

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: 23 mei 2016
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- **Dit examen omvat 12 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 8 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: 17 punten
 - Vraagstuk 3: 14 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 Bepaling van een besmetting

Voor een demonstratiepracticum worden in een radionuclidenlaboratorium regelmatig bronnen gemaakt. Op een dag wordt een besmetting ontdekt op de vloer. De toezichhoudend stralingsdeskundige wordt gevraagd deze besmetting te onderzoeken. Het logboek wijst uit dat er na de laatste controles alleen met ^{60}Co en ^{35}S is gewerkt. Van het besmette deel van de vloer wordt een veegtest genomen. Het veegmonster wordt vervolgens zowel met een bètateller met GM-buis als met een gammaspectrometer gemeten. Met de bètateller worden $4,20 \cdot 10^3$ tpm (tellen per minuut) gemeten. Met de gammaspectrometer worden in de fotopiek van 1,33 MeV 480 tpm gemeten.

Gegevens:

- ^{35}S $T_{1/2} = 87,4$ d $E_{\beta, \max} = 0,167$ MeV (100%), geen γ
- ^{60}Co $T_{1/2} = 5,27$ j $E_{\beta, \max} = 0,318$ MeV (99,9%)
 $E_{\gamma} = 1,33$ MeV (100%) en 1,17 MeV (99,9%)

Het percentage geeft de emissiewaarschijnlijkheid aan.

- Telrendementen in de gebruikte opstellingen:
 - bètateller voor $E_{\beta, \max}$ tussen 100 en 400 keV: 45% (tps / Bq)
 - gammaspectrometer-fotopiekkrendement bij 1,33 MeV: 32% (tps / Bq)
- Het telrendement van de bètateller voor de fotonen van ^{60}Co mag gelijk aan 0 worden gesteld.
- Dode tijd van de bètateller: 200 μs
- Zowel de teltijd met de bètateller en als de teltijd met de gammaspectrometer is 2 minuten.
- Het achtergrondteltempo mag voor beide detectoren in dit geval worden verwaarloosd.
- Geveegd vloeroppervlak: 120 cm^2
- Aangenomen vegefficiëntie: 35%

Vraag 1.1

Wat is het voor dode tijd gecorrigeerde bètateltempo van het veegmonster?

Vraag 1.2

Hoe groot is de totale bèta-activiteit van het veegmonster uitgedrukt in Bq?

Vraag 1.3

Hoe groot is de gemeten ^{60}Co -activiteit in het veegmonster uitgedrukt in Bq?

Vraag 1.4

Bereken de gemiddelde oppervlaktebesmetting van het geveegde oppervlak voor zowel ^{35}S als ^{60}Co in $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$.

De toezichhoudend stralingsdeskundige wil met een grote mate van zekerheid weten dat de totale besmettingsgraad de limiet van een oppervlaktebesmetting niet overschrijdt. Als betrouwbaarheidsgrens wordt een marge aangehouden van 2x de standaarddeviatie.

Vraag 1.5

Toon door berekening aan, met genoemde betrouwbaarheidsgrens, dat de totale besmettingsgraad van het geveegde oppervlak de wettelijk toegestane limiet voor een oppervlaktebesmetting niet overschrijdt.

Vraagstuk 2 Noodprocedure Brachytherapie

Patiënten met slokdarmkanker kunnen op een afdeling radiotherapie zowel uitwendig als inwendig bestraald worden. Brachytherapie is een behandeling waarbij een ^{192}Ir -bron nabij de tumor wordt gebracht om deze van dichtbij te bestralen. De radioactieve bron wordt op afstand automatisch via een katheter in de patiënt gebracht.

Op een dag vindt er tijdens de bestraling een complicatie plaats: de radioactieve bron wordt niet automatisch uit de patiënt verwijderd. Nu moeten arts en laborant de noodprocedure uitvoeren en de ^{192}Ir -bron zo snel mogelijk uit de patiënt halen. Arts en laborant lopen de brachyruimte in. De laborant loopt eerst naar het rek met de loodschorten, pakt er één en trekt deze aan. De arts loopt meteen naar de patiënt, trekt de katheters inclusief ^{192}Ir -bron, uit de patiënt en plaatst deze in de noodcontainer naast de patiënt. Gezamenlijk brengen ze de patiënt uit de brachyruimte.

Gegevens:

Algemeen:

- **Bijlage, blz. 3:** Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (2e druk 2007), blz. 214, gegevens ^{192}Ir
- **Bijlage, blz. 4:** Detailcurve brede bundel transmissie van fotonen afkomstig van ^{192}Ir door lood (SBD-TU/e)
- Het omgevingsdosisequivalent mag gebruikt worden als schatter voor de effectieve dosis.

Procedure:

- **Figuur 1**, op pagina 5: Bovenaanzicht brachyruimte met bed en patiënt
- Arts en laborant worden gedurende de noodprocedure 30 s blootgesteld aan de ^{192}Ir -bron.
- Er mag van uit worden gegaan dat arts en laborant zich tijdens de noodprocedure op een vaste afstand van de ^{192}Ir -bron bevinden, deze is respectievelijk 20 cm en 2,0 m.
- Dikte loodschort 0,50 mm Pb
- Er mag van uit worden gegaan dat de laborant gedurende de volledige 30 s het loodschort droeg.
- De verzwakking door de patiënt mag worden verwaarloosd.

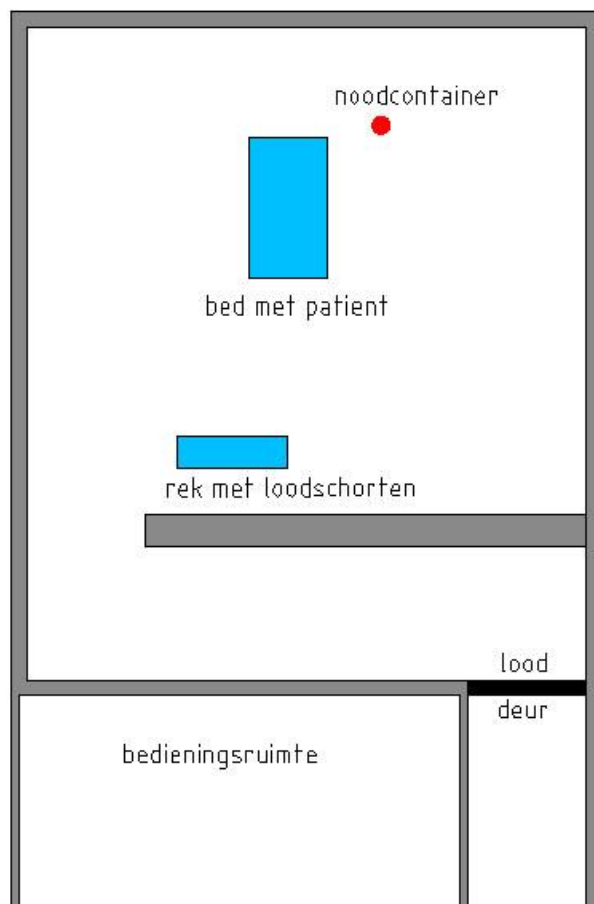
Bron:

- De activiteit van de ^{192}Ir -bron was op de dag van kalibratie 12 Ci.
- Deze complicatie vond 30 dagen na de kalibratie plaats.
- De ^{192}Ir -bron mag als puntbron beschouwd worden.

- De omhulling van het radioactieve materiaal bestaat uit 0,35 mm dik roestvast staal (dichtheid = $7,8 \text{ g/cm}^3$).

Noodcontainer:

- De noodcontainer, een cilindervormige container van lood, heeft een buitendiameter van 25 cm en een hoogte inclusief bodem en deksel van 25 cm.
- Alle wanden inclusief bodem en deksel hebben een dikte van 3 cm.
- Er mag van uit worden gegaan dat de ^{192}Ir -bron zich, zowel horizontaal als verticaal, in het midden van de container bevindt.



Figuur 1: Bovenaanzicht brachyruimte met bed en patiënt

Vraag 2.1

Laat door berekening zien dat de omhulling van de ^{192}Ir -bron voldoende dik is om de uitgezonden β^- -straling volledig te absorberen.

Vraag 2.2a

Wat is de effectieve dosis van de arts en van de laborant ten gevolge van de noodprocedure? Verwaarloos hierbij het effect van het loodschoort.

Vraag 2.2b

Is bij deze noodprocedure het loodschoort wat betreft afscherming van toegevoegde waarde? Hoe moet het advies over het dragen van loodschoorten bij deze noodprocedure zijn? Motiveer uw antwoord.

Vraag 2.3

De arts (reguliere dosis 4 mSv per jaar) is op basis van de blootstellingsrisico's bij zijn overige werkzaamheden ingedeeld als blootgestelde werknemer categorie B. Is de indeling in categorie B de juiste categorie indien de waarschijnlijkheid van optreden van bovenstaand scenario als één keer per jaar moet worden beschouwd? Motiveer uw antwoord.

Volgens het vervoersbesluit zijn de grenswaarden voor het vervoer van een collo:

- 1) 2 mSv/h aan het oppervlak van het collo, en
- 2) 0,1 mSv/h op een afstand van 1 m van het oppervlak van het collo.

Vraag 2.4

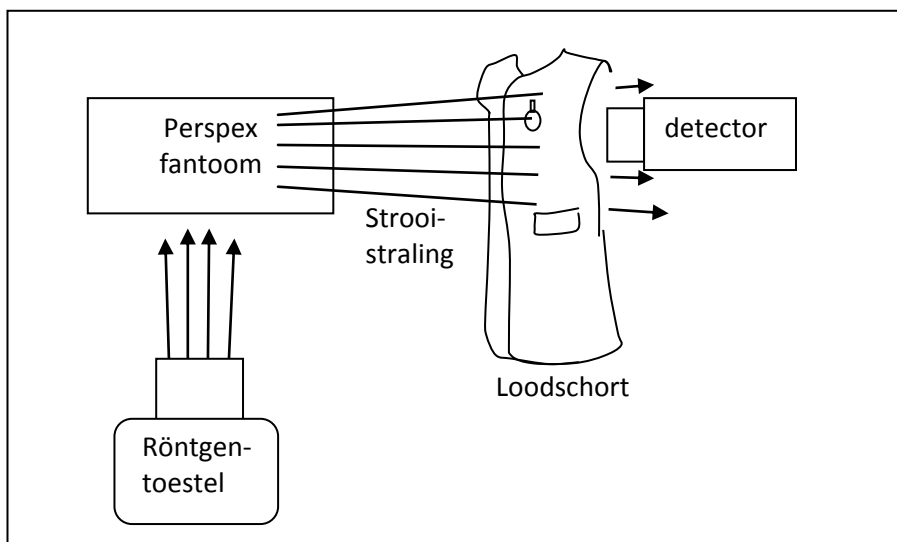
Voldoet de afgesloten noodcontainer – direct na het incident – aan deze grenswaarden van het vervoersbesluit?

Vraagstuk 3 Effectiviteit van een loodschort

Een interventieradioloog heeft een badge-uitslag (dieptedosis, $H_p(10)$) van gemiddeld 4,7 mSv per jaar. Tijdens het doorlichten van patiënten draagt hij een loodschort van 0,25 mm loodequivalent en een schildklierkraag van 0,50 mm loodequivalent. Het loodschort is een rondom-schort met een brede overlap aan de voorzijde, wat resulteert in 0,50 mm loodequivalent aan de voorzijde. De TLD-badge wordt op de borst aan de buitenzijde van het loodschort gedragen. Gedurende het doorlichten staat de radioloog naar de patiënt gericht.

Om na te gaan hoeveel effect het dragen van het loodschort heeft op de effectieve dosis wordt de transmissie bepaald in een experiment. Hierbij wordt de stroostraling die ontstaat in een patiënt gesimuleerd door stroostraling te produceren in een perspex fantoom, zie de schets in de figuur hieronder.

Een detector wordt aan de binnenzijde van het loodschort geplaatst. Door de gemeten intensiteit te vergelijken met een meting zonder loodschort wordt de transmissie bepaald. Dit wordt gedaan met diverse fantomen, geometrieën en buisspanningen. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in de bijlage.



Figuur 1. Experimentele bepaling van de transmissie van de verstrooide straling

Gegevens:

- Bij de doorlichtingen wordt het röntgentoestel gebruikt op 80 kV.
- De door de radioloog ontvangen dosis is enkel veroorzaakt door onder 90° verstrooide straling.
- De door de patiënt verstrooide straling kan goed worden nagebootst met behulp van een perspex fantoom.
- De stroostraling bestraalt de radioloog in een AP-geometrie.
- De dichtheid van lood is $11,34 \text{ g/cm}^3$.
- De build-up factor mag gelijk aan 1 gesteld worden.
- **Bijlage, blz. 5:** Figuur 6-2. Experimenteel bepaalde transmissie van directe en verstrooide röntgenstraling door een loodschort van 0,50 mm loodequivalent, als functie van de buisspanning (uit rapport 17 van de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie "Dosimetrie in de Radiologie: Stralingsbelasting van de Patiënt en Werknemers" (2007))
- **Bijlage, blz. 6:** Grafiek interactiecoëfficiënten voor fotonen, lood 0,0010 MeV – 0,2 MeV (gebaseerd op tabel D uit Inleiding tot de Stralingshygiëne, Bos et al (2e druk 2007))
- **Bijlage, blz. 7:** Figuur 6.9 uit Inleiding tot de Stralingshygiëne, Bos et al (2e druk 2007): De verhouding van de effectieve dosis E en het persoonsdosisequivalent $H_{p, \text{slab}}(10, 0^\circ)$ als functie van de fotonenenergie in de AP-bestralingsgeometrie (ontleend aan ICRP-74)
- **Bijlage, blz. 8:** Weefselweegfactoren volgens ICRP-60

De door het fantoom verstrooide straling is niet mono-energetisch. Om toch een berekening te kunnen maken van de afscherming, wordt de effectieve fotonenergie bepaald. Dit kan worden gedaan door μ/ρ af te leiden uit de transmissie.

Vraag 3.1

Bepaal de effectieve fotonenergie van de onder 90° in perspex verstrooide fotonen op de plek van de radioloog.

Vraag 3.2

Bepaal uit de gemiddelde badgeuitslag ($H_p(10)$) de gemiddelde effectieve jaardosis van de interventieradioloog. Veronderstel hierbij dat alle organen die bijdragen aan de effectieve dosis zijn afgedekt door loodschort en schildklierkraag.

Indien u het antwoord op vraag 1 niet heeft gevonden mag u 0,060 MeV gebruiken als effectieve energie van de verstrooide straling.

Vraag 3.3

Stel dat er geen schildklierkraag wordt gedragen, wat zou dan de effectieve jaardosis zijn? Veronderstel dat in dit geval van alle organen die bijdragen aan de effectieve dosis, alleen de gehele schildklier onbeschermd is.

Vraag 3.4

De interventieradioloog draagt geen oogbescherming. Zou u als stralingsdeskundige adviseren om dit wel te gaan doen? Motiveer uw antwoord aan de hand van de huidige wettelijke dosislimiet voor de ooglenzen van 150 mSv/jaar en de limiet voor de ooglenzen van 20 mSv/jaar uit de nieuwe Europese Basisnormen. De badgeuitslag $H_p(10)$ mag in dit geval als goede schatter voor de ooglensdosis worden gebruikt.

Vraagstuk 4 Blootstelling in een cyclotronhal

Op het moment dat een cyclotron in bedrijf is, wordt door activering van de lucht een aantal relatief kortlevende radionucliden gevormd, die vervolgens via het ventilatiesysteem naar buiten worden afgevoerd. In dit vraagstuk wordt onderzocht wat de stralingshygiënische gevolgen zijn voor werknemers die zich in de cyclotronhal of in één van de bestralingsruimtes bevinden.

Gegevens:

- **Tabel 1**, op pagina 11: Een overzicht van de jaarlijkse activiteitslozing per nuclide
- De activiteitsconcentratie in de geloosde lucht is constant gedurende de uren dat het cyclotron in bedrijf is.
- Gedurende de uren dat het cyclotron in bedrijf is, mag de gemiddelde activiteitsconcentratie in de geloosde lucht gelijk worden verondersteld aan die in de cyclotronhal.
- De activiteitsconcentratie van ^{15}O is bepalend voor de totale activiteitsconcentratie.
- Het debiet van de ventilatie in de cyclotronhal bedraagt $24.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.
- Het cyclotron is 24 uur per dag, 5 dagen per week, en 50 weken per jaar in bedrijf.
- De volledige werktijd van een werknemer bedraagt 2000 h per jaar.
- Volgens het submersiemodel wordt de geabsorbeerde dosis D_T (in Gy) in orgaan T gegeven door de uitdrukking

$$D_T = 2,5 \cdot 10^{-10} (\text{J} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{h}^{-1}) \sum_i g_{T,i} \times C_i \times E_i \times t \text{ (Gy)}$$

Hierin is g_T de afschermingsfactor voor orgaan T, C de activiteitsconcentratie (in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) in de lucht, E de energie (in MeV per $\text{Bq} \cdot \text{s}$) die per desintegratie vrijkomt, en t de verblijfstijd (in h). De sommatie vindt plaats over alle nucliden (i).

- De bijdrage door inhalatie aan de stralingsbelasting voor werknemers tijdens submersie mag bij de vragen 2 en 3 verwaarloosd worden.

Tabel 1. Jaarlijkse activiteitslozing per nuclide;

- $T_{1/2}$ is de halveringstijd,
- $\langle E_{\beta} \rangle$ de gemiddelde bèta-energie,
- E_{γ} de energie van gamma- of annihilatiestraling per desintegratie en
- A de jaarlijks geloosde activiteit van het betreffende nuclide.

nuclide	$T_{1/2}$ (min)	$\langle E_{\beta} \rangle$ (MeV/(Bq·s))	E_{γ} (MeV/(Bq·s))	A (GBq·j ⁻¹)
¹¹ C	20	0,39	1,02*	180
¹⁵ O	2	0,74	1,02*	1600
¹³ N	10	0,49	1,02*	160
⁴¹ Ar	110	0,46	1,28	50

* Hierbij is rekening gehouden met twee annihilatiefotonen van 0,511 MeV.

Vraag 4.1

Bepaal de activiteitsconcentratie (in kBq·m⁻³) van ¹⁵O.

Vraag 4.2

Bereken de effectieve jaardosis door submersie in lucht met ¹⁵O voor een werknemer die zijn volledige werktijd doorbrengt in de cyclotronhal terwijl het cyclotron in bedrijf is. Ga ervan uit dat alléén fotonenstraling bijdraagt aan de effectieve dosis en dat afscherming van dieper gelegen organen in het lichaam mag worden verwaarloosd (voor g_T mag dus voor alle organen 1 worden genomen).

Indien u het antwoord op vraag 1 schuldig bent gebleven kunt u uitgaan van een activiteitsconcentratie van ¹⁵O van 10 kBq·m⁻³.

Door vraag 2 voor de overige nucliden te herhalen kan men aantonen dat de dosisconsequenties vrijwel volledig worden bepaald door ¹⁵O. De overige nucliden blijven daarom verder buiten beschouwing.

Naast de cyclotronhal bevindt zich een aantal bestralingsruimtes. In deze ruimtes is de ventilatie slechter dan in de hal, waardoor de activiteitsconcentratie in de lucht er veel hoger is. Uit metingen is gebleken dat het omgevingsdosis-equivalenttempo veroorzaakt door ¹⁵O direct na het uitschakelen van de bundel in de bestralingsruimtes waardes kan aannemen tot maximaal 100 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$.

Vraag 4.3

Bereken de maximale activiteitsconcentratie ^{15}O in de lucht binnen de bestralingsruimtes. U mag er hierbij van uitgaan dat het omgevingsdosisequivalent een goede schatter is van de effectieve dosis (door submersie).

Tegen de voorschriften in, betreedt een werknemer een bestralingsruimte onmiddellijk na het uitschakelen van de cyclotronbundel.

Aanvullende gegevens:

- Als de werknemer de bestralingsruimte betreedt, is $\dot{H}^*(10) = 100 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$.
- Volgens ICRP-80 geldt voor *injecties* met ^{15}O een dosisconversiecoëfficiënt van $e(50)_{\text{injectie}} = 9,3\cdot 10^{-13} \text{ Sv Bq}^{-1}$.
- Ongeveer 20% van de ingeademde zuurstof wordt via de longen in het transfercompartiment opgenomen. Dit percentage mag in deze opgave als geïnjecteerde activiteit worden beschouwd.
- De werknemer heeft een ademvolumetempo van $1,4 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.
- De verwijdering van activiteit uit de bestralingsruimte door ventilatie mag bij deze vraag verwaarloosd worden.

U gaat nu een schatting maken zowel van de effectieve volg dosis door inhalatie van ^{15}O als van de effectieve dosis door uitwendige bestraling door ^{15}O .

Vraag 4.4

Toon door berekening aan dat de *maximale* effectieve volg dosis door inhalatie van ^{15}O ten gevolge van het voortijdig betreden van de bestralingsruimte verwaarloosbaar is ten opzichte van de effectieve dosis door uitwendige bestraling door dit radionuclide.

Indien u het antwoord op vraag 3 schuldig bent gebleven, kunt u uitgaan van een maximale activiteitsconcentratie van ^{15}O van $500 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.