

Gecoördineerd examen stralingsbescherming Deskundigheidsniveau 3

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave Nascholing/LUMC	BN/LUMC
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC
TU Eindhoven	TU/e

examendatum: 14 december 2015

examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

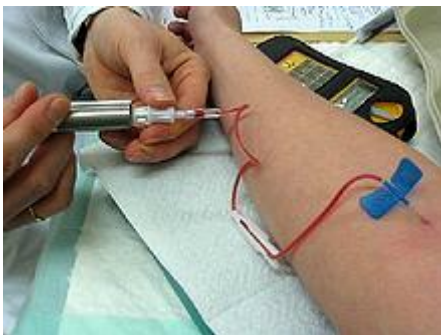
- **Dit examen omvat 11 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 21 pagina's. Controleer dit!**
- Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Ook alle niet gebruikte uitwerkbladen dient u in te leveren.
- Vermeld **alleen uw examenummer** op de uitwerkbladen (dus niet uw naam en adres).
- Het is geoorloofd boeken, persoonlijke aantekeningen en ander documentatiemateriaal te raadplegen voor het beantwoorden van de vragen.
- *Met nadruk wordt erop gewezen dat u ook dient aan te geven via welke **berekeningsmethode** en/of volgens welke **beredenering** u tot de oplossing komt.*
- Indien u een onderdeel van een vraagstuk niet kunt uitrekenen en het antwoord nodig is voor het oplossen van de rest van het vraagstuk, mag u uitgaan van een fictief antwoord.
- Voor sommige vraagstukken behoeven niet alle gegevens noodzakelijkerwijs te worden gebruikt.
- In totaal kunt u 67 punten behalen bij het goed oplossen van de vraagstukken. De puntenverdeling over de vraagstukken is als volgt:
 - Vraagstuk 1: 16 punten
 - Vraagstuk 2: 17 punten
 - Vraagstuk 3: 17 punten
 - Vraagstuk 4: 17 punten

Vraagstuk 1 Stralingshygiënische maatregelen tijdens het gebruik van ^{18}F FDG

Op een afdeling nucleaire geneeskunde worden patiënten onderzocht door middel van het toedienen van een radiofarmacon. Een radiofarmacon is een radioactieve stof die specifiek door één of enkele organen wordt opgenomen. In deze vraag gaat het om onderzoek met het radiofarmacon ^{18}F -fluorodeoxyglucose (^{18}F -FDG). Met behulp van een Positron Emissie Tomogram (PET-scan) kan men de activiteitsverdeling zichtbaar maken.

Een werknemer van deze afdeling gaat de rechtvaardiging voor een nieuw toediensysteem onderzoeken. Op basis van onderstaande procedure voert hij enkele berekeningen uit.

Het ^{18}F -FDG bevindt zich in een injectiespuit (gemaakt van polyethyleen), met daaromheen een loden huls met een wanddikte van 15 mm. De toediening aan de patiënt geschiedt middels een toediensysteem dat de spuit met de patiënt verbindt. Het toedienen van het ^{18}F -FDG duurt 20 seconden. De werknemer verricht naast het toedienen van dit radiofarmacon verschillende andere handelingen, maar deze zijn uit oogpunt van stralingsbescherming verwaarloosbaar.



Figuur 1 toediensysteem waarbij alleen de spuit is afgeschermd.

Gegevens:

- **Bijlage, blz. 3-4:** Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (2^e druk 2007), blz. 26-27, gegevens ^{18}F ;
- **Bijlage, blz. 5:** Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al. (2^e druk 2007), blz. 266, figuur 11.1: Halveringsdikte van verschillende afschermingsmaterialen voor smalle-bundel-fotonenstraling;
- **Bijlage, blz. 6:** Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al. (2^e druk 2007), blz. 268, tabel 11.1: Build-up factoren voor een isotrope puntbron;

- De activiteit op het tijdstip van toediening bedraagt 400 MBq;
- In alle situaties mag de spuit - gevuld met ^{18}F -FDG - als puntbron worden beschouwd;
- Verzwakking van fotonenstraling door polyethyleen mag worden verwaarloosd;
- $\rho_{\text{polyethyleen}} = 0,94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Vraag 1.1

Bepaal de minimale dikte van de polyethyleen wand van de injectiespuit, zodat alle β^+ -deeltjes worden afgeschermd.

Tijdens de toediening bevindt het radiofarmacon zich gedurende 20 seconden in het onafgeschermd toediensysteem tussen spuit en patiënt.

Vraag 1.2

Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ op 50 cm van het toediensysteem ten gevolge van de 20 seconden durende toediening. Het toediensysteem mag op 50 cm afstand beschouwd worden als een puntbron. De bijdrage van de β^+ -deeltjes wordt in de berekening niet meegenomen.

De hand van de werknemer bevindt zich op een gemiddelde afstand van 10 cm vanuit het midden van de met 15 mm lood afgeschermd spuit.

Vraag 1.3

Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ ter plaatse van de hand van de werknemer als het radiofarmacon zich juist de volledige 20 seconden in de afgeschermd spuit zou bevinden.

Eén uur na toediening start de PET-scan waarbij 45 minuten lang opnamen worden gemaakt. De werknemer bevindt zich gedurende het gehele onderzoek op 2,5 meter van de patiënt.

- Op deze afstand mag de activiteit in de patiënt als een puntbron worden beschouwd.
- De verzwakking van de fotonstraling in de patiënt of door apparatuur mag worden verwaarloosd.
- Het is voor onderstaande berekening toegestaan om het omgevingsdosisequivalenttempo halverwege het onderzoek te gebruiken voor het berekenen van het omgevingsdosisequivalent voor de werknemer gedurende het gehele onderzoek.

Vraag 1.4

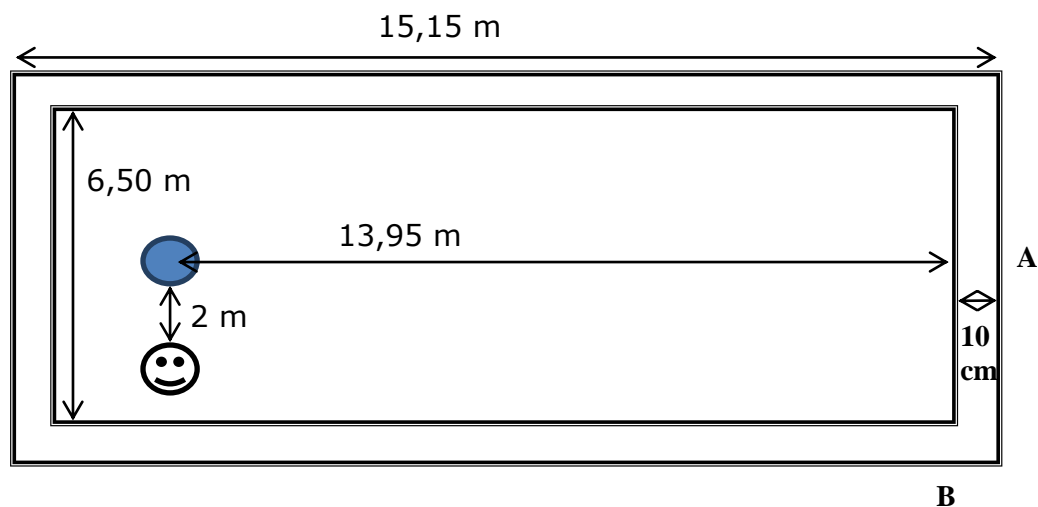
Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ ter plaatse van deze werknemer gedurende de gehele PET-scan.

Vraagstuk 2 Blootstelling bij het kalibreren van stralingsmeetapparatuur

In het Besluit stralingsbescherming staat dat regelmatig, maar ten minste eenmaal per jaar de goede werking en het juiste gebruik van bronnen en instrumenten voor meting van ioniserende straling moet worden gecontroleerd.

Bij een vergunninghouder met veel meetapparatuur beschikt men daartoe over een aantal ingekapselde bronnen, waaronder een ^{60}Co -bron met een activiteit van 22 GBq. Deze ^{60}Co -bron wordt gebruikt in een kalibratieruimte (zie figuur 1). Tijdens het gebruik van de bron is de operator in de ruimte aanwezig op 2 meter afstand van de bron.

De bron zit in een bronhouder. De afscherming van de bronhouder is zodanig geconstrueerd dat er buiten de gesloten bronhouder geen verhoging van het omgevingsdosisequivalenttempo ten opzichte van de achtergrond kan worden gemeten. Tijdens een kalibratie wordt de bron omhoog gebracht totdat deze zich voor het geopende diafragma van de bronhouder bevindt. Het meetinstrument wordt zodanig gepositioneerd dat het in zijn geheel door de bundel wordt bestraald.



Figuur 1. Schets van het bovenaanzicht van de kalibratieruimte (niet op schaal).

Gegevens:

- **Bijlage, blz. 7-8:** Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 74-75, gegevens ^{60}Co ;
- **Bijlage, blz. 9:** Bijlage 1.3 van de Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ: Activiteitswaarden waarboven een ingekapselde bron voldoet aan de definitie van een hoogactieve bron.

Vraag 2.1

Bepaal of de beschreven kalibratiebron een hoogactieve bron is.

Extra gegevens:

- **Bijlage, blz. 10:** ICRP-33, blz 49, figuur 18: Transmissie van brede bundels gammastraling van radionucliden door beton;
- **Bijlage, blz. 11:** ICRP-33, blz. 47, figuur 16: Transmissie van brede bundels gammastraling van radionucliden door lood;
- **Bijlage, blz. 12:** ICRP-33, blz. 56, figuur 22: Verstrooiingsfractie het kerntempo op een betonnen afscherming.
- Bijlage 10 en 11 mogen ook gebruikt worden voor verstrooide straling.
- De bron staat op een afstand van 3,25 m van de binnenkant van de lange zijden en op 13,95 m van de overliggende korte zijde;
- De muur om de ruimte heen heeft een dikte van 10 cm beton;
- Punt A ligt net aan de buitenkant van de ruimte, in de primaire bundel;
- Punt B ligt net aan de buitenkant van de ruimte ter hoogte van de verstrooiingsplek met een hoek van 90 graden ten opzichte van de plek waar de stralingsbundel de muur raakt;
- De handelingen met deze bron vinden gemiddeld 1 uur per dag, 5 dagen per week en 40 weken per jaar plaats en er vinden geen andere handelingen in deze ruimte plaats;
- De operator bevindt zich op dezelfde hoogte als het diafragma in de bronhouder;
- De bron mag als puntbron beschouwd worden;
- Het verstrooiend oppervlak aan de overliggende zijde van de kalibratieruimte heeft een diameter van 3 m;
- De verzwakking van de bundel door het te kalibreren meetinstrument mag worden verwaarloosd;
- De strooistraling afkomstig van het te kalibreren meetinstrument, het plafond en de vloer mag worden verwaarloosd ten opzichte van de strooistraling afkomstig van het verstrooiend oppervlak van de muur;
- De effectieve dosis mag benaderd worden door het omgevingsdosisequivalent.

Om aan de interne limiet voor de effectieve dosis van 1 mSv/j te voldoen ter hoogte van punt A wordt afscherming met lood aangebracht aan de buitenzijde van de muur.

Vraag 2.2

Bepaal de dikte van het benodigde lood om in de primaire bundel op punt A te voldoen aan de limiet van 1 mSv/j. Rond af op gehele cm.

Vraag 2.3

Bepaal of het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ aan de buitenkant van de lange muur op punt B voldoet aan de limiet van 1 mSv/j.

Vraag 2.4

Bepaal of de operator op basis van alleen deze handelingen ingedeeld moet worden als blootgestelde werknemer-A of als blootgestelde werknemer-B of niet ingedeeld hoeft te worden als blootgestelde werknemer.

Vraagstuk 3 Inwendige besmetting met ^{210}Po

Enkele jaren geleden werd de Russische oud-spion en dissident Alexander Litvinenko vermoord door hem vergiftigde thee te serveren. De thee bevatte het radioactieve isotoop ^{210}Po . U wilt met uw stralingshygiënische kennis een uitspraak doen over de hoeveelheid ^{210}Po die hiervoor minimaal gebruikt moet zijn.

Gegevens:

- **Bijlage, blz. 13-14:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 228-229, gegevens ^{210}Po ;
- **Tabel 1:** massa, weefselweegfactor en LD_{50} voor α -straling van diverse organen;
- Onder het kritieke orgaan wordt in deze opgave verstaan: het orgaan waarvoor geldt dat voor het bereiken van de LD_{50} de laagste toegediende activiteit nodig is;
- De geabsorbeerde dosis in de lever en het rode beenmerg na ingestie van 1 Bq ^{210}Po bedraagt $6,7 \cdot 10^{-8}$ Gy respectievelijk $2,7 \cdot 10^{-8}$ Gy.

Tabel 1. Massa m_T , weefselweegfactor w_T (ontleend aan ICRP-60) en LD_{50} voor α -straling.

orgaan	m_T (g)	w_T (ICRP-60)	LD_{50} (Gy)
lever	1800	0,05	8
nieren*	310	0,025	6
rood beenmerg	1500	0,12	3-4

* Behoort tot de 10 overige organen met samen een weegfactor van 0,05. In het geval dat één van deze organen een hogere equivalente dosis oploopt dan enig ander orgaan met een eigen weefselweegfactor wordt voor dat orgaan een $w_T = 0,025$ gehanteerd. Dat is hier het geval voor de nieren.

Vraag 3.1

Toon aan dat de effectieve halveringstijd van ^{210}Po in de genoemde organen 37 dagen bedraagt.

Vraag 3.2

Verifieer door berekening dat ingestie van 1 Bq ^{210}Po leidt tot een geabsorbeerde dosis van $1,3 \cdot 10^{-7}$ Gy in de nieren.

Vraag 3.3

Geef voor elk van de in tabel 1 genoemde organen aan welke activiteit bij ingestie leidt tot een geabsorbeerde dosis gelijk aan de LD_{50} . Bepaal op

grond van de uitkomsten welk van de drie genoemde organen als het kritieke orgaan moet worden aangemerkt.

U veronderstelt dat de moordenaars van Litvinenko zeker hebben willen stellen dat betrokkene het niet zou overleven. U neemt daarom aan dat hij vergiftigd is met een activiteit van *tweemaal* de bij de vraag 3 berekende activiteit voor het kritieke orgaan. Na zijn vergiftiging liet Litvinenko een spoor van ^{210}Po achter waardoor derden besmet raakten. U veronderstelt dat de meest besmette persoon 0,01% van de oorspronkelijke activiteit via ingestie heeft binnengekregen.

Vraag 3.4

Bereken voor deze persoon de effectieve volg dosis ten gevolge van ingestie.

Indien u geen antwoord heeft gevonden bij vraag 3.3 kunt u de waarde $1 \cdot 10^8$ Bq gebruiken.

Vraagstuk 4 Activiteitsbepaling van zirkoonzand

Zirkoonzand wordt gebruikt in de industrie bij de productie van keramische materialen en als schuur- en polijstmiddel. Zirkoon is een mineraal dat wordt gewonnen uit de aardkorst en heeft als basisstructuurformule $ZrSiO_4$. Bij de winning van zirkoonzand komen echter ook natuurlijke radionucliden van de uranium- en thoriumreeksen mee naar boven. Dit maakt dat verwerking van zirkoon(zand) tot werkzaamheid zoals bedoeld in het Besluit stralingsbescherming wordt gerekend.

Als restant van een proces is 200 kg zirkoonzand als afval overgebleven. Hiervan wordt een monster van 2 kg genomen om te analyseren met gammaspectrometrie met behulp van een halfgeleiderdetector (type HPGe). Het resultaat van enkele gevonden karakteristieke pieken is weergegeven in **Tabel 1**.

ROI nr.	Nuclide	Foton-energie [keV]	Bruto teltempo in ROI [cps]	Teltempo achtergrond in ROI [cps]	Yield [foton/desintegratie]	Fotopiekrendement [counts/foton]	Reeks (^{238}U of ^{232}Th)
1	^{234}Th	93	53,3	18,2	0,058		
2	^{214}Pb	352	159,2	22,4	0,376		
3	^{208}Tl	583	42,5	15,6	0,845		
4	^{228}Ac	911	30,0	10,6	0,258		

Tabel 1 Meetgegevens en nuclide-informatie. Het achtergrondteltempo is in feite het teltempo van het continuüm in de betreffende Region of Interest (ROI).

Gegevens:

- **Bijlage blz. 15, Figuur 3:** Efficiencykalibratie voor de HPGe-detector in de gebruikte meetomstandigheden (fotopiekrendement in counts per uitgezonden foton).
- **Bijlage, blz. 16 -21:** Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 230-235, gegevens van ^{232}Th , ^{238}U en ^{226}Ra .

Vraag 4.1

Bepaal met de gegevens van de ^{238}U - en ^{232}Th -vervalreeksen en de efficiencykalibratie in figuur 1 wat er moet staan in de lege vakjes van tabel 1. Vul deze waarden in op je uitwerkblad (het fotopiekrendement per ROI en tot welke reeks het nuclide behoort).

Reken bij de vragen 4.2, 4.3a en 4.3b verder met uitsluitend de nucliden uit de thoriumreeks.

Vraag 4.2

Bereken de activiteiten van de gevonden thoriumreeksnucliden.

Zowel de meettijd van de zirkoonmeting als die van de achtergrond bedroeg 1 uur.

Vraag 4.3a

Bereken het 95% betrouwbaarheidsinterval in de gevonden activiteiten van de nucliden van de thoriumreeks.

Vraag 4.3b

Beredeneer of de ^{232}Th reeks in seculier evenwicht is.

Om vast te stellen of het afval vrijgegeven kan worden, worden de gevonden waarden vergeleken met de vrijgavegrenzen in het Handboek Radionucliden.

Wanneer u geen seculier evenwicht heeft gevonden bij vraag 3b, gebruik dan de (conservatieve) regel dat u rekent met de hoogst gevonden activiteit in de thoriumreeks alsof de gehele reeks hiermee in evenwicht was.

Extra gegeven:

- De activiteitsconcentratie van ^{238}U in het restant zirkoonzand is 14 kBq/kg. De uraniumreeks is in seculier evenwicht.

Vraag 4.4

Overschrijdt 200 kg zirkoonzand de vrijstellingsgrenzen of kan het worden vrijgegeven? Beredeneer uw antwoord.