



Stralingsbescherming & Nucleaire Technologie

MEDISCHE BEELDVORMING

Docentenhandleiding

Hoeveel patiënten gaat
jouw team helpen?



NATUURKUNDE



GENEESKUNDE



SCHIEKUNDE



TRANSPORT
& VEILIGHEID

Docentenhandleiding lesmodule Medische Beeldvorming

Junior Academy NRG

In deze docentenhandleiding voor de lesmodule Medische Beeldvorming van Junior Academy NRG wordt een overzicht gegeven van de lesopzet, geadviseerde voorbereiding, aandachtspunten, onderdelen van het curriculum en een beoordelingsmodel. Dit lespakket is een aanvulling op het Subdomein B2 Medische Beeldvorming voor HAVO/VWO klassen met als doel de leerling een beter gevoel te laten ontwikkelen over de onderwerpen radioactiviteit en diens medische toepassingen.

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.

Inhoud

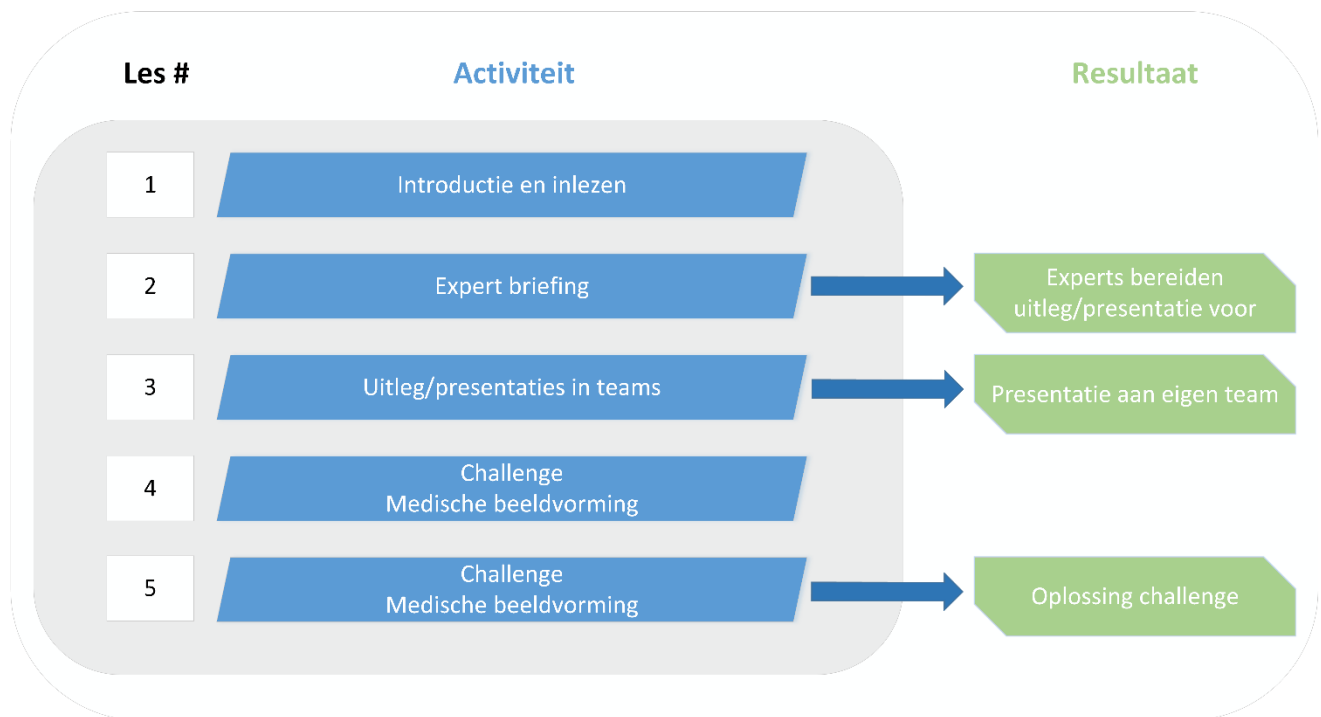
1	Overzicht	3
1.1	Lesopzet en planning	3
1.2	Behandelde onderdelen	6
1.3	Beoordelingsmodel	7
2	Bijlage Samenvatting Expertkennis	8
2.1	Natuurkundigen	8
2.2	Artsen	9
2.3	Chemici	10
2.4	Experts Logistiek en Veiligheid	11
3	Bijlage Uitleg Percentage – Challenge deelvraag 3	12

1 Overzicht

Dit lespakket is een aanvulling op Subdomein B2, Medische Beeldvorming, van 5 lessen voor HAVO/VWO in klas 4, 5 of 6. Met dit lespakket ontwikkelt de leerling meer gevoel voor het onderwerp radioactiviteit en de medische toepassingen. Lessen zijn gebaseerd op de *expertmethode*. Na indeling van de klas in teams van 4 ontwikkelt ieder teamlid expertise op een deelgebied van medische beeldvorming met ioniserende straling. Vervolgens gaan de teams de *Challenge* aan, waarin de experts hun kennis moeten bundelen om tot de oplossing van het centrale probleem te komen: “Bestel precies genoeg radioactief materiaal (molybdeen) voor onderzoek van de 20 patiënten in het ziekenhuis.”

1.1 Lesopzet en planning

In Figuur 1 is een overzicht van de lessenreeks gegeven, verdeeld over 5 lessen. De leerling kan in principe al het werk in de les doen. Bij voldoende voortgang in de les is huiswerk maken niet nodig.



Figuur 1: Overzicht van de lessen in de module Medische Beeldvorming.

Lessen

(Les 1). In de eerste les wordt de klas door de docent verdeeld in teams van 4, waarin ieder teamlid één van de volgende *expertrollen* gaat vervullen: natuurkundige, arts, chemicus of expert logistiek en veiligheid.

Daarna volgt een algemene theoretische introductie. Zie

Tabel 1 voor de opzet van de groepsindeling.

Tip: als er geen groepjes van 4 gemaakt kunnen worden, kunnen er een of meerdere groepjes van vijf komen waarbij twee teamleden één expertrol vervullen. Dit werkt beter dan dat er een expertrol in een groepje mist.

Tip: om de kennis van de leerlingen even te updaten kan het handig zijn om de eerste les te beginnen met een korte introductie over radioactiviteit. Ook kan ervoor gekozen worden de leerlingen zelf hun rol te laten kiezen, zo wordt een rol gekozen die past bij de interesse van de leerling.

Team:	A	B	C	D	E	F
Natuurkundigen						
Artsen						
Chemici						
Expert in logistiek en veiligheid						

Tabel 1: Groepsindeling voor de module: in ieder team van vier leerlingen (team A, team B, etc.) krijgt iedere leerling één unieke expertrol (natuurkundige, arts, chemicus en expert logistiek en veiligheid).

(Les 2). De tweede les is de expertbriefing. Hierin zullen de leerlingen voor hun *expertrol* een stuk theorie bestuderen en een aantal opdrachten maken. Iedere *expert* gaat de essentie van de inhoud van deze briefing overbrengen op hun team in les 3. In het werkboek voor de leerlingen worden de belangrijkste punten genoemd, die terug moeten komen in de uitleg. In de bijlage van dit document “Samenvatting expertkennis” is per *expertrol* samengevat welke informatie zij minimaal moeten kennen en doorgeven aan hun teamgenoten.

Tip: wanneer de klas niet te groot is kan het een positief effect hebben om de experts met dezelfde rollen in groepjes bij elkaar te plaatsen. De leerlingen kunnen op deze manier overleggen over hetzelfde onderwerp en raken daardoor ook minder snel afgeleid.

(Les 3). In de derde les geven alle leerlingen een uitleg aan hun eigen team over wat ze in hun *expertbriefing* hebben geleerd. De leerlingen die niet aan het uitleggen zijn, beantwoorden quizvragen over de stof. Deze staan in het werkboek. De informatie die vereist is voor het beantwoorden van deze quizvragen, moeten zij uit de uitleg van hun teamgenoot kunnen halen.

Tip: uit ervaring is gebleken dat de volgende tijdindicatie kan worden aangehouden: 10 minuten voor de expertbriefing, 15 minuten voor de quizvragen en ongeveer 10 minuten nakijken. De overige lestijd wordt gebruikt voor het omschakelen tussen de expertbriefings/het opstarten van (PowerPoint)presentaties.

(Les 4) + (les 5). In lessen 4 en 5 gaan de teams de Challenge aan. Met behulp van een serie van opeenvolgende vragen gaan zij de hoofdvraag beantwoorden.

Tip: attendeer de leerlingen erop dat veel antwoorden van de Challenge terug te vinden zijn in de module.

Vorbereiding en Aandachtspunten

Als voorbereiding voor de docent is het doornemen van het werkboek en deze handleiding voldoende. Ter ondersteuning is er een document met uitwerkingen voor de Briefing- en Challenge-opdrachten meegeleverd.

In de derde les geven alle leerlingen uitleg aan hun team over de expertbriefing, die zij hebben gemaakt in les 2.

Het is de bedoeling dat op deze manier iedere leerling zich de essentie van de inhoud van alle briefings eigen maakt, bij voorkeur vóór de Challenge. Hierdoor hebben alle leerlingen aan het eind van les 3 genoeg informatie om de Challenge met hun team te maken. Die kennis is samengevat per expertrol in de bijlage 'Samenvatting Expertkennis' van dit document. Mocht de uitleg in sommige groepen niet voldoende zijn, dan kan de docent ervoor kiezen om deze bijlage als 'Factsheet' uit te delen aan de leerlingen. Het is aan te raden om iedere uitleg een vaste tijd te geven (bijvoorbeeld met een stopwatch bij de docent), zodat de uitleg van alle leerlingen binnen de teams even lang duurt.

1.2 Behandelde onderdelen

Dit lesmateriaal is een aanvulling op syllabus Specificaties 2, 3 en 4 uit Subdomein B2, Medische Beeldvorming, voor HAVO/VWO in klas 4 of 5. Aan te bevelen, maar niet noodzakelijk, is dat leerlingen bekend zijn met Specificatie 1 met betrekking tot de emissie en absorptie van elektromagnetische golven / fotonen. Alle stof en opgaven zijn geschikt voor zowel HAVO als VWO leerlingen.

De begrippen en bijbehorende formules uit Specificaties 2, 3 en 4 uit Subdomein B2 die **niet** expliciet worden behandeld in dit lesmateriaal, zijn de volgende:

HAVO, <u>niet</u> behandeld/genoemde begrippen	VWO, <u>niet</u> behandelde/genoemde begrippen
2. - Activiteit bepalen uit een (N,t)-diagram en de gemiddelde activiteit berekenen - Vakbegrippen: dracht, kosmische straling, dosimeter, eV	2. - Activiteit uit een (N,t)-diagram bepalen - Vakbegrippen: dracht, kosmische straling, dosimeter
4. - Echografie - Halveringsdikte van menselijke weefsels, magnetisch veld en resonantie, ultrasone geluidsgolf, geluidssnelheid in menselijk weefsel, terugkaatsing	4. - Echografie - Natuurkundige achtergronden: Halveringsdikte van menselijk weefsel, magnetisch veld en resonantie, annihilatie, creatie van een elektron-positronpaar, ultrasone geluidsgolf, geluidssnelheid in menselijk weefsel, terugkaatsing

Tabel 2: Niet behandelde onderdelen/begrippen van Specificaties 2, 3 en 4

Niet behandelde formules

HAVO

$$E_f = hf, \quad c = f\lambda$$

$$A = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raaklijn}}, \quad A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

$$A = N + Z$$

VWO

$$E_f = hf, \quad c = f\lambda$$

$$A = -\frac{dN}{dt}, \quad A = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} N$$

$$A = N + Z$$

1.3 Beoordelingsmodel

Indien gewenst, kan de docent de leerlingen beoordelen op de uitwerking van de Challenge. Hiervoor is een nakijkmodel bijgeleverd. Deze staat in het laatste hoofdstuk van het uitwerkingenboek. Tabel 3 geeft de punten weer die per vraag van de Challenge behaald kunnen worden. Dit is gebaseerd op de moeilijkheidsgraad van elke vraag. Het totaal aantal punten dat te halen is 39 punten.

$$\text{Eindcijfer} = \frac{\text{aantal punten}}{39} * 9 + 1$$

Vraag	Punten (max)
1	1
2	1
3	3
4	3
5	3
6	3
7	4
8	1
9	3
10	4
11	3
12	1
13	2
14	1
15	3
16	2
17	1
Totaal	39

Tabel 3: Punten per vraag in de Challenge.

2 Bijlage Samenvatting Expertkennis

Hieronder zijn per *expertrol* de essentiële kennisonderdelen van de briefings samengevat. Deze kennis moeten leerlingen zich eigen maken met behulp van de presentaties, bij voorkeur voordat de Challenge begint.

2.1 Natuurkundigen

- De werking van een SPECT-scan:
 - o Het radioactieve isotoop technetium-99m (^{99m}Tc) gekoppeld aan een molecuul dat zich aan kankercellen bindt, wordt ingespoten bij de patiënt.
 - o ^{99m}Tc vervalst via gammaverval naar het stabiele ^{99}Tc : $^{99m}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Tc} + \gamma$
 - o De gammafotonen die hierbij vrijkomen, worden gemeten door detectoren rondom de patiënt. Zo wordt een afbeelding (SPECT scan) gemaakt van de locaties in het lichaam waar kankercellen aanwezig zijn.

- Aantal atomen N : het aantal atomen van een radioactieve stof vermindert door verval. De vergelijking voor het aantal atomen op tijdstip t is:

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

met N_0 het aantal atomen in het begin en $t_{1/2}$ de halveringstijd.

- ^{99m}Tc ontstaat door verval van ^{99}Mo : $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc} + \beta^-$
- Halveringstijd $t_{1/2}$ is de tijd waarin de helft van de beginatomen is vervallen.
- Omdat ^{99}Mo een langere halveringstijd heeft dan ^{99m}Tc (^{99}Mo : $t_{1/2} = 65,9$ uur, ^{99m}Tc : $t_{1/2} = 6,01$ uur) wordt molybdeen geproduceerd in de reactor, zodat er genoeg tijd is om het te vervoeren naar het ziekenhuis.
- Voor productie van molybdeen worden in de reactor plaatjes met uranium-235 (^{235}U) bestraald met neutronen. Door deze botsing met de neutronen splijten de ^{235}U -atomen in twee kleinere atomen. Bij zo'n botsing is er ongeveer 6% kans dat één van de twee brokstukken ^{99}Mo is.

2.2 Artsen

- Gammastraling is zeer geschikt voor medische beeldvorming, omdat het bijna overal doorheen gaat.
- Technetium-99m (^{99m}Tc) is zeer geschikt voor medische beeldvorming, omdat:
 - o het een gammafoton uitzendt bij verval. Een foton heeft geen lading of massa en kan daardoor makkelijk het lichaam verlaten en gemeten worden met een detector.
 - o het een korte halveringstijd heeft, waardoor een kleine hoeveelheid voldoende is voor het maken van een SPECT-scan. Door de korte halveringstijd vervalt het technetium ook relatief snel, waardoor het snel verdwijnt.
- Technetium-99m wordt gekoppeld aan een suikermolecuul. Kankercellen nemen meer suiker op dan gewone cellen, waardoor er meer technetium in tumoren terecht komt als het gekoppeld aan suiker wordt ingespoten bij de patiënt. De fotonen die vrijkomen door het gammaverval van technetium-99m worden gemeten met de detector van de SPECT-scanner. Het signaal is sterker op de plekken waar zich meer technetium-99m bevindt. De plekken in het lichaam waarvandaan het signaal hoog is, zijn daarom verdacht voor tumorvorming.
- Voor- en nadelen van SPECT
 - o **Voordelen**
 - Het is goedkoper dan een CT- of MRI-scan
 - De radioactieve stof kun je labelen zodat het naar het juiste celtype gaat.
 - o **Nadelen**
 - De patiënt wordt blootgesteld aan een effectieve dosis van enkele mSv per scan.
 - De resolutie van de foto is relatief laag.
 - De medewerker in het ziekenhuis wordt blootgesteld aan een effectieve dosis van ongeveer 15 μSv per scan.
- ALARA staat voor “As Low As Reasonably Achievable” of in het Nederlands “zo laag als redelijkerwijs mogelijk”. Hiermee wordt bedoeld dat de effectieve dosis (en de hoeveelheid radioactiviteit die zorgt voor de dosis) voor iedereen zo laag als redelijkerwijs mogelijk moet zijn.
- Activiteit is het aantal atomen in de stof dat per seconde vervalt. Dit drukken we uit in de eenheid becquerel (Bq). De vergelijking van activiteit over tijd is de volgende:

$$A(t) = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

met A_0 de beginactiviteit, en $t_{1/2}$ de halveringstijd.

2.3 Chemici

- In een reactor wordt een target (een legering met onder andere uranium) bestraald met neutronen. Atomen in het target kunnen hierdoor splijten in brokstukken (nieuwe elementen). Van alle splijtingen zal 6% leiden tot molybdeen-99 (^{99}Mo) als een brokstuk. 1 mol molybdeen (net als 1 mol technetium-99m) weegt 99 gram.
- Het scheiden van het molybdeen-99 van de rest van het bestraalde target gaat via een chemisch scheidingsproces in een laboratorium met de volgende stappen:
 - o Het target gaat in een oven met oxidatie als gevolg: $2\text{Mo} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{MoO}_3$
 - o Molybdeen uit het target halen met natronloog: $\text{MoO}_3 + 2\text{NaOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
 ^{99}Mo is nu in een oplossing en overblijfselen van target in vaste vorm in suspensie.
 - o Vaste deeltjes worden vervolgens uit de suspensie gefiltreerd met als resultaat een heldere oplossing met 2Na^+ (aq) en MoO_4^{2-} (aq) ionen.
- Daarna wordt de resulterende oplossing samengevoegd met een staafje, dat 90% van de MoO_4^{2-} adsorbeert. Deze wordt naar het ziekenhuis verzonden.
- Aantal atomen N : het aantal atomen van een radioactieve stof vermindert door radioactief verval. De vergelijking voor het aantal atomen op tijdstip t is:

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$
 met N_0 het aantal atomen in het begin en $t_{1/2}$ de halveringstijd.
- Een deel van het molybdeen zal vervallen naar technetium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$). Als men in het ziekenhuis een zoutoplossing langs het staafje laat lopen, lost dit technetium-99m op in de zoutoplossing, terwijl het molybdeen aan de staaf blijft zitten. Deze zoutoplossing wordt aan de patiënt toegediend.
- Per scan is tussen 0,20 en 1,8 nanogram $^{99\text{m}}\text{Tc}$ nodig.
- Radioactief afval wordt vervoerd naar de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA). De COVRA is gespecialiseerd in het veilig verwerken en opslaan van radioactief afval in voorbereiding op eindberging daarvan.

2.4 Experts Logistiek en Veiligheid

- Bij radioactief verval vermindert de hoeveelheid van het oorspronkelijke materiaal met de tijd. De tijd die het kost om de oorspronkelijke hoeveelheid materiaal te halveren heet de halveringstijd $t_{1/2}$. De hoeveelheid materiaal op tijdstip t is dan te berekenen met:

$$m_t(t) = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Hier is m_t de massa van het materiaal op tijdstip t , m_0 de beginmassa en $t_{1/2}$ de halveringstijd.

- Als gammastraling door een materiaal beweegt, wordt het ten dele geabsorbeerd. De dikte van het materiaal die nodig is om de hoeveelheid straling te halveren, heet de halveringsdikte $d_{1/2}$. De intensiteit van de gammastraling na het passeren van materiaal met dikte d is dan:

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

Hier is I de intensiteit op afstand d in het materiaal, I_0 de beginintensiteit en $d_{1/2}$ de halveringsdikte.

- Geabsorbeerde dosis (D) met de eenheid gray (Gy):

$$D = \frac{E}{m}$$

Met E de geabsorbeerde stralingsenergie en m de massa van het menselijk weefsel, waardoor het is geabsorbeerd.

- Omdat de verschillende soorten ioniserende straling een andere mate van schade aan het lichaam toebrengen, wordt vaak de equivalente dosis (H) gebruikt om dit te kunnen vergelijken in de eenheid sievert (Sv). Equivalente dosis:

$$H = w_r D$$

Hier is w_r een weegfactor voor het type straling. Alfastraling ($w_r = 20$) is bij dezelfde geabsorbeerde dosis 20 keer schadelijker dan bèta- en gammastraling (beide $w_r = 1$).

- De stralingsgevoeligheid van verschillende types menselijk weefsel is niet hetzelfde. Daarom moet naast de soort straling, ook het type weefsel gewogen worden. Hiervoor wordt de effectieve dosis E gebruikt. Deze is ook in de eenheid sievert (Sv). Effectieve dosis:

$$E = w_T H$$

Hier is w_T een weegfactor voor het type weefsel.

Let op! We gebruiken de hoofdletter E dus voor de grootte Energie en voor de grootte Effectieve dosis. Dit komt omdat zij nu eenmaal zo zijn gedefinieerd. Dit kan verwarrend zijn. Vandaar ook dat het heel belangrijk is om ook altijd de eenheid er goed bij te schrijven!

Bijvoorbeeld:

Bij $E = 5 \text{ J}$, is het duidelijk dat het om de E van energie gaat, immers de eenheid is in joule.

Bij $E = 5 \text{ mSv}$, is het duidelijk dat het om de E van effectieve dosis gaat, immers de eenheid is in sievert.

3 Bijlage Uitleg Percentage – Challenge deelvraag 3

Uitleg van het percentage (67,9%) dat gegeven is bij deelvraag 3.

Het technetium-99m dat gegenereerd wordt vanuit molybdeen-99-veral gedurende een tijd t (in dit geval 24 uur), vervalt ook naar technetium-99 in de tijd. Aangezien de halveringstijd van technetium-99m $t_{1/2, Tc99m} = 6,01$ uur bijna 4 keer wordt gehaald in 24 uur, kunnen we dit niet verwaarlozen. De fractie van de gegenereerde technetium-99m-atomen, die in 24 uur vervallen is, schrijven we als:

$$\text{Fractie Tc}^{99m} \text{ vervallen(24 uur)} = 1 - \frac{N_{Tc99m}(24 \text{ uur})}{N_{Tc99m, \text{gen in 24 uur}}}$$

Hierbij is:

$$\begin{aligned} N_{Tc99m, \text{gen in 24 uur}} &= \text{het aantal gegenereerde technetium-99m atomen in 24 uur} \\ N_{Tc99m}(24 \text{ uur}) &= \text{het aantal technetium-99m atomen op } t=24 \text{ uur.} \end{aligned}$$

Het aantal gegenereerde technetium-99m-atomen is gelijk aan het aantal molybdeen-99-atomen dat vervallen is in 24 uur:

$$N_{Tc99m, \text{gen in 24 uur}} = N_{0, Mo99} - N_{Mo99}(24 \text{ uur}) = N_{0, Mo99} \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{24 \text{ uur}}{t_{1/2, Mo99}}} \right)$$

Met $N_{Mo99}(24 \text{ uur})$ het aantal molybdeen-99-atomen op tijdstip $t=24$ uur en $N_{0, Mo99}$ het aantal molybdeen-99-atomen op tijdstip $t=0$.

De vergelijking voor $N_{Tc99m}(t)$ moet rekening houden met zowel het verval van technetium-99m naar technetium-99 als het genereren van technetium-99m met het verval van molybdeen-99. Omdat dit een stelsel van vergelijkingen oplevert, is de afleiding hiervan te uitgebreid om hier uit te schrijven en te ingewikkeld om van de scholieren te verwachten. De uitkomst is:

$$N_{Tc99m}(t) = \frac{t_{1/2, Tc99m}}{t_{1/2, Mo99} - t_{1/2, Tc99m}} \cdot \left(\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t_{1/2, Mo99}}} - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t_{1/2, Tc99m}}} \right)$$

Bij elkaar voegen en invullen met de halveringstijden geeft:

$$\begin{aligned} \text{Fractie Tc}^{99m} \text{ vervallen(24 uur)} &= 1 - \frac{t_{1/2, Tc99m}}{t_{1/2, Mo99} - t_{1/2, Tc99m}} \cdot \frac{\left(\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{24}{t_{1/2, Mo99}}} - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{24}{t_{1/2, Tc99m}}} \right)}{1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{24 \text{ uur}}{t_{1/2, Mo99}}}} \\ &= 1 - \frac{6,01}{65,9 - 6,01} \cdot \frac{\left(\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{24}{65,9}} - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{24}{6,01}} \right)}{1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{24 \text{ uur}}{65,9}}} = 0,6787.. = 0,679 = 67,9\% \end{aligned}$$