

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: 11 december 2023

- 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 met I-131

Vraag 1.1 [3 punten]

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

- Voor werknemers moet een AMAD van 5 μm worden gekozen. [0,5 punt]
 De fractie in ET1 bij AMAD = 5 μm is 33,9% [0,5 punt]
 Het snuitsel bevat 60% van de activiteit in ET1 [1 punt]
 $A_{\text{inname}} = 9,3 \text{ [kBq]} / 0,339 \times 0,6 = 45,7 \text{ kBq}$ [1 punt]

Vraag 1.2 [3 punten]

Bereken uit de schildkliermeting de totale geïnhaleerde activiteit.

- Activiteit is 20 [cps] / 9,5 [cps/kBq] = 2,1 kBq [1 punt]
 NaI valt onder de 'overige verbindingen' en is dus inhalatieklasse F [1 punt]
 De activiteit in de schildklier na 24 uur is $1,2 \times 10^{-1} \text{ Bq}$ per Bq inname
 $A_{\text{inname}} = 2,1 \text{ [kBq]} / 1,2 \cdot 10^{-1} \text{ [Bq per Bq inname]} = 17,5 \text{ kBq}$ [1 punt]

Vraag 1.3 [3 punten]

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

- $E(50) = e(50)(w) \times A(\text{inname})$
 Snuitsel: $E(50) = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]} \times [45,7 \text{ kBq}] = 5,03 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,50 \text{ mSv}$
 Schildkliermeting: $E(50) = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]} \times [17,5 \text{ kBq}] = 1,93 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,20 \text{ mSv}$ [2 punten]

Keuzes: [1 punt bij correct argument]

- In het kader van een *worst case* analyse is een effectieve volgdozis van 0,50 mSv een goede keus
- Vanwege de gebrekkige nauwkeurigheid van de modelmatige aanpak is een gemiddelde waarde een goede keus: $(0,50 \text{ [mSv]} + 0,20 \text{ [mSv]}) / 2 = 0,35 \text{ mSv}$
- Waarschijnlijk is de berekening aan de hand van het snuitsel minder nauwkeurig dan de berekening aan de hand van de schildkliermeting en is het kiezen van 0,20 mSv een goede keus
- het optellen van beide waardes is geen valide optie

Vraag 1.4 [3 punten]

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

De effectieve volg dosis wordt vooral veroorzaakt door de bijdrage van de geabsorbeerde dosis voor de schildklier. Deze wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door bètadeeltjes en deels door conversie-elektronen en fotonen, alle met een stralingsweegfactor van 1 Sv/Gy. [1 punt]

De weefselweegfactor van de schildklier is niet gegeven, maar mag uit het cursusmateriaal worden gebruikt ($w_T = 0,04$ of $w_T = 0,05$). Beargumenteerd gebruiken van de kleinst gangbare weefselweegfactor ($w_T = 0,01$) wordt ook goed gerekend. [1 punt]

De geabsorbeerde dosis voor de schildklier zal dan liggen tussen:

$$D_{\text{schildklier}} = 0,5 \text{ mSv}/(1 \times 0,04) = 13 \text{ mGy}$$

$$D_{\text{schildklier}} = 0,5 \text{ mSv}/(1 \times 0,05) = 10 \text{ mGy} \quad [1 \text{ punt}]$$

Alternatieve uitwerkingen, b.v. aan de hand van de effectieve volg dosis worden ook goed gerekend.

Vraag 1.5 [3 punten]

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

De weefselweegfactor voor de schildklier is 0,05 volgens ICRP-60. Gebruik van de waarde 0,04 (ICRP-103) is niet correct omdat de tabel in de bijlage gebaseerd is op ICRP-60, maar het wordt niet fout gerekend. Andere waarden voor de weefselweegfactor leiden tot een aftrek van 1 punt.

De bijdrage van de equivalente volg dosis van de schildklier aan de effectieve volg dosis is: $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ [Sv/Bq]} \times 0,05 = 1,05 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ [1 punt]

De procentuele bijdrage aan de effectieve volg dosis is: $(1,05 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]}) / (1,1 \cdot 10^{-8} \text{ [Sv/Bq]}) \times 100\% = 95,5\%$ [1 punt]

De bijdrage van alle andere organen samen dan $100 - 95,5 = 4,5\%$
Dit is minder dan 10%. [1 punt]

Puntenwaardering:

Vraagstuk 1	
Vraag	Punten
Vraag 1.1	3 punten
Vraag 1.2	3 punten
Vraag 1.3	3 punten
Vraag 1.4	3 punten
Vraag 1.5	3 punten
Totaal	15 punten

Vraagstuk 2: Leerlingenproject 'Radioactieve 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 massieke verzwakkingcoëfficiënt μ/ρ voor fotonen van 100 keV in aluminium bedraagt $0,17 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. [1 punt]

Een dikte van 1,5 cm aluminium ($\rho = 2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) leidt dan tot een verzwakking van $T = e^{-0,17 \cdot 2,7 \cdot 1,5} = e^{-0,68} = 0,5$ [2 punten]

Omgekeerd mag uiteraard uit de vergelijking $T = e^{-0,17 \cdot 2,7 \cdot d} = 0,5$ ook worden afgeleid dat $d = 1,5 \text{ cm}$.

Gebruikmaken van de formule $d_{1/2} = \ln(2) / [\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho]$ wordt ook goed gerekend.

Vraag 2.2 [5 punten]

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

De drie hoogste uitgezonden energieën hebben de grootste emissiewaarschijnlijkheden, en zijn alle drie afkomstig van ^{214}Bi . Dit betekent dat ^{214}Bi de grootste bijdrage aan de totaal uitgezonden energie levert. [1 punt]

De per desintegratie uitgezonden energie kan worden berekend met

$$E_{\text{totaal}} = \sum_i y_i \cdot E_{\gamma,i}$$

Maak gebruik van bijlage 1:

Nuclide	E_{γ} (in MeV)	y	Bijdrage aan E_{totaal} (MeV)
^{210}Pb	0,046	0,04	0,002
^{214}Pb	0,295	0,2	0,06
^{214}Pb	0,352	0,4	0,14
^{214}Bi	0,609	0,5	0,30
^{214}Bi	1,120	0,3	0,34
^{214}Bi	1,765	0,4	0,71

Uit het voorgaande is ook evident dat ^{214}Bi veruit de grootste bijdrage aan de totaal uitgezonden energie levert:

$$E_{214\text{Bi}} = 0,30 + 0,34 + 0,71 = 1,4 \text{ MeV} \quad [1,5 \text{ punt}]$$

Handboek Radionucliden: $k = 0,28 \text{ } \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$

Uit de gegeven vuistregel volgt dan: $E_{\gamma} = 0,28 \cdot 7 = 2,0 \text{ MeV}$. [1,5 punt]

De procentuele bijdrage van ^{214}Bi bedraagt dus $1,4 / 2,0 = 0,70$, ofwel 70%.

NB: uit niet-afgeronde getallen volgt $1,35 / 1,96 = 0,69$, ofwel 69%. [1 punt]

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}Ra , in evenwicht met haar dochters, hebben gemeten.

In vraag 2.1 is bepaald dat de halveringsdikte voor 100 keV fotonen $\gg 0,3$ mm. De meest relevante fotonen hebben nog veel hogere energieën met halveringsdiktes groter dan 1,5 cm. De leerlingen hebben dus in elk geval niet de halveringsdikte voor fotonen afkomstig uit het verval van ^{226}Ra gemeten.

[2 punten]

Vraag 2.4 [3 punten]

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

De dracht van α -deeltjes in lucht bedraagt maximaal $0,3\sqrt{E_\alpha^3} = 6,4$ cm (bij een E van 7,7 MeV). [1,5 punten]

Keuze van een andere (lagere) E leidt tot een aftrek van maximaal 1 punt.

Uit de regel van Bragg-Kleeman volgt dan dat de dracht in aluminium gelijk is aan:

$$R_A = 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{AR_L}}{\rho} = 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{27 \times 6,4}}{2,7} = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 39 \text{ } \mu\text{m} < 0,3 \text{ mm}$$

Alle α -deeltjes worden dus gestopt in 0,3 mm aluminium. [1,5 punten]

Voor louter kwalitatieve argumentatie wordt maximaal de helft van het aantal punten toegekend.

Voor alleen het opmerken dat de door de leerlingen vastgestelde halveringsdikte de 'gecombineerde' halveringsdikte is van α -, β -deeltjes en fotonen, wordt 1 punt toegekend (bij vraag 3 of 4).

Vraag 2.5 [4 punten]

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

Gegeven:

- $d_{1/2} = 0,07 E_{\beta,\text{max}} [\text{g}\cdot\text{cm}^2] / \rho$
- $\rho = 2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

$$\rightarrow d_{1/2} = 0,07 E_{\beta,\text{max}} / 2,7 = 0,031 [\text{cm}] = 0,31 (\text{mm}) \quad [2 \text{ punten}]$$

Uit de literatuur is bekend dat de transmissie van β -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 dracht van de β -deeltjes (dit hoeft door de kandidaat niet expliciet genoemd te worden).

$$\rightarrow T = 2^{-0,3/d_{1/2}} \quad [1 \text{ punt}]$$

Voor de door ^{210}Bi uitgezonden bèta ($E_{\beta,\text{max}} = 1,2 \text{ MeV}$) volgt dan $T = 0,51$. [1 punt]

NB. Op basis van alle uitgezonden bèta's uit bijlage 1 is de conclusie nagenoeg identiek:

Nuclide	$E_{\beta,\text{max}}$ (in MeV)	y	$d_{1/2}$ (mm Al)	T (0,3 mm Al)	T x y
^{214}Pb	0,7	0,85	0,18	0,31	0,26
^{210}Bi	1,2	1,0	0,31	0,51	0,51
^{214}Bi	1,5	0,35	0,39	0,59	0,21
^{214}Bi	3,3	0,19	0,86	0,79	0,15
		2,39			1,13

Het totaal aantal uitgezonden bètadeeltjes per desintegratie bedraagt 2,39. Daar zijn er na 0,3 mm aluminium nog 1,13 van over. Dat correspondeert met een fractie (of transmissie) van $1,13/2,39 = 0,47$.

NB1: deze waarden komen nagenoeg overeenkomen met de door de leerlingen gevonden waarde van 0,5. Met in het achterhoofd dat fotonen nauwelijks worden tegengehouden door het aluminium betekent dit dat de gebruikte GM-buis nauwelijks gevoelig is voor alfadeeltjes. Was dat wel zo geweest, dan hadden de leerlingen vermoedelijk een veel kleinere transmissie vastgesteld omdat alle alfadeeltjes door het aluminium worden gestopt.

NB2: de in dit vraagstuk gebruikte vuistregel voor de halveringsdikte voor β -straling is buitengewoon conservatief. De voorfactor 0,07 volgt uit de benaderingsformule voor de gereduceerde dracht $R\cdot\rho = 0,5\cdot E_{\beta,\text{max}}$. Deze formule mag eigenlijk alleen voor elektronen met een energie tussen 1 en 10 MeV worden toegepast. Een realistischer waarde van de voorfactor is 0,04 (ontleend aan fig. 3.5 uit R.D. Evans, The atomic nucleus, McGraw-Hill, 1955)

Puntenwaardering:

Vraagstuk 2	
Vraag	Punten
2.1	3
2.2	5
2.3	2
2.4	3
2.5	4
Totaal	17

Vraagstuk 3: Blootstelling van buspassagiers in het Andesgebergte

Vraag 3.1 [4 punten]

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

10 Ci = 370 GBq. [1 punt]

$$E = \frac{0,072 [\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2] \times 370 \cdot 10^3 [\text{MBq}]}{0,7^2 [\text{m}^2]} \times 8 [\text{h}] \times 0,8 [\text{Sv/Sv}] \times 0,8 =$$

$$2,78 \cdot 10^5 \mu\text{Sv} = 0,28 \text{ Sv}$$

Correctie transmissie vloer en bagage [1 punt]

Correctie conversiefactor [1 punt]

Correctie invullen overige waarden formule en juist uitrekenen [1 punt]

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.

Onder ongeveer 0,5 Gy zijn nauwelijks of geen zichtbare / merkbare weefselreacties te verwachten. Mogelijk zou van een dosis als deze een verandering in het bloedbeeld te zien kunnen zijn; dit kan gebruikt worden om vast te stellen of de dosis inderdaad in deze orde grootte zit. Een dosis van 0,28 Sv in een keer is hoog in vergelijking met de dosis die je oploopt als gevolg van achtergrondstraling (ca. 2 mSv/j). Het noemen van andere effecten met een drempeldosis van 0,5 Gy of lager (b.v. tijdelijke steriliteit) wordt uiteraard ook goed gerekend.

De kans op kanker zal toenemen met 5% per Sv. Bij dergelijk hoge effectieve doses geldt dat de DDREF van 2 niet meer van toepassing is: 10% per Sv is vermoedelijk beter – het noemen van de DDREF is niet nodig om voor het maximale aantal punten in aanmerking te komen. Percentages tussen 4% en 10% worden dus goed gerekend.

De blootgestelde persoon heeft een extra kans op het ontwikkelen van kanker ergens in zijn/haar leven. Die extra kans is bij een effectieve dosis van 0,28 Sv enkele procenten extra bovenop de kans die er altijd al is (orde grootte in Nederland 30%): $0,05 \times 0,28 = 0,014 = 1,4\%$ of $0,1 \times 0,28 = 0,028 = 2,8\%$, ofwel waardes van ruwweg 1 tot 3%.

Benoemen directe effecten / weefselreacties (drempeldosis / effect): [1,5 punten]
 Benoemen stochastische effecten (toename enkele procenten) [1,5 punten]

Vraag 3.3 [6 punten]

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

$$a = \frac{A}{l} = \frac{370 \cdot 10^3 \text{ [MBq]}}{0,1 \text{ [m]}} = 3,7 \cdot 10^6 \text{ MBq/m} \quad [1 \text{ punt}]$$

Omwerken $h_p(0,07)$ naar de juiste eenheid¹:

$$h_p(0,07) = 15,1 \left[\frac{\text{mSv}}{\text{h}} \text{ per GBq op } 10 \text{ cm} \right] \cdot 10^3 \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{mSv}} \right] \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{GBq}}{\text{MBq}} \right] \cdot 10^{-2} [\text{op } 1 \text{ m}] = 0,151 \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \text{ per MBq op } 1 \text{ m} \right] \quad [2 \text{ punten}]$$

$$\dot{H}_p(0,07) = \frac{\pi \cdot h_p(0,07) \cdot a}{r} = \frac{3,14 \times 0,151 \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \text{ per } \frac{\text{MBq}}{\text{m}^2} \right] \times 3,7 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{MBq}}{\text{m}} \right]}{1 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}} = 1,8 \cdot 10^9 \mu\text{Sv/h} \quad [2 \text{ punten}]$$

In 30 seconden ontvangt de medewerker dus een $H_p(0,07)$ van:

$$H_p(0,07) \cong 1,8 \cdot 10^9 \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \right] \times 10^{-6} \left[\frac{\text{Sv}}{\mu\text{Sv}} \right] \times \frac{30 \text{ [sec]}}{3600 \left[\frac{\text{sec}}{\text{h}} \right]} = 15 \text{ Sv} \quad [1 \text{ punt}]$$

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.

Een waarde van $h_p(0,07)$ van 15 Sv komt overeen met een geabsorbeerde dosis van 15 Gy ter plaatse van de bestraalde huid, aangezien $w_R=1 \text{ Sv/Gy}$.

Als 15 Gy is afgegeven in korte tijd treden schadelijke weefselreacties op.

Na enkele uren treedt tijdelijke roodheid van de huid (erytheem) op. Na enkele weken treedt er reactie op in de diepere huidlagen en ontstaat opnieuw roodheid als gevolg van ontstekingsreacties en desquamatie (afschilfering). Het noemen van (tijdelijke) ontharing wordt niet fout gerekend.

Afhankelijk van de formulering worden punten toegekend. Leidraad:

Noemen schadelijke weefselreacties / drempeldosis [1 punt]

Noemen erytheem en/of huidsyndroom [1 punt]

Noemen juiste tijdpad (volgorde volstaat) [1 punt]

¹ T. Otto: "Personal dose-equivalent conversion coefficients for 1252 Radionuclides", Radiation Protection Dosimetry (2016), 168(1), p.1

Het noemen van (het ontbreken van) kansgebonden effecten kan met 1 punt gehonoreerd worden als men voor dit onderdeel nog niet alle punten heeft behaald.

Puntenwaardering:

Vraagstuk 3	
Vraag	Punten
3.1	4
3.2	3
3.3	6
3.4	3
Totaal	16

Note: Dit vraagstuk is gebaseerd op een incident met een ¹⁹²Ir-bron in 2002, Bolivia – zie www.iaea.org/publications/6975/the-radiological-accident-in-cochabamba.

Vraagstuk 4: Efficiëntiebepaling van een gammacamera

Vraag 4.1 [4 punten]

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

Het bruto aantal counts bij 121 keV is 9036 counts (in 1 uur). Achtergrond wordt gegeven in de tabel.

$$R_n = R_b - R_a = \frac{9036}{3600 [s]} - \frac{5400}{3600 [s]} = 1,01 \text{ cps} \quad [2 \text{ punten}]$$

De standaarddeviatie hierin is:

$$\sigma_{R_n} = \sqrt{\frac{R_b}{t_b} + \frac{R_a}{t_a}} = \sqrt{\frac{9036}{3600 [s]} + \frac{5400}{3600 [s]}} = 0,033 \text{ cps}$$

$$R_n = 1,01 \pm 0,03 \text{ cps} \quad [2 \text{ punten}]$$

Vraag 4.2 [5 punten]

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

$$\varepsilon = \frac{R_n}{\text{fotonen} \cdot \text{s}^{-1}} = \frac{1,01 [\text{cps}]}{58752 [\text{fotonen} \cdot \text{s}^{-1}]} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ counts per foton} \quad [2 \text{ punten}]$$

$$MDA = \frac{3}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{R_a}{t_a}} = \frac{3}{\varepsilon \cdot \gamma} \cdot \sqrt{\frac{R_a}{t_a}} = \frac{3}{1,72 \cdot 10^{-5} \times 0,2841} \cdot \sqrt{\frac{5400}{3600 [s]}} = 12532 \text{ Bq} = 12,5 \text{ kBq} \quad [3 \text{ punten}]$$

Fictief rendement (voor correctie met emissiewaarschijnlijkheid) binnen interval $9 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$ geeft geen aftrek voor 2^e deel berekening. Buiten het interval geeft het 1 punt aftrek.

Als alternatief mag uiteraard ook $\eta = R_n/A$ gebruikt worden:

$$\eta = \frac{R_n}{A} = \frac{1,01 [\text{cps}]}{2,068 \cdot 10^5 [\text{Bq}]} = 4,89 \cdot 10^{-6} \text{ counts per Bq} \quad [2 \text{ punten}]$$

$$MDA = \frac{3}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{R_a}{t_a}} = \frac{3}{4,89 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{\frac{5400}{3600 [s]}} = 12532 \text{ Bq} = 12,5 \text{ kBq} \quad [3 \text{ punten}]$$

Vraag 4.3 [2 punten]

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

Argument:

De aanwezigheid van het ^{137}Cs veroorzaakt een verhoogde achtergrond voor de lagere energieën door het Comptoneffect (Comptonrug). [1 punt]

Effect:

Door het verhoogde teltempo van de achtergrond gaat de minimaal detecteerbare activiteit omhoog. [1 punt]

Vraag 4.4 [3 punten]

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

De beste keus is de piek met de laagste MDA. [1 punt]

Uit de formule $MDA = \frac{3}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{R_a}{t_a}}$ kan geconcludeerd worden dat de MDA het laagst is wanneer de efficiëntie (telrendement) het hoogst is, de meettijd het langst is én het teltempo in de achtergrondmeting het laagst is. Dit kun je vereenvoudigen door te stellen dat het gemeten aantal pulsen in de achtergrondmeting het laagst en de efficiëntie het hoogst moet zijn. De piek die de kleinste waarde oplevert voor $\frac{\sqrt{N_a}}{\eta}$ moet dus gevonden worden.

Benoemen (totale) efficiëntie en achtergrond [2 punten]
Uiteraard mogen ook de efficiëntie (in counts/foton) en yield afzonderlijk genoemd worden.

Bij de 121 keV piek is de totale efficiëntie weliswaar het hoogst (omdat de efficiëntie per foton het hoogst is en de emissiewaarschijnlijkheid van deze fotonen het hoogst is), maar in deze piek is ook de achtergrond het hoogst. De keuze voor deze piek is dus niet triviaal (zie de tabel op de volgende pagina).

Energie piek (keV)	Yield y (%)	Achtergrond piek N_a (counts)	Efficiëntie ϵ (counts per foton)	MDA (kBq)
121,78	28,41%	5400	1,72E-05	1,25E+01
244,7	7,55%	2100	8,97E-06	5,64E+01
344,28	26,59%	950	6,81E-06	1,42E+01
411,12	2,23%	569	5,23E-06	1,70E+02
443,96	2,82%	420	4,62E-06	1,31E+02
778,9	12,97%	90	1,38E-06	4,42E+01
869	4,24%	69	1,33E-06	1,23E+02
964,5	14,50%	56	7,87E-07	5,46E+01
1085,9	10,13%	45	6,10E-07	9,05E+01
1112,1	13,41%	36	6,31E-07	5,91E+01
1408	20,85%	16	2,90E-07	5,51E+01

Puntenwaardering:

Vraagstuk 4	
Vraag	Punten
4.1	4
4.2	5
4.3	2
4.4	3
Totaal	14