

Examen Coördinerend Deskundige Stralingsbescherming

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: 11 december 2017

examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- ❑ **Dit examen omvat 13 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 16 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 63 punten behalen bij het goed oplossen van de vraagstukken. De puntenverdeling over de vraagstukken is als volgt:
 - Vraagstuk 1: 15 punten
 - Vraagstuk 2: 14 punten
 - Vraagstuk 3: 17 punten
 - Vraagstuk 4: 17 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 34,65 punten.

Vraagstuk 1. Radium Girls

Snel na de ontdekking van radioactiviteit door Henri Becquerel in 1896 ontstonden er veel toepassingen. Langzaam maar zeker werden echter ook de gevaren duidelijk. Een bekend voorbeeld is de wijzerplaatindustrie. Daar werd lichtgevende verf gebruikt, die bestond uit zinksulfide vermengd met een radiumzout.



In een laboratorium staat als demonstratiemodel een oude Westclox wekker met lichtgevende wijzeruiteinden. Om een indruk te krijgen van de activiteit die nog op de wijzers zit, worden de wijzerpunten bij elkaar gezet en wordt er met een dosistempometer (deze meet alleen fotonen) op ongeveer 5 cm afstand van de punten een netto omgevingsdosisequivalenttempo van $0,4 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ gemeten.

Gegevens:

- **Bijlage blz. 3-4:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2007), blz. 230-231, gegevens ^{226}Ra
- De geometrie van de meting is zo, dat de puntbronbenadering mag worden toegepast

Vraag 1.1

Maak een schatting van de activiteit ^{226}Ra die nu nog op de wijzers van deze wekker aanwezig is. U mag ervan uitgaan dat het gemeten dosistempo alleen door ^{226}Ra (inclusief dochters) wordt veroorzaakt.

In de wijzerplaatindustrie is het sinds 1925 verboden om met de mond een puntje aan het penseel te maken. Ernstige bot-sarcomen zijn alleen gevonden binnen de groep medewerksters die voor 1925 in deze industrie werkten. Besmetting via de mond wordt daarom ook gezien als de voornaamste besmettingsroute voor de wijzerplaatschilders, de 'Dial Painters'. In september 1994 is er door R.E. Rowland van het Argonne National Laboratory in Illinois een groot overzichtsartikel gepubliceerd over 'Radium in Humans'.

Als voorbeeld gaan we in dit vraagstuk uit van "Case 00-003" uit het artikel van Rowland, een vrouw, geboren in 1894, overleden in 1927, doodsoorzaak kwaadaardige bottumoren in haar bovenlijf. We noemen haar verder 'Casie'. Voor Casie wordt vermeld dat zij in 1917 is begonnen als wijzerplaatschilderes. Zij heeft dat 104 weken gedaan en heeft daarbij $603,7 \mu\text{Ci } ^{226}\text{Ra}$ binnengekregen. Het artikel vermeldt een bijbehorende dosis van 3404 cGy.

Vraag 1.2

Neem aan dat Casie iedere werkweek $1/104^{\text{e}}$ deel van de totale activiteit heeft binnengekregen. Bereken dan de effectieve volg dosis voor 1 werkweek van Casie, alsof de inname in die ene werkweek de enige inname zou zijn.

Een stralingsdeskundige doet een aantal aannames om zelf een globale schatting van de energie-overdracht van $603,7 \mu\text{Ci } ^{226}\text{Ra}$ te kunnen maken.

Gegevens en aannames:

- Voor de berekeningen mag worden aangenomen dat ^{226}Ra op het moment van inname in evenwicht was met alle dochters
- Er mag worden aangenomen dat de alfa-yield van ^{226}Ra en elk van haar dochters 100% is

Vraag 1.3

Stel dat er $603,7 \mu\text{Ci } ^{226}\text{Ra}$ in evenwicht met al de dochters is opgelost in een goed gesloten bak met 70 liter water. Bepaal voor deze bak water de geabsorbeerde dosis in Gy voor één jaar. U hoeft in deze berekening alleen de energie van de alfastraling mee te nemen.

De dochter van ^{226}Ra , het edelgas radon-222 (^{222}Rn) heeft een halveringstijd van 3,82 dagen. Voor een mens wordt aangenomen dat, na inname van ^{226}Ra , $2/3^{\text{e}}$ deel van het gevormde radon het lichaam verlaat door uitscheiding via de longen.

Vraag 1.4

Pas de berekening van 1.3 aan voor de situatie dat de bak water van 70 liter niet meer goed gesloten is en dat er $2/3$ van het gevormde radon direct ontsnapt.

Vraagstuk 2. Productie van ^{18}F

Om ^{18}F te produceren worden protonen versneld in een cyclotron en via een bundelgeleidingssysteem getransporteerd naar een met het stabiele ^{18}O -verrijkt water-target (H_2^{18}O , verrijkingsgraad = 97%).

Gegevens:

- Het radioactieve nuclide ^{18}F wordt gevormd door de reactie $^{18}\text{O} (p,n)$
- Het productietempo \dot{P} (s^{-1}) van ^{18}F wordt gegeven door:

$$\dot{P} = f \cdot \frac{m \cdot N_A}{M} \cdot \sigma \cdot \varphi = 0,97 \cdot \frac{4,44 \times 6,022 \cdot 10^{23}}{20} = 1,30 \cdot 10^{23} \cdot \sigma \cdot \varphi,$$

met σ de werkzame doorsnede in cm^2 en φ het protonenfluentietempo in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

- De werkzame doorsnede σ van het ^{18}O voor de protonen is $11 \cdot 10^{-3}$ barn per atoom
- $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$
- $\varphi = I / (e \cdot O)$ = bundelstroom in ampère gedeeld door de elementaire lading in coulomb maal oppervlak O van de protonenbundel
- De bundelstroom $I = 120 \mu\text{A} = 120 \mu\text{C/s}$
- De elementaire lading $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Het bundeloppervlak $O = 1,0 \text{ cm}^2$
- De activiteit van het ^{18}F in het watertarget op tijdstip t wordt bepaald door een aanmaak- en vervalproces en wordt als functie van de tijd gegeven door: $A(t) = \dot{P} \times (1 - e^{-\lambda t})$
- De halveringstijd van ^{18}F is 109,7 minuten

Vraag 2.1

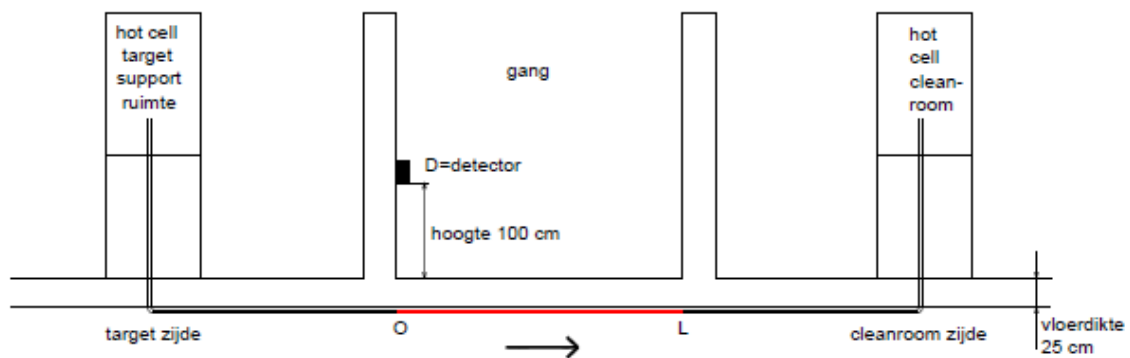
Bereken de activiteit van het aangemaakte ^{18}F indien het target met het ^{18}O verrijkt water 120 minuten bestraald is.

Op een gegeven moment is het verval van het aangemaakte radionuclide gelijk aan de productie ervan en is verzadiging bereikt.

Vraag 2.2

Bereken hoe lang de bestraling ten minste moet duren totdat minimaal 95% van de verzadigingsactiviteit is bereikt.

Het in het verrijkte water aangemaakte ^{18}F wordt na het einde van de bestraling als vloeistof via een transportleiding onder een betonvloer door getransporteerd naar een hot cell in de cleanroom (het ^{18}F -lab) (figuur 1).



Figuur 1: Zijaanzicht transportleiding (figuur is niet op schaal).

Het ^{18}F -transport stagneert en als de batch na 10 minuten nog steeds niet in de hot cell van de cleanroom is gearriveerd gaat de operator op onderzoek uit. Hij ontdekt dat een omgevingsdosisequivalenttempo-monitor (positie Detector in figuur 1) in alarm staat. Hij verricht een aantal aanvullende metingen en stelt vast dat de ^{18}F -bolus (totale volume van het radioactieve materiaal tijdens het transport door de transportleiding) onder de betonvloer is blijven steken tussen positie 0 en L in figuur 1.

Direct na het verrichten van de aanvullende metingen neemt de operator contact op met de verantwoordelijke hoofdoperator die snel ter plaatse is en het probleem snel oplost. De bolus komt daarna zonder problemen aan in de hot cell in de cleanroom.

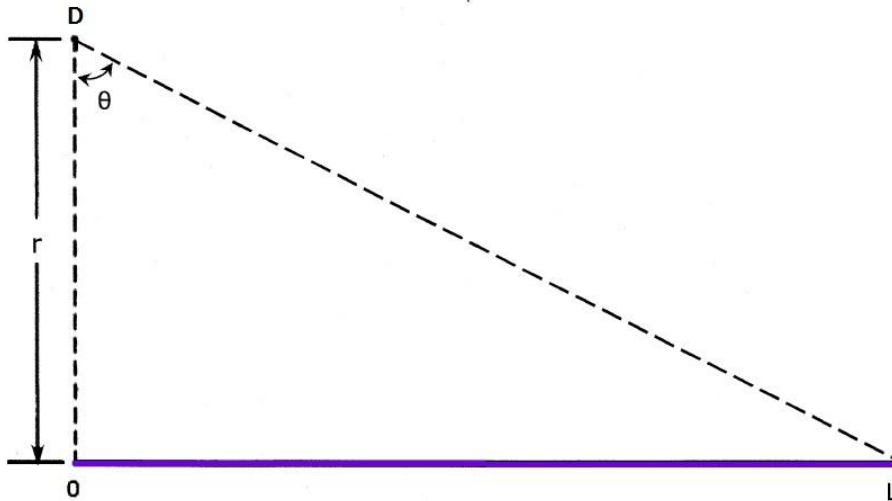
Gegevens:

- Het volume van de ^{18}F -oplossing is 4,0 mL
- De transportleidingen hebben een binnendiameter van 1,0 mm
- Het volume V van een buis met lengte L en straal r is: $V = \pi \cdot r^2 \cdot L$
- De detector die het omgevingsdosisequivalenttempo meet bevindt zich 1 m (= 100 cm) boven de vloer
- De betonvloer heeft een dikte van 25 cm
- **Bijlage blz. 5:** Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (3^e druk 2007), blz. 26, gegevens ^{18}F
- **Bijlage blz. 6:** NIST Standard Reference Database 126: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, J. H. Hubbell and S. M. Seltzer (latest update July 2004), ordinary concrete
- **Bijlage blz. 7:** ANS-6.4.3, D.K. Trubey (September 1988), appendix II table 3, Exposure build-up factors for concrete, blz. 44
- In Dosis-B mag een bron als puntbron beschouwd worden indien de afstand tussen meetpunt en bron minimaal 5x de grootste afmeting van de beschouwde bron is

Vraag 2.3

Bereken de lengte van de ^{18}F -bolus en bereedeneer waarom de bolus in de beschreven situatie niet beschouwd mag worden als een puntbron.

In figuur 2 hieronder is de ^{18}F -bolus als een lijnbron met lengte L weergegeven. In de beschreven situatie bevindt de detector die het omgevingsdosisequivalenttempo meet zich op positie D ten opzichte van de ^{18}F -bolus.



Figuur 2. Lijnbron

Voor een isotrope rechte lijnbron geplaatst in een verzwakkend medium is het omgevingsdosisequivalenttempo inclusief opbouwfactor in punt D te berekenen met de Sievert-integraal. Voor deze specifieke situatie is de Sievert-integraal voor de lijnbron tussen 0 en L te benaderen met:

$$\dot{H}^* (10) = \frac{h \cdot A \cdot \theta}{r \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{1}{\theta \cdot \mu d}} \cdot B \cdot e^{-\mu d}$$

Waarin h = omgevingsdosisequivalenttempoconstante in $\mu\text{Sv/h}$ per MBq/m^2 , A = activiteit in MBq , θ de hoek in *radialen*¹, r = de afstand tussen meetpunt en lijnbron in m , L = de lengte van de lijnbron in m , μ de lineïeke verzwakkingscoëfficiënt in cm^{-1} , d de dikte van de afscherming in cm en B = de opbouwfactor.

Hoewel de opbouwfactor afhankelijk is van de brongeometrie, mag aangenomen worden dat de opbouwfactor voor een *isotrope lijnbron* gelijk is aan die van een *isotrope puntbron*.

¹ Opmerking: controleer of de calculator ingesteld staat op graden of radialen. (Opm: 1 radiaal = $180/\pi$ graden en vice versa 1 graad = $\pi/180$ radialen)

Als u geen antwoord hebt gevonden bij vraag 1 kunt u 0,5 TBq gebruiken.

Vraag 2.4

Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo dat de operator op de monitor afleest, uitgaande van de bij vraag 2.1 berekende ^{18}F -activiteit. Bij de tabellen in bijlagen blz. 6 en 7 mag u uitgaan van een fotonenergie van 0,5 MeV.

Vraagstuk 3. Abou op reis

Op 9 mei 2015 plaatste de NOS het volgende bericht op het journaal.

Een vrouw [...] die zich vreemd gedroeg trok de aandacht van de Spaanse douane. Ze wilde met een koffer de grens oversteken tussen Marokko en de Spaanse enclave Ceuta. Toen de koffer door de scanner ging, werd meteen duidelijk waarom de vrouw zo zenuwachtig was. In de koffer zat een jongen van acht jaar. Het jochie reageerde laconiek toen de douane de koffer openritste: "Hallo, ik heet Abou," zei hij in het Frans tegen de verbaasde Guardia Civil.



Het röntgentoestel van de bagagescanner bevindt zich onder de lopende band. De röntgenbundel is verticaal omhoog gericht. De beveiligingsbeambte staat via de uitgang van de bagagetunnel bloot aan strooistraling.



Figuur 1: Schematisch overzicht bagagescanner met relevante afstanden

Gegevens:

- Over de buis staat een gelijkspanning $V = 150 \text{ kV}$
- De gemiddelde buisstroom bedraagt $I = 0,2 \text{ mA}$
- De gemiddelde belichtingstijd bedraagt 20 ms per opname
- De afstand tussen focus (F, figuur 1) en het oppervlak van de lopende band (C, figuur 1) is $63,5 \text{ cm}$
- De afstand tussen het oppervlak van de lopende band en de buitenzijde aan de bovenkant (B, figuur 1) van de tunnel voor de handbagage bedraagt 47 cm
- **Bijlage blz. 8:** Brede bundel transmissie van röntgenstraling door lood volgens ICRP-33, blz. 38, fig. 7
- **Bijlage blz. 9:** Conversiecoëfficiënten van luchtkerma naar omgevingsdosisequivalent en naar effectieve dosis (ontleend aan ICRP-74)
- **Bijlage blz. 10:** Verstrooiingscoëfficiënten voor röntgenstraling (ontleend aan ICRP-33)
- **Bijlage blz. 11:** Uitvoeringsbesluit Stralingsbescherming EZ – Artikel 4.10 lid 1
- De afmetingen van de koffer zijn $55 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ (dit zijn de maximaal toegelaten afmetingen voor handbagage)
- De afstand tussen het bestraalde deel van de lopende band en de werklocatie van de beveiligingsbeambte is $1,5 \text{ m}$
- Er worden gemiddeld 10 opnamen per minuut gemaakt
- Voor de berekening van stralingsbeschermingsgrootheden mag in dit vraagstuk voor de effectieve röntgenenergie 100 keV worden genomen; dit geldt voor zowel de primaire als de secundaire (d.w.z. verstrooide) straling

Vraag 3.1

Toon door berekening aan dat de effectieve dosis van Abou ten gevolge van één enkele opname door de bagagescanner enkele μSv bedraagt. U mag hierbij de afschermdende werking van de lopende band en de koffer verwaarlozen. Voor de berekening van de effectieve dosis mag de blootstelling ter hoogte van de lopende band als uitgangspunt worden gebruikt.

Vraag 3.2

Bereken het gemiddelde omgevingsdosisequivalenttempo (in $\mu\text{Sv/h}$) op 10 cm van de bovenkant aan de buitenzijde (A, figuur 1) van de bagagetunnel. U mag hierbij de afschermdende werking van lopende band, bagage en tunnelwand verwaarlozen.

Vraag 3.3

Aan de bovenzijde van de tunnelwand (B, figuur 1) wordt loodafscherming aangebracht. Bereken de minimaal benodigde dikte van de loodafscherming om aan de wettelijke eis voor lekstraling voor inherent veilige toestellen te voldoen. Rond het resultaat af op 0,5 mm.

Vraag 3.4a

Bereken de maximaal mogelijke effectieve jaardosis van de beveiligingsbeambte ten gevolge van strooistraling. U mag er hierbij van uitgaan dat het verstrooiend oppervlak gelijk is aan het oppervlak van een koffer met maximaal toegestane afmetingen ter hoogte van punt C (figuur 1), en dat de verstrooiingshoek 90° is.

Vraag 3.4b

Noem ten minste één praktisch uitvoerbare maatregel waardoor de stralingsbelasting van beveiligingsbeambten zou kunnen worden verlaagd.

Vraagstuk 4. Analyse vloeibaar afval

In een isotopenlab wordt gewerkt met ^{35}S en ^{32}P . Het niet-chemisch radioactief vloeibaar afval wordt verzameld in één 10-liter-vat. Wanneer dit vat 90% gevuld is wordt dit afgevoerd, maar eerst moet worden bepaald hoeveel activiteit er in het afvalvat zit. Hiervoor wordt een monster van 10 mL uit het vat genomen en dit monster wordt, na toevoeging van telvloeistof, gemeten in een vloeistofscintillatieteller (LSC). Omwille van de eenvoud mag worden aangenomen dat er geen dovende (= *quenched*) stoffen in het afvalmonster zitten. De meetresultaten en het spectrum worden weergegeven op een telstrook, zoals afgebeeld in de bijlage, blz. 12: figuur 1. Om te bepalen hoe de diverse radionucliden worden weergegeven in het spectrum op de telstrook worden op dezelfde manier ook twee potjes met radiochemisch zuivere radio-isotopen gemeten, te weten ^{35}S en ^{32}P . Beide radionucliden zijn pure β -emitters.

Toelichting meetresultaten:

De meetresultaten worden opgedeeld in drie overlappende energiegebieden (= *regions*): A, B en C. De grenzen van deze regions worden aangegeven met het lower level (LL) en upper level (UL), waarbij het lower level steeds 0 keV is. Het upper level is gelijk aan de maximale energie van drie veelgebruikte bèta-stralers: ^3H (region A, $E_{\beta,\text{max}} = 18,6$ keV), ^{35}S (region B, $E_{\beta,\text{max}} = 167$ keV) en ^{32}P (region C, $E_{\beta,\text{max}} = 1711$ keV). Region C bevat dus ook de bijdragen in region B en region A! De meettijd is steeds 30 seconden.

Gegevens:

- **Bijlage, blz. 12:** Figuur 1: Meetresultaten en spectrum van het vloeibaar afvalmonster
- **Bijlage, blz. 13:** Figuur 2: Meetresultaten en spectrum van een zuiver ^{32}P -monster
- **Bijlage, blz. 14:** Figuur 3: Meetresultaten en spectrum van een zuiver ^{35}S -monster
- Bij alle metingen mag verondersteld worden dat de doving verwaarloosbaar is
- De bijdrage van de achtergrondstraling aan het teltempo mag bij alle metingen worden verwaarloosd
- Het totale rendement in region C is 0,90 cpm/dpm voor ^{35}S en 0,95 cpm/dpm voor ^{32}P
- **Bijlage, blz. 15:** Fysische halveringstijd ($T_{1/2}$), radiotoxiciteitsequivalent voor ingestie (Re_{ing}) en maximale bèta-energie

- **Bijlage, blz. 16:** Uitvoeringsregeling EZ, Bijlage 1.5 Rekenregels AGIS, paragraaf 4.4, lozingen in water

Vraag 4.1a

Waarom geeft alleen ^{32}P een bijdrage in region C-B (het energiegebied tussen 167 en 1711 keV)?

Vraag 4.1b

Bereken het rendement (cpm/dpm) voor ^{32}P in region C-B.

Vraag 4.2

Bereken de relatieve statistische onnauwkeurigheid in de berekening van de activiteit van ^{32}P op basis van 1 sigma.

Vraag 4.3

Bereken de ^{32}P -activiteit in het 10-liter-vat.

Vraag 4.4

Bereken de ^{35}S -activiteit in het 10-liter-vat.

Het laboratorium heeft tien afvalvaten per jaar (allen voor 90% gevuld) en wil de inhoud hiervan lozen. Daarom wil men weten in hoeverre deze lozing onder het secundair niveau voor waterlozing (W_{SN} het afgeleide toetsingsniveau) zit. Voor het bepalen van de maximale jaarlijkse emissie in water, uitgedrukt in Re's (W_{max}), is het van belang te weten hoeveel activiteit er maximaal mag worden geloosd per radionuclide ($A_{\text{w},i}$). In de Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ worden de rekenregels voor de analyse gevolgen ioniserende straling (AGIS) bij lozing in water beschreven.

De activiteit van de maximaal mogelijke lozing per jaar van radionuclide i in water (A_{wi}) kan berekend worden met:

$$A_{\text{w},i} = A_{\text{vloeibaar afval},i} \times CR_{\text{w},i}$$

$CR_{\text{w},i}$ is de correctiefactor voor het radioactief verval en de cumulatie in het milieu van het radionuclide i .

Ga er vanuit dat de activiteit in elk vat gelijk is aan de activiteit die bij de vragen 4.3 en 4.4 is bepaald.

Wanneer u bij 4.3 en 4.4 geen antwoord hebt gevonden mag u een fictief antwoord gebruiken: ^{35}P 10 MBq en ^{32}S 1 MBq.

Vraag 4.5

Bereken de fractie van het afgeleide toetsingsniveau voor lozingen in water (W_{SN}) als gevolg van de jaarlijkse lozing van de inhoud van de tien 10-liter-vaten.