

Examen Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van coördinerend deskundige

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC

examendatum: 13 mei 2024
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- ❑ **Dit examen omvat 13 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 11 pagina's. Controleer dit!**
- ❑ Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Maak voor elk vraagstuk gebruik van een apart, bij dat vraagstuk horend uitwerkblad. Lever ook alle niet gebruikte uitwerkbladen in.
- ❑ 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.
- ❑ Geef aan 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 hoeven niet alle gegevens noodzakelijkerwijs te worden gebruikt.
- ❑ Besteed aandacht aan het vermelden en juist toepassen van grootheden én eenheden.
- ❑ In totaal kunt u 59 punten behalen bij het goed oplossen van de vraagstukken. De puntenverdeling over de vraagstukken is als volgt:
 - Vraagstuk 1: 15 punten Vraagstuk 2: 13 punten
 - Vraagstuk 3: 15 punten Vraagstuk 4: 16 punten
- ❑ U bent voor dit examen geslaagd als u minstens 55% van het totaal aantal punten hebt behaald. Dit komt overeen met een score van ten minste 32,45 punten.

Vraagstuk 1: Interventiecardiologie [15 punten]

Op een afdeling Cardiologie vinden behandelingen plaats waarbij gebruik wordt gemaakt van röntgendoorlichting. In het kader van een herziening van de risico-inventarisatie en -evaluatie (RI&E) maakt u een schatting van de effectieve dosis voor de cardioloog.

Gegevens

- De afstand van het focus van de röntgenbuis tot de huid van de patiënt – het intreepunt – bedraagt 65 cm
- Het röntgenveld heeft een afmeting van 22 cm × 22 cm op een afstand van 1 meter van het focus
- De gemiddelde doorlichtingstijd per behandeling bedraagt 10 minuten
- De buisspanning tijdens de behandeling bedraagt 100 kV
- De buisstroom bedraagt 1 mA
- Tijdens de behandeling bevindt de cardioloog zich op een afstand van 0,8 m van het röntgenveld op de patiënt
- De conversiefactor tussen K_{lucht} en D_{weefsel} is 1 [Gy]/[Gy]
- Ga ervan uit dat als er geen loodschort zou worden gedragen de verstrooide straling een homogene geabsorbeerde dosis veroorzaakt bij de cardioloog. De geabsorbeerde dosis is dus hetzelfde in elk orgaan, inclusief de ooglen
- **Bijlage blz. 3:** Output- en transmissiegegevens van brede bundels röntgenstraling door lood voor de gebruikte röntgenbuis

Vraag 1.1 [3 punten]

Bereken de luchtkerma vrij-in-lucht op de plaats van het intreepunt, dus op 65 cm afstand van het focus, ten gevolge van één behandeling.

Een vuistregel in de röntgendiagnostiek voor een schatting van de luchtkerma veroorzaakt door verstrooide straling luidt:

$$K_s = 0,1 \cdot \frac{K_p \cdot A}{r^2}$$

waarbij:

- K_s = luchtkerma vrij-in-lucht ten gevolge van verstrooide straling op afstand r van het verstrooiende oppervlak (s komt van *strooistraling*)
- K_p = luchtkerma vrij-in-lucht ten gevolge van de primaire bundel ter plaatse van het verstrooiende oppervlak
- A = oppervlak röntgenveld (m^2) ter plaatse van de patiënt
- r = afstand (m) van de cardioloog tot het centrum van het röntgenveld op de patiënt.

Ga er vanuit dat deze vuistregel voor de blootstelling van de cardioloog mag worden toegepast.

Vraag 1.2 [3 punten]

Bereken de gemiddelde geabsorbeerde entreedosis (uitgaande van geladen-deeltjesevenwicht) voor de cardioloog voor één behandeling, zonder rekening te houden met persoonlijke beschermingsmiddelen.

Tijdens de behandeling draagt de cardioloog een loodschoot. De dikte van het loodschoot is 0,35 mm loodequivalent. Andere mogelijke beschermingsmaatregelen zijn niet genomen.

Vraag 1.3 [3 punten]

Bereken de transmissie van de verstrooide straling door het loodschoot. Neem aan dat voor de verstrooide straling de transmissiecurve voor de bijbehorende primaire straling uit de bijlage mag worden gebruikt.

Aanvullende gegevens

U mag uitgaan van de volgende veronderstellingen:

- Als een loodschort wordt gedragen worden de volgende organen **niet** door het loodschort afgeschermd: ooglenzen, schildklier, speekselklieren en hersenen
- Voor de berekening van de effectieve dosis mag u voor de afgeschermd organen uitgaan van de afscherpende werking van het loodschort, zoals berekend bij vraag 1.3
- De weefselweegfactoren voor de schildklier, speekselklieren en hersenen bedragen respectievelijk 0,04, 0,01 en 0,01 (ICRP-103)

Vraag 1.4 [3 punten]

Bereken de effectieve dosis voor de cardioloog ten gevolge van één behandeling.

De cardioloog is ingedeeld als blootgestelde werknemer categorie A en voert geen andere behandelingen uit dan in dit vraagstuk beschreven. Uit de RI&E blijkt dat de bijdrage ten gevolge van voorziene onbedoelde gebeurtenissen (VOG) aan de jaarlijkse effectieve dosis van de cardioloog een waarde heeft van 1,5 mSv.

Vraag 1.5 [3 punten]

Hoeveel behandelingen mag de cardioloog jaarlijks uitvoeren? Houd in uw beantwoording rekening met de grenswaarden voor zowel de effectieve dosis als de equivalente ooglenzisdosis.

Puntenwaardering:

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

Vraagstuk 2: Een ijzer-55 kalibratiebron [13 punten]

Een instituut voor ruimteonderzoek heeft een ^{55}Fe -kalibratiebron aangeschaft. De stralingsbeschermingsdeskundige heeft de bron bij een buitenlandse leverancier besteld. Zodra het collo met de bron in een loodpot bij het instituut arriveert wordt de bron geregistreerd.



Figuur 1 - ^{55}Fe -kalibratiebron naast euromuntstuk

Gegevens:

- De activiteit van de ^{55}Fe -bron bedraagt 200 MBq
- De dikte van de wanden van de loodpot bedraagt 2 mm
- **Bijlage blz. 4:** Uitsnede nuclidenkaart
- **Bijlage blz. 5:** Handboek Radionucliden, A.S Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 64, gegevens ^{55}Fe

Na het uitpakken van de bron voert de stralingsbeschermingsdeskundige een meting uit met een dosistempomonitor boven de gesloten loodpot waarin zich de bron bevindt. Tot zijn verrassing geeft de detector een uitslag boven de achtergrondwaarde.

Vraag 2.1a [2 punten]

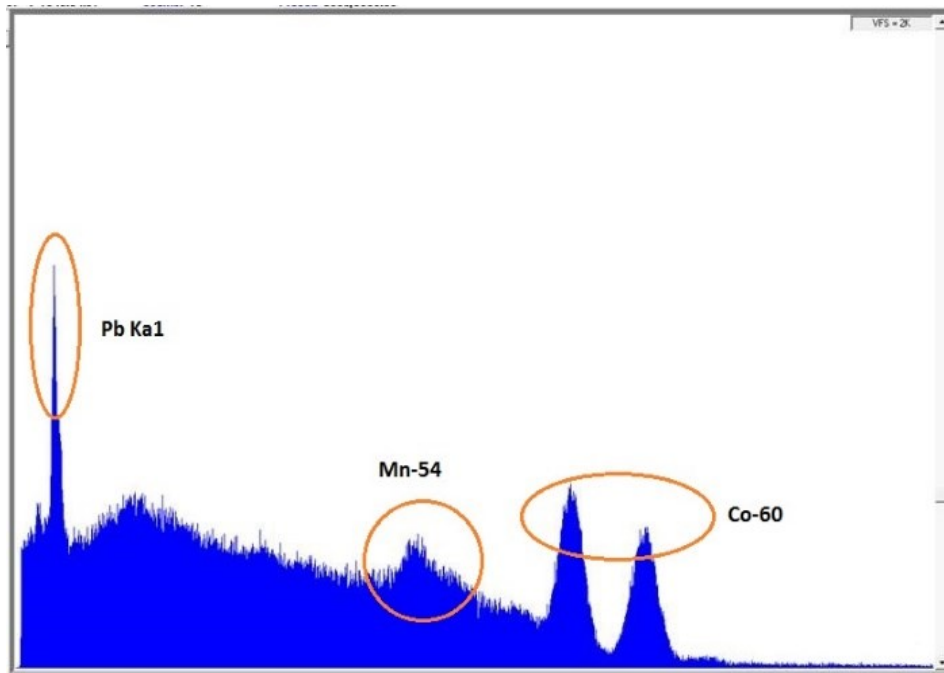
Wat verwacht de stralingsbeschermingsdeskundige te meten en waarom?

Een ervaren collega vertelt dat ^{55}Fe wordt geproduceerd door natuurlijk ijzer met neutronen te bestralen.

Vraag 2.1b [2 punten]

Verklaar dat ^{55}Fe kan ontstaan door natuurlijke ijzerisotopen ^{54}Fe en ^{56}Fe te bestralen met neutronen. Geef beide hierbij horende reactievergelijkingen.

Om te achterhalen welke verontreiniging aanwezig is, voert de stralingsbeschermingsdeskundige een spectrumanalyse uit. Hiervoor wordt de bron (in de loodpot) in een loodkasteel geplaatst met een NaI-detector. Na een uur meten wordt een spectrum (zie figuur 2) verkregen en analyseert de deskundige dit. Er worden twee andere isotopen geregistreerd, ^{54}Mn en ^{60}Co .



Figuur 2 – Spectrum ^{55}Fe -kalibratiebron

Met behulp van een MCA (MultiChannel Analyzer) en het instellen van een ROI (Region Of Interest) worden gegevens verzameld. Zie Tabel 1 voor een overzicht van de meetresultaten.

	energie fotopiek (keV)	netto counts N in ROI (meetijd 1 uur)	Absolute fout in N σ_N	totaal rendement NaI-detector (% cps/Bq)
^{54}Mn	835	4056	141	0,88
^{60}Co	1173	5358	91	0,46
^{60}Co	1333	4429	72	0,38

Tabel 1 – MCA meetresultaten ^{55}Fe -kalibratiebron en rendement NaI-detector

Vraag 2.2 [1 punt]

Leg uit waarom in de tabel geen enkele σ_N gelijk is aan de bijbehorende \sqrt{N} .

De stralingsbeschermingsdeskundige is verbaasd te zien dat ^{54}Mn en ^{60}Co in de kalibratiebron aanwezig zijn en beklagt zich bij de leverancier. Deze mailt als antwoord dat het onvermijdelijk is dat enige onzuiverheid aanwezig is in deze kalibratiebron. Het betreft voor ^{60}Co hoogstens 0,0003% van de totale activiteit en voor ^{54}Mn is dat hoogstens 0,0001%.

Vraag 2.3 [2 punten]

Bereken de ^{54}Mn -activiteit in de bron en de onzekerheid hierin, voor het 68%-betrouwbaarheidsinterval.

Vraag 2.4 [3 punten]

Verifieer of de bewering van de leverancier juist is, rekening houdend met een 95%-betrouwbaarheidsinterval van de bij vraag 2.3 berekende activiteit.

In het vervolg van dit vraagstuk mag de aanwezigheid van ^{54}Mn en ^{60}Co in de bron verwaarloosd worden.

Aanvullend gegeven:

- De A_1 - en A_2 -waarden voor het transport van ^{55}Fe zijn beide 40 TBq

Op het collo waarmee de kalibratiebron is vervoerd is een gevarenklasse 7 vervoerssticker geplakt 'etiket II-geel'. Hierop staat onder andere de transportindex vermeld.

Vraag 2.5 [3 punten]

Wat zal de transportindex zijn? Licht uw antwoord toe. Geef ook aan of het juiste etiket op het collo is geplakt.

Puntenwaardering:

Vraagstuk 2	
Vraag	Punten
2.1a	2
2.1b	2
2.2	1
2.3	2
2.4	3
2.5	3
Totaal	13

Vraagstuk 3: Prikincident met fluor-18 [15 punten]

De radioactieve stof ^{18}F -PSMA (fluor-18 gekoppeld aan het eiwit Prostaat Specifiek Membraan Antigen) wordt gebruikt om PET-scans te maken. Na het toedienen van ^{18}F -PSMA aan een patiënt, prikt een nucleair geneeskundige haar hand aan de nog met radioactiviteit besmette naald van de lege spuit. Zij gebruikt een groot-oppervlak besmettingsmonitor om de huid te controleren en meet 1900 cps. Na zorgvuldig wassen van de handen controleert zij de huid opnieuw en meet 120 cps. Het achtergrondteltempo is 30 cps. Tussen het ontstaan van de besmetting en het wassen van de handen zit 5 minuten. Omdat een klein wondje is ontstaan kan een inwendige besmetting niet worden uitgesloten.

Gegevens:

- **Bijlage blz. 6-7:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 26+27, gegevens ^{18}F
- **Bijlage blz. 8:** Meetrendement van NaI-putkristal voor ^{18}F
- **Bijlage blz. 9:** ^{18}F -PSMA-uitscheiding in urine
- In de handleiding van de gebruikte groot-oppervlak besmettingsmonitor staat dat een homogene besmetting van 1 Bq/cm^2 ^{18}F (over een oppervlak dat tenminste zo groot is als het oppervlak van de detector) een netto teltempo geeft van 25 cps.
- Het detectoroppervlak is 100 cm^2 .
- Ga uit van een besmet oppervlak op de huid van 2 cm^2

Vraag 3.1a [3 punten]

Bereken de besmettingsgraad van het besmette deel van de huid, vóórdat de handen werden gewassen in Bq/cm^2 .

Vraag 3.1b [2 punten]

Bereken de equivalente huiddosis van het besmette deel van de huid als gevolg van de 5 minuten dat de huid besmet is geweest.

Om na te gaan of een inwendige besmetting is opgetreden als gevolg van het prikincident wordt 3 uur na de besmetting de urine verzameld. Uit de totale hoeveelheid van 300 mL urine wordt een monster van 10 mL genomen. De activiteit hiervan wordt gemeten in een NaI-putkristal. In een meettijd van 10 minuten worden netto 539 pulsen geteld.

Vraag 3.2 [5 punten]

Bereken de totale activiteit van de verzamelde urine.

Vraag 3.3 [2 punten]

Toon met behulp van de bijlage "PSMA-uitscheiding in urine" aan dat na 180 minuten nog maar 5,2% van de activiteit van de ¹⁸F-PSMA-uitscheiding in de urine aanwezig is.

Indien u bij vraag 3.2 geen waarde voor de totale activiteit van de verzamelde urine heeft kunnen vinden, kan hiervoor de waarde 100 Bq gebruikt worden.

Vraag 3.4 [3 punten]

Bereken de effectieve volgdoos als gevolg van de totale activiteit van het ¹⁸F-PSMA die tijdens het incident in het lichaam terecht is gekomen.

Puntenwaardering:

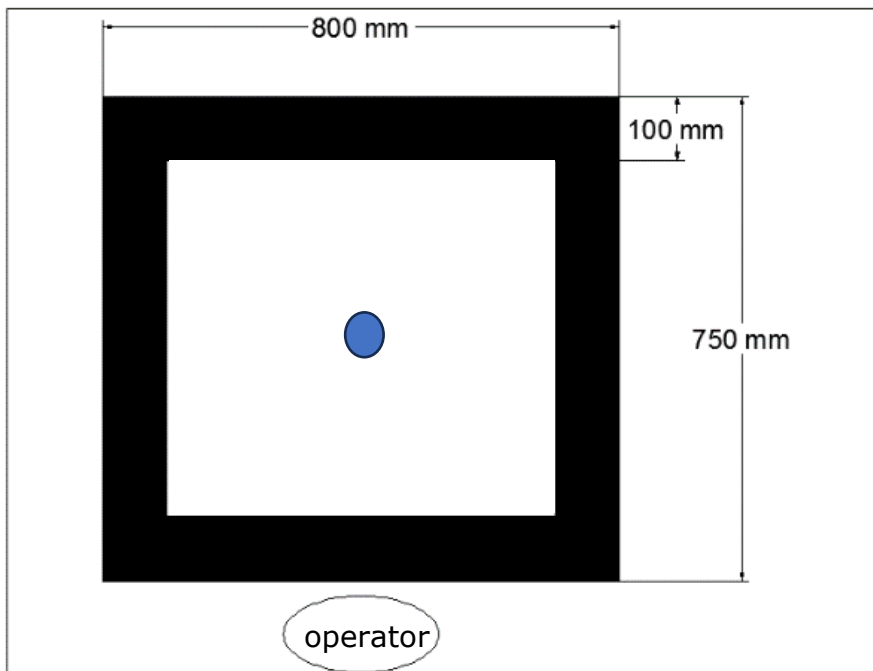
Vraagstuk 3	
Vraag	Punten
3.1a	3
3.1b	2
3.2	5
3.3	2
3.4	3
Totaal	15

Vraagstuk 4: Synthese van FDG in een hot cell [16 punten]

De productie van fluor-18 (^{18}F) vindt plaats met een cyclotron. Het aangemaakte ^{18}F wordt na het einde van de bestraling via een leidingsysteem naar de hot cell in het ^{18}F -lab getransporteerd. In het lab wordt een aantal chemische bewerkingen met het ^{18}F uitgevoerd om het gewenste radioactief gelabelde product FDG (fluorodeoxyglucose) te bereiden. De handelingen worden geautomatiseerd uitgevoerd om blootstelling van medewerkers aan ioniserende straling zoveel mogelijk te beperken.

Gegevens:

- Bij aankomst in de hot cell ($t = 0$) is de activiteit van de ^{18}F -oplossing 500 GBq
- Bij de berekeningen mag voor de energie van de annihilatiefotonen 0,5 MeV worden gebruikt
- Buitenafmetingen van de hot cell: breedte x hoogte x diepte = 80 cm x 60 cm x 75 cm
- De hot cell wordt aan alle kanten afgeschermd met 10,0 cm loodequivalent materiaal
- De flacon met ^{18}F -oplossing mag als een puntbron worden beschouwd en bevindt zich exact in het midden van de hot cell
- De gevolgen van remstraling mogen binnen dit vraagstuk buiten beschouwing worden gelaten
- **Figuur 3:** Bovenaanzicht van de hot cell
- **Bijlage blz. 6-7:** Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 26+27, gegevens ^{18}F
- **Bijlage blz. 10:** Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al. (2^e druk 2007), appendix D interactiecoëfficiënten voor fotonen, blz. 382
- **Bijlage blz. 11:** Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al. (2^e druk 2007), tabel 11.1 exposie-opbouwfactor voor isotrope puntbron, blz. 268



Figuur 3: Bovenaanzicht hot cell met ^{18}F in het midden (niet op schaal).

Vraag 4.1 [5 punten]

Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo $\dot{H}^*(10)$ ten gevolge van de annihilatiefotonen op het oppervlak aan de voorzijde van de hot cell op tijdstip $t = 0$.

Na de synthese gaat het ^{18}F gelabeld als FDG naar een andere hot cell waar flesjes gevuld worden met 2 mL FDG-oplossing met een activiteit van 4,5 GBq per flesje. De flesjes hebben een buitendiameter van 24 mm, een wanddikte van 2 mm en een dichtheid van $2,23 \text{ g/cm}^3$.

De operator ontdekt dat hij de verkeerde activiteitsconcentratie heeft ingegeven in de computer en dat er een verkeerde sticker op het eerste gevulde flesje FDG zit. Volgens protocol mag een verkeerd gestickerd flesje niet vrijgegeven worden voor transport, dus neemt de operator contact op met de lokaal stralingsbeschermingsdeskundige en vraagt of hij het flesje mag overstickeren. Deze overstickering moet handmatig (niet geautomatiseerd) worden uitgevoerd.

Vraag 4.2 [3 punten]

Bereken de dracht van de bètadeeltjes in glas en stel vast of deze bijdragen aan de huid dosis.

De stralingsbeschermingsdeskundige werkt 2 scenario's uit om zijn advies te beargumenteren. Daarbij gaat hij ervan uit dat $H^*(10)$ een goede schatter is van $H^*(0,07)$.

In scenario 1 wordt het overstickeren met de hand gedaan. Dit duurt slechts 2 seconden. In deze situatie is geen sprake van een puntbrongeometrie en het omgevingsdosisequivalenttempo is in dit scenario ongeveer een factor 2 hoger dan men op basis van een puntbron in het midden van het flesje verwacht. De handdosis $H_{\text{huid}}(0,07)$ ten gevolge van scenario 1 bedraagt 5,8 mSv per flesje.

In scenario 2 wordt het overstickeren met 30 cm lange pincetten gedaan en duurt het 3 keer zo lang. De effectieve afstand van de handen tot de bron is in deze situatie 20 cm.

Vraag 4.3a [3 punten]

Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ op de plaats van de handen voor scenario 2.

Vraag 4.3b [1 punt]

Wat zou u als stralingsbeschermingsdeskundige op basis van de uitkomst van de beide scenario's adviseren en waarom?

Een half uur na het overstickeren is de betreffende operator klaar met zijn werkzaamheden. Hij controleert zijn handen met een besmettingsmonitor en stelt vast dat een van zijn handen zeer lokaal besmet is (0,18 MBq over 1 cm²). Hij wast zijn handen diverse keren, controleert zijn handen nogmaals en stelt vast dat de besmetting volledig verwijderd is.

Extra gegevens:

- De besmetting heeft een half uur op zijn hand gezeten en het besmette oppervlak is 1 cm²
- Door de korte halveringstijd van het ¹⁸F kan de huiddosis niet eenvoudig berekend worden door het huiddosistempo op het moment van de besmetting (aangeduid als $\dot{H}_{\text{huid}}(0)$) te vermenigvuldigen met de besmettingsduur $t_{\text{besmetting}}$, ofwel: $\dot{H}_{\text{huid}}(0) \cdot t_{\text{besmetting}}$. In plaats daarvan moet het tijdsafhankelijke dosistempo geïntegreerd worden over deze besmettingsduur
- Deze integraal voor de equivalente huiddosis kan als volgt worden berekend:

$$H_{\text{huid}} = \int_0^{t_{\text{besmetting}}} \dot{H}_{\text{huid}}(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} dt = \frac{\dot{H}_{\text{huid}}(t_{\text{besmetting}})}{\lambda} (e^{\lambda \cdot t_{\text{besmetting}}} - 1)$$

Hierbij is aangenomen dat de besmetting optreedt op tijdstip 0, en dat de besmettingsmeting plaatsvindt aan het einde van deze periode, waarbij het huiddosistempo is afgenomen, van $\dot{H}_{\text{huid}}(0)$, naar $\dot{H}_{\text{huid}}(t_{\text{besmetting}})$

Vraag 4.4 [4 punten]

Bereken de lokale equivalente huiddosis ten gevolge van de gemeten activiteit van de radioactieve besmetting.

Puntenwaardering:

Vraagstuk 4	
Vraag	Punten
4.1	5
4.2	3
4.3a	3
4.3b	1
4.4	4
Totaal	16