6 (g cm⁻²) leidt tot een looddikte van 2,5 cm.

Vraag 4.3 [2 punten]

Beargumenteer waarom het gebruik van de omgevingsdosisequivalenttempoconstante uit het Handboek bij de beantwoording van vraag 4.2 niet juist is, maar wel aan de stralingshygiënisch veilige kant zit.

De omgevingsdosisequivalenttempoconstante houdt rekening met alle uitgezonden fotonen, terwijl – na de in vraag 4.2 berekende afscherming – alleen de fotonen met een energie van 531 keV een significante bijdrage leveren aan het omgevingsdosisequivalenttempo. Voor andere fotonen (met energieën lager dan 100 keV) is de transmissie door deze afscherming verwaarloosbaar.

[1 punt]

In vraag 2 wordt voor alle fotonen dezelfde transmissie gehanteerd, t.w. die van de 531 keV fotonen. De in vraag 2 berekende looddikte zit daarmee ruimschoots aan de veilige kant.

[1 punt]

Vraag 4.4 [2 punten]

Geef ten minste één reden waarom bij de berekening van de wanddikte van de loodpot in vraag 4.3 geen rekening hoeft te worden gehouden met het aanwezige ¹⁴⁷Pm.

Er zijn in beginsel twee goede redenen:

- ¹⁴⁷Pm vervalst onder uitzending van uitsluitend zachte bèta's ($E_{\max} = 225 \text{ keV}$) en zou dus wanneer het aanwezig zou zijn, geen bijdrage aan het dosistempo buiten het collo leveren.
- Direct na productie is er nog geen ¹⁴⁷Pm gevormd – de halveringstijd van ¹⁴⁷Nd is immers meer dan 10 dagen, terwijl de halveringstijd van ¹⁴⁷Pm veel langer is (2,62 jaar) – zie ook de uitwerking bij vraag 4.5.

Een goede reden levert [2 punten]

Vraag 4.5 [3 punten]

Toon met behulp van een berekening aan dat de maximale activiteit ^{147}Pm die op enig moment in de oplossing aanwezig is, ongeveer 1 GBq is.

De verhouding tussen de halveringstijden van ^{147}Nd en ^{147}Pm bedraagt $T_{1/2,\text{Nd}}/T_{1/2,\text{Pm}} = 10,98 \text{ (d)} / [2,62 \text{ (j)} \times 365,25 \text{ (d/j)}] = 0,0115$. [1 punt]

De halveringstijd van de moeder is dus veel kleiner dan die van de dochter, waardoor het verval van ^{147}Pm verwaarloosd mag worden in de periode waarin het grootste deel van het ^{147}Nd vervalt (één tot twee maanden). Na twee maanden zijn dus alle op $t=0$ aanwezig atomen ^{147}Nd vervallen naar ^{147}Pm , ofwel $N_{\text{max, Pm}} \approx N_{0, \text{Nd}}$. Hieruit volgt

$$A_{\text{max, Pm}} = \lambda_{\text{Pm}} \times N_{\text{max, Pm}} \sim \lambda_{\text{Pm}} \times N_{0, \text{Nd}} = \frac{\lambda_{\text{Pm}}}{\lambda_{\text{Nd}}} \times A_{0, \text{Nd}} = 0,015 \times 100[\text{GBq}] = 1,15 [\text{GBq}]$$

[2 punten]

NB: Uit de volledige berekening van de ingroei-vervalcurve blijkt dat de maximale activiteit 1,09 GBq is, na ongeveer 71 dagen.

Puntenwaardering

Vraagstuk 4	
Vraag	Punten
4.1	3
4.2	6
4.3	2
4.4	2
4.5	3
Totaal	16