

Gecoördineerd examen stralingsbescherming Deskundigheidsniveau 3

Nuclear Research and Consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave/IRS-stralingsbeschermingscursussen	BHC/IRS
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboud Universiteit/ UMC St.Radboud	RU/UMC

examendatum: 14 mei 2007
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- ❑ **Deze examenopgaven omvatten 11 genummerde pagina's. Wilt u dit controleren!**
- ❑ Er is een vel met enkellogaritmisch grafiekenpapier bijgevoegd.
- ❑ Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Ook alle niet gebruikte uitwerkbladen en het grafiekenpapier 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 : 17 punten
 - vraagstuk 2 : 17 punten
 - vraagstuk 3 : 17 punten
 - vraagstuk 4 : 16 punten

Vraagstuk 1 Oppervlaktebesmetting

In een radionuclidenlaboratorium wordt gewerkt met de gammastralers ^{125}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en ^{51}Cr . Op een dag wordt een besmetting ontdekt op de vloer. Met een monitor met een dun NaI-kristal (diameter 2,5 cm) wordt bruto 2419 cps gemeten. Met een 1 mm dik plaatje lood tussen de besmetting en de detector meet men bruto 85 cps. Een meting op een schoon deel van de vloer levert 10 cps. Zie onderstaande tabel 1 voor verdere gegevens.

Tabel 1 Halveringstijd en -dikte en energie van de uitgezonden gammastraling (met tussen haakjes de emissiewaarschijnlijkheid)

nuclide	$T_{1/2}$	$d_{1/2}$ (mm lood)	E_{γ} (MeV)
^{125}I	60 dagen	0,02	0,03 (147%)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 uur	0,2	0,140 (90%)
^{51}Cr	28 dagen	2	0,320 (10%)

Vraag 1

Welk nuclide zit in de besmetting? Veronderstel dat de besmetting uit één nuclide bestaat. Beargumenteer uw antwoord.

De besmetting wordt zo goed mogelijk schoongemaakt. Desondanks is na het schoonmaken op een gebied van $10 \times 10 \text{ cm}^2$ nog activiteit te meten. Op 5 cm afstand boven dit oppervlak is het bruto teltempo 25 cps. Van de monitor is het detectierendement voor het betreffende nuclide onbekend. Om een indruk te krijgen van de activiteit van de besmetting wordt de monitor op 5 cm afstand van een druppeltje van een bekende oplossing van het betreffende nuclide gehouden. De oplossing bevat op dat moment 2,4 MBq. Het netto teltempo is 950 cps.

Vraag 2

Bereken het detectierendement van de monitor (in cps/Bq) in deze geometrie.

Vraag 3a

Maak een schatting van de resterende activiteit van het besmette oppervlak, uitgedrukt in Bq/cm^2 .

Vraag 3b

Verwacht u een overschatting of een onderschatting van de oppervlaktebesmetting (Bq/cm^2), zoals geschat bij vraag 3a? Motiveer uw antwoord.

Vraag 4

Bereken de absolute fout (1 standaarddeviatie) in de oppervlaktebesmetting, uitgedrukt in Bq/cm^2 (vraag 3a). Veronderstel hierbij een meettijd van vijf seconden voor zowel het bruto als het achtergrondteltempo en verwaarloos de fout in het berekende detectierendement.

Vraagstuk 2 Afscherming van een 15 MV lineaire versneller

Een ziekenhuis is voornemens een extra lineaire versneller te plaatsen om in de toekomst meer patiënten te kunnen behandelen. Om patiënten optimaal te kunnen behandelen wordt gekozen voor een lineaire versneller die maximaal 15MeV-fotonen kan produceren. De handelingen met de lineaire versneller zullen plaatsvinden in een nog te bouwen bestralingsbunker. Gemakshalve wordt ervoor gekozen het ontwerp te gebruiken van een bestralingsbunker die in het verleden is gebouwd. Voor dit ontwerp moet gecontroleerd worden of de afscherming voldoende is.

De afschermingfactor van het beton en van het staal wordt uitgedrukt in “tenth-value thickness”. De “tenth-value thickness” is de dikte van het materiaal die nodig is om het dosistempo van de bundel tot 10% van het oorspronkelijke dosistempo te verlagen. De “tenth-value thickness” heeft betrekking op een brede bundel en bevat dus tevens de opbouwfactor.

Voor het behandelen van de patiënten wordt gewerkt met een punt waarop de geabsorbeerde dosis bekend is. Dit punt noemt met het isocentrum (I). De locatie van dit punt blijft onveranderd gedurende alle behandelingen. De versneller kan in elke hoek ten opzichte van de patiënt worden ingesteld. Hierbij draait het target op vaste afstand tot het isocentrum rond de patiënt.

Verdere gegevens:

- Tenth-value thickness beton voor 15MV-versneller = 41 cm;
- Tenth-value thickness staal 15MV-versneller = 11 cm;
- Situatieschets zie bijlage 1;
- Het isocentrum ligt op 1 meter afstand van het target;
- Geabsorbeerd dosistempo in isocentrum (I) = 1000 Gy/week;
- Indien nodig mogen de transmissies van diverse materialen met elkaar worden vermenigvuldigd om de totale transmissie te bepalen;
- Conversiefactor van geabsorbeerde dosis naar omgevingsdosisequivalent = 1 Sv/Gy;
- In dit vraagstuk mogen effectieve dosis en omgevingsequivalent numeriek aan elkaar gelijk worden gesteld.

De ruimten aan de buitenzijde van de muren van de bunker zijn ruimten waar bezoekers kunnen verblijven. De terreingrens ligt op grote afstand tot de bunker en kan tijdens de berekeningen buiten beschouwing worden gelaten.

Vraag 1

Bepaal uit de wettelijke jaarlimiet het maximaal toegestane omgevingsdosisequivalent per week aan de buitenzijde van de muren.

In 25% procent van het totaal aantal bestralingen is de primaire bundel geprojecteerd in de richting van punt A. De maximale veldgrootte is kleiner dan de maximale breedte van het staal.

Vraag 2

Toon door middel van een berekening aan of de afscherming ter hoogte van punt A voldoet. Bij de berekening hoeft alleen rekening te worden gehouden met de bijdrage van de primaire bundel.

Naast de 15MeV-fotonen worden er in en rond het target van de versneller neutronen geproduceerd. Het omgevingsdosisequivalent ten gevolge van de neutronen in de versnellerruimte neemt kwadratisch af met de afstand tot het target en bedraagt in het isocentrum 0,7 mSv bij 1 Gy fotonenstraling.

Vraag 3a

Bereken de bijdrage aan het omgevingsdosisequivalenttempo (mSv/week) ter hoogte van het isocentrum (I) ten gevolge van de neutronen.

Vraag 3b

Bereken de bijdrage aan het omgevingsdosisequivalenttempo (mSv/week) ter hoogte van het punt B. Ga er vanuit dat alle neutronen geproduceerd worden in het target en verwaarloos absorptie in de targethouder.

De bijdrage van de verstrooide neutronen aan het omgevingsdosisequivalenttempo ter hoogte van het uiteinde van het labrynt (punt C) wordt berekend met de formule:

$$\dot{H}_{n,C} = \dot{H}_{n,B} \times 10^{\frac{-d_{B,C}}{5(m)}}$$

Waarin:

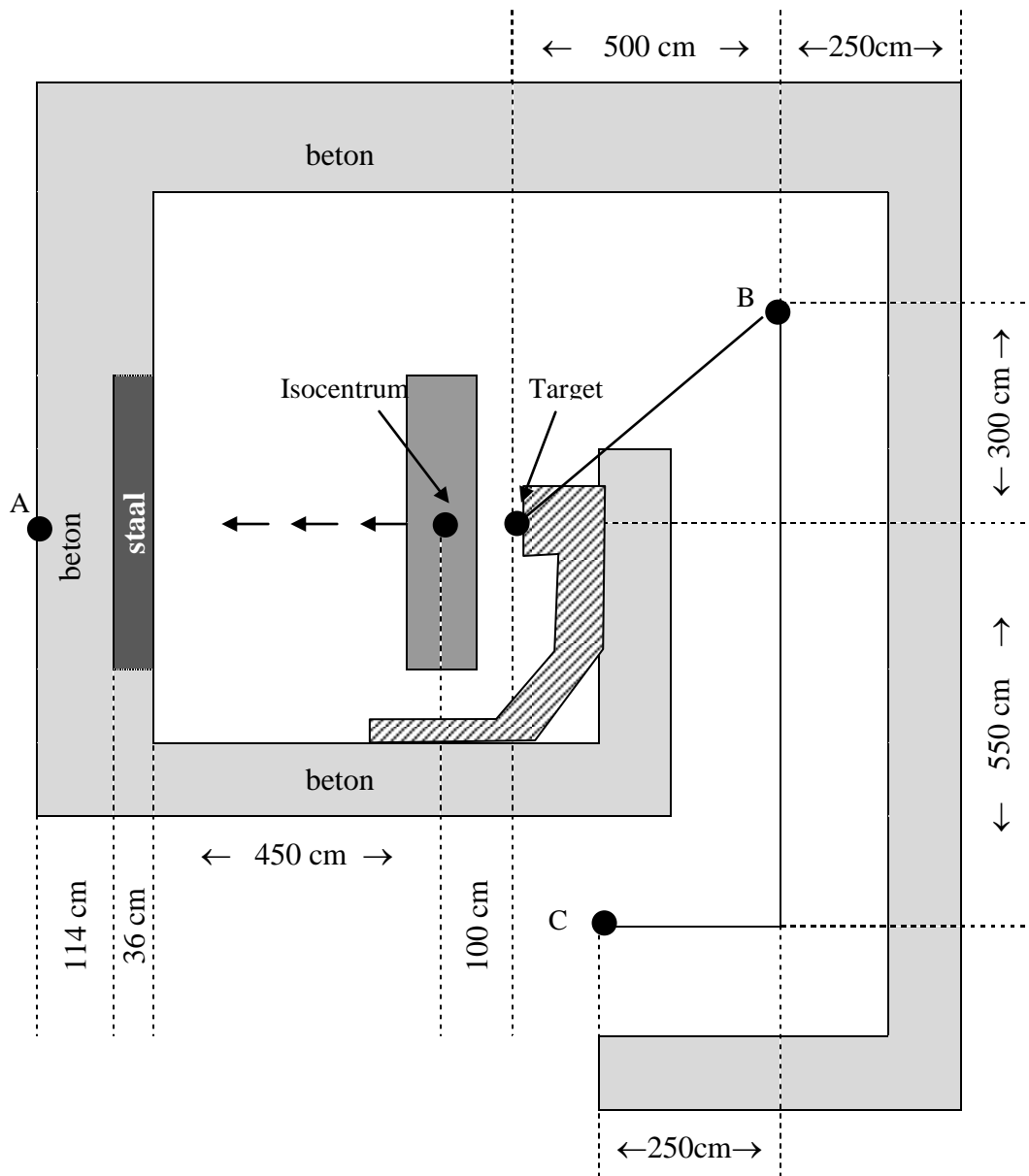
$\dot{H}_{n,C}$ = Omgevingsdosisequivalenttempo ten gevolge van neutronen bij het uiteinde van het labrynt (punt C);

$\dot{H}_{n,B}$ = Omgevingsdosisequivalenttempo ten gevolge van neutronen in punt B;

$d_{B,C}$ = Afstand punt B tot punt C (meter).

Vraag 4

Bepaal door middel van een berekening of de lengte van het labrynt voldoende is om het equivalente dosistempo door neutronen te verlagen tot onder de afgeleide wecklimiet uit vraag 1. Voor het berekenen van de lengte wordt steeds het midden van het labrynt gekozen, in de situatieschets weergegeven als een ononderbroken lijn. De bijdrage ten gevolge van (verstrooide) fotonenstraling mag worden verwaarloosd.



Figuur 1: Situatieschets

Bovenaanzicht van de bunker. De vermelde afstanden zijn de afstanden tussen de stippelijnen.

Vraagstuk 3 Bèta-lights als vluchtwegaanduiding

In Nederland worden zogenaamde bèta-lights verkocht die als noodverlichting of vluchtwegaanduiding in o.a. openbare gebouwen worden gebruikt. Deze bèta-lights bevatten elk 800 GBq tritiumgas (HT). In opdracht van een detailhandelaar wordt u als stralingsdeskundige gevraagd een schatting te maken van de maximale stralingsbelasting in geval activiteit uit deze bèta-lights vrijkomt. U beschouwt daartoe het volgende scenario:

Tijdens sloopwerkzaamheden in een niet geventileerd magazijn met een volume van 500 m^3 wordt 1 bèta-light zodanig vernield dat al het tritiumgas in de ruimte vrijkomt en zich direct homogeen verspreidt in de ruimte. Een werknemer van een sloopbedrijf bevindt zich hierna nog acht uur in deze ruimte.

Gegevens:

- Handboek Radionucliden, pag. 20 en 21; n.b. de door tritium uitgezonden β -deeltjes hebben een gemiddelde energie van 5,7 keV;
- de dosisconversiecoëfficiënt na inwendige besmetting door inhalatie van tritiumgas bedraagt $e_{\text{inh}}(50) = 1,8 \cdot 10^{-15} \text{ Sv Bq}^{-1}$ (ICRP-publicatie 68, pag. 75);
- het ademvolumedebiet van de betrokken werknemer mag worden gesteld op $1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$;
- vanwege opname door de huid is het opnametempo van getritieerde waterdamp via huid en longen in totaal $1,8 \text{ Bq h}^{-1}$ per Bq m^{-3} ;
- de inhoud van de longen van de referentiemens bedraagt volgens ICRP-publicatie 23 gemiddeld $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$;
- de massa van de longen van de referentiemens bedraagt 1,0 kg;
- de weefselweegfactor voor de longen is $w_{\text{long}} = 0,12$.

Vraag 1

Bereken de effectieve volgdosis voor de werknemer van het sloopbedrijf ten gevolge van de inwendige besmetting met tritiumgas.

Vraag 2a

Bereken het aantal desintegraties van het tritiumgas in de longen van de werknemer van het sloopbedrijf.

Vraag 2b

Bereken nu voor dit scenario de maximaal mogelijke geabsorbeerde dosis in de longen van deze werknemer ten gevolge van bèta-verval van tritiumgas. Ga daarbij uit van de veronderstelling dat alle afgegeven energie in het longweefsel wordt gedeponeerd.

Op basis van het antwoord bij vraag 2b kan een bovengrens voor de effectieve dosis voor deze werknemer tengevolge van de bestraling van de longen worden berekend.

Vraag 3

Bereken deze bovengrens voor de effectieve dosis voor de werknemer van het sloopbedrijf.

In geval van brand is het mogelijk dat meerdere bèta-lights kapot gaan. Ga uit van het volgende worst-case scenario:

Tijdens een korte felle brand in hetzelfde magazijn verbrandt de totale voorraad van 500 bèta-lights. Tengevolge hiervan komt al het tritium vrij. Door de hoge temperatuur reageert het tritiumgas onmiddellijk met zuurstof tot *waterdamp*, waarvan wordt verondersteld dat het zich direct homogeen in de ruimte verspreidt. Een medewerker van de bedrijfshulpverlening bestrijdt gedurende 3 minuten het vuur in deze ruimte. De betrokken medewerker maakt geen gebruik van adembescherming.

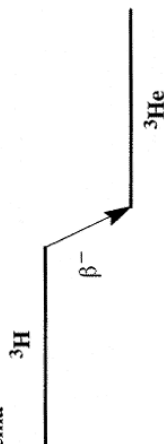
Vraag 4

Bereken de effectieve volgdosis voor de bedrijfshulpverlener ten gevolge van de inwendige besmetting met getritieerde waterdamp.

^3H **$Z=1$** **$N=2$** **^3H** **Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 12,35 \text{ j} = 3,89 \times 10^8 \text{ s}$$

$$\lambda = 1,78 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema**Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	γ ($\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$)	E (keV)
β^-	1,000	5,7

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 3,57 \times 10^{17} \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
Radiotoxiciteit	Laag (4)
Vrijstellingsgrenzen	$10^6 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ en 10^9 Bq
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} < 1 \times 10^{-14} \text{ Sv}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{cm}^2$
Wondbesmetting	$e(50) = 1,7 \times 10^{-11} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$
Vervoer	$A_1 = 40 \text{ TBq}$ $A_2 = 40 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Tritium wordt geproduceerd door bestraling van lithium met neutronen: $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$. Op natuurlijke wijze ontstaat ook tritium. Het wordt gevormd in de buitenste lagen van de atmosfeer, door interactie van kosmische straling met stikstof, voornamelijk via de reactie $^{14}\text{N}(n,\beta)^3\text{H}$. Zodoende komt tritium voor in de biosfeer: de tritium-concentratie in zeewater ten gevolge van het natuurlijke tritium bedraagt 0,1–1 Bq/l. De tritiuminventaris van de gehele aarde wordt geschat op 1–2 EBq. Door proeven met thermonucleaire explosies in de atmosfeer is hieraan inmiddels ongeveer 200 EBq toegevoegd. Elk persoon bevat hierdoor 100 Bq tritium. Van de vele toepassingen van tritium zijn de volgende het belangrijkste:

- tritium-houdende trefplaat voor neutronengenerator via D,T-reactie;
- als lichtbron (o.a. EXIT-bord en horloge); β -light;
- als grondstof voor thermonucleaire reactie (waterstofbomb)
- als merker van biologische verbindingen, o.a. voor geneesmiddelenonderzoek
- als merker bij geologische onderzoeken, o.a. bij olie-exploratie
- als bron in een electroncapture-detector.

Inwendige besmetting

Metabolisch model.

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat tritium in de vorm van water bij inhalatie en ingestie volledig en instantaan in het lichaam wordt opgenomen. Verder kan het via de intacte huid worden opgenomen.

De biologische halveringstijd voor alle organen/weefsels wordt gesteld op:

Water	$T_{1/2}$	Organisch	$T_{1/2}$
97%	10 d	50%	10 d
3%	40 d	50%	40 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie

Alle verbindingen

$$f_1 = 1$$

Inhalatie

Oxide (waterdamp)

Bij een ademhalingsdebiet van $1,2 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ en een concentratie van $C \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ geldt een inname van $1,8 C \text{ Bq}\cdot\text{h}^{-1}$ (door verrekking van de opname via de huid).

Dosisconversiecoëfficiënten na inwendige besmetting

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie
$e(50)$ (Sv/Bq)	$1,8 \times 10^{-11}$	Damp	Organisch
RE (Bq)	6×10^{10}	$1,8 \times 10^{-11}$	$4,1 \times 10^{-11}$
		6×10^{10}	2×10^{10}

Gegevens voor urine-analyse

Eenmalige inname		Urine-uitscheidingsconcentratie (Bq/l per Bq inname)	
Tijd (d)			
1	$2,2 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$
2	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$
3	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$
5	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$
7	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-3}$
Continue inname		14	42
$\text{Bq}/(\text{Bq}\cdot\text{d}^{-1})$		4×10^{-10}	$4,4 \times 10^{-10}$
$\text{Sv}\cdot\text{j}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$			

Vraagstuk 4 Embryo-dosis bij een röntgenonderzoek

Een stralingsbeschermingsdeskundige wordt geraadpleegd over het volgende voorval. Een vrouw heeft een röntgenonderzoek van de onderbuik ondergaan. Zij meldt 6 maanden later dat ze ten tijde van het onderzoek ongeveer 1 week zwanger was. De deskundige wordt gevraagd een beoordeling te maken van de geabsorbeerde dosis op het embryo, gebaseerd op meetgegevens van de periodieke kwaliteitscontrole van het gebruikte röntgenapparaat. Deze kwaliteitscontrole vond kort voor het patiëntonderzoek plaats.

Gegevens van de periodieke kwaliteitscontrole

Hoogspanning röntgenapparaat: 80 kVp

Vaste filtering: 2 mm Al

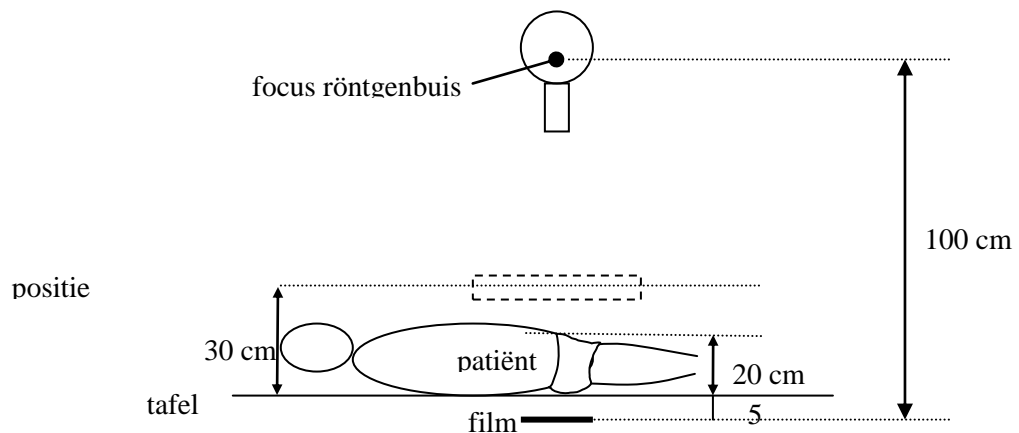
Product van bundelstroom en bestralingstijd = 30 mA·s

Uitkomsten luchtkermametingen met een ionisatiekamer, gemeten op 30 cm boven de tafel:

0 mm Al-absorber toegevoegd tussen kamer en buis:	5 mGy
2,5 mm Al-absorber toegevoegd tussen kamer en buis:	2,8 mGy
4,5 mm Al-absorber toegevoegd tussen kamer en buis:	1,8 mGy

Gegevens van de patiënt en het röntgenonderzoek

- Hoogspanning röntgenapparaat: 80 kVp
- Vaste filtering: 2 mm Al
- Product van bundelstroom en bestralingstijd = 30 mA·s
- Afstand focus röntgenbuis – film = 100 cm
- Afmetingen stralingsveld op 100 cm van het focus van de buis: 35 cm × 40 cm
- De film bevindt zich 5 cm onder de bovenkant van de tafel.
- Dikte abdomen (onderbuik) van de patiënt 20 cm
- Er zijn twee opnamen gemaakt, een anterior-posterior (AP) en een posterior-anterior (PA)
- Tabel 1 met omrekeningsfactoren voor de embryodosis in μGy per mGy intree-huidosis vrij-in-lucht.



Figuur 1. Schematisch overzicht van de opstelling

Tabel 1. Embryodosis in μGy per mGy intree-huiddosis vrij-in-lucht

Bundelkwaliteit		Dosis ¹⁾ ($\mu\text{Gy}/\text{mGy}$)					
HVL (mm Al) =		1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Embryo	AP	133	199	265	330	392	451
	PA	56	90	130	174	222	273
	LAT	13	23	37	53	71	91

¹⁾ Bij een röntgenstralingsveld $35\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ op 100 cm van het focus van de buis

Vraag 1

De stralings- of bundelkwaliteit van een röntgenbundel is gedefinieerd als de eerste halveringsdikte (*Half Value Layer*) in aluminium. Bepaal de bundelkwaliteit (HVL) in mm Al tijdens de periodieke kwaliteitscontrole. Bij deze bepaling mag gebruik worden gemaakt van het bijgevoegde enkel-logaritmische grafiekpapier.

Vraag 2

Bepaal de intree-huiddosis vrij-in-lucht ten gevolge van één röntgenopname.

Vraag 3

Bepaal de totale geabsorbeerde dosis in het embryo ten gevolge van de beide opnamen.

Vraag 4

Wat zijn de mogelijke gevolgen voor het embryo door dit onderzoek?