



Stralingsbescherming & Nucleaire Technologie

# MEDISCHE BEELDVORMING

## Uitwerkingen

Hoeveel patiënten gaat  
jouw team helpen?

NRG  
PALLAS

ACADEMY



NATUURKUNDE



GENEESKUNDE



SCHEIKUNDE

TRANSPORT  
& VEILIGHEID

# Uitwerkingenboek voor de lesmodule Junior Academy NRG

Dit is het uitwerkingenboek voor de opgaven van de lesmodule “Medische Beeldvorming” van de Junior Academy NRG. Zowel de uitwerkingen voor de *expertbriefings* als de uitwerkingen voor de subvragen en hoofdvraag van de challenge zijn inbegrepen.

**De werkzaamheden van de Junior Academy vormen onderdeel van het onderzoeksprogramma PIONIER dat NRG uitvoert in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.**

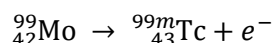
## 1 Inhoud

<b>2</b>	<b>Uitwerkingen opgaves van de briefings</b>	<b>3</b>
2.1	Uitwerkingen briefing voor natuurkundigen	3
2.2	Uitwerkingen briefing voor artsen	4
2.3	Uitwerkingen briefing voor chemici	5
2.4	Uitwerkingen briefing voor experts in logistiek en veiligheid	7
<b>3</b>	<b>Uitwerkingen quiz vragen</b>	<b>9</b>
3.1	Uitwerkingen quiz voor natuurkundigen	9
3.2	Uitwerkingen quiz voor artsen	9
3.3	Uitwerkingen quiz voor chemici	9
3.4	Uitwerkingen quiz voor experts in logistiek en veiligheid	10
<b>4</b>	<b>Nakijkmodel Challenge</b>	<b>11</b>

## 2 Uitwerkingen opgaves van de briefings

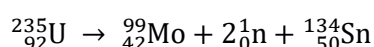
### 2.1 Uitwerkingen briefing voor natuurkundigen

#### Opgave 1.



#### Opgave 2.

Het aantal protonen en neutronen moet voor en na de splijting hetzelfde zijn. Dit betekent dat het andere brokstuk 84 neutronen en 50 protonen heeft. Een atoom met 50 protonen is altijd tin.



#### Opgave 3.

Gebruik de formule voor het aantal radioactieve atomen:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Om het percentage uit te rekenen, vullen we  $N_0 = 100\%$  in:

$$\frac{N(t)}{N_0} [\text{in \%}] = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

De halveringstijd van technetium-99m is 6,01 uur. We vullen dus  $t_{1/2} = 6,01$  uur en  $t = 40,0$  uur in:

$$\frac{N(t)}{N_0} [\text{in \%}] = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{40,0}{6,01}} = 0,992\% \approx 1\%$$

#### Opgave 4.

a. De halveringstijd van molybdeen-99 is  $t_{1/2} = 65,9$  uur. De berekening is hetzelfde als bij opgave 3.

Invullen van  $t = 40,0$  uur en  $t_{1/2} = 65,9$  geeft:

$$\frac{N(t)}{N_0} [\text{in \%}] = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{40,0}{65,9}} = 65,7\%$$

b. De halveringstijd van molybdeen-99 is  $t_{1/2} = 65,9$  uur. De berekening is hetzelfde als bij opgave 3 en 4.a.

Invullen van  $t = 438$  uur en  $t_{1/2} = 65,9$  geeft:

$$\frac{N(t)}{N_0} [\text{in \%}] = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{438}{65,9}} = 0,998\% \approx 1\%$$

We zien dus dat het veel langer duur voordat er nog 1% van de beginhoeveelheid over is van molybdeen-99 ten opzichte van technetium-99m (opgave 3).

#### Opgave 5.

Het technetium-99m heeft een korte halveringstijd van 6,01 uur. Dit maakt het moeilijk om het technetium te produceren in een reactor en vervolgens op tijd naar het ziekenhuis te vervoeren. Molybdeen-99 heeft een langere halveringstijd en dus kan het op tijd naar het ziekenhuis vervoerd worden, waar het vervalproduct technetium-99m kan worden gebruikt voor SPECT scans.

## 2.2 Uitwerkingen briefing voor artsen

**Opgave 1.** De  $^{99m}\text{Tc}$ -atomen zenden een foton uit. Fotonen bewegen gemakkelijk door het lichaam, omdat ze een kleine kans op interacties met het menselijk weefsel hebben. Hierdoor bereikt een groot deel van de fotonen de detector. Ook heeft  $^{99m}\text{Tc}$  een korte halveringstijd. Je kunt dus met  $^{99m}\text{Tc}$  foto's maken én de radioactieve stof is al snel na het maken van de foto vervallen.

**Opgave 2.** Met SPECT kun je andere weefsels zichtbaar maken dan met MRI. Daarnaast is SPECT goedkoper om toe te passen. En je kunt de radioactieve stof labelen zodat die naar het juiste celtype toe gaat. Zo kun je heel gericht kijken naar het probleemgebied. Het nadeel van SPECT is dat je met radioactieve stoffen werkt en daar dus extra veiligheidsrisico's bij komen kijken. Zo worden sommige medewerkers in de productie van  $^{99m}\text{Tc}$  en de medewerkers en patiënten in het ziekenhuis blootgesteld aan straling

**Opgave 3.** Gebruik de formule voor het aantal radioactieve atomen. De halveringstijd van technetium-99m is 6,01 uur.

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \rightarrow \frac{A(t)}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{24,0}{6,01}} = 0,0628 \quad \text{dus } 6,28\%$$

**Opgave 4.** Per uitgevoerde scan wordt de medewerker blootgesteld aan 15 microsievert. 200 scans maakt 3000 microsievert of 3 millisievert.

**Opgave 5.** De achtergrondstraling in Nederland is 1,6 millisievert per jaar (uit de tekst). De patiënt loopt de hoogste dosis op (per scan 10 millisievert), en het kan ook zijn dat een patiënt meerdere scans ondergaat. Omdat de patiënt al gevaar loopt door ziekte, en de SPECT scan de kans op overleven vergroot, is het gezondheidsrisico waar de patiënt door de stralingsdosis aan wordt blootgesteld door de arts bepaald als acceptabel. De 2 millisievert die de medewerker per jaar in het ziekenhuis ontvangt is dezelfde orde van grootte als de dosis die hij of zij door achtergrondstraling ontvangt. Er is daarom statistisch gezien geen significante verhoging van het risico om aan kanker te overlijden als gevolg van deze blootstelling.

## 2.3 Uitwerkingen briefing voor chemici

**Opgave 1.** We weten dat 3,0% van de uraniumatomen in de productieplaatjes gespleten wordt. Ook weten we dat 6,0% van de kernsplijtingen van  $^{235}\text{U}$  een  $^{99}\text{Mo}$ -atoom oplevert en dat de efficiëntie van het chemische scheidingsproces 90% is. Dat betekent dat uit beginhoeveelheid uranium-235-atomen in de productieplaatjes na alle verwerkingsstappen  $0,030 \cdot 0,060 \cdot 0,90 = 0,0016 = 0,16\%$  molybdeen-99-atomen naar het ziekenhuis worden verstuurd.

Let op: we hebben voor het rekengemak het verval van molybdeen-99 naar technetium-99m verwaarloosd. In werkelijkheid is dit percentage nog iets lager door het verval van  $^{99}\text{Mo}$  tijdens het chemische proces en vervoer.

**Opgave 2.** Het scheiden van  $^{99}\text{Mo}$  duurt anderhalve dag (36,0 uur). Omdat de halveringstijd van  $^{99}\text{Mo}$  65,9 uur is geeft de formule:

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{36,0}{65,9}} = N_0 \cdot 0,685 \quad \rightarrow \frac{N(t)}{N_0} = 0,685 \rightarrow 68,5\% \text{ is nog over. Dus } 31,5\% \text{ is vervallen.}$$

Gecombineerd met het antwoord uit opdracht 1, komt van de initiële uranium-atomen dus 68,5% van 0,16% aan als molybdeen-99. Dat is dus  $0,685 \cdot 0,0016 = 0,00109 = 0,11\%$ .

**Opgave 3.** Voor de chemische reactie,  $\text{MoO}_3 + 2\text{NaOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , is de molaire verhouding van natronloog (NaOH) en  $\text{MoO}_3$  2:1. We berekenen de benodigde hoeveelheid natronloog als volgt:

$$\frac{\text{aantal gram MoO}_3}{\text{molaire massa MoO}_3} \cdot 2 \cdot \text{molaire massa NaOH} = \text{aantal gram NaOH}$$

Invullen geeft:

$$\frac{5 \text{ g}}{144 \text{ g/mol}} \cdot 2 \cdot 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 2,78 \text{ g NaOH nodig voor het oplossen van } 5 \text{ g MoO}_3$$

**Opgave 4.** Voor één scan heb je 0,20 nanogram (=  $0,20 \cdot 10^{-9}$  gram)  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  nodig. Met de efficiëntie die in vraag 1 is berekend (5,4%) en het percentage molybdeen dat na verval in het ziekenhuis aankomt uit opdracht 2 (68,5%), kun je berekenen hoeveel procent van het uranium als molybdeen aankomt in het ziekenhuis:  $0,685 \cdot 0,054 = 0,037$ , dus 3,7%. Als je 1,0 microgram uranium hebt, kun je daar 0,037 microgram  $^{99}\text{Mo}$  in het ziekenhuis krijgen. Als je verdere verliezen verwaarloost kun je de totale scans die je hiermee kunt maken berekenen als volgt:

$$\frac{0,037 \cdot 10^{-6}}{0,20 \cdot 10^{-9}} = 185 \text{ scans}$$

(Let op! Verdere verliezen zijn eigenlijk niet verwaarloosbaar. We gaan hier tijdens de challenge verder op in.)

**Opgave 5.** Het materiaal dat gedurende chemische processen gebruikt is en besmet is geraakt moet indien mogelijk worden schoongemaakt. Chemicaliën waar radioactief materiaal in zit moet dan worden gefilterd. Materiaal dat is gebruikt voor het schoonmaken of filteren en materiaal dat niet schoon wordt, moet worden afgevoerd als radioactief afval. Hierbij heeft veiligheid voor mens en milieu de hoogste prioriteit. In Zeeland

staat de COVRA, een organisatie gespecialiseerd in het veilig verwerken en opslaan van radioactief afval. Al het radioactief afval dat in Nederland wordt geproduceerd komt hier terecht. Opslagprijzen per liter afval variëren van honderden tot duizenden euro's per liter. Verwerkingskosten komen hier nog bovenop. Om veiligheidsoverwegingen, de kosten van nucleaire behandelingen en omdat je zo weinig mogelijk radioactief restafval achter wilt laten voor nakomende generaties, is het belangrijk dat de productie van radioactief afval zoveel mogelijk wordt geminimaliseerd.

## 2.4 Uitwerkingen briefing voor experts in logistiek en veiligheid

### Opgave 1.

- $\left(\frac{1}{2}\right)^{10} = \frac{1}{2^{10}} = \frac{1}{1024} = 0,00097..$ , dus minder dan 0,1% van het materiaal is over na 10 halveringstijden.
- De aanname dat dit een verwaarloosbare hoeveelheid is, hangt af van de hoeveelheid materiaal in de beginsituatie. In het geval van een SPECT-scan bijvoorbeeld is de hoeveelheid, die na tien halveringstijden achter blijft in het lichaam, verwaarloosbaar.

### Opgave 2.

In opgave 1 hebben we gezien dat na 10 halveringstijden de hoeveelheid restmateriaal zo klein is, dat we het verwaarloosbaar kunnen noemen en dus kunnen zeggen dat het vervallen is. Eén halveringstijd is 6,01 uur, dus na 60,1 uur (ongeveer 2,5 dag) is het vervallen.

### Opgave 3.

Deze opgave is op te lossen met (1) het inzicht dat voor het doorlaten van 25% (afscherming van 75%) precies twee halveringsdiktes nodig zijn of (2) omschrijven van de halveringsdikteformule:

- Voor het doorlaten van 25% van de intensiteit van de straling zijn precies twee halveringsdiktes nodig, omdat  $(1/2)^2 = 0,25$ . Dus  $d = 2 \cdot d_{1/2} = 0,54$  mm
- De container mag 25% van de straling doorlaten. Als we de formule voor intensiteit van gammastraling omschrijven naar dikte  $d$ :

$$d = d_{1/2} \cdot \log_{1/2}\left(\frac{I}{I_0}\right), \text{ met } \frac{I}{I_0} = 0,25$$

en de halveringsdikte van lood uit de tekst  $d_{1/2} = 0,27$  mm invullen, geeft dit  $d = 0,54$  mm.

### Opgave 4.

Antwoord B is correct. Er zijn twee opties om deze vraag op te lossen:

*Optie 1: De drie beginwaarden in vergelijking 15 invullen geeft:*

$$A) m_t(12,0 \text{ u}) = 110 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{12,0}{65,9}} = 97,0 \text{ gram} < 100 \text{ gram, dus te weinig.}$$

$$B) m_t(12,0 \text{ u}) = 115 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{12,0}{65,9}} = 101 \text{ gram} \rightarrow \text{Net iets meer dan 100 gram. Het juiste antwoord.}$$

$$C) m_t(12,0 \text{ u}) = 120 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{12,0}{65,9}} = 106 \text{ gram} \rightarrow \text{Dit is meer dan genoeg, maar we willen niet te veel bestellen. Antwoord B) is dus een beter antwoord.}$$

*Optie 2: Vergelijking 15 omschrijven naar  $N_0 = \dots$  en invullen:*

$$\text{Vergelijking 15: } m_t(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_0}}$$

Omschrijven:

$$N_0 = \frac{m_t(t)}{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}}$$

Invullen van  $t = 12,0$  uur,  $t_{1/2} = 65,9$  uur en  $m_t(12,0 \text{ uur}) = 100 \text{ g}$  geeft:

$$N_0 = \frac{100}{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{12,0}{65,9}}} = 113 \text{ g}$$

Antwoord B) zit hier het dichtste bij en is dus het correcte antwoord.

*Toelichting:*

Antwoord B) zit het dichtst bij de 100 gram molybdeen-99 die over moet zijn bij aankomst van de technetiumkoe in het ziekenhuis. Je wilt nooit meer nucleair materiaal versturen dan strikt noodzakelijk is, dus het moet zo dicht mogelijk tegen het streefgetal aan zitten.

### Opgave 5.

a. Bereken eerst de geabsorbeerde dosis  $D$  met  $E = 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ J}$  en  $m = 70,0 \text{ kg}$ :

$$D = \frac{E}{m} = \frac{1,05 \cdot 10^{-3} \text{ [J]}}{70,0 \text{ [kg]}} = 1,50 \cdot 10^{-5} \text{ Sv}$$

Bereken daarna de equivalente dosis  $H$  met de weegfactor  $w_R = 1$  voor gammastraling (zie tekst).

$$H = w_R D = 1 \cdot 1,50 \cdot 10^{-5} \text{ [Gy]} = 1,50 \cdot 10^{-5} \text{ Sv}$$

In de tekst staat dat we aannemen dat de effectieve dosis gelijk is aan de equivalente dosis, dus effectieve dosis is  $E = 15,0 \mu\text{Sv}$ .

b. Het aantal SPECT-scans dat deze werknemer per jaar uitvoert is 100 stuks. De totale effectieve dosis die de werknemer per jaar oploopt is dan:  $E_{\text{jaar}} = 100 \cdot 15,0 \cdot 10^{-6} = 1,50 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}$ .

Hiermee zit het nog ruim onder de dosislimiet voor effectieve dosis voor een medisch nucleair werker.

c. Ja, de dosislimieten voor de medisch nucleair werker worden niet overschreden.



### 3 Uitwerkingen quiz vragen

#### 3.1 Uitwerkingen quiz voor natuurkundigen

- ${}^{99m}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$
- De vergelijking  $(N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}})$  kan worden toegepast op elk radioactief isotoop en elk soort straling, dus de vergelijking kan gebruikt worden voor zowel  ${}^{99}\text{Mo}$  als  ${}^{99m}\text{Tc}$ . Molybdeen-99 en Technetium-99m hebben wel een andere halveringstijd ( $t_{1/2}$ ).
- Voordat het target in de reactor bestraald wordt, bestaat het uit uranium-235.
- Gebruik bovenstaande formule met  $t = 65,9$  uur en  $t_{1/2} = 6,01$  uur.

$$\frac{N(t)}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{10,965} = 0,0005 \rightarrow 0,0005 \times 100\% = 0,05\%$$

Oftewel 0,05%  ${}^{99m}\text{Tc}$  blijft over van de oorspronkelijke hoeveelheid.

#### 3.2 Uitwerkingen quiz voor artsen

- ${}^{99m}\text{Tc}$  is een geschikt medisch isotoop, omdat
  - Gammafotonen een hoog doordringend vermogen hebben en daarom buiten het lichaam te meten zijn.
  - Het isotoop een korte halveringstijd heeft.
- Een tumor voedt zich voornamelijk met suikers.
- Dosis is de geabsorbeerde hoeveelheid energie in een bepaald gewicht. De eenheid van dosis is Gray (Gy) of J/kg.
- $N_0$  is de hoeveelheid atomen van een radioactief isotoop op  $t=0$ .  $A_0$  is de activiteit, oftewel het aantal atomen dat vervalst per seconde, van een radioactief isotoop op  $t=0$ .

#### 3.3 Uitwerkingen quiz voor chemici

- Ideaal zou het target na bestraling geen uranium meer bevatten. In realiteit is het te lastig om elk uranium atoom te bestralen en dus zal het target nog uranium bevatten.
- De drie reacties die plaatsvinden tijdens de scheiding van  ${}^{99}\text{Mo}$  zijn de volgende:
  - $2\text{Mo} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3$  (oxidatie van  $\text{MoO}_3$ )
  - $\text{MoO}_3 + 2\text{NaOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (vorming van  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ )
  - $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \rightarrow 2\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{MoO}_4^{2-}(\text{aq})$  (oplossing tot  $\text{MoO}_4^{2-}$ )
- Er wordt een zoutoplossing gebruikt voor de scheiding van  ${}^{99m}\text{Tc}$  en  ${}^{99}\text{Mo}$ . Hierna kan  ${}^{99m}\text{Tc}$  verder verwerkt worden om uiteindelijk gebruikt te worden bij een SPECT scan.

### 3.4 Uitwerkingen quiz voor experts in logistiek en veiligheid

1.  $d_{1/2}$  is de halveringsdikte, de dikte afschermend materiaal die nodig is om de helft van de straling te absorberen.  $t_{1/2}$  is de halveringstijd, de tijd die nodig is voordat de helft van het aantal atomen dat straling uitzendt vervallen is.
2. De hoeveelheid straling die door een bron is uitgezonden kan je verminderen door afscherming te gebruiken, waardoor straling geabsorbeerd wordt. Bij het afschermen van gammastraling wordt hiervoor vaak lood gebruikt. Ook kun je de afstand tussen de bron en jou vergroten en de tijd dat je in de buurt van de bron bent verkleinen.
3. De geabsorbeerde dosis is de hoeveelheid energie die per gewicht is geabsorbeerd. De equivalente dosis neemt mee welke soort straling is geabsorbeerd. De effectieve dosis neemt mee welk lichaamsdeel blootgesteld is aan de straling en hoe gevoelig dat type weefsel is voor straling.

## 4 Nakijkmodel Challenge

Totaal aantal punten: **39p**

Beoordeling: Cijfer =  $\frac{\# \text{ behaalde punten}}{\# \text{ totaal punten}} \cdot 9 + 1$

### Deelvraag 1. (1p totaal)

Per scan wordt er  $m_{\text{Tc99m}} = 1,0 \text{ ng} = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ g}$  technetium-99m gebruikt. De molaire massa is  $M_{\text{Tc99m}} = 98,9 \text{ g/mol}$ . Het aantal mol technetium-99m is dan:

$$(1p): N_{\text{Tc99m}} = \frac{m_{\text{Tc99m}}}{M_{\text{Tc99m}}} = \frac{1,0 \cdot 10^{-9}}{98,9} = 1,01 \cdot 10^{-11} \text{ mol}$$

### Deelvraag 2. (1p totaal)

Er moeten vier scans per dag uitgevoerd worden. Deelvraag 1 geeft ons  $N_{\text{Tc99m}} = 1,01 \cdot 10^{-11} \text{ mol}$  per scan.

$$(1p): N = 4 \cdot 1,01 \cdot 10^{-11} = 4,04 \cdot 10^{-11} \text{ mol}$$

### Deelvraag 3. (3p totaal)

In de 24 uur waarin het technetium-99m wordt gegenereerd vervalst 67,9% van dit gegenereerde technetium-99m naar technetium-99. (zie de laatste pagina van de docentenhandleiding voor de uitleg van dit percentage) Er blijft dus over van het gegenereerde technetium-99m:

$$1,00 - 0,679 = 0,321 \text{ (32,1\%)} \quad (1p)$$

Als we een  $x$  hoeveelheid technetium-99m na 24 uur willen hebben, moet er gedurende de 24 uur

$$\frac{1}{0,321} = 3,11 \text{ keer zoveel gegenereerd worden. (1p)}$$

De hoeveelheid mol technetium-99m die in 24 uur minimaal gegenereerd moet worden is dan dus:

$$4,04 \cdot 10^{-11} \cdot 3,11 = 1,26 \cdot 10^{-10} \text{ mol technetium-99m (1p)}$$

### Deelvraag 4. (3p totaal)

*Dit inzicht (2p):*

Molybdeen-99 vervalst via  $\beta^-$ -verval naar technetium-99m. Alle vervallen molybdeen-99-atomen zijn dus technetium-99m-atomen geworden. Het aantal vervallen molybdeen-99-atomen is gelijk aan het verschil tussen het huidige aantal molybdeen-99-atomen (op tijdstip  $t$ ) en het beginaantal molybdeen-99-atomen (op tijdstip  $t = 0$ ). Dat betekent dus dat het aantal technetium-99m-atomen gegenereerd tussen 0 en tijdstip  $t$  gelijk moet zijn aan dit verschil.

In formulevorm wordt dat:

$$N_{\text{Tc99m,gen in tijd } t} = N_{0,\text{Mo99}} - N_{\text{Mo99}}(t)$$

met  $N_{\text{Tc99m,gen in 24 uur}}$  het aantal mol technetium-99m op tijdstip  $t$ ,  $N_{\text{Mo99}}(t)$  het aantal mol molybdeen-99 op tijdstip  $t$  en  $N_{0,\text{Mo99}}$  het beginaantal mol molybdeen-99 ( $t = 0$ ). **(1p)** voor het inzicht wat de grootheden betekenen.

**Deelvraag 5. (3p totaal)**

We weten dat het aantal mol technetium-99m op een tijdstip  $t$  gelijk is aan de beginhoeveelheid molybdeen-99 minus de overgebleven hoeveelheid molybdeen-99 op tijdstip  $t$ , ofwel:

$$N_{\text{Tc99m,gen in tijd } t} = N_{0,\text{Mo99}} - N_{\text{Mo99}}(t)$$

Uit de briefings weten we dat het aantal atomen (of aantal mol) gelijk is aan:

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

*Dit inzicht (2p):*

Als we dit nu invullen in de eerste formule krijgen we het antwoord, namelijk:

$$N_{\text{Tc99m,gen in tijd } t} = N_{0,\text{Mo99}} - N_{0,\text{Mo99}} \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}} = N_{0,\text{Mo99}} \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}\right)$$

**(1p):** Als we dit omschrijven naar  $N_{0,\text{Mo99}} = \dots$  krijg je:

$$N_{0,\text{Mo99}} = \frac{N_{\text{Tc99m,gen in tijd } t}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}}$$

**Deelvraag 6. (3p totaal)**

*Dit inzicht (1p):* De beginhoeveelheid molybdeen-99 die we nodig hebben, kunnen we berekenen door de halveringstijd van molybdeen  $t_{1/2} = 65,9$  uur, de tijd  $t = 24,0$  uur en de benodigde hoeveelheid technetium-99m na 24 uur  $N_{\text{Tc99m in 24 uur}} = 1,26 \cdot 10^{-10}$  mol (antwoord op deelvraag 3.) in te vullen in de formule van deelvraag 5.

**(2p):** Het antwoord is:

$$N_{0,\text{Mo99}} = \frac{1,26 \cdot 10^{-10}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{24/65,9}} = \frac{1,26 \cdot 10^{-10}}{0,223..} = 5,65 \cdot 10^{-10} \text{ mol}$$

**Deelvraag 7. (4p totaal)**

**1. Dit inzicht (2p):**

We willen de generator op vrijdagochtend voor het laatst melken. Dan moet er genoeg technetium-99m in zitten voor 4 scans. Dat betekent dat er 24 uur daarvoor minimaal  $5,65 \cdot 10^{-10}$  mol molybdeen-99 in de generator moet zitten (antwoord van deelvraag 6). Dat is op donderdagochtend om 08:00 uur.

**2. Dit inzicht (2p):**

We weten dan ook dat er voor de vier keer melken daarvoor genoeg molybdeen-99 aanwezig was, omdat de hoeveelheid molybdeen-99 in de generator groter was en daardoor de opbrengst van technetium-99m per 24 uur ook.

Verdere uitleg (niet nodig voor punten):

De generator produceert namelijk minder technetium-99m in 24 uur als er minder molybdeen-99 aan het begin van die 24 uur in de generator zit. Dit kun je in de vergelijking van deelvraag 5. zien, namelijk:

$$N_{\text{Tc99m,gen in tijd } t} = N_{0,\text{Mo99}} \left( 1 - \left( \frac{1}{2} \right)^{t/t_{1/2}} \right)$$

Een kleinere beginhoeveelheid molybdeen-99 (kleinere  $N_{0,\text{Mo99}}$ ) betekent een kleinere technetium-99m opbrengst (kleinere  $N_{\text{Tc99m,gen in tijd } t}$ ).

### Deelvraag 8. (1p totaal)

De technetium generator komt om 18:00 op zondagavond aan in het ziekenhuis. Deze generator is 8 uur eerder op transport gezet, dus dat is om 08:00 uur op zondagochtend. Donderdagochtend 08:00 uur is 4 dagen later. Dat geeft  $t = 96$  uur. (1p)

### Deelvraag 9. (3p totaal)

Het is bekend hoeveel molybdeen-99 er in de technetium koe moet zitten 24 uur voor de laatste keer melken. Aangezien het molybdeen-99 met de tijd steeds minder wordt, wordt er iedere 24 uur ook minder technetium-99m geproduceerd. Als we dus de laatste 24 uur genoeg technetium-99m produceren, doen we dat in de keren daarvoor ook.

*Dit inzicht (1p):* De hoeveelheid molybdeen-99 die we na  $t = 96$  uur nodig hebben, is gelijk aan het  $5,65 \cdot 10^{-10}$  mol (antwoord van deelvraag 6.). Dat betekent dus:

$$N(t = 96 \text{ uur}) = N_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{96/t_{1/2}} = 5,65 \cdot 10^{-10} \text{ mol}$$

*Dit inzicht (2p):*

Als we hier nu de halveringstijd van molybdeen-99  $t_{1/2} = 65,9$  uur invullen en dit oplossen voor  $N_0 = \dots$ , krijg je:

$$N_0 = \frac{5,65 \cdot 10^{-10}}{\left( \frac{1}{2} \right)^{96/65,9}} = 1,55 \cdot 10^{-9} \text{ mol}$$

Er moet dus op het moment van verzenden minimaal  $1,55 \cdot 10^{-9}$  mol molybdeen-99 in de technetium-generator zitten om voldoende technetium-99m te genereren gedurende de week.

### Deelvraag 10. (4p totaal)

*Dit inzicht (1p):* Het dosistempo van de container zonder lood is 0,30 mSv/uur op 2 meter afstand. We willen dat dit met een laag lood maximaal 0,010 mSv/uur wordt.

We weten dus dat  $I_0 = 0,30$  mSv/uur en  $I(d) \leq 0,010$  mSv/uur.

*Gebruik van de juiste formule (1p):*

Vergelijking 16 in de briefing van de Experts in logistiek en veiligheid geeft:

$$I(d) = I_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{d}{d_{1/2}}}$$

*Invullen in de formule (1p):*

We kunnen alles invullen in de formule invullen, namelijk  $I_0 = 0,30$  mSv/uur,  $d_{1/2} = 7,1$  mm en  $d = 35$  mm. Dat geeft:

$$I(d = 35 \text{ mm}) = 0,30 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{35}{7,1}} = 0,0098 \text{ mSv/uur}$$

*Vergelijken van het antwoord met het maximum (1p):*

Als we nu  $I(d = 35 \text{ mm}) = 0,0098$  mSv/uur vergelijken met de maximale toegestane waarde  $0,010$  mSv/uur zitten we met een loodlaag van  $35$  mm daar netjes onder.

### Deelvraag 11. (3p totaal)

We gaan er hier vanuit dat in het slechtste geval alle vervoerde generators zo dicht mogelijk bij de bestuurder staan, dus op  $2$  meter afstand. Met de loodafscherming van de container zelf (die is berekend bij deelvraag 8) is het dosistempo op  $2$  meter afstand van één container  $0,010$  mSv/uur. (1p)

*Dit inzicht (1p):*

Door lood neemt dit dosistempo af volgens de vergelijking 16 in de briefing experts in logistiek en veiligheidsbriefing:

$$I(d) = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{d_{1/2}}}$$

Als we de afstand  $d = 40$  mm en halveringsdikte van lood  $d_{1/2} = 7,1$  mm invullen, kunnen we het dosistempo per generator bepalen inclusief de extra afscherming:

$$I(d = 40 \text{ mm}) = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{40}{7,1}} = I_0 \cdot 0,020$$

*Totale dosis berekening (1p):*

De bestuurder doet over zijn rit  $8,0$  uur, dus ondervindt deze een dosis van:

$0,010[\text{mSv/uur}] \cdot 8,0[\text{uur}] \cdot 0,020 = 0,0016 \text{ mSv} = 1,6 \mu\text{Sv}$  per container. De chauffeur vervoert  $10$  containers, dus de totale dosis die de bestuurder ontvangt is  $16 \mu\text{Sv}$ .

### Deelvraag 12. (1p totaal)

Van het geproduceerde molybdeen-99 in de productieplaatjes komt  $90\%$  (1p) in de container. De overige  $10\%$  gaat verloren in het scheidingsproces. *Dit kan worden opgezocht in de briefing van de chemici.*

### Deelvraag 13. (2p totaal)

(1p): We weten uit deelvraag 9 dat er  $1,55 \cdot 10^{-9}$  mol molybdeen-99 verzonden moet worden. Als we het verval van molybdeen-99 verwaarlozen, gaat  $10\%$  van het geproduceerde molybdeen-99 in de productieplaatjes verloren in het scheidingsproces. Er blijft dus  $90\%$  over na het scheidingsproces.

(1p): We hebben dus  $\frac{1,55 \cdot 10^{-9}}{0,9} = 1,72 \cdot 10^{-9}$  mol molybdeen-99 nodig in de productieplaatjes, voordat ze het scheidingsproces ondergaan.

**Deelvraag 14. (1p totaal)**

Gemiddeld bestaat 6% **(1p)** van de splijtingsproducten van uranium-235 uit molybdeen-99. *Dit kun je opzoeken in paragraaf 1.4.3. van de algemene introductie, de briefing van de Natuurkundigen (paragraaf 2.1.3.) en de briefing van de Chemici (paragraaf 2.3.1.)*

**Deelvraag 15. (3p totaal)**

We hebben  $1,71 \cdot 10^{-9}$  mol molybdeen-99 in de productieplaatjes nodig direct na de bestraling in de reactor. We weten ook dat 3,0% van de uranium-235-atomen een splijtingsreactie ondergaat en dat gemiddeld 6,0% van de splijtingsreacties een molybdeen-99-atoom produceert. De hoeveelheid mol uranium-235 die we nodig hebben is dan:

$$(2p): \frac{1,72 \cdot 10^{-9}}{0,030 \cdot 0,060} = 9,55 \cdot 10^{-7} \text{ mol uranium-235}$$

Uranium-235 heeft een molaire massa van 235,04 g/mol, dus het aantal gram is dan:

$$(1p): m_{U235} = 9,55 \cdot 10^{-7} \cdot 235,04 = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

**Deelvraag 16. (2p totaal)**

De **logistiek medewerker** ontvangt 16  $\mu\text{Sv}$  per rit volgens het antwoord van deelvraag 11. Als de chauffeur 50 ritten maakt per jaar, ontvangt hij dus  $50 \cdot 16 \mu\text{Sv} = 800 \mu\text{Sv} = 0,80 \text{ mSv}$  per jaar. **(1p)**

Tabel correct ingevuld **(1p)**:

Medewerkers	Dosis in een jaar (mSv)
Medisch nucleair werker (ziekenhuis)	1,5
Logistiek medewerker	$16 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 0,80$
Chemicus	5
Reactor operator	5
Patiënt	5 (per onderzoek)

**Deelvraag 17. (1p totaal)**

**(1p)** voor argumenten gebaseerd op een vergelijking tussen het wettelijke maximum en de waardes uit de tabel in deelvraag 16. De leerlingen zijn vrij om hun eigen meningen te geven hier.

De effectieve dosis van alle medewerkers valt binnen het wettelijk maximum voor hun beroep. Volgens de wet is het dus verantwoord. Voor blootgestelde medewerkers is het toegestane maximum 20 keer zo hoog als voor normale medewerkers. Hierbij is een compromis gesloten tussen een zo laag mogelijke effectieve dosis en wat praktisch werkbaar is. De blootgestelde medewerkers zullen een iets grotere kans hebben op sommige nadelige effecten van straling. De wetgever heeft echter beoordeeld dat de voordelen van het werk uitvoeren, opwegen tegen dit verhoogde risico.

De patiënt ontvangt een hogere effectieve dosis dan de gemiddelde burger. Een gewone burger wordt blootgesteld aan 1,6 mSv/jaar. De patiënt wordt blootgesteld aan 5 mSv. Patiënten hebben geen dosislimiet, aangezien de arts heeft besloten dat de voordelen van de SPECT-scan opwegen tegen de blootstelling aan de straling.