

Gecoördineerd examen stralingsbescherming Deskundigheidsniveau 3

Nuclear Research and Consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave Nascholing/LUMC	LUMC
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboud Universiteit/UMC St.Radboud	RU/UMC

examendatum: 7 mei 2012
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- ❑ **Deze examenopgaven omvatten 11 genummerde pagina's en tevens een losse bijlage met gegevens van 10 pagina's. Wilt u dit controleren!**
- ❑ 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 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 Opsporen van een vermiste bron

Na het begeleiden van een practicum, waar de halveringsdikte van de gammastraling van ^{60}Co in diverse materialen moest worden vastgesteld, ontdekt u als stralingsdeskundige dat één van de gebruikte bronnen ontbreekt.

Om de bron op te sporen heeft u de beschikking over een monitor met een klein NaI(Tl)-kristal. Daarnaast beschikt u over een andere ^{60}Co -bron. Beide bronnen zijn aangeschaft op 7 mei 2004 en hadden bij aanschaf een activiteit van:

- Vermiste bron: 125 kBq
- Aanwezige bron: 350 kBq

Voordat er in de practicumzaal wordt gezocht, stelt u eerst vast op welke afstand de vermiste bron nog net gedetecteerd kan worden. Hiervoor doet u een meting met de aanwezige ^{60}Co -bron op 50 cm afstand van de monitor. De monitor geeft een uitslag van 50 cps. Een achtergrondmeting levert een teltempo van 8 cps.

Gegevens:

- **bijlage:** Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 74-75, gegevens ^{60}Co ;
- **bijlage:** Figuur 1, gegevens Gamma Scintillation Probe Type 5.41;
- het dosistempo in lucht is ongeveer gelijk aan het luchtkermatempo:
 $\dot{D} \approx \dot{K}$.

Vraag 1

Bereken de activiteit van de beide bronnen op 7 mei 2012.

Vraag 2

Bereken het meetrendement (in cps/Bq) van de detector wanneer de afstand tussen de detector en aanwezige ^{60}Co -bron 50 centimeter is.

Vraag 3

Bereken op welke afstand de vermiste bron nog te detecteren is. U mag veronderstellen dat een verdubbeling van het teltempo van de achtergrond een significante verhoging van het teltempo betekent.

Behalve de gebruikte monitor met NaI-detector is er in een naburig laboratorium een monitor met een Gamma Scintillation Probe Type 5.41 beschikbaar (zie bijlage, figuur 1 voor gegevens). U wilt nagaan of deze tweede monitor gevoeliger is dan de aanwezige monitor en kijkt hiervoor in de fabrieks-specificaties. Ondertussen wordt alvast een achtergrondtelling met Probe Type 5.41 gedaan; het achtergrondteltempo in de practicumzaal bedraagt 5 cps.

Vraag 4

Bereken welk netto teltempo de Gamma Scintillation Probe Type 5.41 zou aangeven bij de vermiste bron op de bij vraag 3 berekende afstand. (Indien bij vraag 3 geen afstand gevonden is, neem dan 70 cm.) Is deze detector geschikt voor het opsporen van de vermiste bron? Motiveer uw antwoord.

Vraagstuk 2 Medische kwakzalverij

In het midden van de twintigste eeuw werd een uitgemergelde 52 jaar oude patiënt in een ziekenhuis opgenomen. De man vertelde dat hij sinds vijf jaar op advies van zijn natuurarts iedere dag een fles "radiumwater" dronk. Een week na opname overleed de patiënt¹.

U wilt retrospectief enkele vragen beantwoorden aan de hand van huidige gegevens en regelgeving.

Gegevens:

- een fles "radiumwater" bevatte 200 mL water;
- het "radiumwater" bleek bij analyse 10 ppb (massa) ²²⁶Ra te bevatten [1 ppb (massa) = 1 gram op 10⁹ gram];
- de referentiemens heeft een botmassa van 5000 g;
- biologische halveringstijden voor radium in het skelet (zie tabel 1 hieronder);
- **bijlage:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 230-231, gegevens ²²⁶Ra.

Tabel 1. Retentie van radium in het skelet².

fractie	t _{1/2} biologisch (d)
0,30	2
0,08	40
0,03	4000

Vraag 1

Bereken de radiumactiviteit per fles "radiumwater", zoals gedronken door de patiënt.

Vraag 2

Bereken de effectieve volgdosis voor een volwassene, als gevolg van de inname van één fles "radiumwater".

Mocht u het antwoord van vraag 1 niet hebben gevonden, neem dan aan dat de radiumactiviteit per fles gelijk aan 80 kBq is.

¹ Ontleend aan 'Radiation: what it is and how it affects you' – Jack Schubert & Ralph E. Lapp – Viking Press (New York), 1957.

² Gebaseerd op figuur A5 van ICRP-67.

Na overlijden werd er sectie op het lichaam verricht. De doodsoorzaak bleek stralingsziekte, waarschijnlijk als gevolg van het consumeren van de vele flessen radiumhoudend water.

Vraag 3

Bereken de hoeveelheid ^{226}Ra (in μg) die destijds in het skelet werd aangetroffen. De berekening mag beperkt worden tot de retentiefraction met de langste biologische halveringstijd; er kan namelijk worden aangetoond dat alleen deze term vanwege de lange accumulatieperiode wezenlijk bijdraagt tot de activiteit in het skelet.

Vraag 4

Stel dat eenzelfde overlijden zich recent heeft voorgedaan en dat er is besloten tot crematie van het lichaam, zou de as dan volgens de Kernenergiewet vergunningsplichtig zijn? Motiveer uw antwoord. Er mag worden uitgegaan van de veronderstelling dat de massa van de as gelijk is aan de botmassa. En tevens van de veronderstelling dat de hoeveelheid radium in de rest van het lichaam verwaarloosbaar is. Mocht u het antwoord op vraag 3 niet hebben, ga dan uit van 25 μg radium in de botten.

Vraagstuk 3 Transmissie door loodschort

In een ziekenhuis is het beleid om bij procedures die onder röntgendoorlichting plaatsvinden altijd loodschorten te dragen. Ook voor personeel op de operatiekamer geldt deze regel.

Op de afdeling nucleaire geneeskunde echter wordt de werknemersdosis beperkt door de blootstellingstijd te beperken en de afstand zo groot mogelijk te houden. Hier worden geen loodschorten gedragen. Dit gebeurt ook niet door het verplegend personeel dat patiënten verzorgt, die hoge activiteiten ^{131}I toegediend hebben gekregen. Een verpleegkundige die op de afdeling nucleaire geneeskunde werkt, wil graag van de stralingsdeskundige weten waarom hiervoor gekozen is. De stralingsdeskundige wil zijn uitleg illustreren door de werking van het loodschort in twee praktijksituaties door te rekenen.

Situatie 1

Tijdens een doorlichting wordt een operatie-assistent blootgesteld aan door de patiënt verstrooide röntgenstraling. De röntgenbuis bevindt zich onder de operatietafel en straalt loodrecht naar boven. Beschouw voor de berekening de straling die onder een hoek van 90° in de patiënt verstrooid wordt.

Gegevens:

- buisspanning bij doorlichting: 100 kV;
- buisstroom bij doorlichting: 2 mA;
- output luchtkermatempo van dit röntgentoestel bij 100 kV op 1 meter van het focus (2 mm Al filtering): $2,2 \text{ mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$;
- veldgrootte: 20 bij 20 cm;
- afstand focus – patiënt = 50 cm;
- afstand patiënt – operatie-assistent = 2 m;
- dikte standaard loodschort: 0,25 mm loodequivalent. Aan de voorzijde worden twee flappen over elkaar heen geslagen, waardoor de dikte 0,50 mm loodequivalent bedraagt;
- het dosistempo in weefsel is ongeveer gelijk aan het luchtkermatempo: $\dot{D}_{\text{weefsel}} \approx \dot{K}_{\text{lucht}}$.
- tabel 1. Geabsorbeerde dosis in lucht ten gevolge van verstrooide straling als percentage van de intreedosis per 400 cm^2 veldgrootte (ICRP-33).
- **bijlage**, Figuur 2: Verzwakkingsfactoren voor primaire bundels röntgenstraling in loodschorten met twee verschillende loodwaarden, als functie van de buisspanning.

Tabel 1

Geabsorbeerde dosis in lucht ten gevolge van verstrooide straling als **percentage** van de intreedosis per 400 cm² veldgrootte (ICRP-33).

Angle of scatter	100 kV ^b	200 kV ^b	300 kV ^b	⁶⁰ Co ^{c,e}	6 MV ^{d,e}
15°	—	—	—	— (0.48)	0.65 (0.48)
30°	0.02	0.24	0.34	— (0.27)	0.30 (0.24)
45°	0.03	0.23	0.26	0.18 (0.14)	0.14 (0.12)
60°	0.04	0.19	0.22	0.14 (0.08)	0.08 (0.07)
90°	0.05	0.14	0.19	0.07 (0.04)	0.04 (0.03)
120°	0.12	0.23	0.26	0.05 (0.03)	0.03 (0.02)
135°	0.17	0.30	0.33	0.04 (0.02)	0.03 (0.02)
150°	0.21	0.37	0.48	— (0.02)	— (0.02)

^a Per cent scattered radiation is related to primary beam measurements in air at the point of reference, that is, at the same position as the phantom surface or phantom centre.

^b Bomford and Burlin (1963). Cuboid phantom 30 cm wide × 22 cm deep. Field area and angle of scattered radiation referred to phantom surface.

^c Dixon *et al.* (1952). Elliptic cylinder phantom 36 cm major axis, 20 cm minor axis. Field area and angle of scattered radiation referred to phantom centre. Beam along major axis.

^d Karzmark and Capone (1968). Cylinder phantom 27 cm diameter. Field area and angle of scattered radiation referred to phantom centre.

^e Figures in brackets are from Nilsson (1975): spherical tissue irradiated; equivalent phantoms with masses in the range 0.9–30 kg. Sources located in a separate room with a collimator in the intervening wall, which largely eliminated problems of scattered radiation from the walls.

Vraag 1a

Bereken het luchtkermatempo in de primaire bundel ter plaatse van de patiënt.

Vraag 1b

Bereken het luchtkermatempo van de aan de patiënt, onder een hoek van 90°, verstrooide straling ter plaatse van de operatie-assistent.

De maximale energie van de fotonen, die in de richting van de operatie-assistent worden verstrooid, is lager dan de oorspronkelijke 100 keV. Deze maximale energie is door de stralingsdeskundige berekend en bedraagt 84 keV. Veronderstel verder dat de vorm van het spectrum van de verstrooide straling vergelijkbaar is met het spectrum van een primaire stralingsbundel. Daardoor mag u figuur 2 ook voor de verstrooide straling gebruiken.

Vraag 2

Bereken het equivalente dosistempo achter het loodschoort dat de operatie-assistent draagt (totaal 0,50 mm Pb-equivalent). Verwaarloos het effect van backscatter in het loodschoort.

Wanneer u bij vraag 1b geen antwoord heeft kunnen vinden, neem dan aan dat het antwoord van vraag 1b $0,50 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ is.

Situatie 2

Bij verpleging van een patiënt op de afdeling nucleaire geneeskunde wordt een verpleegkundige blootgesteld aan de gammastraling die uit een behandelde patiënt komt. Het hoogste dosistempo is te verwachten bij patiënten die zojuist therapeutische hoeveelheden ^{131}I hebben ingeslikt.

Aanvullende gegevens:

- activiteit ^{131}I in de patiënt direct na toediening: 3700 MBq. Beschouw de patiënt als een puntbron;
- de verzwakking in de patiënt wordt verwaarloosd;
- bij berekening van de verzwakking in het loodschoort dient u uit te gaan van de uitgezonden fotonen met de hoogste energie;
- het effect van build-up in het loodschoort mag worden verwaarloosd;
- **bijlage:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 164-165, gegevens ^{131}I ;
- **bijlage:** Inleiding tot de Stralingshygiëne, Bos et al (2^e druk 2007), blz. 381, interactiecoëfficiënten voor fotonen.

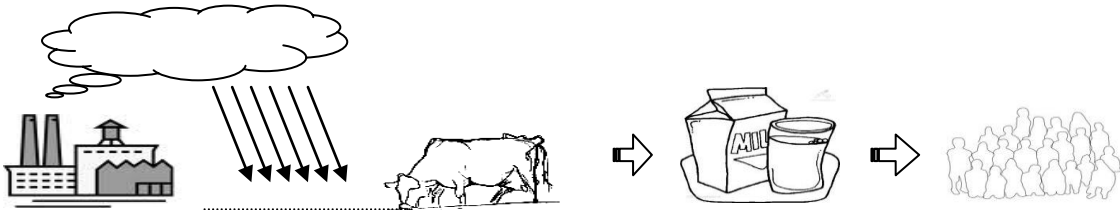
Vraag 3

Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo voor een verpleegkundige op 2 meter van de behandelde patiënt, zowel voor de situatie zonder loodschoort als met loodschoort.

Vraag 4

Is het dragen van een loodschoort op de afdeling nucleaire Geneeskunde de meest voor de hand liggende dosisverlagende maatregel? Motiveer uw antwoord.

Vraagstuk 4 Van lozing tot inwendige besmetting: een ketenmodel



Een vol-continu bedrijf stoot jaarlijks een bepaalde activiteit ^{131}I uit. In deze opgave kijken we naar een model dat wordt gebruikt voor dosisberekeningen na lozingen van ^{131}I . Het jodium verspreidt zich door de atmosfeer en komt onder andere neer op grasland waar koeien grazen. Het besmette gras wordt door de koeien geconsumeerd wat leidt tot een besmetting van de melk die ze produceren. Deze besmette melk leidt vervolgens tot een inwendige besmetting bij personen die deze melk drinken.

Met behulp van een gemeten besmetting van de melk kan ook een schatting worden gemaakt van de totale ^{131}I -activiteit (in Bq) die door het bedrijf jaarlijks wordt uitgestoten.

Opmerking: in deze opgave kunt u ervan uitgaan, dat het bedrijf al zeer vele jaren dit ^{131}I uitstoot met een constant en continu lozingstempo gedurende het gehele jaar. Alle berekende jaargemiddelde getallen zijn dus evenwichtswaarden.

Gegevens:

- de jaargemiddelde activiteitsconcentratie van de met ^{131}I besmette melk (C_{melk}) bedraagt bij consumptie $106 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$;
- een volwassen persoon drinkt per jaar gemiddeld 120 liter melk;
- neem aan dat al deze melk afkomstig is van koeien die grazen op een homogeen besmet grasveld;
- **bijlage:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 164-165, gegevens ^{131}I .

Vraag 1

Bereken de effectieve volgdoos ten gevolge van de ingestie van deze besmette melk gedurende één jaar. U mag hierbij uitgaan van een eenmalige inname van de jaarlijks binnengekregen activiteit.

Extra gegevens:

- koeien eten gemiddeld 70 kg gras per dag;
- 1 m² grasveld bevat 1,3 kg voor een koe eetbaar gras;
- voor de besmetting van melk geldt de volgende vergelijking:

$$C_{melk} = F_{melk} A_{koe} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t_w}{t_{1/2}}}$$

waarin:

- A_{koe} = de gemiddelde activiteit, die een koe per dag binnenkrijgt via consumptie van het besmette gras;
- F_{melk} = de conversiecoëfficiënt [$\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$] ¹³¹I bij een inname van 1 $\text{Bq} \cdot \text{dag}^{-1}$ besmet gras door de koe;
- $F_{melk} = 0,01 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ per $\text{Bq} \cdot \text{dag}^{-1}$;
- $t_w = 3$ dagen, tijd tussen het melken van de koe en de consumptie van de melk;
- $t_{1/2}$ = halveringstijd van ¹³¹I.

Vraag 2

Bereken de gemiddelde oppervlaktebesmetting van het grasveld C_{gras} in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$.

De evenwichtswaarde van de oppervlaktebesmetting die zich in de loop der jaren heeft opgebouwd, is afhankelijk van:

- de depositie van radioactief ¹³¹I uit besmette lucht op het gras en van de mate van luchtbesmetting;
- verschillende verwijderingprocessen zoals radioactief verval en uitspoeling door regen.

Extra gegevens:

- bij een gemiddelde luchtconcentratie van $1,0 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ bedraagt de activiteitsbesmetting van het oppervlak van het gras gemiddeld $1,0 \cdot 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$;
- het gemiddelde ademvolumetempo is $0,95 \text{ m}^3$ per uur;
- de totale inhalatieduur is 7000 uur per jaar;
- neem aan dat het ¹³¹I in de lucht aanwezig is als I₂-damp.

Vraag 3

Laat zien dat de jaarlijkse effectieve volgdozis voor een volwassen persoon als gevolg van inhalatie van de met ¹³¹I besmette lucht op basis van de in opgave 2 berekende oppervlaktebesmetting, veel kleiner is dan de dosis ten gevolge van ingestie van besmette melk zoals in vraag 1 is berekend.

(Indien bij vraag 2 geen oppervlaktebesmetting is berekend, ga dan uit van een besmetting van $150 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$).

Om een schatting te maken van de jaarlijkse lozing van radioactief ^{131}I wordt gebruik gemaakt van een atmosferisch verspreidingsmodel. De gemiddelde luchtconcentratie C_{lucht} [$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$] op afstand r van het lozingspunt wordt gegeven door:

$$C_{\text{lucht}}(r) = \alpha(r) \frac{A_{\text{uit}}}{\Delta t U}$$

waarin:

- A_{uit} (in Bq) de uitgestoten activiteit is in tijdsinterval Δt (in uur);
- U de gemiddelde windsnelheid in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ is;
- de coëfficiënt $\alpha(r)$ [$\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] de verdunningsfactor is die afhangt van het type weer en van de afstand r van het beschouwde punt tot de bron van de lozing (zie onderstaande tabel 1).

Tabel 1: Afstandsafhankelijkheid van de verdunningscoëfficiënt $\alpha(r)$

Afstand r (in km)	$\alpha(r)$ [$\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
0,1	$2,39\cdot 10^{-6}$
0,2	$6,79\cdot 10^{-7}$
0,5	$1,36\cdot 10^{-7}$
1	$4,23\cdot 10^{-8}$
2	$1,37\cdot 10^{-8}$
5	$3,25\cdot 10^{-9}$
10	$1,15\cdot 10^{-9}$
20	$4,22\cdot 10^{-10}$

Extra gegevens:

- gemiddeld 1/3 deel van het jaar staat de wind in de richting van het beschouwde grasveld;
- de besmette pluim bereikt het grasveld;
- het grasveld bevindt zich op 2 km afstand van het bedrijf en de gemiddelde windsnelheid is $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vraag 4

Bereken op basis van de in vraag 3 berekende luchtconcentratie, de gemiddelde geloosde activiteit door het bedrijf, uitgedrukt in $\text{GBq}\cdot\text{jaar}^{-1}$. (Als bij vraag 3 geen luchtconcentratie is berekend, ga dan uit van $0,030 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$).