

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: 14 december 2009

examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- Deze examenopgaven omvatten 19 genummerde pagina's. Wilt u dit controleren!**
- 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 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: 16 punten
 - Vraagstuk 3: 17 punten
 - Vraagstuk 4: 18 punten

Vraagstuk 1 Skeletscintigrafie met ^{99m}Tc

Een patiënt ondergaat een nucleair-geneeskundig onderzoek met ^{99m}Tc -hydroxymethyleen-difosfonaat (^{99m}Tc -HDP). Om 10.45 uur wordt het middel intraveneus (in de bloedbaan) in zijn arm ingespoten. Direct na de toediening vermoedt de laborant dat hij heeft misgepriktd waardoor het middel niet in de bloedbaan, maar in het omliggende weefsel terecht is gekomen. Hij waarschuwt daarom de stralingsdeskundige van de afdeling Nucleaire Geneeskunde van het ziekenhuis. Deze stralingsdeskundige beschikt over een oude maar recent geijkte exposietempometer. Om 11.00 uur wordt door de stralingsdeskundige op een afstand van 0,30 meter tot zijn lichaam een exposietempo van 4,0 mR per uur gemeten.

Gegevens:

- De halveringstijd van ^{99m}Tc bedraagt 6,0 uur;
- De omgevingsdosisequivalenttempoconstante h van ^{99m}Tc bedraagt $0,023 \mu\text{Sv/h}$ per MBq/m^2 ;
- De dosisconversiecoëfficiënt $e(50) = 8,0 \cdot 10^{-12} \text{ Sv/Bq}$ voor intraveneuze injectie van ^{99m}Tc -HDP (ICRP-53);
- Een exposie van 1 R correspondeert met een kerma in lucht van 8,8 mGy;
- De conversiecoëfficiënt van luchtkerma naar omgevingsdosisequivalent voor fotonen, uitgezonden door ^{99m}Tc , bedraagt $1,5 \text{ Sv/Gy}$;
- De afdeling verstrekt op verzoek van de stralingsdeskundige het op het preparaat bevestigde etiket. Hierop staat vermeld dat de activiteit van het preparaat om 10.00 uur 565,59 MBq bedroeg.

Vraag 1

Bereken de activiteit op het moment van injecteren.

Vraag 2

Bereken de effectieve volg dosis $E(50)$ ten gevolge van dit onderzoek ervan uitgaande dat alle activiteit wel in de bloedbaan terecht is gekomen.

Vraag 3

Reken het gemeten exposietempo om naar het omgevingsdosisequivalenttempo ter plekke.

De stralingsdeskundige probeert door middel van een eenvoudige berekening te controleren of het vermoeden van de laborant juist is. Daartoe beschouwt hij twee situaties.

- I. De geïnjecteerde activiteit heeft zich in het eerste kwartier na de injectie nog in het geheel niet verspreid over het lichaam. Deze situatie doet zich bij 'misprikken' voor. De plek van inspuiting op de arm wordt in deze situatie door de stralingsdeskundige als puntbron beschouwd. Absorptie van straling in het weefsel wordt hierbij verwaarloosd.

- II. De geïnjecteerde activiteit heeft zich een kwartier na de injectie homogeen door het lichaam verspreid. De patiënt wordt door de stralingsdeskundige omwille van de eenvoud als lijnbron beschouwd. Het omgevingsdosisequivalenttempo ten gevolge van een (oneindig lange) lijnbron met een lineïeke activiteit a (in MBq/m) is gelijk aan

$$\dot{H}^*(10) = \frac{\pi \cdot h \cdot a}{r} \mu\text{Sv/h}$$

waarbij r de afstand tot de lijnbron is, h de omgevingsdosisequivalenttempoconstante. Deze formule geeft voor een eindige lijnbron een aanzienlijke overschatting. Voor de berekening van de lineïeke activiteit a wordt in dit scenario gebruik gemaakt van de lengte l van de patiënt:

$$a = \frac{A}{l} \text{ MBq/m.}$$

Aanvullende gegevens:

- De specifieke geabsorbeerde fractie voor de γ -straling die door het homogeen in het lichaam aanwezige ^{99m}Tc wordt uitgezonden (= SAF (total body \leftarrow total body)) bedraagt ongeveer $5 \cdot 10^{-6}$ per gram (ICRP-23);
- De lengte l en de massa van de onderzochte patiënt vallen toevalligerwijs samen met de waarden voor de 'reference man' (ICRP-23) en bedragen respectievelijk 1,70 m en 70.000 gram.

Vraag 4a

Bereken, uitgaande van situatie I, het omgevingsdosisequivalenttempo om 11.00 uur op een afstand van 0,30 m tot de plek van injectie op de arm.

Vraag 4b

Bereken, uitgaande van situatie II, het omgevingsdosisequivalenttempo om 11.00 uur op een afstand van 0,30 m tot van de patiënt.

Vraagstuk 2 Meting aan afvalwater

Bij de verpleegafdeling van een ziekenhuis waar patiënten met schildklierkanker verblijven na een therapeutische hoeveelheid ^{131}I toegediend te hebben gekregen, wordt al het afvalwater verzameld in een grote tank. Om na te gaan of de activiteit van het verzamelde afvalwater voldoende laag is om te mogen lozen op het riool wordt op woensdagochtend 6 mei 2009, 10.00 uur, een monster genomen en gemeten. Op dat moment bevat de tank 1345 liter afvalwater. Er wordt gebruik gemaakt van een meetopstelling waarin de activiteit van 2 liter vloeistof in een zogenaamde Marinelli-beker wordt bepaald met behulp van een NaI-kristal. Bij deze opstelling is de NaI-detector rondom omgeven door de vloeistof waardoor een hoog meetrendement wordt verkregen (zie figuur 1). De meetopstelling is aangesloten op een analyzer waarmee enkel fotonen met een energie tussen 330 keV en 400 keV worden gemeten. Bij meting van een monster met 2 liter afvalwater worden 8291 counts in 5 minuten gemeten. Een achtergrondmeting levert 359 counts in 5 minuten.

Gegevens:

- Tabel 1: Tekst uit geldende Kew-vergunning;
- Figuur 1: Opbouw meetopstelling;
- Figuur 2: Fotopiekrendement van de gebruikte meetopstelling, in counts per uitgezonden foton;
- Gegevens van ^{131}I uit Handboek Radionucliden, 2^e druk, blz 164 – 165.

Tabel 1: Tekst uit geldende Kew-vergunning

correctiefactor voor lozing in lucht en in water:

Factor om een radiotoxiciteitsequivalent (Re) van een bepaald radionuclide te corrigeren voor de fysische halveringstijd van het betrokken radionuclide, voor lozingen in de lucht en het oppervlaktewater en in het openbare riool. De geloosde hoeveelheden uitgedrukt in Re worden vóór toetsing gecorrigeerd met de volgende correctiefactoren:

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

Vraag 1

Bereken de activiteit van het monster.

Vraag 2

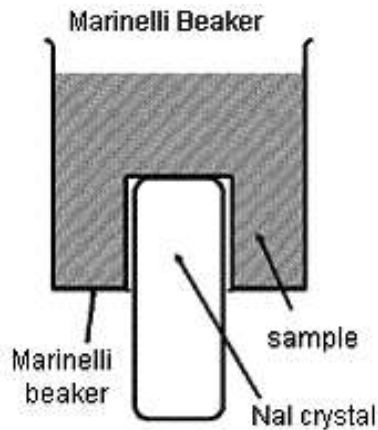
Bereken de totale activiteit in de tank op vrijdagochtend 8 mei 2009, 9.00 uur.

Vraag 3

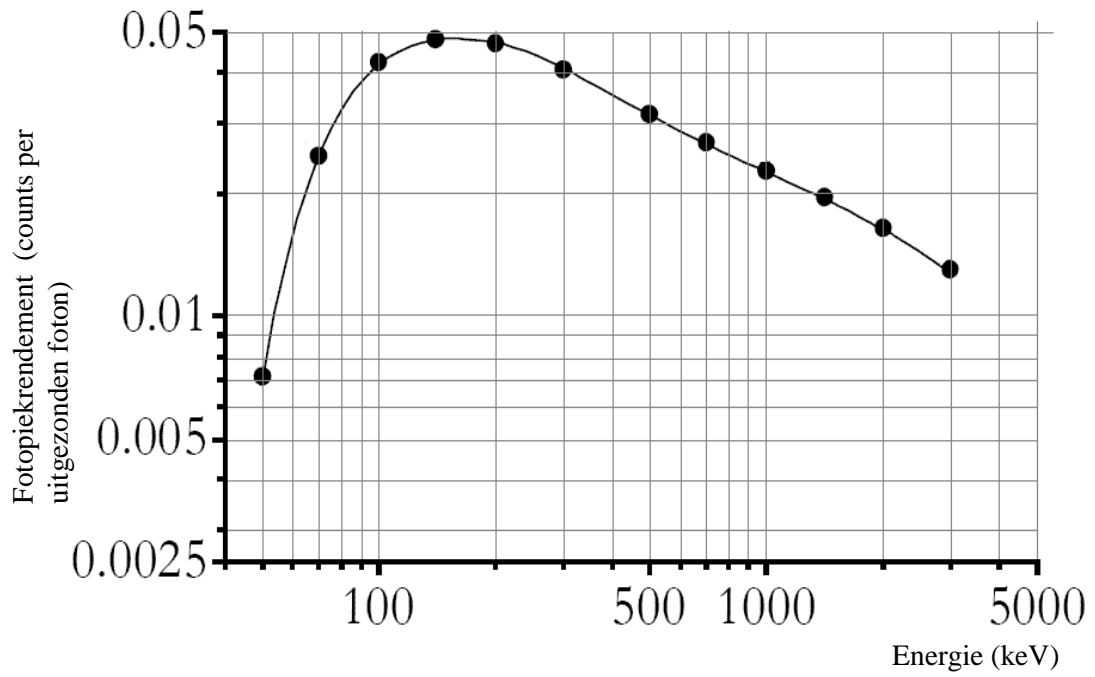
Hoeveel Radiotoxiciteitsequivalenten (Re) worden, met inachtnaam van de correctiefactor voor lozing in water, geloosd indien de tank en het gemeten monster op vrijdagochtend 8 mei 2009 om 9.00 uur geloosd worden?

Vraag 4

Bereken de laagste activiteitsconcentratie (in Bq/l) die met deze meetopstelling en de gehanteerde meettijd kan worden bepaald. Ga hierbij voor het netto aantal uit van een overschrijdingskans van drie standaarddeviaties in het teltempo van de achtergrond.



Figuur 1: *Opbouw meetopstelling*

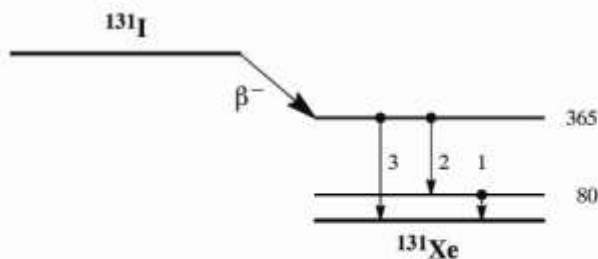


Figuur 2. Fotopiekrendement van de gebruikte meetopstelling, in counts per uitgezonden foton

^{131}I **$Z = 53$** **Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 8,021 \text{ d} = 6,93 \times 10^5 \text{ s}$$

$$\lambda = 1,00 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema (vereenvoudigd)**Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
β^-	0,894	192 606
γ_1	0,026	80
ce K γ_1	0,036	46
γ_2	0,061	284
γ_3	0,812	365

Bronconstanten

Kermtempo in lucht	$k = 0,052 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,066 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 4,60 \times 10^{15} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 4 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 2,2 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 3 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,7 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{131}I is een belangrijk splijtingsproduct. Het wordt veelvuldig toegepast in de diagnostische en therapeutische nucleaire geneeskunde.

164

Bijlage 1: *Gegevens ^{131}I uit: A.S. Keverling Buisman, Handboek Radionucliden, BetaText, tweede druk, 2007*

N = 78

131I

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat jodium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 70% directe uitscheiding en 30% naar de schildklier. Jodium in de schildklier verblijft aldaar met een biologische halveringstijd van 80 dagen, van waaruit het in de vorm van organisch jodium homogeen over het lichaam wordt verdeeld. Het verblijf in andere organen/weefsels dan de schildklier geschiedt met een halveringstijd van 12 dagen. Een tiende van het organisch jodium wordt onmiddellijk uitgescheiden via de faeces, terwijl de rest (90%) terugkeert in het transfercompartiment. Zodoende wordt de biologische halveringstijd in de schildklier effectief gelijk aan 90 dagen.

N.B. Dit model geldt niet voor patiënten, zie pagina 14.

Ingestie- en longzuiveringsklassen**Ingestie**

Alle verbindingen $f_1 = 1$

Inhalatie

Damp (I ₂)	$f_1 = 1$	Klasse SR-1
Damp (CH ₃ I)	$f_1 = 1$	Klasse SR-1 70% depositie
Overige verbindingen	$f_1 = 1$	Klasse F

Disconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie $f_1 = 1$	Inhalatie F	Inhalatie I ₂	Inhalatie CH ₃ I	
$e(50)(w)$	$2,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$4,5 \times 10^7$	$9,1 \times 10^7$	$5,0 \times 10^7$	$6,7 \times 10^7$	Bq
$e(50)(b)$	$2,2 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$4,5 \times 10^7$	$1,3 \times 10^8$	$5,0 \times 10^7$	$6,7 \times 10^7$	Bq

Gegevens voor schildkliertelling (na eenmalige inname)

Tijd (d)	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)			
	$f_1 = 1$	F	I ₂	CH ₃ I
0,25	$6,0 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$
1	$2,4 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$
2	$2,5 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$1,7 \times 10^{-1}$
3	$2,3 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-1}$
5	$1,9 \times 10^{-1}$	$9,0 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{-1}$
7	$1,6 \times 10^{-1}$	$7,5 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$

Vraagstuk 3 Inhalatie van splijtingsproducten

In een laboratorium (gecontroleerde zone) bij een hoge-temperatuurreactor (HTR) worden grafietbolletjes uit de HTR, die splijtstof en splijtstofproducten bevatten, opgewerkt door deze te oxideren. Tijdens dit oxidatieproces vindt er per ongeluk een kleine explosie plaats, waardoor er met name ^{137}Cs - en ^{90}Sr -oxiden in de vorm van aërosolen worden gevormd. De aanwezige blootgestelde werknemer slaat alarm en verlaat vervolgens zo snel mogelijk de gecontroleerde zone, verwisselt zijn werkkleding volgens protocol en wast en doucht zich goed. Aangenomen wordt, dat hij uitsluitend via inhalatie zou kunnen zijn besmet in de gecontroleerde zone. Een eerste indicatie van de grootte van de mogelijke inwendige besmetting wordt bepaald door deze medewerker zijn neus te laten snuiten. Uit de analyse van het neussnuitsel wordt afgeleid, dat er zich in de neus $1,9 \text{ kBq } ^{90}\text{Sr}$ bevindt. Neem verder aan, dat de geïnhaleerde radionucliden nog “vers” zijn, dat wil zeggen dat er nog geen ingroei heeft plaatsgevonden.

Gegevens:

- Tabel 1. Fractie (in %) van de geïnhaleerde activiteit gedeponneerd in de verschillende longcompartimenten voor twee AMAD-waarden (ontleend aan Bos *et al.* Inleiding tot de stralingshygiëne);
- Tabel 2. Dosisconversiecoëfficiënt en gegevens voor urine-analyse van ^{90}Sr na eenmalige inname voor longzuiveringsklasse M en AMAD = $5 \mu\text{m}$ (ontleend aan IMBA Professional Plus);
- Pagina 104 en 105 van ^{90}Sr uit “Handboek Radionucliden, uitgave 2007”;
- Pagina 172 en 173 van ^{137}Cs uit “Handboek Radionucliden, uitgave 2007”.

Vraag 1

Bepaal de effectieve volgdosis voor de blootgestelde werknemer ten gevolge van de inhalatie van ^{90}Sr .

De stralingsdeskundige stuurt de medewerker naar een totale-lichaamsteller (TLT). De TLT-meting, die twee dagen na het incident plaatsvindt, geeft als resultaat dat de medewerker op dat moment $50 \text{ kBq } ^{137}\text{Cs}$ in zijn lichaam heeft.

Vraag 2

Bepaal de effectieve volgdosis ten gevolge van de gemeten inwendige besmetting met ^{137}Cs .

Als extra controle vindt 7 dagen na het incident een urine-excretieanalyse plaats. In de verzamelde 24-uursurine bevindt zich dan $7,1 \text{ Bq } ^{90}\text{Sr}$.

Vraag 3

Bepaal de effectieve volgdosis tengevolge van de ^{90}Sr -inname met gegevens van de verzamelde urine en gegevens uit het Handboek Radionucliden.

De stralingsdeskundige is gezien het grote verschil in de uitkomsten van vraag 1 en 3 niet tevreden en besluit de berekening te herhalen, gebruik makend van gegevens, afkomstig uit IMBA Professional Plus voor longzuiveringsklasse M (Tabel 2).

Vraag 4a

Bepaal nu de geïnhaleerde activiteit en de effectieve volgdosis als gevolg van de inhalatie van ^{90}Sr uitgaande van longzuiveringsklasse M.

Vraag 4b

Tot welke longzuiveringsklasse moet op basis van zowel dit antwoord als de uitkomsten van vraag 1 en 3 het geïnhaleerde ^{90}Sr vermoedelijk worden gerekend? Licht uw antwoord toe.

Vraag 4c

Toon door berekening aan of er, en zo ja, welke, dosislimieten voor de betrokken werknemer worden overschreden. Aangenomen mag worden dat de werknemer uitsluitend door inhalatie blootgesteld is (geweest) aan ioniserende straling.

Tabel 1. Fractie (in %) van de geïnhaleerde activiteit gedeponneerd in de verschillende longcompartimenten voor twee AMAD-waarden (ontleend aan: Bos *et al.* Inleiding tot de stralingshygiëne, pag. 213).

Compartment	Fractie (%)	
	AMAD = 1 μm	AMAD = 5 μm
ET1	16,5	33,9
ET2	21,1	39,9
BB	1,2	1,8
bb	1,7	1,1
AI	10,7	5,3
Totaal	51,2	82

Tabel 2. Dosisconversiecoëfficiënt en gegevens voor urine-analyse van ^{90}Sr na eenmalige inname voor longzuiveringsklasse M en AMAD = 5 μm (ontleend aan IMBA Professional Plus).

Tijd(d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)
1	$1,3 \times 10^{-3}$
2	$5,0 \times 10^{-3}$
3	$3,3 \times 10^{-3}$
4	$2,5 \times 10^{-3}$
5	$2,0 \times 10^{-3}$
6	$1,6 \times 10^{-3}$
7	$1,4 \times 10^{-3}$
8	$1,2 \times 10^{-3}$
9	$1,1 \times 10^{-3}$
10	$9,7 \times 10^{-4}$
Dosisconversiecoëfficiënt voor een blootgestelde werknemer	
$e(50)_{\text{inh}} = 2,4 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$	

⁹⁰Sr

Z = 38

N = 52

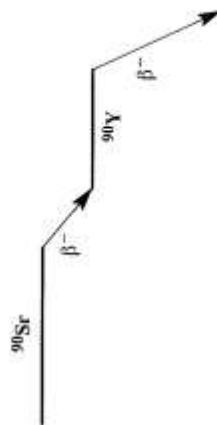
⁹⁰Sr

Halveringsstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 28,7 \text{ j} = 9,06 \times 10^8 \text{ s}$$

$$\lambda = 7,65 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

Vervalchema



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)	Van dochter ⁹⁰ Y (T _{1/2} = 64 h):	E (keV)
β ⁻	1,000	196 546	Straling	935 2284
			β ⁻	1,000

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 5,12 \times 10^{12} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^4 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{fluid}} = 5 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting: Injectie	$e(50) = 8,8 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 0,3 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,3 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radioactieve ⁹⁰Sr is een splijttingsproduct dat door bovengrondse kernexplosies in de atmosfeer is gebracht. Door zijn lange halveringsstijd en zijn chemische eigenschappen (botzoeker) is ⁹⁰Sr een belangrijke contaminant. Het wordt gebruikt, vanwege de hoge beta-energie van dochter ⁹⁰Y, als beta-standaard, bron voor diktemeting, bij brachytherapie en in een ophitalmisch applicator.

Metabool model

De stofwisseling van de botzoeker strontium is uitgebreid beschreven in ICRP-67.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie			
Sr-titanaat	$f_1 = 0,01$		
Overige verbindingen	$f_1 = 0,3$		
Inhalatie			
Titanaat	$f_1 = 0,01$	Klasse S	
Overige	$f_1 = 0,3$	Klasse F	

Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciëitsquivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$f_1 = 0,01$	$f_1 = 0,3$	F	S
$A_{ne}(w)$	$2,7 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$	$7,7 \times 10^{-8}$
$e(50)(b)$	$3,7 \times 10^8$	$3,6 \times 10^7$	$3,3 \times 10^7$	$1,3 \times 10^7$
$A_{ne}(b)$	$2,7 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-7}$
	$3,7 \times 10^8$	$3,6 \times 10^7$	$4,2 \times 10^7$	$6,7 \times 10^6$

Gegevens voor urine-analyse

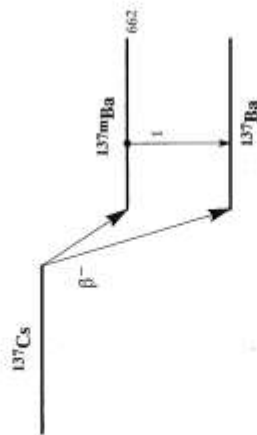
Na eenmalige inname	
Tijd (d)	Urine-uitscheidings tempo (Bq/d per Bq inname)
1	$1,8 \times 10^{-3}$
2	$5,6 \times 10^{-2}$
3	$2,2 \times 10^{-2}$
5	$1,4 \times 10^{-2}$
7	$8,3 \times 10^{-3}$
	$1,9 \times 10^{-4}$
	$6,3 \times 10^{-3}$
	$8,1 \times 10^{-4}$
	$3,4 \times 10^{-4}$
	$2,2 \times 10^{-4}$
	$1,3 \times 10^{-4}$
	$9,0 \times 10^{-5}$

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 30,25 \text{ j} = 9,55 \times 10^8 \text{ s}$$

$$\lambda = 7,26 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

Verval-schema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y ($\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$)	E (keV)	Straling y ($\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$)	E (keV)
β^-	0,946	173 512	71	0,898
β^-	0,054	425 1173	cc K γ	0,083
				624

Van $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ($T_{1/2} = 2,55 \text{ m}; y = 0,946$):

Bronconstanten (van dochter $^{137\text{m}}\text{Ba}$ in evenwicht met ^{137}Cs)

Kermatempo in lucht	$k = 0,077 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ per MBq/m^2
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,093 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{90} = 3,19 \times 10^{12} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^1 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^4 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{10} \text{ Sv/s}$ per Bq/cm^2 (incl. $^{137\text{m}}\text{Ba}$)
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 1,4 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ (incl. $^{137\text{m}}\text{Ba}$)
Vervoer	$A_1 = 2 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,6 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{137}Cs is een belangrijk splijtingsproduct. Het wordt onder meer gebruikt als gamma-referentiebron en als bron bij brachytherapie.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat cesium zich vanuit het bloed homogeen over alle organen/weefsels verdeelt. De biologische halveringstijden zijn:

Fractie	$T_{1/2}$
0,1	2 d
0,9	110 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	$f_1 = 1$
Alle verbindingen	$f_1 = 1$
Inhalatie	$f_1 = 1$
Alle verbindingen	$f_1 = 1$
	Klasse F

Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciëitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$f_1 = 1$	F
$A_{R_0}(w)$	$1,3 \times 10^{-8}$	$6,7 \times 10^{-9}$
$e(50)(b)$	$7,7 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-8}$
$A_{R_0}(b)$	$1,3 \times 10^{-8}$	$4,8 \times 10^{-9}$
	$7,7 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-8}$
		$2,1 \times 10^{-8}$

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
Tijd (d)	
0,25	$1,0 \times 10^9$
1	$7,4 \times 10^1$
2	$9,9 \times 10^1$
3	$6,0 \times 10^{-1}$
5	$5,1 \times 10^{-1}$
7	$4,7 \times 10^{-1}$
	$4,4 \times 10^{-1}$
	$4,2 \times 10^{-1}$

Vraagstuk 4 Afscherming van een Van de Graaff-generator

Een onderzoeksinstituut is van plan een Van de Graaff-generator aan te schaffen. Voor de afscherming is een ontwerp gemaakt, waarvan de plattegrond is weergegeven in figuur 1. Met deze generator zullen elektronen worden versneld met een totale versnelspanning van 6 MV. Deze elektronen worden gestopt in een target T met een hoog atoomnummer. Met de opgewekte remstraling worden bestralingen uitgevoerd bij een stroomsterkte van 1,0 mA gedurende een bedrijfsduur van 4000 uur per jaar. Ter afscherming is rondom het target een loden box gepland met een wanddikte van 25 cm. Voor de berekeningen wordt aangenomen dat de remstraling isotroop wordt uitgezonden (dit is een conservatieve aanname). De werkgever stelt als eis dat in de bedieningsruimte de effectieve dosis niet meer mag bedragen dan 1 mSv/jaar.

Gegevens:

- Een luchtkerma van 1 Gy komt in deze situatie overeen met een omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$, van 1,15 Sv;
- Voor dit vraagstuk zijn $H^*(10)$ en de effectieve dosis numeriek aan elkaar gelijk;
- Neem aan dat voor de totale transmissie T geldt: $T_{\text{totaal}} = T_{\text{Pb}} \times T_{\text{beton}}$;
- Figuur 1. Plattegrond van de versnellerruimte;
- Figuur 2. Luchtkermatempo op 1 m afstand van de trefplaat bij een bundelstroom van 1 μA als functie van de versnelspanning;
- Figuur 3. Brede-bundeltransmissie in lood van remstraling opgewekt met elektronen met verschillende versnelspanningen;
- Figuur 4. Brede-bundeltransmissie in beton van remstraling opgewekt met elektronen met verschillende versnelspanningen;
- Figuur 5. Verstrooide straling op 1 m, in % van het invallende dosistempo per 100 cm^2 bestraald oppervlak (ontleend aan ICRP-33);
- Figuur 6. Brede-bundeltransmissie in beton van 6 MV remstralingsfotonen verstrooid over verschillende hoeken.

Vraag 1

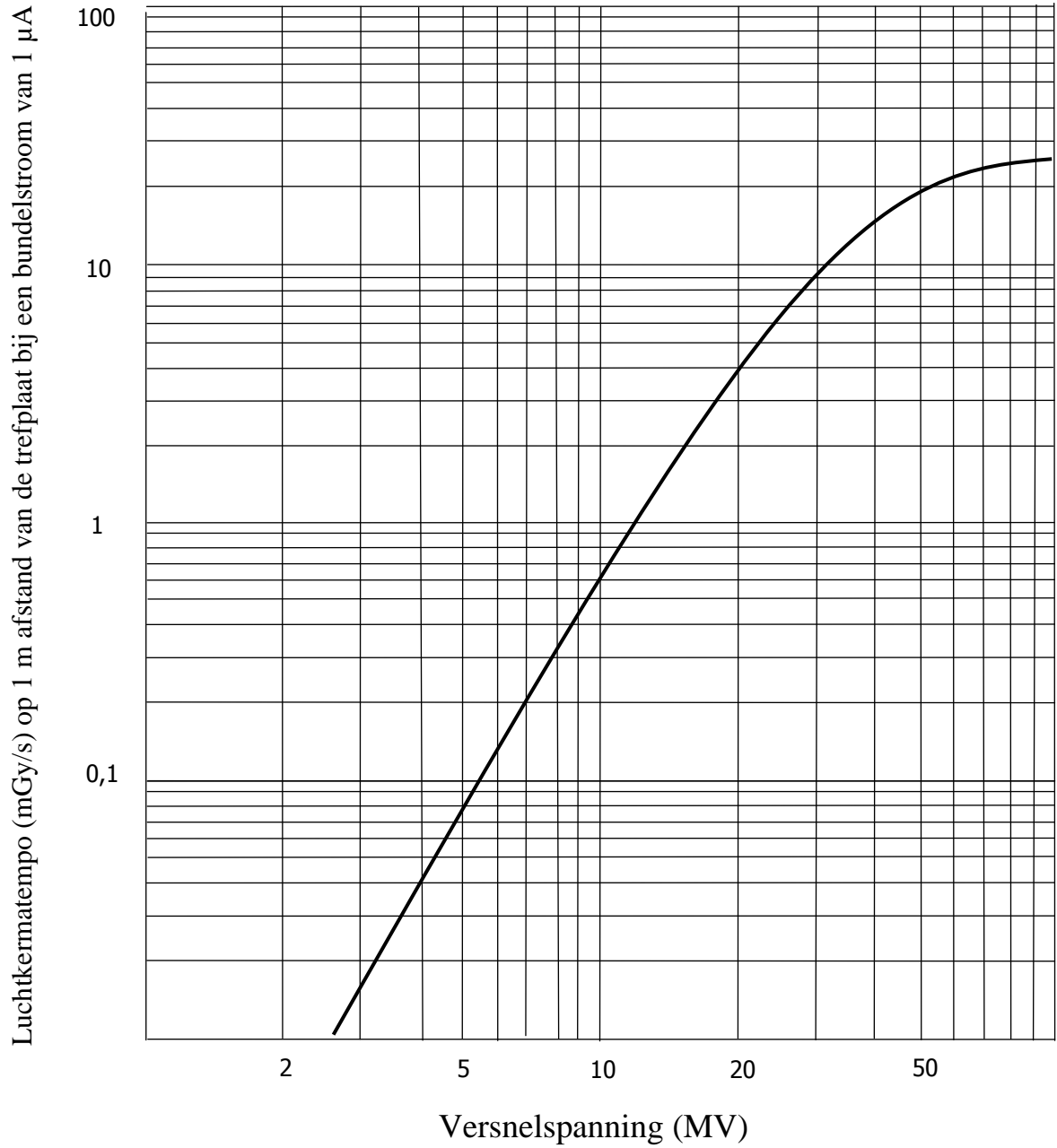
Bereken het omgevingsdosisequivalent, $H^*(10)$, per jaar tengevolge van de directe straling afkomstig van het target, op 1,0 m van dat target ingeval er geen afscherming zou zijn.

Vraag 2

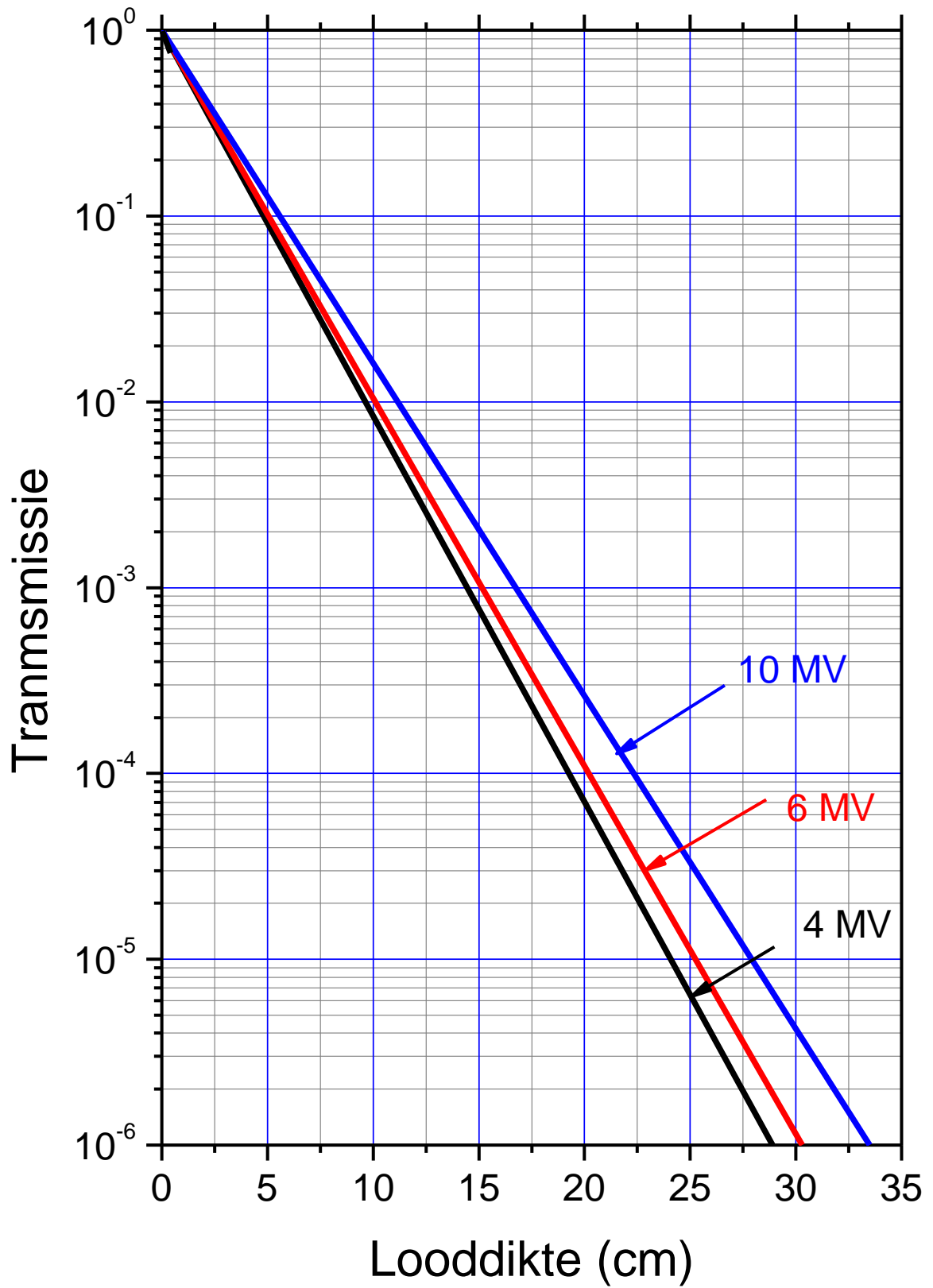
Bereken de minimale dikte van de betonmuur tussen de bestralingsruimte en de bedieningsruimte. Neem hierbij punt A als uitgangspunt. Punt A bevindt zich op 4,0 meter afstand van het target T. Voor deze berekening hoeft geen rekening te worden gehouden met eventuele bijdrage van door de muren verstrooide straling.

Vraag 3

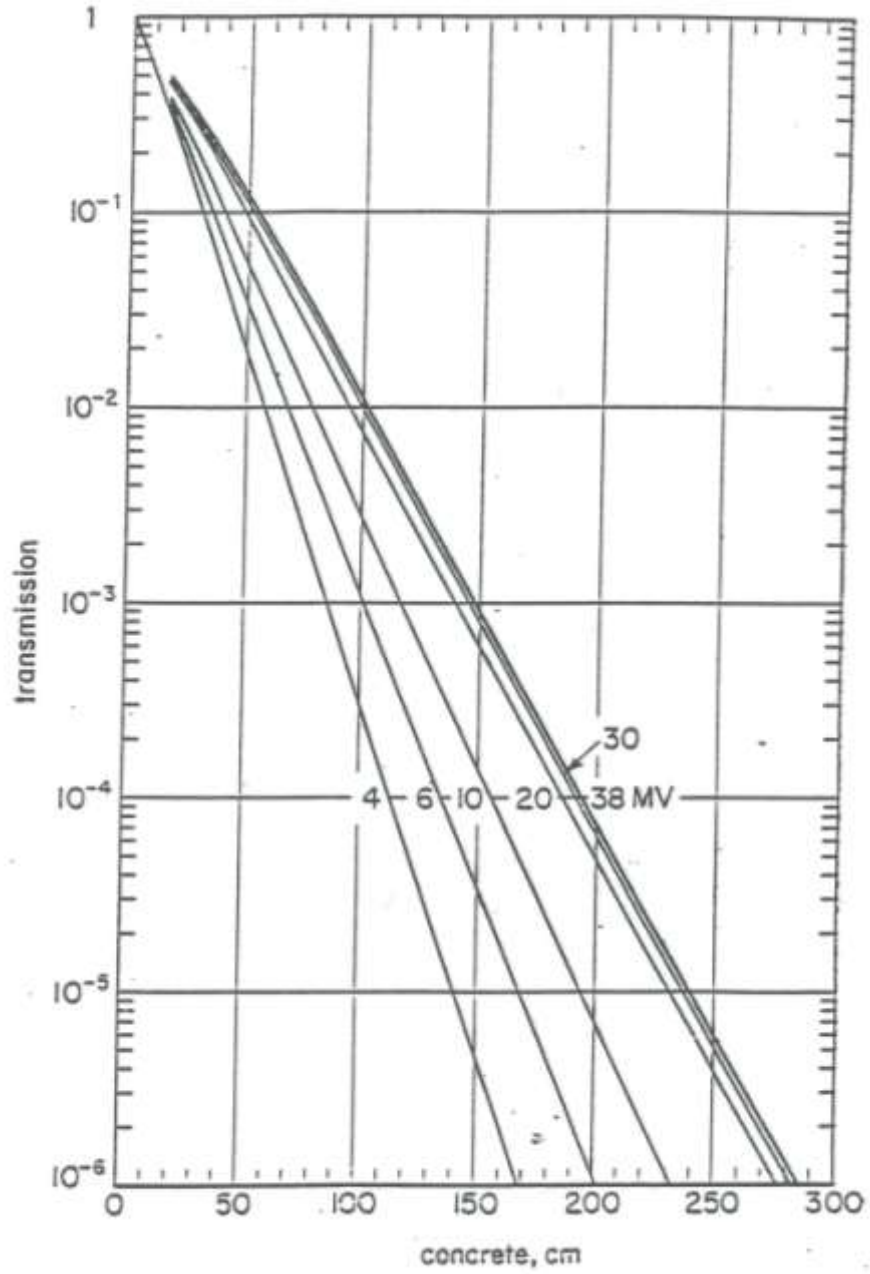
Bepaal de minimaal vereiste dikte van de loden deur. Uitgangspunt hierbij is punt B, dat zich bevindt op $(4 + x)$ meter van het target T. Hierbij is x de gevraagde looddikte.



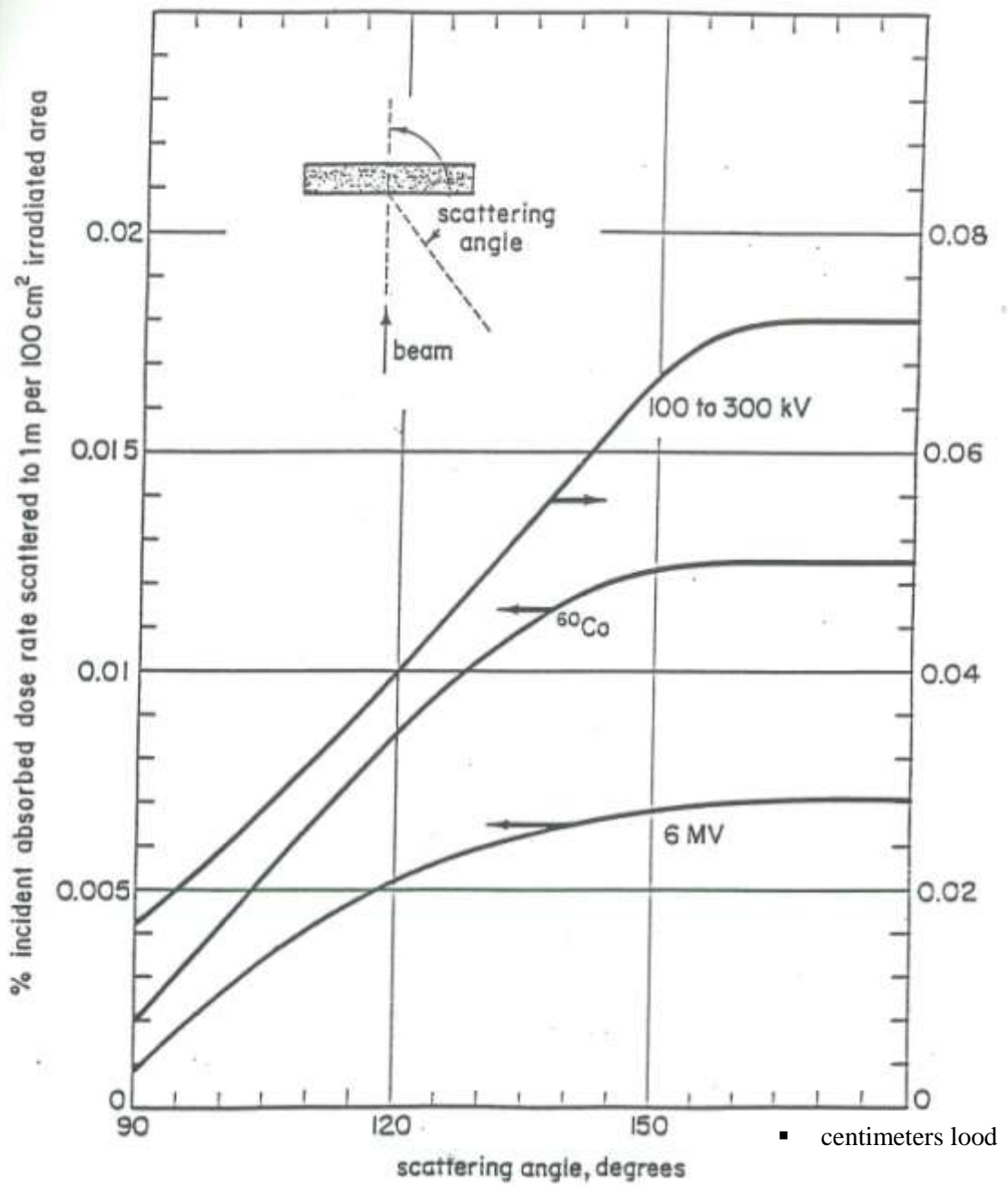
Figuur 2. *Luchtkermatempo op 1 m afstand van de trefplaat bij een bundelstroom van 1 μ A als functie van de versnelspanning.*



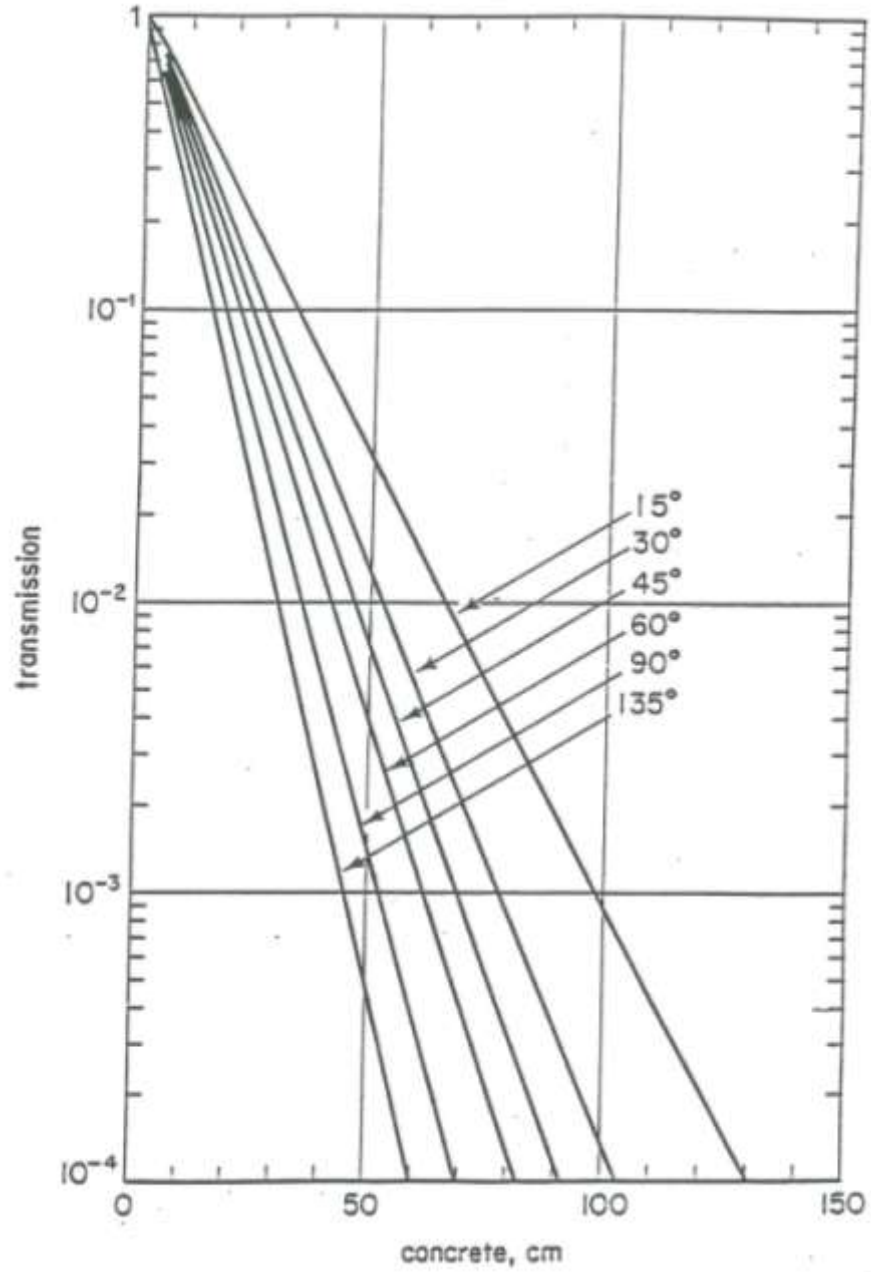
Figuur 3. *Brede-bundeltransmissie in lood van remstraling opgewekt met elektronen met verschillende versnelspanningen.*



Figuur 4. *Brede-bundeltransmissie in beton van remstraling opgewekt met elektronen met verschillende versnelspanningen.*



Figuur 5. *Verstrooide straling op 1 m, in % van het invallende dosistempo per 100 cm² bestraald oppervlak (ontleend aan ICRP-33).*



Figuur 6. *Brede-bundeltransmissie in beton van 6 MV remstralingsfotonen verstrooid over verschillende hoeken*