

## Gecoördineerd examen stralingsbescherming Deskundigheidsniveau 3

---

Nuclear Research and Consultancy Group  
Technische Universiteit Delft  
Boerhaave/IRS-stralingsbeschermingscursussen  
Rijksuniversiteit Groningen  
Radboud Universiteit/ UMC St.Radboud

NRG  
TUD  
BHC/IRS  
RUG  
RU/UMC

---

examendatum: 16 mei 2011  
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

<b>Instructie:</b>
--------------------

- Deze examenopgaven omvatten 16 genummerde pagina's. Wilt u dit controleren!**
- Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Ook alle niet gebruikte uitwerkbladen en het grafiekpapier 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 documentatie-materiaal 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: 18 punten
  - Vraagstuk 4: 16 punten

## Vraagstuk 1      Borstkanker

Borstkanker is de meest voorkomende soort kanker in Nederland. Door middel van bevolkingsonderzoek wordt geprobeerd borstkanker in een vroeg stadium op te sporen. Ieder jaar worden 800.000 vrouwen van 50 tot en met 75 jaar onderworpen aan een röntgenonderzoek (mammografie). Tijdens het onderzoek maakt de laborante twee röntgenfoto's per borst (mammogram). Een vrouwenborst bevat klier- en vetweefsel. Voor de dosimetrie is alleen het klierweefsel van belang.

### Gegevens:

*Technische gegevens röntgentoestel voor mammografie:*

- Buisstroom: 140 mA
- Buisspanning: 35 kV
- Anode materiaal: molybdeen
- Filter: 0,03 mm molybdeen
- Belichtingstijd (Bestralingsduur per foto): 200 ms
- **Figuur 1: Mammograaf (röntgentoestel voor borstonderzoek)**
- **Tabel 1: Kans op een fatale kanker in een bevolking van alle leeftijden na een blootstelling aan een lage dosis. (Ontleend aan ICRP-report 60, Annex B, Tabel B17).**
- **Figuur 2: Intreeluchtkerma in  $\mu\text{Gy}$  per mAs als functie van de buisspanning in kV van een röntgenbuis met molybdeenanode en 0,03 mm molybdeenfilter.**
- **Figuur 3: Totale massieke energieverliesdoorsnede van elektronen in verschillende materialen.**



**Figuur 1** Mammograaf (röntgentoestel voor borstonderzoek)

### Vraag 1

Bepaal de gemiddelde geabsorbeerde dosis in het klierweefsel per foto.

Gebruik hiervoor formule:  $\text{MGD} = K \times g$

MGD = Mean Glandular Dose = gemiddelde geabsorbeerde dosis in klierweefsel (mGy)

K= Intreeluchtkerma (mGy)

$g = (\text{gemiddelde geabsorbeerde weefseldosis}) / (\text{luchtkerma})$  (in (mGy/mGy));

voor de gemiddelde vrouw geldt:  $g = 0,17 \text{ mGy/mGy}$  bij 0,03 mm Mo-filtering

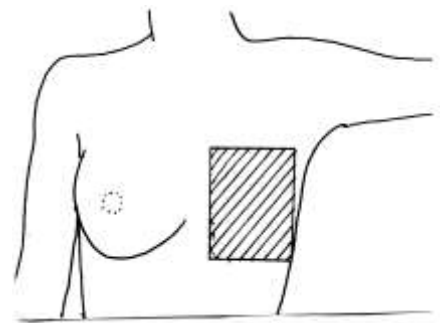
**Vraag 2**

Stel dat alle leden in een bevolkingsgroep van alle leeftijden worden blootgesteld aan het hierboven beschreven borstsonderzoek. Schat dan op basis van de gegevens in tabel 1 het gemiddelde risico op een fatale borstkanker bij een individu van die bevolkingsgroep. (Indien u het antwoord op vraag 1 schuldig bent gebleven, kunt u uitgaan van een gemiddelde dosis in klierweefsel van 0,3 mGy per foto)

Van de onderzochte vrouwen blijkt 0,7% daadwerkelijk borstkanker te hebben. Een veel voorkomende behandelmethode van borstkanker is uitwendige bestraling met fotonen (radiotherapie).

Als aanvulling op de uitwendige bestraling met fotonen, kan ook nog een bestraling met elektronen ( $E_{\text{elektronen}} = 8 \text{ MeV}$ ) plaatsvinden. In dit geval gebeurt dat gedurende 6 minuten per dag, 5 dagen per week en 7 weken lang.

De uittredende bundel bevat  $3,5 \cdot 10^9$  elektronen per seconde. Deze elektronen worden verspreid over een veldoppervlak van 12 cm x 17 cm. Neem hierbij aan dat er geen energieverlies optreedt tussen uittredende bundel en de huid van de patiënt.



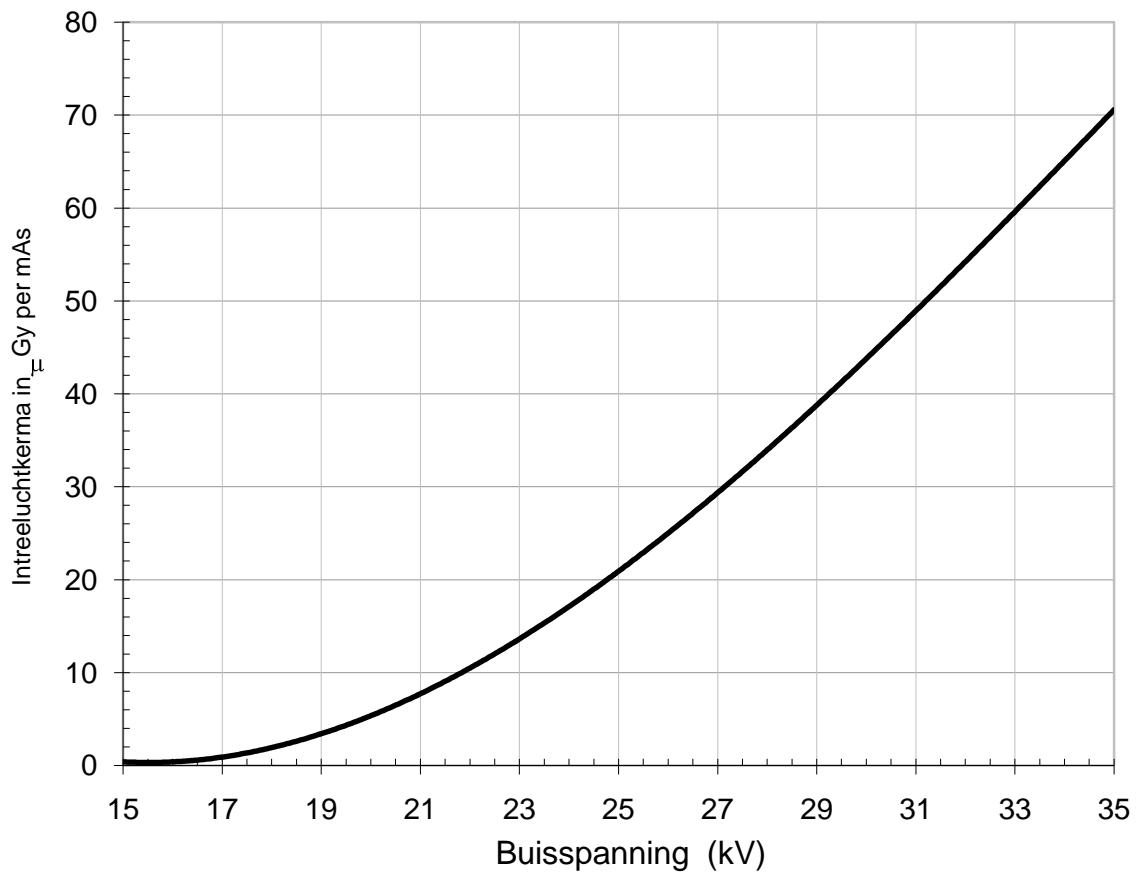
*Schematisch overzicht van elektronenbestraling met gearceerd elektronenveld*

**Vraag 3**

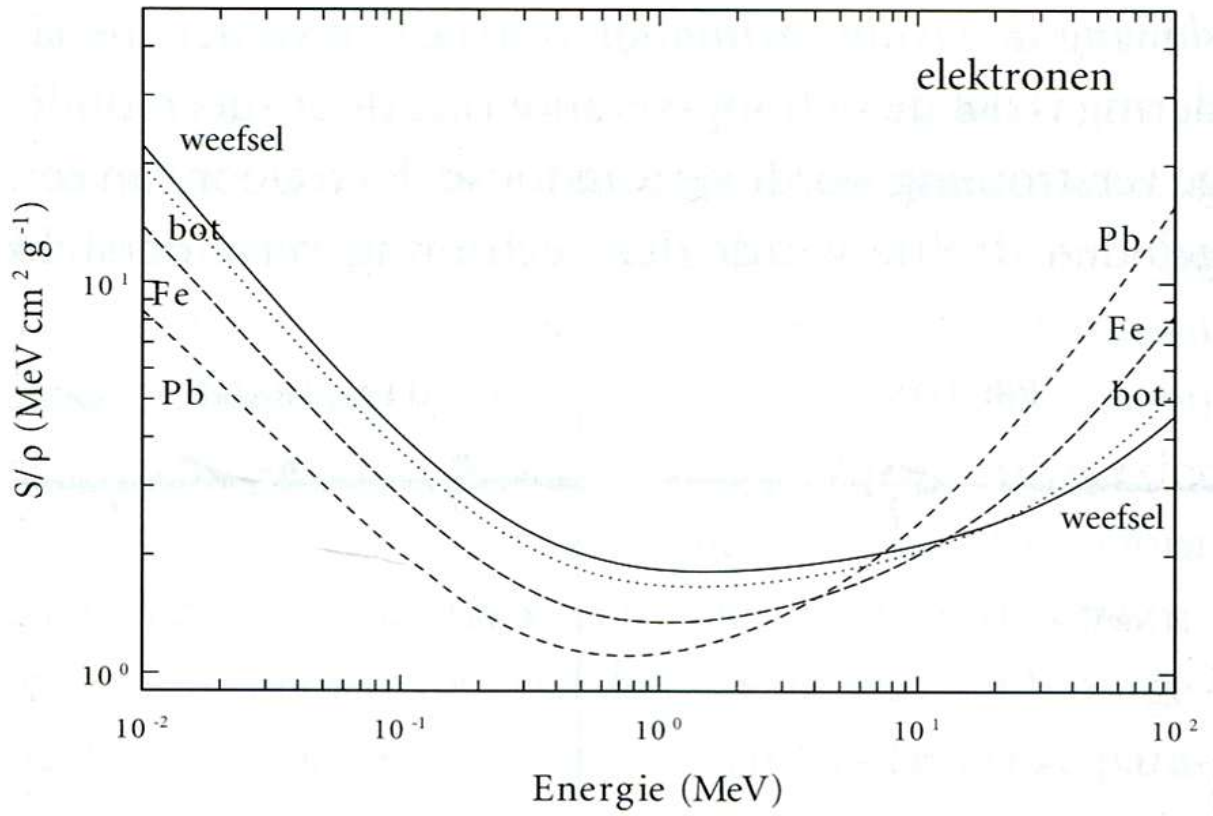
Kan er bij deze behandeling met elektronen huiderythem ontstaan? Verklaar dit aan de hand van een berekening. Ga uit van een drempeldosis voor huiderythem van 30 Gy (bij gefractioneerde bestraling).

**Tabel 1:** Kans op een fatale kanker in een bevolking van alle leeftijden na een blootstelling aan een lage dosis. (Ontleend aan ICRP-report 60, Annex B, Tabel B17).

Orgaan/ weefsel	Kans op fatale kanker F ( $10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$ )
Blaas	30
Borst	20
Botoppervlak	5
Dikke darm	85
Eierstokken	10
Huid	2
Lever	15
Longen	85
Maag	110
Rode beenmerg	50
Schildklier	8
Slokdarm	30
Gonaden	
Rest	50
Totaal	500



**Figuur 2:** Intreeluchtkerma in  $\mu\text{Gy per mAs}$  als functie van de buisspanning in  $\text{kV}$  van een röntgenbuis met molybdeenanode en  $0,03 \text{ mm}$  molybdeenfilter.



**Figuur 3:** Totale massieke energieverliesdoorsnede van elektronen in verschillende materialen.

## Vraagstuk 2      Besmettingsincident in een radionuclidenlaboratorium

Op zekere dag wordt in een radionuclidenlaboratorium een ernstige besmetting op één van de werktafels geconstateerd. In dit laboratorium wordt gewerkt met een viertal radionucliden in verspreidbare vorm:  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  en  $^{137}\text{Cs}$ . Nader onderzoek met een draagbare NaI(Tl)-monitor wijst uit dat het om een puntvormige besmetting gaat. Een meting gedurende 10 minuten levert het gammaspectrum dat is weergegeven in figuur 1. Aan weerszijden van de piek wordt een marker geplaatst, waarna de veelkanaalsanalysator automatisch de netto-inhoud tussen de beide markers berekent. Deze blijkt 18 750 telpulsen te bedragen.

### Gegevens:

- De bijdrage van de achtergrond aan het gammaspectrum in figuur 1 mag verwaarloosd worden.
  - Tabel 1: energie en emissierendement (*yield*) van de fotonen die door de gebruikte radionucliden worden uitgezonden.
  - Figuur 1. Energiespectrum gemeten met een NaI(Tl)-monitor en gecorrigeerd voor achtergrond. De teltijd bedroeg 10 minuten. Vertikaal: gemeten aantal telpulsen (willekeurige lineaire schaal); horizontaal: kanaalnummer.
  - Figuur 2: Energiekalibratie. Horizontaal: gamma-energie (in keV); vertikaal: kanaalnummer.
- Figuur 3: het telrendement als functie van de fotonenergie voor de gebruikte meetsituatie. Het telrendement is hier gedefinieerd als de verhouding van het aantal geregistreerde telpulsen per seconde en het aantal fotonen dat per seconde door de bron wordt uitgezonden.

### Vraag 1

Uit welk(e) radionuclide(n) bestaat de besmetting? Beredeneer uw antwoord.

### Vraag 2

Bereken de activiteit van de besmetting.

De besmetting wordt zo goed mogelijk opgeruimd en vervolgens wordt nogmaals gedurende 10 minuten een gammaspectrum gemeten. Dit keer bedraagt de netto inhoud tussen de beide markers 1 572 telpulsen.

### Vraag 3

Bereken i) de activiteit van de resterende besmetting en ii) de standaarddeviatie hierin.

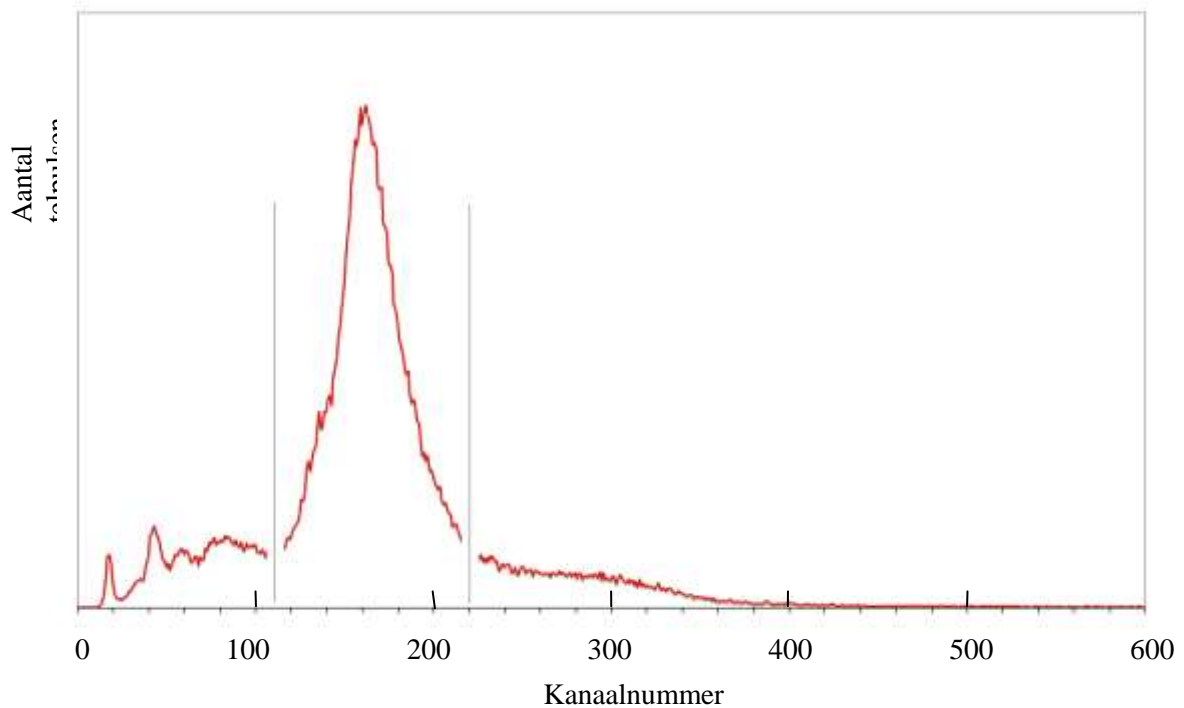
Voor de zekerheid wordt de restbesmetting nogmaals bepaald met behulp van een besmettingsmonitor met groot oppervlak ( $100\text{ cm}^2$ ). Het bruto teltempo blijkt 35 telpulsen per seconde (tps) te bedragen bij een achtergrond van 25 tps.

**Aanvullend gegeven:**

- U mag er bij beantwoording van de volgende vraag van uitgaan dat 1 tps voor het door u bij vraag 1 bepaalde isotoop overeenkomt met een besmetting van  $0,3 \text{ Bq cm}^{-2}$ .

**Vraag 4**

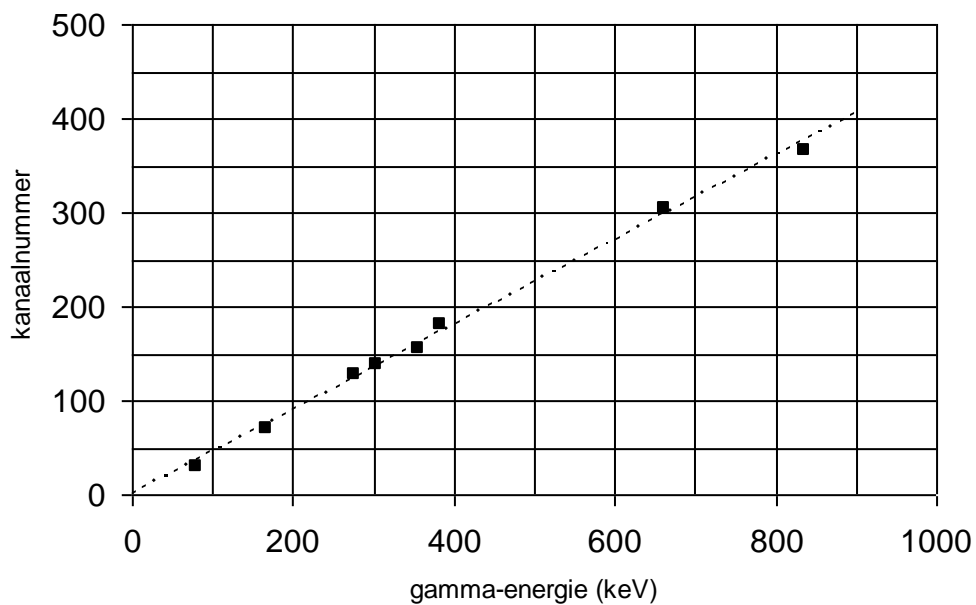
Bereken nogmaals de restactiviteit.



**Figuur 1.** Energiespectrum gemeten met een NaI(Tl)-monitor en gecorrigeerd voor achtergrond. De teltijd bedroeg 10 minuten. Vertikaal: gemeten aantal telpulsen (willekeurige lineaire schaal); horizontaal: kanaalnummer.

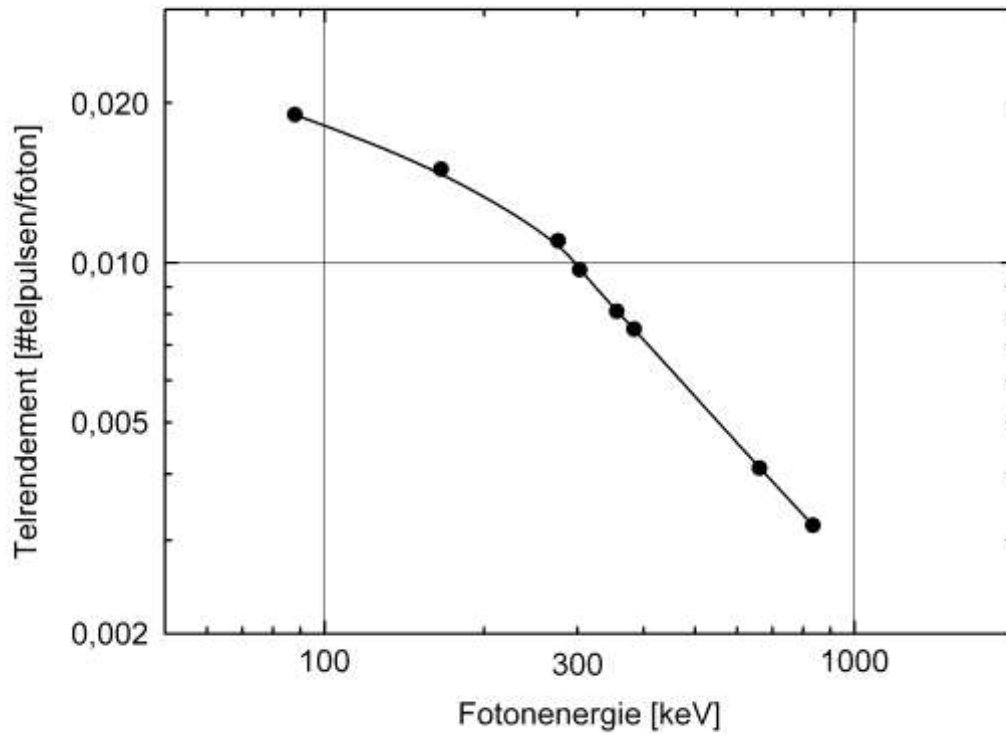
**Tabel 1.** Energie en emissierendement (*yield*) van de fotonen die door de gebruikte radionucliden worden uitgezonden.

radionuclide	$E_\gamma$ (keV)	$f_\gamma$
$^{22}\text{Na}$	511	1,81
	1275	1,00
$^{54}\text{Mn}$	835	1,00
$^{133}\text{Ba}$	81	0,37
	276	0,07
	303	0,18
	356	0,62
	384	0,09
$^{137}\text{Cs}$	662	0,85



**Figuur 2.** Energiekalibratie. Horizontaal: gamma-energie (in keV); vertikaal: kanaalnummer.





**Figuur 3.** het telrendement als functie van de fotonenergie voor de gebruikte meetsituatie. Het telrendement is hier gedefinieerd als de verhouding van het aantal geregistreerde telpulsen per seconde en het aantal fotonen dat per seconde door de bron wordt uitgezonden.

### Vraagstuk 3      Uraniumlozing

Het volgende stukje stond in *Trouw* op 9 juli 2008 :  
(Alleen de relevante passages zijn vermeld)

#### Uranium geloosd in Franse riviertjes

Van onze redactie buitenland

Een lozing van uraniumbevattend water heeft geleid tot een zwem- en visverbod in twee riviertjes in Frankrijk.

[...]

Het water bevatte 12 gram per liter onverrijkt uranium. Dat uranium is maar licht radioactief, maar wel erg giftig. In eerste instantie maakten de autoriteiten bekend dat er dertig kubieke meter water was geloosd, later werd die schatting verlaagd tot ruim zes, zodat er 75 kilogram uranium in het milieu terecht is gekomen.

[...]

#### Gegevens:

- Figuur 1: Uitsnede uit de *Karlsruher Nuklidkarte* (7<sup>e</sup> oplage, 2006, revised printing 2007).
- Dosisconversiecoëfficiënten onverrijkt uranium:  $^{238}\text{U}$  = uranium-238 met kortlevende dochters ( $^{234}\text{Th}$  en  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ) plus  $^{235}\text{U}$  en  $^{234}\text{U}$  voor leden van de bevolking:
  - $e(50)_{\text{inh}} = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$
  - $e(50)_{\text{ing}} = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$
- Tabel 1: Correctiefactoren voor lozingen in water en lucht.
- Tabel 2: Opname van uranium in *Hibiscus esculentus* (okra) bij verschillende bodemconcentraties.

De totale specifieke activiteit van onverrijkt uranium bedraagt  $25,1 \text{ kBq}\cdot\text{g}^{-1}$ . Hieraan wordt bijgedragen door de drie primordials  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  en  $^{238}\text{U}$ . De activiteit van de kortlevende dochters ( $^{234}\text{Th}$  en  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ) van  $^{238}\text{U}$  mag in dit vraagstuk worden verwaarloosd.

### Vraag 1

Bereken de bijdrage in  $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  van het isotoop  $^{234}\text{U}$  aan de specifieke activiteit van onverrijkt uranium met behulp van de gegevens op de nuclidenkaart.

### Vraag 2

Hoeveel voor lozing gewogen radiotoxiciteitsequivalenten natuurlijk uranium zijn er, uitgegaan van de schatting van de autoriteiten, in totaal in het milieu terecht gekomen?

### Vraag 3

Stel dat ondanks het verbod toch iemand in de rivier heeft gezwommen en daarbij een flinke slok (50 ml) van het onverdunde uraniumbevattende water heeft binnengekregen. Wat is de effectieve volg dosis als gevolg van deze inname?

### Vraag 4

Stel dat een nietsvermoedende tuinier zijn moestuin heeft besproeid met water uit de rivier. Als gevolg daarvan is er een extra  $8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  uranium in de bodem beland; de bodem van de moestuin bevatte voor het besproeien  $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  uranium.

Op zijn landje kweekt de tuinier okra (*Hibiscus esculentus*; groente). De opbrengst van zijn oogst is prima, namelijk zo'n 10 kg. De tuinier en zijn vrouw eten ieder zo'n vijf kilo van de geogoste okra (van de okra worden de vruchten gegeten; neem de gemiddelde waarden uit Tabel 2 als uitgangspunt.)

Wat is de volg dosis voor de tuinier als gevolg van het eten van de okra?

**Tabel 1:** Correctiefactoren voor lozingen in water en lucht: factoren om een radiotoxiciteitsequivalent ( $\text{Re}$ ) van een bepaald radionuclide te corrigeren voor de fysische halveringstijd van het betrokken radionuclide, voor lozingen in de lucht, het oppervlaktewater en het open riool.

halveringstijd $T_{1/2}$	correctiefactor (CR) voor lozing in:	
	water ( $\text{CR}_w$ )	lucht ( $\text{CR}_l$ )
$T_{1/2} \leq 5$ dagen	0,001	1
$5 < T_{1/2} \leq 7,5$ dagen	0,01	1
$7,5 < T_{1/2} \leq 15$ dagen	0,1	1
$15$ dagen $< T_{1/2} \leq 25$ jaar	1	1
$25 < T_{1/2} \leq 250$ jaar	10	10
$250$ jaar $< T_{1/2}$	100	100

**Tabel 2:** Opname van uranium in okra bij verschillende bodemconcentraties. (uit: Singh et al., 2005)

Uranium concentratie (mg·kg <sup>-1</sup> )				
Grond	Wortels	Steel	Bladeren	Gemiddelde
2	5,64±0,15	2,90±0,10	0,16±0,02	2,90
10	8,22±0,21	5,6±0,15	1,86±0,08	5,11
50	21,12±0,29	19,10±0,27	8,30±0,17	16,17
100	67,69±0,51	24,80±0,31	10,87±0,20	33,45
200	130,19±0,71	28,44±0,33	21,12±0,28	59,91
400	196,34±0,88	30,16±0,34	22,14±0,28	82,88
800	261,15±1,01	32,69±0,36	29,95±0,33	107,93

U 238.02891	U 234 0.0054	U 235 0.7204	U 236	U 237 6.75 d	U 238 99.2742
$\sigma_{n,\gamma}$ 3.4 $\sigma_f$ 4.2	$2.455 \cdot 10^5$ a $\alpha$ 4.775; 4.723...; sf Mg 28; Ne; $\gamma$ (53; 121...) $e^-$ ; $\sigma$ 98; $\sigma_f$ 0.07	26 m $7.038 \cdot 10^8$ a $\alpha$ 4.398...; sf Ne; $\gamma$ 186... $\sigma$ 95; $\sigma_f$ 588 $e^-$	120 ns $2.342 \cdot 10^7$ a $\alpha$ 4.494; 4.445...; sf; $\gamma$ (49; 113...) $e^-$ ; $\sigma$ 5.1 sf	$\beta^-$ 0.2... $\gamma$ 60; 208... $e^-$ $\sigma \sim 100$ ; $\sigma_f < 0.35$	298 ns $4.468 \cdot 10^9$ a $\beta^-$ 2514; 1879... $\alpha$ 4.198...; sf $29^+$ ; $\gamma$ (50...); $e^-$ $\sigma$ 27; $\sigma_f$ 3E-6

**Figuur 1:** Uitsnede uit de *Karlsruher Nuklidkarte* (7<sup>e</sup> oplage 2006, revised printing 2007)

## Vraagstuk 4 Hartkatheterisatiekamer

In een ziekenhuis wordt een nieuwe hartkatheterisatiekamer ingericht met onder meer een röntgentoestel uitgerust met een gelijkspanningsgenerator. Een verticale doorsnede van deze kamer is gegeven in figuur 1.

De röntgenbuis bevindt zich boven de patiënt. Tussen het röntgentoestel en de bedieningslessenaar bevindt zich een 225 cm hoog loodscherm. Het plafond is van beton.

Strooistraling vanuit de patiënt, zie pijlen in figuur 1, kan zorgen voor additionele stralingsbelasting bij het bedienend personeel. De strooistraling kan direct (pijl 2) of via verstrooiing aan het plafond (pijl 1) het personeel achter de bedieningslessenaar treffen.

Voordat de hartkatheterisatiekamer wordt vrijgegeven voor eerste gebruik, worden door de stralingsbeschermingseenheid strooistralingsmetingen verricht met een mensequivalent fantoom als patiënt. De metingen worden gedaan op één meter afstand vanaf het centrum van het intreeveld punt P op dit fantoom. Uit de metingen wordt berekend of de afscherming voldoende is om in de bedieningsruimte de streefwaarde van 1 mSv/jaar voor de effectieve dosis niet te overschrijden.

### Algemene gegevens:

**Figuur 1:** Verticale doorsnede hartkatheterisatiekamer.

**Figuur 2:** Opbrengst en transmissie van brede röntgenbundels, opgewekt met een gelijkspanningsgenerator.

Snijpunten met de Y-as: 28.7 bij 200 kV, 18.3 bij 150 kV, 9.6 bij 100 kV, 6.1 bij 75 kV, 2.6 bij 50 kV (Ontleend aan ICRP 33).

### Specifieke gegevens:

- De gebruikte buisspanning is 100 kV.
- Het loodscherm bevat 1,5 mm lood.
- De lekstraling door de omhulling van de röntgenbuis mag worden verwaarloosd.
- Per dag wordt er 4 uur gestraald. Een jaar heeft 200 werkdagen. Ga er van uit dat dezelfde werknemer elke werkdag in de bedieningsruimte aanwezig is.
- Het intreeveld punt P op het fantoom bevindt zich 100 cm boven de vloer.
- Tijdens het bestralen van het fantoom wordt in schuin-terugwaartse richting (pijl 1, 45° omhoog) op één meter afstand van het centrum van het intreeveld (punt P) een omgevingsdosisequivalenttempo  $\dot{H}^{*(10)}$  van 4000  $\mu\text{Sv h}^{-1}$  gemeten.
- In de richting van pijl 2 wordt op één meter afstand van punt P een omgevingsdosis-equivalenttempo van 3000  $\mu\text{Sv h}^{-1}$  gemeten.
- Het verstrooiende fantoom mag voor de berekeningen als een puntbron worden beschouwd.
- De afstand van punt P tot punt 4 bedraagt 280 cm. Het hoofd van de medewerker (punt 3) bevindt zich 100 cm onder het plafond.
- De afstand van punt P tot punt 3 (pijlrichting 2) bedraagt 315 cm.

- Een deel van de in de patiënt verstrooide straling (in figuur 1 gesymboliseerd door de grijze bundel) wordt via het plafond verstrooid. De dosisbijdrage van deze verstrooiing aan het plafond bedraagt achter het loodschermbijpunt 3 (hoofdhoogte medewerker) 2,1% van het omgevingsdosisequivalent in punt 4.
- Het omgevingsdosisequivalent,  $H^*(10)$ , is een goede schatter voor de effectieve dosis.
- Voor transmissie-bepaling bij een brede röntgenbundel, gebruikt u figuur 2.

### **Vraag 1**

Bereken  $H^*(10)$  per jaar op hoofdhoogte van de medewerker (punt 3) ten gevolge van de directe stroostraling uit de patiënt (richting pijl 2). Geef een conservatieve schatting door aan te nemen dat de straling loodrecht op het loodschermbijpunt valt.

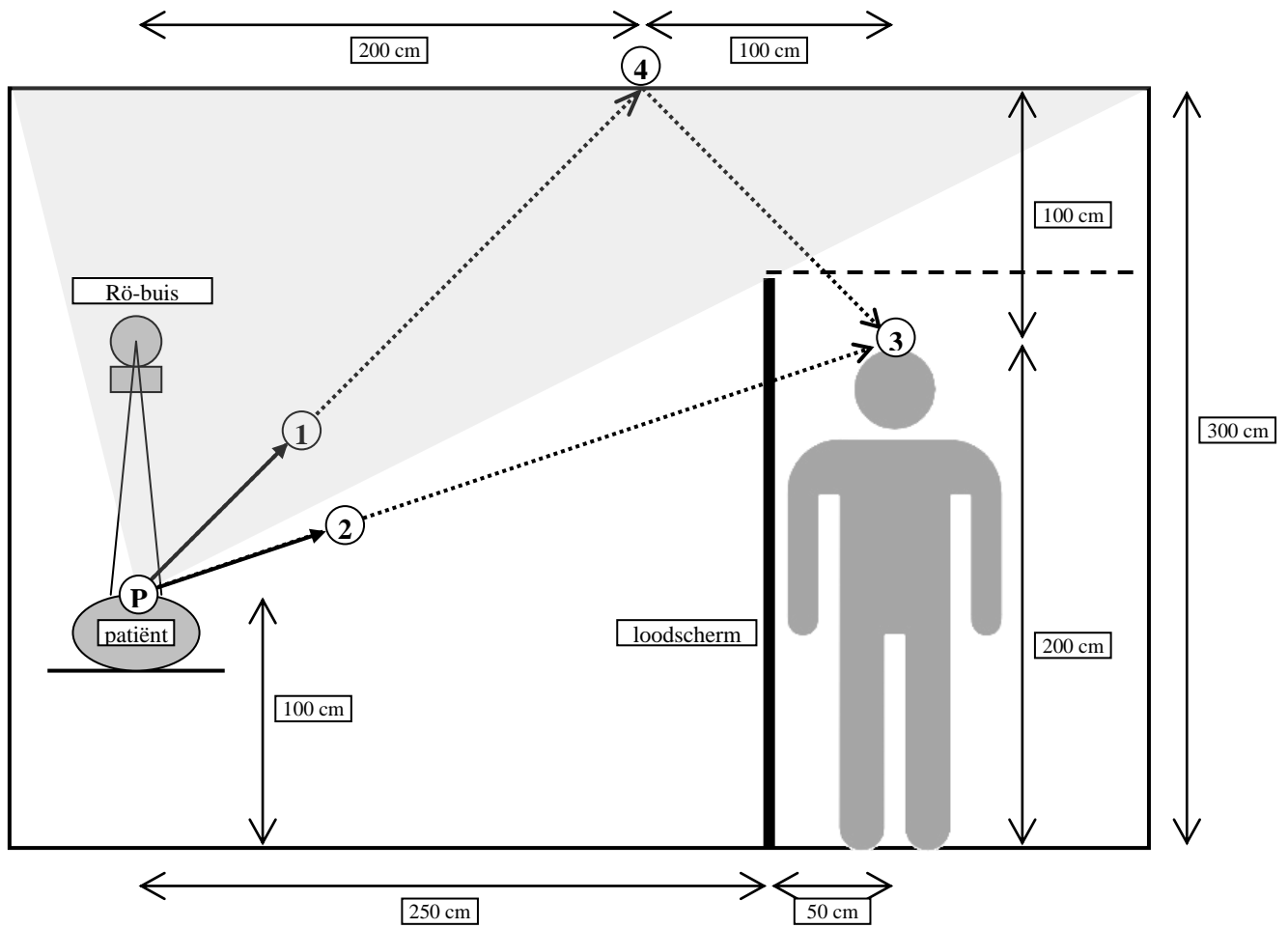
### **Vraag 2**

Bereken  $H^*(10)$  per jaar op hoofdhoogte van de medewerker (punt 3) ten gevolge van de verstrooiing via het plafond van de stroostraling uit de patiënt.

### **Vraag 3**

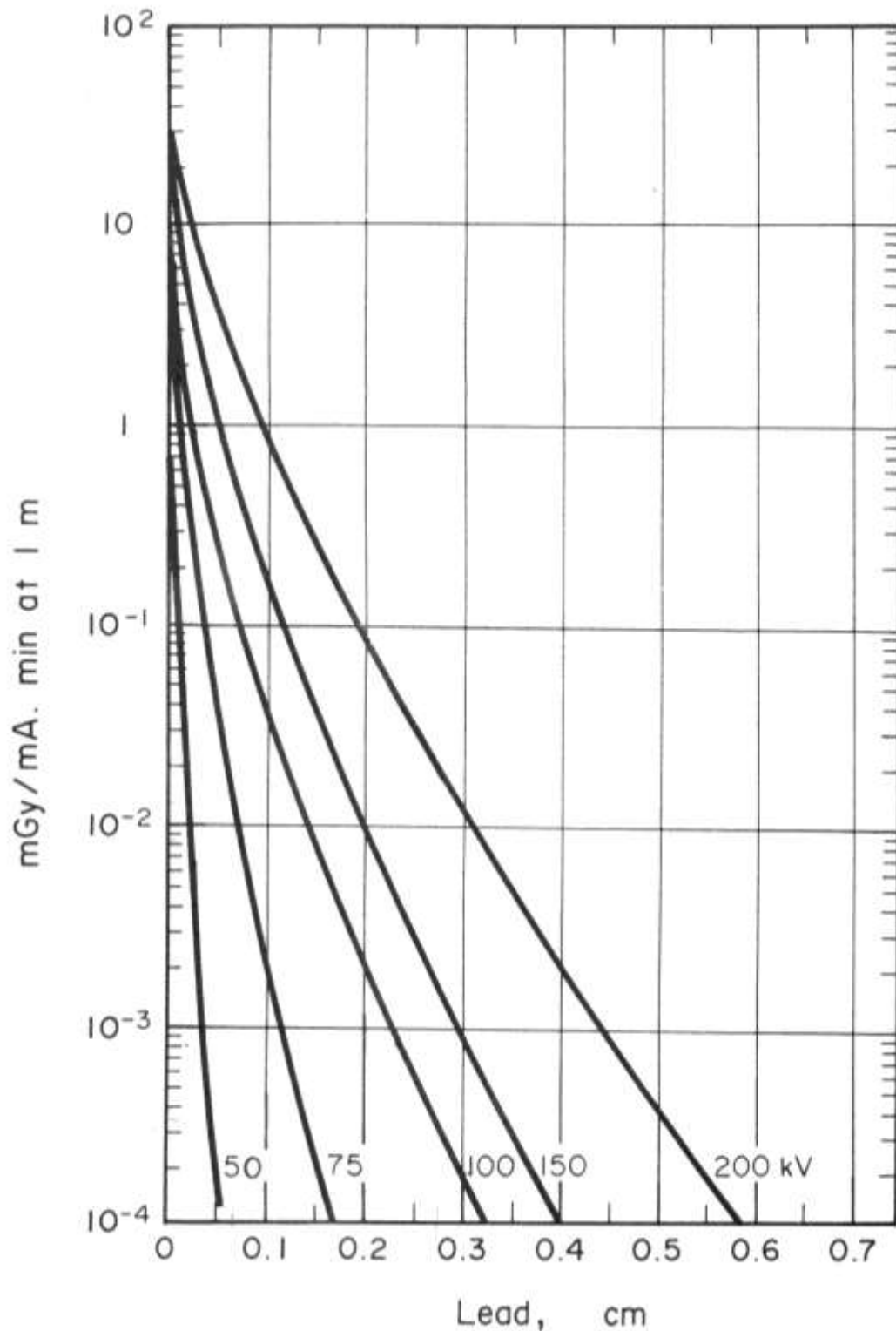
Om de  $H^*(10)$  op hoofdhoogte van de medewerker ten gevolge van de directe straling en de stroostraling uit de patiënt te verlagen naar 1 mSv per jaar, wordt tussen bovenzijde loodschermbijpunt en achterwand een loden afscherming aangebracht (stippellijn in figuur 1). Hoe dik moet deze loodafscherming dan zijn als de directe stralingsbijdrage ongewijzigd blijft? Rond de looddikte af op een halve mm. Geef een conservatieve schatting door aan te nemen dat de stroostraling loodrecht op de extra loodschermbijpunt valt. Neem verder aan dat ook voor de transmissie van de verstrooide straling figuur 2 mag worden gebruikt.

Wanneer u bij vraag 2 geen  $H^*(10)$  in punt 3 (hoofdhoogte) hebt kunnen berekenen, stel die dan op 10 mSv.



**Figuur 1:** Verticale doorsnede hartkatheterisatiekamer

## REPORT OF COMMITTEE 3



**Figuur 2:** Opbrengst en transmissie van brede röntgenbundels, opgewekt met een gelijkspanningsgenerator.  
 Snijpunten met de Y-as: 28.7 bij 200 kV, 18.3 bij 150 kV, 9.6 bij 100 kV, 6.1 bij 75 kV, 2.6 bij 50 kV (Ontleend aan ICRP 33).