

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: 11 mei 2015
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- **Dit examen omvat 11 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 14 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: 18 punten
 - Vraagstuk 2: 17 punten
 - Vraagstuk 3: 16 punten
 - Vraagstuk 4: 16 punten

Vraagstuk 1 Inwendige besmettingscontrole

Voor een radionuclidenlaboratorium (C-niveau) is een nieuwe toezichthoudend stralingsdeskundige aangesteld, die alle protocollen, risico's en controlemetingen opnieuw in kaart wil brengen. In het laboratorium wordt gewerkt met DNA, dat gelabeld wordt met ^{32}P . Het betreft hier een labeling met een niet-vluchtig nuclide. Per labeling wordt 1 MBq ^{32}P gebruikt.

Als eerste vraagt de stralingsdeskundige zich af of deze labeling in dit laboratorium op tafel uitgevoerd mag worden, zoals tot nu toe gebruikelijk is. Daarvoor gebruikt hij de berekening uit de vergunningsbijlage 'Bijlage Radionucliden-laboratorium'.

Gegevens:

- **Bijlage blz. 3-4:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 32-33, gegevens ^{32}P .
- **Bijlage blz. 5-7:** Vergunningsbijlage 'Bijlage radionucliden-laboratorium', blz. 10, 11, 12.
- Ga uit van een klasse-F-verbinding.

Vraag 1.1

Toon aan dat het geoorloofd is om de labeling buiten de zuurkast uit te voeren.

In interne regelgeving is vastgelegd dat een volgdosis van 10 μSv of meer als gevolg van inwendige besmetting gemeld moet worden aan NDRIS¹. De nieuwe stralingsdeskundige vraagt zich af of periodieke controle van de urine van de laboratoriummedewerkers geschikt is om deze volgdosis aan te kunnen tonen.

Om de controle niet al te belastend te maken, wordt gedacht aan een controle waarbij de laboratoriummedewerkers elke maandagochtend urine moeten inleveren. Hieruit wordt een monster van 2,5 mL genomen, dat vervolgens in een vloeistofscintillatieteller wordt gemeten.

¹ NDRIS = Nationaal Dosis Registratie- en Informatie Systeem

Gegevens:

- Ga er in alle berekeningen van uit dat er één besmetting, 7 dagen voor de controle, heeft plaatsgevonden.
- Urineproductie per dag is 1400 mL.
- Het detectierendement van de vloeistofscintillatieteller is voor urinemonsters met ^{32}P : $\varepsilon = 0,80$ cpm/dpm.
- De gegevens uit het Handboek Radionucliden mogen worden gebruikt voor deze urinemonsters.

Vraag 1.2a

Bereken de activiteit van het nuclide ^{32}P die een werknemer moet inhaleren om een effectieve volgdosis van 10 μSv te ontvangen.

Vraag 1.2b

Bereken welke activiteit hiervan in het urinemonster zou terecht komen.

Het monster wordt 10 minuten gemeten. Tijdens een zeer langdurende meting is het achtergrondteltempo bepaald op 10,0 cpm.

Vraag 1.3

Zou de hierboven berekende activiteit in het betreffende urinemonster te meten zijn? Als significant wordt aangehouden: een betrouwbaarheidsinterval van 3σ boven het achtergrondteltempo.

Omdat men vermoedt dat het achtergrondteltempo fluctueert, wordt de achtergrond na elke meting van een urinemonster opnieuw kortdurend gemeten.

Op een maandagochtend worden de volgende metingen gedaan:

- Een urinemonster wordt gedurende 10 minuten geteld, met als uitkomst: 13,1 cpm.
- Direct daarna wordt gedurende 10 minuten het achtergrondteltempo gemeten met als uitkomst: 9,3 cpm.

Vraag 1.4

Bereken de activiteit in het urinemonster en de spreiding in dit antwoord. Levert berekening van de effectieve volgdosis vanuit deze activiteit een waarde die aan het NDRIS gemeld dient te worden?

Vraagstuk 2 Mobiele versneller voor IORT

Intra-operatieve radiotherapie (IORT) is een techniek waarbij na het verwijderen van een tumor een lokale therapeutische dosis elektronenstraling (vanaf hier verder kortweg de therapeutische dosis genoemd) wordt gegeven, nog voordat de operatiewond weer gesloten wordt. Op deze wijze hoeven de huid en andere weefsels geen stralingsdosis te ontvangen.

Voor het uitvoeren van intra-operatieve radiotherapie wordt overwogen een mobiele elektronenversneller aan te schaffen. Deze versneller kan een elektronenbundel produceren met een maximale elektronenenergie van 10 MeV. Voordat tot aanschaf wordt overgegaan wordt gekeken welke afschermingsmaatregelen noodzakelijk zullen zijn om te voldoen aan de wettelijke limieten. De benodigde therapeutische dosis is 20 Gy (geabsorbeerde dosis).

Gegevens:

- In dit vraagstuk mag worden aangenomen dat de bestralingsrichting loodrecht naar beneden is.
- Bij gebruik van een bundel elektronenstraling ontstaan in de patiënt fotonen.
- **Bijlage blz. 8, Tabel 1:** Omgevingsdosisequivalent (μSv) op verschillende afstanden en posities rond de patiënt bij een therapeutische dosis elektronenstraling van 10 Gy.
- **Bijlage blz. 8, Tabel 2:** Gemeten halfwaarde- en tiendewaardediktes (*HVL* resp. *TVL*) voor brede bundels fotonenstraling voor lood, beton en ijzer als functie van de toegepaste elektronenversnelspanning tijdens IORT. Uit: Introduction to Health Physics, Herman Cember, third edition.
- Voor alle naastliggende en onderliggende ruimtes geldt een effectieve dosisbeperking voor daar aanwezige personen van 1 mSv/jaar.
- De vloer bestaat uit 30 cm beton.
- De afstand tussen de te bestralen plaats in de patiënt en de hoofdhoogte van mensen in de onderliggende ruimte is ten minste 3,5 meter.

Vraag 2.1

Verklaar hoe een therapeutische dosis van 20 Gy, afkomstig van een 10-MeV-elektronenbundel, een significant omgevingsdosisequivalent ($H^*(10)$) kan opleveren voor andere personen dan de patiënt.

Vraag 2.2

Toon gebruik makende van Tabel 2 (Bijlage blz. 8) aan dat de build-up factor in beton, voor fotonen die ontstaan bij gebruik van een elektronenversnelspanning van 10 MV, 1 is voor diktes tot en met de tiendewaardedikte. Doe dit door te bewijzen dat er bij de genoemde betondiktes een exponentieel verband bestaat tussen de transmissie van de fotonenstraling en de dikte van het beton.

Vraag 2.3

Hoeveel patiënten kunnen per jaar bestraald worden zonder de geldende dosisbeperking voor personen in de onderliggende ruimte te overschrijden?

Uit het antwoord van vraag 2.3 blijkt dat de afschermdende werking van het beton onvoldoende is wanneer enige tientallen patiënten per jaar worden bestraald. Daarom wordt bekeken hoeveel lood onder de patiënt moet worden aangebracht om te voldoen aan de geldende dosisbeperking. Mocht u het antwoord op vraag 2.3 schuldig zijn gebleven, ga dan uit van 25 patiënten.

Vraag 2.4

Bereken de extra benodigde looddikte om te voldoen aan de geldende dosisbeperking, wanneer 200 patiënten per jaar worden behandeld.

Vraagstuk 3 Hout uit Letland

Een inwoner van Diemen heeft in 2010 de brandweer gebeld. Hij had eerder haardhout gekocht en was door berichten in de media bang geworden dat het haardhout besmet was met radioactieve stoffen. Het haardhout kwam oorspronkelijk uit Letland en was daar in groei tijdens de ramp in Tsjernobyl. De inwoner had in 2010 twaalf zakken hout in de tuin liggen met een massa van 15 kg elk.

De Adviseur Gevaarlijke Stoffen (AGS) is destijds na de oproep ter plaatse gekomen en heeft een maximaal omgevingsdosisequivalenttempo gemeten van netto 0,45 $\mu\text{Sv/h}$ op 10 cm van het oppervlak van een zak hout.

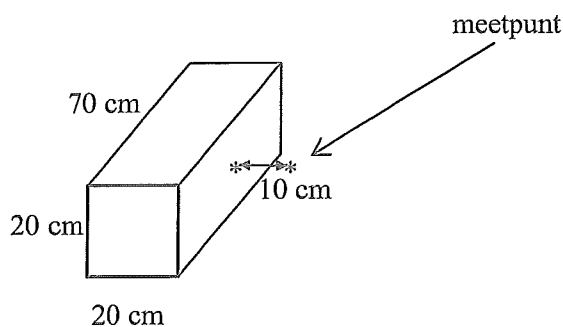
Omdat het hout met een verhoogd stralingsniveau was aangetroffen bij een particulier werd de toenmalige Inspectie Milieuhygiëne gewaarschuwd. De Inspecteur Milieuhygiëne heeft uitleg gegeven aan de inwoner van Diemen over de mogelijke risico's van hout uit de omgeving van Tsjernobyl. De inspecteur heeft verboden het hout te gebruiken om de kachel mee te stoken. Daarnaast heeft hij het RIVM gevraagd om het hout te komen ophalen en op een verantwoorde manier af te voeren.

In dit vraagstuk probeert u de onderliggende argumenten voor de beslissing van de inspecteur te achterhalen.

Gegevens:

- **Bijlage blz. 9-10** : Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (2^e druk 2007), blz. 172-173, gegevens ^{137}Cs .
- Het maximaal gemeten omgevingsdosisequivalenttempo kan gebruikt worden als goede schatter voor het omgevingsdosisequivalenttempo.
- Er blijkt voornamelijk ^{137}Cs aanwezig te zijn in/op het hout. Overige radionucliden kunnen verwaarloosd worden in deze vraag.
- Transmissie van de door ^{137}Cs uitgezonden fotonenstraling door hout is 1.
- Het gemiddeld achtergrond omgevingsdosisequivalenttempo in de buitenlucht in Nederland bedraagt 70 nSv/h.

Figuur 1 Schets van zak hout en meetpunt.



De AGS heeft metingen gedaan op 10 cm afstand van het oppervlak van de zak hout (zie Figuur 1). Omdat deze zak hout een afmeting heeft van 20 cm diepte, 20 cm breedte en 70 cm hoogte kan de puntbronbenadering niet worden gebruikt. De puntbronbenadering mag alleen worden gebruikt als de afstand tot de zak hout gelijk of groter is dan 5 keer de maximale afmeting van de zak hout.

Volgens DOVIS-B² mag in het geval dat de maximale afmeting (L_{\max}) van een bron kleiner is dan 5 keer de minimale afmeting van die bron (L_{\min}) de plaatbronbenadering toegepast worden met behulp van de volgende formule.

$$\dot{H}^*(10, g) = \frac{4 \cdot A}{(L_{\min})^2} \cdot h(10) \cdot \ln \left(\frac{(L_{\min})^2}{4g^2} + 1 \right) \cdot T$$

In deze formule is L_{\min} de kleinste afmeting van de plaat (in m) en g de afstand tot het middelpunt van de plaat (in m). Verder is A de activiteit (in MBq), $\dot{H}^*(10, g)$ het omgevingsdosisequivalenttempo (in $\mu\text{Sv/h}$) op afstand g (in m), $h(10)$ de omgevingsdosisequivalenttempoconstante (in $\mu\text{Sv/h}$ per MBq op 1 m) en T de transmissie voor fotonen vanuit de plaatbron.

Hoewel de zak hout feitelijk niet beschouwd kan worden als plaatbron, wordt er uit praktisch oogpunt toch gekozen voor deze benadering. De afstand g (in m) is in dit geval gelijk aan de afstand van het meetpunt tot het middelpunt van de zak hout.

Vraag 3.1

Toon aan dat de activiteit van het ¹³⁷Cs in/op het hout gelijk is aan 0,22 MBq. Gebruik hiervoor het scenario van een plaatbron.

Vraag 3.2

Toon aan dat de AGS geen meting volgens het puntbronbenaderingmodel had kunnen uitvoeren. Ga er hierbij vanuit dat een meting pas significant verschillend ten opzichte van de achtergrond is wanneer het achtergrond omgevingsdosisequivalenttempo ten minste één maal verhoogd is.

Vraag 3.3

Is de voorraad hout vrijgesteld volgens de vrijstellingsgrenzen van het Besluit stralingsbescherming?

² Dosisberekening voor de Omgeving bij Vergunningverlening Ioniserende Straling – DOVIS Deel B: Externe Straling, J.F.A. van Hienen et al. (2002)

Stel dat de inwoner niet bedacht was op het besmettingsgevaar van het hout en dit hout geheel in de haard had verstookt. Neem aan dat zijn buurman in dat geval 0,1% van de verstookte activiteit inademt.

Vraag 3.4

Bepaal in het geval dat het hout geheel in de haard was verstookt de grootte van de effectieve volgdoos voor de buurman.

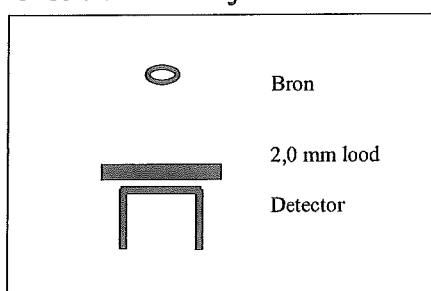
Vraagstuk 4 Bismut-207 kalibratiebron

Op een radionuclidenlaboratorium heeft men de beschikking over een aantal ^{207}Bi bronnen. Deze bronnen worden voor kalibraties gebruikt. Op 10 augustus 2013 wordt gemeten aan één van deze bronnen. De metingen gebeuren met een natriumjodide (NaI)-scintillatie detector, aangesloten op een PC met multichannelanalyzer (MCA). Het beeldscherm van de MCA geeft een fotonenspectrum ("gammaspectrum"): horizontaal staan kanaalnummers, die overeenkomen met de energie van de fotonstraling en verticaal staat de intensiteit.

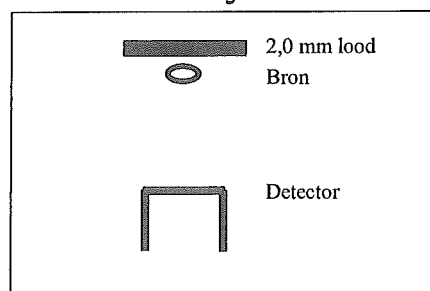
In de bijlage, blz. 12, staan vier gemeten fotonenspectra, steeds 10 minuten geteld.

- Spectrum van de achtergrondstraling;
- Spectrum 1, de ^{207}Bi -bron onafgeschermd;
- Spectrum 2A, de ^{207}Bi -bron afgeschermd met een 2,0 mm dikke loden plaat tussen bron en detector (zie situatie 2A, linksonder);
- Spectrum 2B, de ^{207}Bi -bron onafgeschermd, maar met een 2,0 mm dikke loden plaat bovenop de bron (zie situatie 2B, rechtsonder).

Situatie 2A zijaanzicht:



Situatie 2B zijaanzicht:



Bij spectrum 1, 2A en 2B is de afstand van bron tot de bovenkant van de detector identiek; deze afstand is steeds 10 cm.

In de spectra zijn drie zogenaamde Regions of Interest (ROI) aangegeven. De kwantitatieve meetgegevens van de ROI's staan in de bijlage, blz. 13.

Gegevens:

- Bron ^{207}Bi , 10,0 kBq op 10 april 1995.
- Alle spectra zijn opgenomen op 10 augustus 2013.
- De halveringstijd van ^{207}Bi is 31,55 jaar.
- **Bijlage blz. 11:** Vereenvoudigd vervalschema van ^{207}Bi .
- **Bijlage blz. 12:** Fotonenspectra gemeten aan de ^{207}Bi -bron.
- **Bijlage blz. 13:** Tabel met kwantitatieve gegevens bij de fotonenspectra.

- Bindingsenergieën lood in keV:
K-schil 88,0; L_I-schil 15,9; L_{II}-schil 15,2; L_{III}-schil 13,4 uit het Handbook of Chemistry and Physics, 60th edition.
- **Bijlage blz. 14:** 83-Bismuth-207 Uitgezonden straling,
<http://www.orau.org/library/nuclidedata>.

Vraag 4.1

Bereken voor de onafgeschermdde situatie (spectrum 1) het totale meetrendement van de fotopiek van gamma 2 in cps/Bq.

Vraag 4.2

Bereken de lineïeke verzwakkingscoëfficiënt μ voor lood in cm^{-1} voor de piek in ROI II. Voor de build-up factor bij deze energie en deze looddikte geldt: $B = 1,1$.

Een vergelijking van spectrum 2B met spectrum 1 laat zien dat spectrum 2B over het hele gebied 15.976 counts meer geeft dan spectrum 1; dit is een significant hoger aantal.

Getalsmatig is een deel van dit effect te verklaren door een de verhoging in ROI I; spectrum 2B heeft in ROI I 7.317 counts meer dan spectrum 1.

De overige verhoging (berekend getal = 8.659 counts) is niet te verklaren door een significante verhoging van de andere ROI's, maar deze verhoging is als het ware 'uitgesmeerd' over het hele spectrum 2B, met name aan de lagere energie-kant.

Vraag 4.3a

Verklaar de 'uitgesmeerde' verhoging van het spectrum.

ROI I omvat maar een smal deel van het spectrum. Naast de verklaring die bedoeld is in vraag 4.3a, is er nog een ander effect waardoor ROI I in spectrum 2B duidelijk verhoogd is.

Vraag 4.3b

Verklaar deze verhoging van ROI I.

In bijlage 4 is te zien dat de totale yield van de karakteristieke röntgenstraling van ^{207}Bi bij elkaar opgeteld 1,08 is ($0,366 + 0,218 + 0,163 + 0,332 = 1,08$). Als de yield van de Auger-elektronen erbij wordt geteld, is de totale yield voor deze vervolprocessen zelfs 1,65.

Vraag 4.4

Verklaar op basis van de vervalgegevens in de bijlage, blz. 14, hoe het mogelijk is, dat de totale yield van karakteristieke röntgenstraling en Auger-elektronen voor ^{207}Bi groter is dan 1.