STRALINGSHYGIËNE VRAAGSTUKKEN

voor stralingsbeschermingsdeskundigen
op het niveau van coördinerend deskundige

Frits Pleiter
Hielke Freerk Boersma

editie 2025

Deze vraagstukken dienen ter ondersteuning van het boek 'STRALINGSHYGIËNE voor stralingsbeschermingsdeskundigen op het niveau van coördinerend deskundige' van Frits Pleiter en Hielke Freerk Boersma (GARP, Groningen, 2024) ISBN 978 94 034 3067 6.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze.

Figuur 1 tot en met Figuur 24 van de Appendix zijn overgenomen uit het Handboek Radionucliden (Nucleus, Schoorl, 2007) met vriendelijke toestemming van de auteur.

INHOUD

METINGEN AAN RADIOACTIVITEIT 7

1 ^{14}C-datering 9
2 Activiteit van strontium-isotopen 10
3 Gelijktijdig meten van α- en β-activiteit 11
4 Oppervlaktebesmetting met ^{45}Ca en ^{46}Sc 12
5 Meting van ^{13}N met een gamma-camera 13
6 Detectie van een laboratoriumbesmetting 14
7 Meting van foliediktes met een β-bron 16
8 Detectielimiet 18
9 Vulhoogtemeting 19
10 Afvalmonitor 21
11 Geactiveerd gereedschap 23
12 Detectie van ^{55}Fe 25
13 Bepaling van de massieke verzwakkingscoëfficiënt 26
14 Meting aan ^{125}I 27
15 Vloeibaar afval 28
16 Lekkende ^{131}I-bron 30
17 Kwik in een kolencentrale 31
18 Luchtbesmettingsmonitor 33
19 ^{88}Kr-activiteit in aerosolen 34
20 Slijpschijf met natuurlijke radioactieve stoffen 35
Uitwerkingen 36

UITWENDIGE DOSIMETRIE EN AFSCHERMING 47

21 Fluentietempo en fotonentelling 49
22 Verontreinigd $^{51}CrCl_3$ 50
23 Reefer Rio 51
24 TLD-persoonsdosismeter 52
25 ^{32}P-dosimetrie 54
26 Incident met een gammagrafiebron 55
27 Afscherming van een ^{24}Na-bron 56
28 Afscherming van geactiveerd materiaal 57
29 Afscherming van moeder en dochter 58
30 Container voor opslag van ^{60}Co 60
31 Afscherming van een ionenwisselaar 62
32 Afscherming van een ^{137}Cs-bron 64
33 Afscherming van een ^{60}Co-bron 65
34 Afscherming van ^{60}Co-activiteit 66
35 Afscherming van een ^{60}Co-bestralingsinrichting 67
36 Afscherming van een betatron 69
37 Dosis bij radiodiagnostisch onderzoek 72
38 Dosimetrie van röntgenstraling 74
39 Afscherming van een röntgentoestel 75
40 Afscherming van een neutronengenerator 78
Uitwerkingen 81

INWENDIGE DOSIMETRIE 95

Formules gebruikt bij inwendige dosimetrie 97
41 Equivalente orgaandosis ten gevolge van ^{198}Au in de lever 98
42 ^{87}Rb in voedsel 100
43 Berekening van e(50) van ^{35}S voor een volwassene 101
44 Berekening van e(50) van ^{35}S voor een baby 102
45 Berekening van e(50) van ^{3}H voor een volwassene 103

46	Berekening van e(50) van ^{3}H voor een kind	104
47	Inhalatie van getritieerd waterdamp	105
48	Inwendige besmetting met ^{3}H	106
49	Tritiumoxide in de lucht	107
50	Inwendige besmetting met ^{32}P	108
51	Urinemetingen na een besmetting met $H^{36}Cl$	109
52	Ongeval met ^{51}Cr-poeder	110
53	Injectie met ^{67}Ga-citraat	111
54	Toediening van ^{99m}Tc-fosfonaat	112
55	Ingestie van ^{137}Cs	113
56	Inwendige besmetting met ^{195m}Pt	114
57	Incident met een ^{241}Am-bron	115
58	Bepaling van ^{241}Am in de urine	116
59	Lekkende cilinder met ^{85}Kr	117
60	^{85}Kr-concentratie in de buitenlucht	118
	Uitwerkingen	119

APPENDIX 129

Figuur 1	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{3}H	131
Figuur 2	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{24}Na	132
Figuur 3	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{32}P	133
Figuur 4	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{35}S	134
Figuur 5	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{36}Cl	135
Figuur 6	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{42}K	136
Figuur 7	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{45}Ca	137
Figuur 8	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{46}Sc	138
Figuur 9	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{51}Cr	139
Figuur 10	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{55}Fe	140
Figuur 11	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{60}Co	141
Figuur 12	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{67}Ga	142
Figuur 13	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{85}Kr	143
Figuur 14	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{87}Rb	144
Figuur 15	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{89}Sr	145
Figuur 16	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{90}Sr	146
Figuur 17	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{90}Y	147
Figuur 18	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{99m}Tc	148
Figuur 19	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{125}I	149
Figuur 20	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{131}I	150
Figuur 21	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{137}Cs	151
Figuur 22	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{170}Tm	152
Figuur 23	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{203}Hg	153
Figuur 24	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{241}Am	154
Figuur 25	Gereduceerde dracht van β-deeltjes	155
Figuur 26	Massieke energieoverdracht- en energieabsorptiecoëfficiënten	156
Figuur 27	Fluentietempo en energiefluentietempo van fotonen	156
Figuur 28	Conversiecoëfficiënten voor luchtkerma K_a naar omgevingsdosisequivalent H*(10), effectieve dosis E(AP) in een fantoom van een volwassene in de anterior-posteriorgeometrie, en persoonsdosisequivalent $H_{p,slab}(10)$	157
Figuur 29	Verhouding van effectieve dosis en omgevingsdosisequivalent	157
Figuur 30	Dosisopbouwfactoren voor een isotrope puntbron	158
Figuur 31	Transmissie van brede bundels γ-straling door lood	159
Figuur 32	Transmissie van brede bundels γ-straling door lood	160
Figuur 33	Transmissie van brede bundels γ-straling door beton	161
Figuur 34	Transmissie van brede bundels γ-straling door beton	162
Figuur 35	Transmissie van aan beton verstrooide γ-straling van ^{137}Cs door lood	163
Figuur 36	Transmissie van aan beton verstrooide γ-straling van ^{137}Cs door beton	164
Figuur 37	Transmissie van aan fantoom verstrooide γ-straling van ^{60}Co door lood	165

Figuur 38 Transmissie van aan fantoom verstrooide γ-straling van ^{60}Co door beton 166
Figuur 39 Transmissie van brede bundels röntgenstraling door lood 167
Figuur 40 Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton 168
Figuur 41 Kermatempo voor verschillende filtraties 169
Figuur 42 Kermatempo en transmissie van röntgenstraling door lood 170
Figuur 43 Kermatempo en transmissie van röntgenstraling door beton 171
Figuur 44 Verstrooiing van röntgenstraling aan beton 172
Figuur 45 Verstrooiing van röntgenstraling aan water, beton en lood 172
Figuur 46 Massa's van bron- en doelorganen van de referentiemens 173
Figuur 47 Orgaanweegfactoren w_T 173
Figuur 48 Specifieke geabsorbeerde fracties SAF (in g^{-1}) voor bronorgaan lever 174
Figuur 49 Specifieke geabsorbeerde fracties SAF (in g^{-1}) voor bronorgaan milt 174
Figuur 50 Longdepositiefracties neusademer 175
Figuur 51 Longdepositiefracties mondademer 175

RECENTE EXAMENS 177

METINGEN AAN RADIOACTIVITEIT

8 STRALINGSHYGIËNE

1 ^{14}C-datering (1996-1-2)

In de atmosfeer vindt door interactie van kosmische straling met ^{14}N een continue aanmaak plaats van het radionuclide ^{14}C. De massieke activiteit van ^{14}C in koolstofdioxide (CO_2) in de lucht is door de eeuwen heen min of meer constant gebleven en bedraagt 220 Bq per kg elementair koolstof (C). Zolang er uitwisseling met en opname van CO_2 uit de atmosfeer plaatsvindt, geldt deze waarde ook voor planten en bomen. Na het afsterven van de plant of boom neemt de hoeveelheid ^{14}C af door fysisch verval. Hierop is de koolstofdateringsmethode gebaseerd.

De activiteitsbepaling vindt plaats met behulp van een proportionele telbuis. De telbuis wordt gevuld met CO_2-gas dat ontstaat bij de verbranding van het te onderzoeken materiaal. Het telrendement van de gebruikte telbuis bedraagt 0,95 telpulsen per seconde (tps) per Bq ^{14}C. Het achtergrondteltempo bepaalt men met behulp van steenkool, dat vanwege de hoge ouderdom van de steenkoollagen geen ^{14}C meer bevat. Uit een achtergrondtelling van 32 uur volgt een achtergrondteltempo van gemiddeld 0,003 00 tps.

Gegeven

- het atoomgewicht van C is 12,0 g·mol^{-1}
- het volume van 1 mol gas bedraagt 22,4 l onder standaardcondities
- $T_{½}$(^{14}C) = 5730 j
- eenzijdige overschrijdingskans P(k) voor een normaalverdeling (zie tabel 1)

Tabel 1. Eenzijdige overschrijdingskans P(k) voor een normaalverdeling.

k	*0,0*	*0,1*	*0,2*	*0,3*	*0,4*	*0,5*	*0,6*	*0,7*	*0,8*	*0,9*
0	0,500	0,460	0,421	0,382	0,345	0,308	0,274	0,242	0,212	0,184
1	0,159	0,136	0,115	0,097	0,081	0,067	0,055	0,045	0,036	0,029
2	0,023	0,018	0,014	0,011	0,008	0,006	0,005	0,003	0,003	0,002

Vragen

1 Bepaal de massieke activiteit van ^{14}C (in Bq·kg^{-1} elementair koolstof) voor een stuk hout uit het jaar nul.

2 In een boomstam, gevonden in een prehistorisch graf, meet men een massieke ^{14}C-activiteit van 135 Bq·kg^{-1} elementair koolstof. Hoe oud is deze boomstam?

3 In de gebruikte telbuis wordt 100 cm^3 CO_2-gas gebracht, dat verkregen is door verbranding van een monster uit een houten voorwerp. In 32 uur worden 513 telpulsen verzameld. Bepaal de massieke activiteit van ^{14}C (in Bq·kg^{-1} elementair koolstof).

4 Bereken de ouderdom van het voorwerp uit vraag 3.

5 Hoe oud is het voorwerp uit vraag 3 maximaal bij een betrouwbaarheidsinterval van 95%, rekening houdende met de standaarddeviatie in de massieke activiteit?

2 Activiteit van strontium-isotopen (1988-1-4)

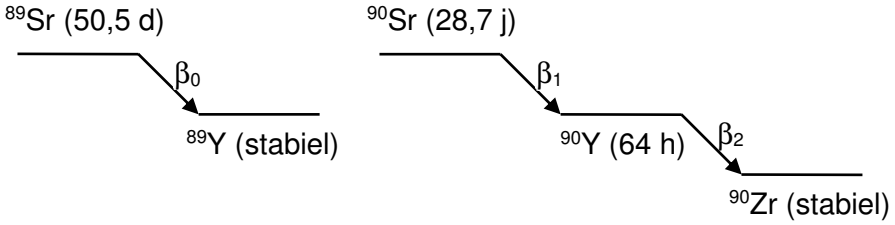
Op een filter waardoor ten tijde van de passage van de activiteitswolk ten gevolge van het Tsjernobyl-incident lucht is gezogen, worden naast de radionucliden die via γ-spectrometrie zijn aan te tonen (^{131}I, ^{137}Cs, ^{103}Ru, enzovoorts) ook de strontium-isotopen ^{89}Sr en ^{90}Sr verwacht. De monstername vond plaats op 02-05-86 van 09:00-11:00 uur.

Teneinde het strontium kwantitatief te kunnen aantonen, wordt dit langs chemische weg gescheiden van de andere elementen op het filter. Het tijdstip waarop de scheiding plaatsvindt, valt op 02-09-86 om 10:00 uur en wordt gedefinieerd als $t = 0$. Het Sr-preparaat wordt onmiddellijk na de scheiding gemeten met behulp van een proportionele telbuis. De teltijd bedraagt 1 uur en het in die tijd verzamelde aantal telpulsen is 6450.

Precies een maand later, op 02-10-86, wordt het preparaat nogmaals gemeten. Het aantal is dan 7622 telpulsen in 1 uur.

Gegeven

- het debiet van de luchtpomp waarmee het monster werd genomen, bedroeg 50 $m^3 \cdot h^{-1}$
- het vangstrendement van het filter wordt in de verdere berekening op 100% gesteld
- de activiteitsconcentratie in de lucht gedurende de monstername wordt constant gedacht
- het achtergrondteltempo van de telbuis bedraagt 0,02 tellen per seconde
- het telrendement van de meetopstelling voor β-deeltjes is 28%
- absorptie van de β-straling mag worden verwaarloosd
- de activiteit gedurende de meting mag constant worden verondersteld
- de vereenvoudigde vervalschema's van ^{89}Sr en ^{90}Sr (zie figuur 1)



Figuur 1. De vereenvoudigde vervalschema's van de radionucliden ^{89}Sr, ^{90}Sr en ^{90}Y.

Vragen

1 Bereken de activiteiten van ^{89}Sr en ^{90}Sr op het filter op het tijdstip van de monstername, uitgaande van de resultaten van de twee metingen.

2 Bereken de activiteitsconcentratie (in $Bq \cdot m^{-3}$) van beide isotopen in de lucht op het tijdstip van de monstername.

3 Gelijktijdig meten van α- en β-activiteit (1987-2-4)

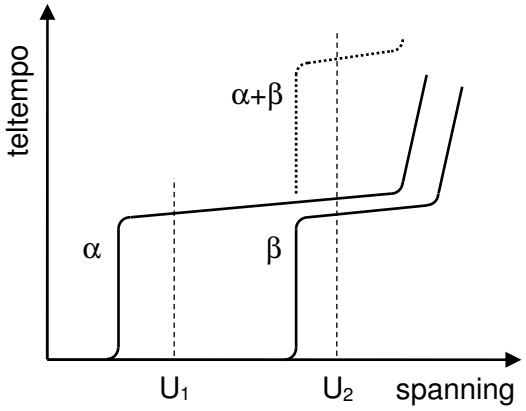
Bij een proportionele telbuis vertoont de relatie tussen teltempo en buisspanning zowel voor α- als voor β-activiteit een plateau. Deze plateau's vertonen enige overlap, zoals aangegeven in figuur 1, waardoor in hetzelfde monster zowel de α- als de β-activiteit kan worden bepaald. Dit gebeurt door bij twee buisspanningen, U_1 en U_2, een meting te verrichten. Met behulp van de telrendementen voor α- en β-straling en de achtergrondteltempi bij de spanningen U_1 en U_2 laten zich α- en β-activiteit afzonderlijk berekenen.

Er worden twee monsters gemeten. Voor het eerste monster worden bij spanning U_1 bruto 400 telpulsen gemeten, bij spanning U_2 zijn dit 700 telpulsen.

Het tweede monster bevat zoveel α-activiteit, dat bij spanning U_1 bruto 500 telpulsen worden gemeten. Men wil door middel van een meting bij spanning U_2 bepalen of dit monster ook β-activiteit bevat.

Gegeven

- het teltempo als functie van de buisspanning
- (zie figuur 1)
- de ijkgegevens van de proportionele telbuis
- (zie tabel 1)
- alle meetresultaten, ook die van de achtergrond, zijn verkregen in een meettijd van 40 minuten
- ga er in dit vraagstuk vanuit dat per desintegratie 1 deeltje wordt uitgezonden
- de β-activiteit is juist aantoonbaar als de verhoging van het teltempo bij buisspanning U_2 ten opzichte van het teltempo bij afwezigheid van β-activiteit, tweemaal de standaarddeviatie van het laatstgenoemde bruto-teltempo is



Figuur 1. Teltempo als functie van de spanning over de proportionele telbuis.

Tabel 1. IJkgegevens van de proportionele telbuis.

spanning	*achtergrond (tpm)*	*telrendement (tps·Bq⁻¹)*	
		α	*β*
U_1	0,2	0,25	0
U_2	1,0	0,30	0,40

Vragen

1 Bereken de α- en β-activiteit (in Bq) met de bijbehorende standaarddeviaties voor het eerste monster.

2 Wat is voor het tweede monster de minimaal aantoonbare β-activiteit (in Bq) bij een teltijd van 40 min bij buisspanning U_2 ?

4 Oppervlaktebesmetting met ^{45}Ca en ^{46}Sc (1995-2-3)

In een radionuclidenlaboratorium wordt gebruik gemaakt van de radionucliden ^{45}Ca en ^{46}Sc. Op een dag wordt een besmetting ontdekt op de vloer. Van het besmette deel van de vloer wordt een veegtest genomen, dat vervolgens met twee verschillende apparaten wordt gemeten, te weten een β-teller en een γ-spectrometer. Met de β-teller worden 50 000 telpulsen per minuut (tpm) verkregen. Met de γ-spectrometer worden 1000 tpm gemeten in een smal kanaal rondom de fotopiek bij 1,12 MeV.

Gegeven

- geveegd vloeroppervlak is 100 cm^2
- in dit vraagstuk wordt de veegefficiëntie op 50% gesteld
- de dode tijd van de β-teller bedraagt 200 μs
- het telrendement van de β-teller is 40% voor waarden van $E_{\beta,max}$ tussen 200 en 400 keV
- het telrendement van de γ-spectrometer voor de fotopiek bij 1,12 MeV is 8%
- het achtergrondteltempo van beide tellers mag worden verwaarloosd
- het vervalschema van ^{45}Ca (zie Appendix, figuur 7)
- het vervalschema van ^{46}Sc (zie Appendix, figuur 8)
- bij de berekeningen hoeft geen rekening te worden gehouden met radioactief verval

Vragen

1 Bereken het voor dode tijd gecorrigeerde β-teltempo van het veegmonster.

2 Bereken de totale β-activiteit van het veegmonster (in Bq).

3 Bereken de ^{46}Sc-activiteit (in Bq).

4 Hoe groot waren de oppervlaktebesmettingen (in Bq·cm^{-2}) van ^{45}Ca en ^{46}Sc afzonderlijk?

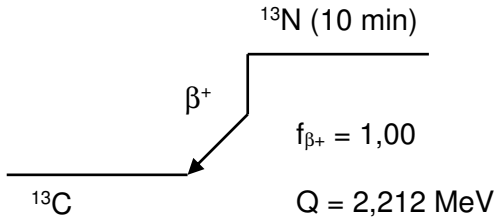
5 Was de besmetting toelaatbaar volgens de (inmiddels oude) Richtlijn Radionuclidenlaboratoria?

5 Meting van ^{13}N met een gamma-camera (1981-1-3)

Ten behoeve van een studie van de werking van de lever wordt door middel van een eenmalige injectie in de bloedbaan aan een proefpersoon een aminozuur toegediend dat gemerkt is met het radionuclide ^{13}N. De verdeling van de activiteit over de verschillende organen bereikt binnen 5 minuten een evenwichtstoestand. Op dat ogenblik wordt een opname gemaakt met de gamma-camera, die op de lever is gericht en ingesteld op de fotopiek van de 0,511 MeV annihilatiestraling.

Gegeven

- vanuit de bloedbaan wordt 10% van de activiteit door de lever opgenomen
- neem bij de berekening aan dat de activiteit in één punt is geconcentreerd, op een afstand van 20 cm van de camera
- de gemiddelde weglengte van de annihilatiestraling door het lichaamsweefsel is 8 cm
- de dikte van het NaI-kristal in de gamma-camera bedraagt 10 mm
- 30% van de wisselwerkingen in NaI verloopt via het foto-elektrisch effect
- de massieke verzwakkingscoëfficiënten voor een γ-energie van 0,511 MeV zijn μ/ρ(weefsel) = 0,095 cm^2·g^{-1} respectievelijk μ/ρ(NaI) = 0,093 cm^2·g^{-1}
- de soortelijke massa's zijn ρ(weefsel) = 1,00 g·cm^{-3} respectievelijk ρ(NaI) = 3,67 g·cm^{-3}
- voor het maken van een bruikbare opname moet het fluentietempo ter plaatse van de camera tenminste 1000 fotonen per cm^2 en per seconde bedragen
- straling die de camera bereikt vanuit andere gedeelten van het lichaam dan de lever wordt in dit vraagstuk buiten beschouwing gelaten
- de bijdrage van verstrooide fotonen wordt in dit vraagstuk ook buiten beschouwing gelaten
- het vervalschema van ^{13}N (zie figuur 1)



Figuur 1. Het vervalschema van het radionuclide ^{13}N.

Vragen

1 Bepaal het fotopiek-rendement van het NaI-kristal voor een γ-energie van 0,511 MeV.

2 Hoeveel ^{13}N-activiteit moet minimaal worden toegediend om een bruikbare opname te verkrijgen?

6 Detectie van een laboratoriumbesmetting (1981-2-2)

In een radiochemisch laboratorium wordt gewerkt met de radionucliden ^{22}Na, ^{55}Fe, ^{81}Kr en ^{125}I. Men heeft de beschikking over een besmettingsmonitor, waarbij twee cilindervormige meetkoppen A en B horen. Beide meetkoppen bevatten een NaI(Tl)-scintillatiedetector, maar hun gevoeligheid als functie van de fotonenergie is verschillend.

Bij een routinematige controle met deze monitor wordt een besmetting op een tafelblad geconstateerd. Met beide meetkoppen wordt het teltempo gemeten. De meetresultaten, gecorrigeerd voor achtergrond, bedragen 10 862 telpulsen per minuut (tpm) voor meetkop A en 5440 tpm voor meetkop B.

Tabel 1. Vervalgegevens van de radionucliden ^{22}Na, ^{55}Fe, ^{81}Kr en ^{125}I. Alle energieën in keV.

nuclide	^{22}*Na*		^{55}*Fe*	^{81}*Kr*	^{125}*I*	
$T_{½}$	2,602 j		2,7 j	$2{,}3\cdot10^5$ j	59,39 d	
verval	β^+		EC	EC	EC	
straling	γ	$\gamma_{\pm}$	X_K	X_K	X_K	γ
energie	1275	511	6	12	27	35
$f_{emissie}$	1,00	1,81	0,28	0,53	1,39	0,07

Gegeven

- vervalgegevens van de radionucliden ^{22}Na, ^{55}Fe, ^{81}Kr en ^{125}I (zie tabel 1)
- detectorrendement van de meetkoppen A en B als functie van de fotonenergie (zie figuur 1)
- het effectieve oppervlak van de meetkoppen A en B bedraagt 4,5 cm² respectievelijk 3,1 cm²
- de afstand tussen detector en tafelblad tijdens de metingen bedraagt 30 mm
- de geometriefactor voor een puntbron en een cilindervormige detector is:

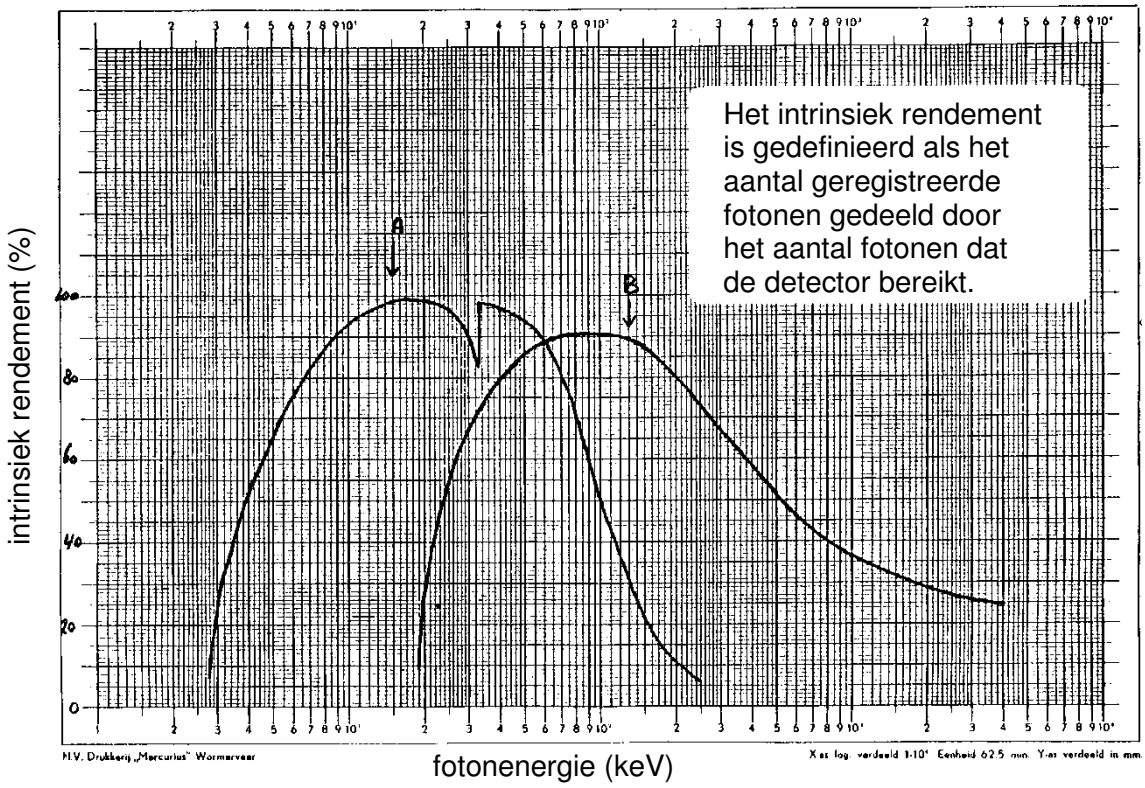
$$f_{\text{geo}} = 0{,}5 \times [1 - \cos(\alpha)]$$
$$\cos(\alpha) = \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}}$$

h = afstand van de bron tot het voorvlak van de detector
r = straal van het cirkelvormige voorvlak

Vragen

1 Bepaal met behulp van de gegevens in tabel 1 en figuur 1 uit welk nuclide de besmetting bestaat, ervan uitgaande dat de besmetting uit slechts één van de vier in de tabel genoemde nucliden bestaat. Beredeneer uw antwoord.

2 Bereken uit één van de meetresultaten de activiteit van de besmetting. Deze mag als puntbron worden beschouwd. Er hoeft geen rekening te worden gehouden met de verzwakking in lucht.



Figuur 1. Detectorrendement van de meetkoppen A en B als functie van de fotonenergie.

7 Meting van foliediktes met een β-bron (2000-1-1)

In een fabriek van kunststoffen wil men tijdens het productieproces foliediktes meten met behulp van de transmissie van β-straling.

Alvorens over te gaan tot aanschaf van een sterke bron, wordt er eerst een minder actieve testbron van $^{90}Sr/^{90}Y$ gebruikt voor metingen van diktes tot 400 mg·cm^{-2}. Volgens het bij de bron meegeleverde certificaat bedroeg de ^{90}Sr activiteit 185 kBq op 01-01-1995. Zonder folie worden met deze bron op 1 mei 2000 netto 4899 telpulsen in 10 s geregistreerd. Bij meting van een bepaald folie op dezelfde dag geeft de detector netto 1952 telpulsen in 10 s.

Gegeven

- het vervalschema van ^{90}Sr (zie Appendix, figuur 16)
- het vervalschema van ^{90}Y (zie Appendix, figuur 17)
- de transmissie van β^--deeltjes van $^{90}Sr/^{90}Y$ door kunststof (zie figuur 1)
- het geabsorbeerde dosistempo in lucht voor een puntvormige β^--bron (zie figuur 2)

Vragen

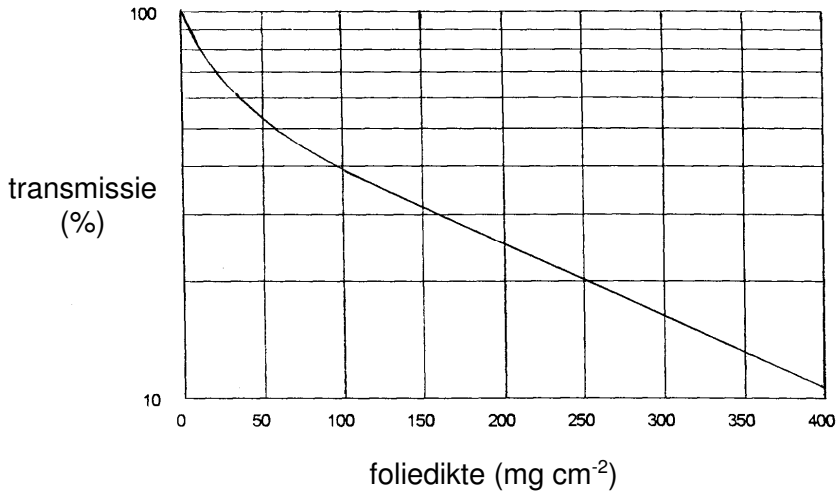
1 Bepaal het totale rendement van de gebruikte meetopstelling zonder folie.

2 Bereken de dikte (in mg·cm^{-2}) van het gemeten folie.

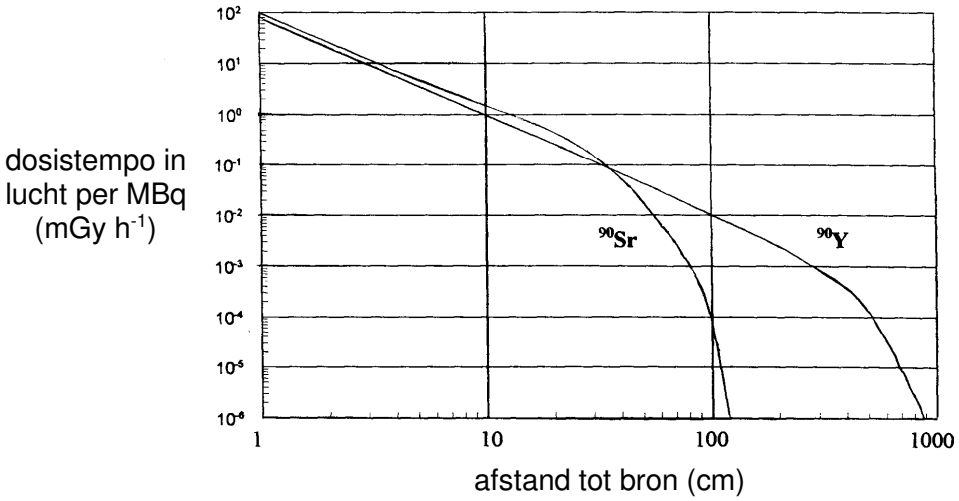
3 Hoe lang moet een telling bij een foliedikte van 200 mg·cm^{-2} tenminste duren opdat de relatieve standaarddeviatie van het eindresultaat gelijk is aan 2,5% ?

In de te gebruiken industriële opstelling zal een veel sterkere $^{90}Sr/^{90}Y$-bron worden toegepast, namelijk 185 MBq ^{90}Sr in evenwicht met de dochter ^{90}Y bij in gebruik name.

4 Bereken het geabsorbeerde dosistempo in lucht op 1 m afstand van de onafgeschermde bron in de uiteindelijke opstelling.



Figuur 1. Transmissie van β-deeltjes van $^{90}Sr/^{90}Y$ door kunststof.



Figuur 2. Het geabsorbeerde dosistempo in lucht voor een puntvormige β-bron.

8 Detectielimiet (1998-1-4)

De lozing van het radionuclide ^{210}Po via een ventilatieschacht wordt regelmatig gecontroleerd met behulp van een luchtbemonsteringsapparaat. Voor elke monstername wordt 20 m^3 lucht door het apparaat geleid.

Ter verkrijging van een eerste indruk van de activiteit wordt het monster na 30 d gemeten in een daartoe geschikte meetopstelling met een telrendement van 20% voor α-straling. In een tijd van 30 min worden 240 telpulsen verzameld. De achtergrond veroorzaakt in deze meetopstelling 3361 telpulsen in 8 h.

Voor α-stralers is de maximaal te lozen volumieke activiteit in de vigerende vergunning vastgelegd op 50 mBq·m^{-3}.

Gegeven

- $T_{½}(^{210}\text{Po}) = 138$ d
- het emissierendement is $f_\alpha = 1$
- de bijdrage van γ-straling tot het teltempo mag worden verwaarloosd
- de minimaal detecteerbare activiteit A_{min} kan worden berekend met de formule:

$$A_{\text{min}} = \frac{k}{\varepsilon}\sqrt{T_{\text{nul}}\left[\frac{1}{t_{\text{bruto}}} + \frac{1}{t_{\text{nul}}}\right]}$$

k = gewenste betrouwbaarheidsinterval (= aantal standaarddeviaties)
ε = telrendement
T_{nul} = teltempo ten gevolge van de achtergrondstraling
t_{bruto} = meettijd van het monster.
t_{nul} = meettijd van de achtergrondstraling

Vragen

1 Bereken de activiteit ten tijde van de monstername.

2 Bereken de standaarddeviatie van deze activiteit.

3 Bereken de minimaal te detecteren activiteit A_{min} ten tijde van de monstername. Ga uit van een betrouwbaarheidsinterval van 95% (dit is twee keer de standaarddeviatie, dus $k = 2$).

4 Is de bij vraag 3 berekende minimaal detecteerbare activiteit laag genoeg om het eventueel overschrijden van de genoemde lozingsnorm vast te stellen?

9 Vulhoogtemeting (2000-2-3)

In een bierbrouwerij moet worden vastgesteld of blikjes bier op de lopende band voldoende gevuld zijn. Dit gebeurt met behulp van een radioactieve ^{85}Kr-bron die γ-straling uitzendt. De bronsterkte bedraagt 10 GBq. De straling wordt gedetecteerd met behulp van een NaI(Tl)-kristal dat γ-straling omzet in elektrische telpulsen.

Gegeven

- het vervalschema van ^{85}Kr (zie Appendix, figuur 13)
- een schets van de meetopstelling (zie figuur 1)
- het blik heeft een diameter van 48 mm
- de invloed van het blik op de transmissie mag worden verwaarloosd
- de achtergrondstraling mag eveneens worden verwaarloosd
- de fotonenbundel is sterk gecollimeerd
- het totale detectierendement (inclusief geometriefactor) voor de fotonen van ^{85}Kr is $1{,}6 \cdot 10^{-4}$
- de massieke verzwakkingscoëfficiënt van bier voor fotonen met een energie van 514 keV bedraagt 0,0097 $m^2 \cdot kg^{-1}$
- bier heeft een soortelijke massa van 1008 $kg \cdot m^{-3}$
- de eenzijdige overschrijdingskans van een gemeten aantal telpulsen als functie van het aantal standaarddeviaties vanaf de verwachtingswaarde (zie tabel 1)

Vragen

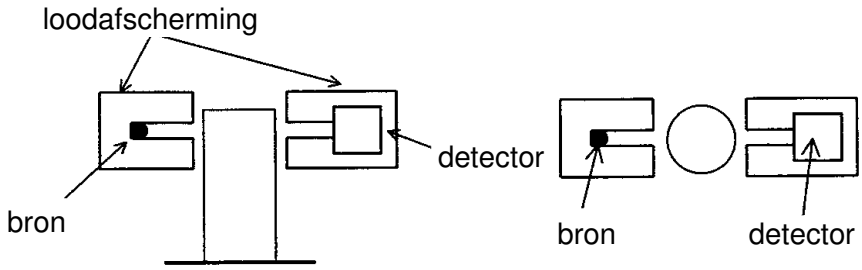
1 Bereken het door de detector geregistreerde teltempo met een leeg blikje.

2 Bereken het door de detector geregistreerde teltempo met een vol blikje in het midden tussen bron en detector.

3 De integratietijd van de detector is ingesteld op 20 ms, dat wil zeggen dat het teltempo over een periode van 20 ms gemiddeld wordt. Hoe groot is de standaarddeviatie in het teltempo bij een vol blikje bier?

4 De selectiedrempel voor discriminatie tussen volle en lege blikjes is ingesteld op precies het gemiddelde van de teltempi voor een vol en een leeg blik. Bereken de kans dat een vol blikje als leeg wordt aangemerkt (= vals leeg) ten gevolge van statistische fluctuaties in het teltempo bij een vol blik.

5 De directie van de brouwerij vindt het aantal vals lege blikken, zoals berekend bij vraag 4, te groot. Geef tenminste twee manieren om dit aantal terug te dringen; geef voor elk van beide manieren tevens een nadeel aan.



Figuur 1. Zijaanzicht (links) en bovenaanzicht (rechts) van de meetopstelling.

Tabel 1. Eenzijdige overschrijdingskans P(k) voor een normaalverdeling.

k	*0,0*	*0,1*	*0,2*	*0,3*	*0,4*	*0,5*	*0,6*	*0,7*	*0,8*	*0,9*
0	0,500	0,460	0,421	0,382	0,345	0,308	0,274	0,242	0,212	0,184
1	0,159	0,136	0,115	0,097	0,081	0,067	0,055	0,045	0,036	0,029
2	0,023	0,018	0,014	0,011	0,008	0,006	0,005	0,003	0,003	0,002

10 Afvalmonitor (1994-1-1)

Een ziekenhuis overweegt om een afvalmonitor aan te schaffen voor het sorteren van radioactief afval. Het apparaat moet in staat zijn om ^{131}I in afvalzakken te meten tot ruim onder de wettelijke vrijgavegrens van 100 $Bq \cdot g^{-1}$.

Een fabrikant biedt een instrument aan waarin zakken afval tot 20 kg in een kast kunnen worden geplaatst. De zijwanden van de kast zijn voorzien van scintillatiedetectoren met een groot oppervlak. Om het achtergrondteltempo te reduceren is de gehele kast omgeven met een laag lood van 2,5 cm dikte. Aan de voorzijde van de kast bevindt zich een deur die eveneens een detector bevat. In de bodem van de kast is een weegschaal gemonteerd die de massa van de afvalzak registreert.

Tussen de metingen door wordt bij gesloten deur en zonder zak op de weegschaal het achtergrondteltempo gemeten. De meettijd bedraagt hiervoor steeds 10 minuten. Onder normale omstandigheden bedraagt het achtergrondteltempo 1398 telpulsen per seconde (tps).

Nadat een afvalzak in de kast is geplaatst, wordt een meting van 10 seconden gestart op het moment dat de deur is gesloten. In de computer worden gemeten teltempo en massa omgerekend naar massieke activiteit, en het resultaat verschijnt vervolgens op het beeldscherm.

Gegeven

- het vervalschema van ^{131}I (zie Appendix, figuur 20)
- het rendement van de monitor (zie figuur 1)
- de bijdrage van de β-straling tot het teltempo mag worden verwaarloosd
- in dit vraagstuk wordt de minimaal detecteerbare activiteit gedefinieerd als de activiteit die overeenkomt met drie standaarddeviaties van de achtergrond

Vragen

1 Bereken de ijkfactor (in $tps \cdot Bq^{-1}$) voor het nuclide ^{131}I.

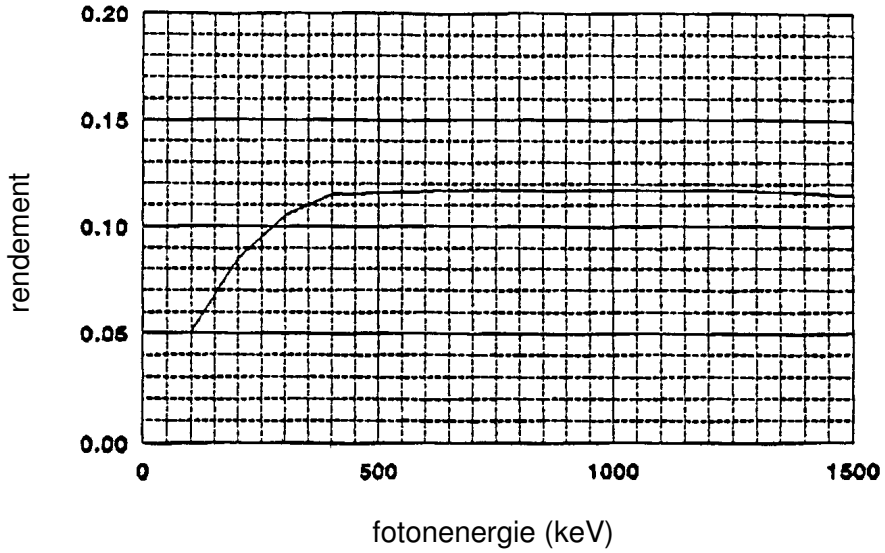
2 Bereken het bruto-teltempo (in tps) voor een afvalzak van 20 kg met een gemiddelde activiteitsconcentratie van 1 $Bq \cdot g^{-1}$.

3 Hoe groot is het aantal geregistreerde telpulsen in de meettijd van 10 seconden voor een zak van 20 kg die geen toegevoegde activiteit bevat?

4 Hoe groot is de standaarddeviatie van dit aantal?

5 Bepaal de minimaal detecteerbare ^{131}I-activiteit (in Bq).

6 Bepaal tenslotte de minimaal detecteerbare massieke ^{131}I-activiteit (in $Bq \cdot g^{-1}$) bij een zakmassa van 20 kg. Voldoet het instrument aan het gestelde doel?



Figuur 1. Totaal telrendement van de afvalmonitor als functie van de fotonenergie.

11 Geactiveerd gereedschap (1994-2-2)

Bij werkzaamheden in een kerncentrale is een stuk gereedschap radioactief geworden door activering. Het gereedschap heeft een massa van 510 gram en is gedurende 0,1 uur blootgesteld aan thermische neutronen. Ten behoeve van een eerste analyse wil men de halveringstijden van de voornaamste radionucliden in het gereedschap bepalen. Daartoe wordt 2 uur na het einde van de activering een reeks metingen gestart met behulp van een scintillatieteller, met de volgende resultaten:

tijdstip	*teltempo (tps)*
12:00	$7{,}09 \cdot 10^{5}$
12:15	$3{,}20 \cdot 10^{5}$
12:30	$1{,}71 \cdot 10^{5}$
13:00	$8{,}77 \cdot 10^{4}$
15:00	$4{,}45 \cdot 10^{4}$
17:00	$2{,}60 \cdot 10^{4}$
20:00	$1{,}16 \cdot 10^{4}$

Nader onderzoek leert dat het de nucliden ^{56}Mn en ^{60m}Co betreft, ontstaan door activering van ^{55}Mn respectievelijk ^{59}Co. Van deze radionucliden heeft ^{60m}Co de kortste halveringstijd.

Gegeven

- het achtergrondteltempo bedraagt 162 tps
- het stuk gereedschap bevat 1,1 mg mangaan en 210 mg cobalt
- het atoomgewicht van mangaan en cobalt is 54,9 $g \cdot mol^{-1}$ respectievelijk 58,9 $g \cdot mol^{-1}$
- de natuurlijke abundanties van ^{55}Mn en ^{59}Co zijn 100%
- het getal van Avogadro is $6{,}02 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}
- het fluentietempo van de thermische neutronen is $1 \cdot 10^{16}$ $m^{-2} \cdot s^{-1}$
- de werkzame doorsneden voor de vangst van thermische neutronen zijn $\sigma_{th}(^{55}Mn) = 13{,}3 \cdot 10^{-28}$ m^2 respectievelijk $\sigma_{th}(^{59}Co) = 20 \cdot 10^{-28}$ m^2
- de activiteit A die ontstaat na bestraling van N atomen wordt gegeven door:

$$A = N\sigma_{th}\varphi_{th}\left(1 - e^{-\lambda t}\right)$$

σ_{th} = werkzame doorsnede per atoom voor de vangstreactie
φ_{th} = fluentietempo van de thermische neutronen
λ = vervalconstante van het activeringsproduct
t = bestralingstijd

- het aantal radioactieve kernen N^* dat bij de neutronenbestraling worden gevormd, wordt gegeven door de formule:

$$N^* = N\sigma_{th}\varphi_{th}t$$

Vragen

1 Zet de netto-teltempi uit op enkel-logaritmisch papier. Bepaal uit de grafiek de halveringstijden van de beide dominant aanwezige nucliden.

2 Bereken de activiteit van het gevormde ^{56}Mn en ^{60m}Co direct na de bestraling.

3 Na verloop van tijd ontstaat het nuclide ^{60}Co ($T_{½}$ = 5,27 j) door verval van ^{60m}Co. Bereken de ^{60}Co-activiteit 24 uur na bestraling.

4 Naast het ^{60}Co dat onstaat als gevolg van radioactief verval van ^{60m}Co, zal ook ^{60}Co aanwezig zijn dat rechtstreeks is ontstaan door neutronvangst in ^{59}Co. Voor deze reactieweg bedraagt de werkzame doorsnede $18 \cdot 10^{-28}$ m^2, zodat de totale doorsnede niet $20 \cdot 10^{-28}$ m^2 bedraagt, maar $38 \cdot 10^{-28}$ m^2. Bereken met dit gegeven de ^{60}Co-activiteit 24 uur na bestraling.

5 Als de bijdragen van andere langlevende activeringsproducten verwaarloosbaar zijn, bepaalt ^{60}Co op den duur de massieke activiteit. Na hoeveel tijd is de massieke activiteit van het stuk gereedschap kleiner dan de wettelijke vrijgavegrens van 10 Bq·g^{-1}?

12 Detectie van ^{55}Fe (1993-1-1)

Bij neutronenbestraling van ijzer en staal is ^{55}Fe een van de belangrijkste activeringsproducten. De enige vrijkomende straling waarmee bij dit vraagstuk rekening behoeft te worden gehouden, is de laagenergetische karakteristieke röntgenstraling.

Om de mate van activering van ijzer- en staaloppervlakken te kunnen meten, moet er gebruik worden gemaakt van een speciale detector die in staat is dergelijke laagenergetische fotonen waar te nemen. Men heeft de beschikking over een uiterst dun NaI(Tl)-kristal met een dikte van 0,1 mm, een oppervlak van 20 cm^2 en een entreefolie van beryllium met een dikte van 0,1 mm.

Gegeven

- het vervalschema van ^{55}Fe (zie Appendix, figuur 10)
- de soortelijke massa's van beryllium en natriumjodide bedragen 1,85 $g \cdot cm^{-3}$ respectievelijk 3,67 $g \cdot cm^{-3}$
- de massieke verzwakkingscoëfficiënten voor een fotonenergie van 6,4 keV zijn $\mu/\rho(Be) = 2{,}07\ cm^2 \cdot g^{-1}$ respectievelijk $\mu/\rho(NaI) = 450\ cm^2 \cdot g^{-1}$
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat de afstand tussen de detector en het te meten oppervlak mag worden verwaarloosd, dat de röntgenstraling voor de helft in de richting van de detector wordt uitgezonden, en dat elke interactie in de detector aanleiding geeft tot een telpuls

Vragen

1 Bereken de transmissie van het berylliumfolie.

2 Geef aan welke fractie van het aantal fotonen dat het kristal bereikt, geen interactie met het kristal zal geven.

3 Bereken de ijkfactor voor het meten van ^{55}Fe-bevattende oppervlakken met deze monitor in telpulsen per seconde (tps) per $Bq \cdot cm^{-2}$.

4 Om de respons van de detector vast te stellen wordt een gecalibreerde en voldoend grote plaatvormige bron aangeschaft met een ^{55}Fe-activiteit van 2000 $Bq \cdot cm^{-2}$. Ga ervan uit dat het ^{55}Fe zich in een zeer dunne laag op het oppervlak van de plaat bevindt. Als men de detector tegen deze plaat houdt, bedraagt het teltempo 5000 tps. Bereken hieruit de ijkfactor (in tps per $Bq \cdot cm^{-2}$).

13 Bepaling van de massieke verzwakkingscoëfficiënt (1992-1-1)

In figuur 1 (links) is het γ-spectrum van ^{137}Cs gegeven dat is opgenomen met een Ge-detector. De bron had een activiteit van 412 kBq en was geplaatst op 5 cm afstand van de detector. De meettijd bedroeg 1 min.

In figuur 1 (rechts) staat hetzelfde spectrum, nu echter opgenomen met een plaatje lood met een dikte van 5,0 mm tussen bron en detector.

Gegeven

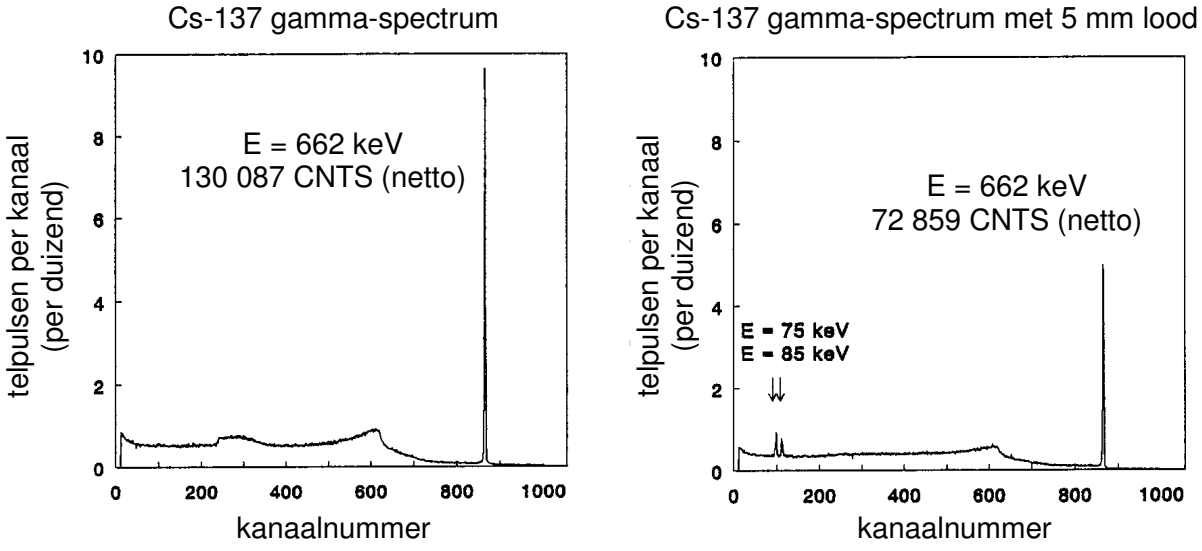
- het vervalschema van ^{137}Cs (zie Appendix, figuur 21)
- de soortelijke massa van lood is $\rho = 11\,340$ kg·m^{-3}
- het gemeten netto-aantal telpulsen in de fotopiek staat in figuur 1 aangegeven als CNTS

Vragen

1 Bereken het fotopiekrendement voor de detectie van γ-straling met een energie van 662 keV in de gegeven geometrie zonder lood.

2 Bereken de verzwakkingscoëfficiënt μ/ρ van lood voor 662 keV γ-straling. Waarom behoort hierbij geen rekening te worden gehouden met de dosisopbouwfactor?

3 Geef een verklaring voor het ontstaan van beide fotopiekjes bij 75 keV en 85 keV.



Figuur 1. Het γ-spectrum van ^{137}Cs, gemeten zonder absorber (links) en met absorber van 5 mm lood (rechts).

14 Meting aan ^{125}I (1999-1-4)

Men wil een hoeveelheid ^{125}I meten in een vloeistofscintillatieteller. Daartoe pipetteert men 100 µl van het monster in een plastic telflesje. Na toevoeging van 3 ml scintillatievloeistof wordt de inhoud van het telflesje gehomogeniseerd. Het netto-teltempo is 100 telpulsen per minuut.

Bij de interacties van de door ^{125}I uitgezonden röntgen- en γ-straling met de telvloeistof en de wand van het telflesje worden elektronen gevormd. Deze elektronen veroorzaken scintillatielicht in de telvloeistof, op dezelfde wijze als de door ^{125}I uitgezonden conversie- en Auger-elektronen dat doen. Het scintillatielicht wordt vervolgens door de fotomultiplicatorbuizen gedetecteerd. De vloeistofscintillatieteller is zodanig ingesteld dat elektronen met een energie tussen 10 keV en 100 keV worden gemeten met een telrendement van 80%. Scintillaties die afkomstig zijn van elektronen met een energie kleiner dan 10 keV worden niet geregistreerd.

Gegeven

- het vervalschema van ^{125}I (zie Appendix, figuur 19)
- de massieke verzwakkingscoëfficiënt van de telvloeistof/telflesje-combinatie voor fotonen met een energie van 30 keV bedraagt 3 $cm^2 \cdot g^{-1}$
- de soortelijke massa van de telvloeistof/telflesje-combinatie is 1 $g \cdot cm^{-3}$

Vragen

1 Bereken het detectierendement voor fotonen met een energie van 30 keV. De gemiddelde weglengte van de fotonen in het telflesje bedraagt 3 mm.

2 Bereken de bijdrage van de conversie- en Auger-elekronen aan het teltempo bij een activiteit van 1 Bq.

3 Bereken de bijdrage van de röntgen- en γ-fotonen aan het teltempo bij een activiteit van 1 Bq. Stel hierbij de energie van fotonen met 20 keV < E < 40 keV op 30 keV.

4 Bereken de ^{125}I-activiteit in het monster.

15 Vloeibaar afval (1990-2-3)

In een laboratorium worden de radionucliden ^{3}H, ^{14}C en ^{32}P gebruikt. De stralingsbeschermingsdeskundige maakt voor de meting van vloeibaar afval gebruik van een vloeistofscintillatieteller met drie kanalen A, B en C. Op 1 februari 1990 werd een vat afvalvloeistof ingeleverd met daarop de vermelding **P-32**. De deskundige nam diezelfde dag 2 ml uit het vat en bewerkte dat tot monster #1. Uit de meetresultaten berekende hij de datum waarop dat vat zou mogen worden geloosd op het openbaar riool.

Op de berekende datum nam hij de monsters #2, #3 en #4. Omdat hij meer activiteit aantrof dan verwacht, zat er blijkbaar ook ^{3}H en/of ^{14}C in het water. Om de activiteit daarvan te bepalen, voegde hij aan monster #3 een zeer klein volume met 160 Bq ^{3}H toe, resulterend in monster #5. Op dezelfde wijze ontstond monster #6 door een zeer klein volume met 300 Bq ^{14}C aan monster #4 toe te voegen. Daarna werden de monsters #5 en #6 gemeten.

Gegeven

- de vervaleigenschappen van de gebruikte radionucliden (zie tabel 1)
- de lozingsnorm voor ^{32}P was in 1990 (!) 0,25 $Bq \cdot ml^{-1}$
- telrendementen voor ^{32}P in de kanalen A, B en C zijn respectievelijk 5%, 26% en 65%
- de meetresultaten gecorrigeerd voor achtergrond, in telpulsen per minuut (zie tabel 2)

Vragen

1 Welke is de door de deskundige te berekenen juiste datum voor lozing van dit afval?

2 Bereken het telrendement voor ^{14}C in de kanalen A en B.

3 Bereken het telrendement voor ^{3}H in de kanalen A en B.

4 Bereken de concentratie van ^{14}C en/of ^{3}H in het afvalwater (in $Bq \cdot ml^{-1}$).

5 Kon de bij vraag 4 berekende concentratie van ^{3}H en/of ^{14}C in het afvalwater reeds op 1 februari 1990 worden vastgesteld? Beredeneer uw antwoord.

Tabel 1. Vervaleigenschappen van de gebruikte radionuliden.

nuclide	$T_{½}$	$E_{\beta,max}$ *(keV)*
^{3}H	12,35 j	18,6
^{14}C	5730 j	156
^{32}P	14,29 d	1710

Tabel 2. Meettijd (in minuut) en netto-meetresultaten (in telpulsen per minuut).

monster	*meettijd (min)*	*A: 0-20 keV (tpm)*	*B: 20-160 keV (tpm)*	*C: 160-1750 keV (tpm)*
#1	1	$5{,}8 \cdot 10^{5}$	$3{,}0 \cdot 10^{6}$	$7{,}8 \cdot 10^{6}$
#2	10	1026	1405	19
#3	10	1002	1423	21
#4	10	1040	1413	20
#5	10	4187	1417	19
#6	10	7498	10 265	21

16 Lekkende ^{131}I-bron (1991-2-1)

In een ruimte met een inhoud van 50 m^3 bevindt zich een opstelling waaruit een wisselende hoeveelheid ^{131}I lekt. In deze ruimte moet een reparatie worden uitgevoerd. De ventilatie, die in die ruimte onder normale bedrijfsomstandigheden zorgt voor een ventilatievoud van tien maal per uur, moet voor de reparatie noodzakelijkerwijs worden uitgeschakeld. In het verleden is gemeten dat bij werkende ventilatie de gemiddelde activiteitsconcentratie van ^{131}I tot maximaal 250 mBq·m^{-3} kan oplopen.

De reparatie duurt in totaal 5 uur, waarbij de monteur gedurende het eerste en het laatste uur in de ruimte moet zijn.

Gegeven

- $T_{½}$(^{131}I) = 8,02 d
- de monteur is een normale neusademer met een ademtempo van 1,2 m^3·h^{-1}

Vragen

1 Bereken de activiteit die maximaal uit de opstelling lekt (in Bq·h^{-1}). Neem bij de berekening aan dat het lek constant is.

2 Geef een formule die de gemiddelde activiteitsconcentratie in de ruimte beschrijft als functie van de tijd vanaf het moment dat de ventilatie wordt uitgeschakeld. Neem hierbij aan dat het lek maximaal is (zie vraag 1) en dat de gemiddelde concentratie bij aanvang van de werkzaamheden 20 mBq·m^{-3} bedraagt.

3 Maak een schatting van de maximale activiteit die de monteur heeft ingeademd. Neem hierbij aan dat de activiteitsconcentratie plaatselijk het tienvoudige kan bedragen van de gemiddelde activiteitsconcentratie zoals berekend met de formule verkregen bij vraag 2.

17 Kwik in een kolencentrale (2000-1-2)

Om het gedrag van kwikverontreinigingen in een kolencentrale te bestuderen wordt gebruik gemaakt van een kwik-tracer. Dit is geactiveerd kwik dat aan de ingaande kolenstroom wordt toegevoegd. Vervolgens wordt de concentratie van het radioactieve kwik gemeten in de verschillende afvalstromen van de centrale.

Van het kwik komt ongeveer 25% als kwikdamp in de uitgaande luchtstroom, 1% als kwikoxide in de bodem-as (slakken) en 40% als kwikoxide in de vlieg-as. De rest wordt in de ontzwavelingsinstallatie afgevangen en wordt hier niet nader beschouwd.

Het experiment wordt uitgevoerd met 300 MBq ^{203}Hq. Dit geactiveerde kwik wordt verkregen via de reactie $^{202}Hg(n,\gamma)^{203}Hg$ door zuiver kwik te bestralen in een reactor. Het neutronenfluentietempo ter plaatse van de bestralingsopstelling is $1 \cdot 10^{18}$ m^{-2}·s^{-1} en de werkzame doorsnede voor de gegeven vangstreactie is $5 \cdot 10^{-28}$ m^2. Om de eveneens gevormde kortlevende kwik-isotopen te laten vervallen, wordt een wachttijd van 30 d in acht genomen.

In de vergunning die verleend is ten behoeve van dit experiment is een limiet gesteld van 1 Re_{inh} per experiment voor lozing in lucht en 100 Bq·g^{-1} voor vaste afvalstoffen.

Tabel 1. Het productietempo van de afvalstoffen.

afvalstroom	*productietempo*
lucht	$2{,}0 \cdot 10^6$ m^3·h^{-1}
bodem-as	$3{,}3 \cdot 10^3$ kg·h^{-1}
vlieg-as	$24{,}2 \cdot 10^3$ kg·h^{-1}

Gegeven

- het productietempo van de afvalstoffen (zie tabel 1)
- het atoomgewicht van kwik is 200,59 g·mol^{-1}
- de natuurlijke abundantie van ^{202}Hg is 29,86%
- het getal van Avogadro is $6{,}02 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{203}Hg (zie Appendix, figuur 23)
- het productietempo van ^{203}Hg wordt bepaald door het aantal atomen ^{202}Hg, het neutronenfluentietempo en de werkzame doorsnede
- ga ervan uit dat de activiteit binnen een uur in de as terecht komt

Vragen

1 Bereken de ^{203}Hg-activiteit die geproduceerd moet worden ten einde op het moment van injectie in de centrale 300 MBq ter beschikking te hebben.

2 Bereken het aantal atomen ^{202}Hg in 1 gram kwik.

3 Bereken het aantal atomen ^{203}Hg dat per seconde wordt gevormd in 1 gram kwik.

4 Bereken de ^{203}Hg-activiteit die per seconde wordt aangemaakt in 1 gram kwik.

5 Hoe lang moet 1 gram kwik worden bestraald om 300 MBq te produceren?

6 Bereken de lozing in lucht. Voldoet deze aan de vergunningseis?

7 Bereken de massieke activiteit in bodem- en vlieg-as. Voldoet deze aan de vergunningseis?

8 Tijdens de injectie in de toevoer van de centrale wordt een gebied rond het injectiepunt afgezet zodat buiten deze afzetting $H^* < 1\ \mu Sv \cdot h^{-1}$. Bereken de afstand tot de ^{203}Hg-bron die deze afzetting minimaal moet hebben.

18 Luchtbesmettingsmonitor (1991-1-1)

Om γ-stralende radioactieve aerosolen in de buitenlucht te detecteren worden bandfilter-aerosolmonitoren gebruikt. Deze zijn voorzien van een filterband die om de twee uur zover opschuift dat er een schoon stuk filtermateriaal voor de aanzuigmond van de pomp verschijnt. Terwijl de lucht wordt aangezogen, worden de op het filter gedeponeerde radioactieve aerosolen geregistreerd met behulp van een germaniumdetector.

Gegeven

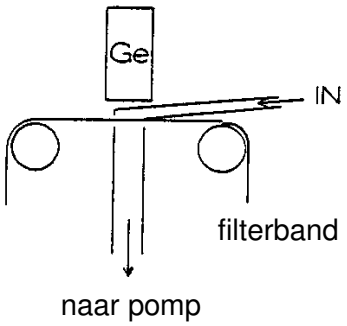
- een situatieschets van de opstelling (zie figuur 1)
- het vervalschema van ^{137}Cs (zie Appendix, figuur 21)
- de pomp zorgt voor een constant luchtdebiet van 9,5 $m^3 \cdot h^{-1}$
- het filter heeft een vangstrendement van 100%
- het fotopiekrendement van de germaniumdetector in de gebruikte geometrie (zie figuur 2)
- voor het vaststellen van de minimaal te detecteren ^{137}Cs-activiteit wordt in dit vraagstuk gesteld dat een fotopiek pas wordt herkend als deze tenminste een netto inhoud heeft van 30 telpulsen

Vragen

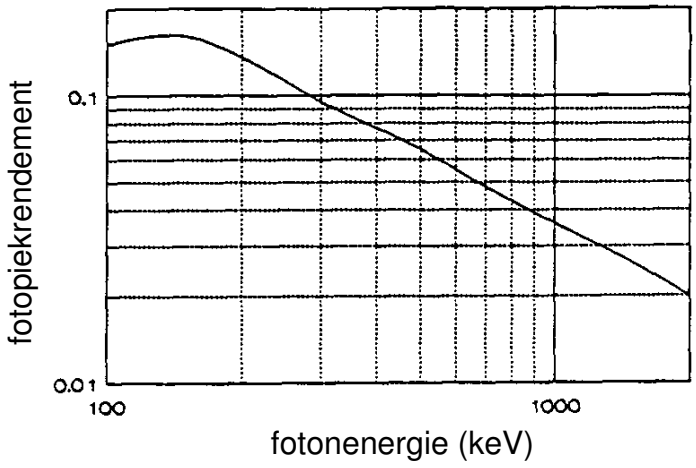
1 Bereken de ^{137}Cs-activiteit op het filter na afloop van de bemonstering- en meetperiode van 2 uur als in de buitenlucht gedurende deze periode een constante activiteitsconcentratie van 10 $Bq \cdot m^{-3}$ ^{137}Cs aanwezig is.

2 Bereken het netto-aantal geregistreerde pulsen in de fotopiek van ^{137}Cs na afloop van de bemonsterings- en meetperiode bij de aangegeven activiteitsconcentratie.

3 Bereken de luchtactiviteitsconcentratie van ^{137}Cs die met deze opstelling nog net kan worden aangetoond.



Figuur 1. Meetopstelling met Ge-detector.

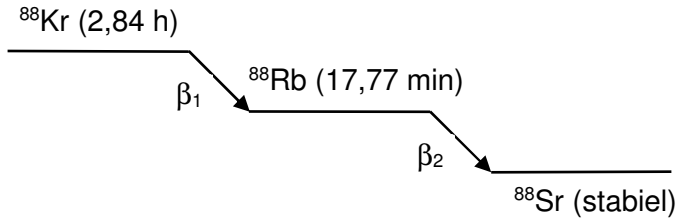


Figuur 2. Fotopiekrendement van bandfilter en Ge-detector.

19 ^{88}Kr-activiteit in aerosolen (1996-1-4)

In een afgesloten, niet geventileerde ruimte met een inhoud van 1000 m^3 bij een kerncentrale ontsnapt het radioactieve edelgas ^{88}Kr uit een lekkende ventilatieleiding. Men wil de activiteitsconcentratie van het ^{88}Kr in de ruimte bepalen door meting van de activiteitsconcentratie van ^{88}Rb dat als vervalproduct uit ^{88}Kr ontstaat.

Men zuigt gedurende 30 minuten lucht uit de betreffende ruimte door een filter, waarna de β^--activiteit op het filter wordt bepaald. De meting begint 10 minuten na het einde van de bemonsteringsperiode en duurt 30 minuten. Bij het begin van de bemonsteringsperiode bevindt zich geen activiteit op het filter. Na correctie voor de achtergrond bedraagt het aantal in 30 minuten gemeten telpulsen 150 000.



Figuur 1. De vereenvoudigde vervalschema's van de radionucliden ^{88}Kr en ^{88}Rb.

Gegeven

- neem aan dat het lektempo van ^{88}Kr gedurende een week voorafgaand aan de meting constant is geweest
- het debiet van de bemonsteringsopstelling bedraagt 30 l·min^{-1}
- het vangstrendement van het filter voor ^{88}Rb is 100%
- het vangstrendement van het filter voor ^{88}Kr is nul
- het telrendement van de telopstelling voor de β-deeltjes van ^{88}Rb bedraagt 10%
- de vereenvoudigde vervalschema's van ^{88}K en ^{88}Rb (zie figuur 1)
- neem bij de berekeningen aan dat voor ^{88}Kr en ^{88}Rb andere verwijderingsmechanismen mogen worden verwaarloosd ten opzichte van de verwijdering door radioactief verval
- maak bij de beantwoording van onderstaande vragen zo nodig gebruik van de formule:

$$\int_0^{\mathrm{T}} \mathrm{e}^{-\lambda t}\,\mathrm{d}t = \frac{1}{\lambda}(1 - \mathrm{e}^{-\lambda \mathrm{T}})$$

Vragen

1 Bereken de ^{88}Rb-activiteit op het filter bij het begin van de telling.

2 Bereken de ^{88}Rb-activiteit op het filter aan het eind van de bemonsteringsperiode.

3 Bereken de ^{88}Rb-concentratie in de bemonsterde lucht.

4 Maak een schatting van de ^{88}Kr-concentratie in de ruimte.

20 Slijpschijf met natuurlijke radioactieve stoffen (1995-2-4)

Van een slijpschijf die gebruikt wordt voor het doorslijpen van metalen buizen blijkt het materiaal een tamelijk grote natuurlijke activiteit te bezitten. De gevonden nucliden zijn van de ^{238}U-reeks (waarvan in tabel 1 de ^{226}Ra-subreeks is vermeld) en de ^{232}Th-reeks. Met behulp van een γ-spectrometer wordt een analyse uitgevoerd van dit materiaal. Zo'n analyse levert niet van alle aanwezige nucliden uit deze reeksen informatie. Wel kan de activiteit van enkele sleutelnucliden worden aangetoond (zie tabel 1).

Gegeven

- verval ^{226}Ra: ^{222}Rn, ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po, ^{210}Pb, ^{210}Bi, ^{210}Po, ^{206}Pb (stabiel)
- verval ^{232}Th: ^{228}Ra, ^{228}Ac, ^{228}Th, ^{224}Ra, ^{220}Rn, ^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{208}Tl, ^{208}Pb (stabiel)
- alle hierboven staande dochters van ^{226}Ra ($T_{½}$ = 1600 j) en ^{232}Th ($T_{½}$ = 1,405·10^{10} j) bezitten een veel kortere halveringstijd dan hun respectievelijke moeders
- de activiteit van ^{238}U en de dochters tot aan ^{226}Ra is voor dit vraagstuk verwaarloosbaar ten opzichte van die van de ^{226}Ra-subreeks
- een slijpschijf bevat 390 g slijpmateriaal
- de vrijstellingsgrenzen volgens het Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming (zie tabel 2)

Tabel 1. Gemeten massieke activiteit (in Bq·kg^{-1}) van enkele radionucliden uit de ^{226}Ra- en ^{232}Th-reeks. Alle γ-energieën zijn gegeven in keV.

^{238}U-reeks			*^{232}Th-reeks*		
nuclide	*$E_γ$*	*massieke activiteit*	*nuclide*	*$E_γ$*	*massieke activiteit*
^{226}Ra	186	127	^{228}Ac	911	153
^{214}Bi	1120	120	^{212}Pb	239	164
^{214}Bi	1764	130	^{212}Pb	300	139
			^{208}Tl	583	133
			^{208}Tl	2614	181

Tabel 2. Vrijstellingsgrenzen voor activiteitsconcentratie (in Bq·g^{-1}) en activiteit (in Bq).

radionuclide	*activiteitsconcentratie*	*activiteit*	
Ra-226 +	1	1·10^4	+, sec
Th-232 sec	1	1·10^3	er wordt uitsluitend getoetst aan de waarde voor het moedernuclide

Vragen

1 Welke conclusie kunt u trekken met betrekking tot het radiologisch evenwicht tussen de gemeten radionucliden uit de twee afzonderlijke reeksen? Neem in aanmerking dat in beide reeksen een nuclide van het gasvormige element radon voorkomt.

2 Maak een schatting van de totale massieke activiteit per (sub)reeks (in Bq·kg^{-1}). Dit is de activiteit van alle radionucliden van de (sub)reeks tezamen.

3 Is een voorraad van 100 slijpschijven vergunningplichtig?

Uitwerkingen

Vraagstuk 1

1 $220\ \text{Bq·kg}^{-1} \times e^{-0{,}693\times 2013/5730} = 220\ \text{Bq·kg}^{-1} \times 0{,}784 = 172\ \text{Bq·kg}^{-1}$

2 $220\ \text{Bq·kg}^{-1} \times e^{-0{,}693\ t/5730} = 135\ \text{Bq·kg}^{-1}$

$t = (5730\ \text{j} / 0{,}693) \times \ln(220\ \text{Bq·kg}^{-1} / 135\ \text{Bq·kg}^{-1}) = (5730\ \text{j} / 0{,}693) \times 0{,}488 = 4035\ \text{j}$

3 $T_{\text{netto}} = T_{\text{bruto}} - T_{\text{nul}}$

$= 513 / (32\ \text{h} \times 3600\ \text{s·h}^{-1}) - 0{,}003\ 00\ \text{tps}$

$= 0{,}004\ 45\ \text{tps} - 0{,}003\ 00\ \text{tps} = 0{,}001\ 45\ \text{tps}$

$t_{\text{bruto}} = t_{\text{nul}} = 32\ \text{h} \times 3600\ \text{s·h}^{-1} = 115\ 200\ \text{s}$

$\sigma_{T\text{netto}} = \sqrt{(T_{\text{bruto}}/t_{\text{bruto}} + T_{\text{nul}}/t_{\text{nul}})}$

$=\sqrt{[(0{,}004\ 45\ \text{tps} + 0{,}003\ 00\ \text{tps}) / 115\ 200\ \text{s}]} = 0{,}000\ 25\ \text{tps}$

activiteit $A = (0{,}001\ 45 \pm 0{,}000\ 25)\ \text{tps} / 0{,}95 = (1{,}53 \pm 0{,}26)\cdot 10^{-3}\ \text{Bq}$

volume CO_2-gas $100\ \text{cm}^3 \times 10^{-3}\ \text{l cm}^{-3} = 0{,}10\ \text{l}$

dit komt overeen met $0{,}10\ \text{l} / 22{,}4\ \text{l·mol}^{-1} = 4{,}46\times 10^{-3}\ \text{mol}$

massa koolstof $m = 4{,}46\cdot 10^{-3}\ \text{mol} \times 12{,}0\ \text{g·mol}^{-1} \times 10^{-3}\ \text{kg·g}^{-1} = 5{,}35\cdot 10^{-5}\ \text{kg}$

massieke activiteit $A / m = (1{,}53 \pm 0{,}26)\cdot 10^{-3}\ \text{Bq} / 5{,}35\cdot 10^{-5}\ \text{kg} = 28{,}6 \pm 4{,}9\ \text{Bq·kg}^{-1}$

4 $220\ \text{Bq·kg}^{-1} \times e^{-0{,}693\ t/5730} = 28{,}6\ \text{Bq·kg}^{-1}$

$t = (5730\ \text{j} / 0{,}693) \times \ln(220\ \text{Bq·kg}^{-1} / 28{,}6\ \text{Bq·kg}^{-1}) = (5730\ \text{j} / 0{,}693) \times 2{,}04 = 16\ 870\ \text{j}$

5 95% komt overeen met een eenzijdige overschrijdingskans $P(k) = 0{,}05$

aflezen tabel 1 $\rightarrow\ k \approx 1{,}65$

$A > 28{,}6\ \text{Bq·kg}^{-1} - 1{,}65 \times 4{,}9\ \text{Bq·kg}^{-1} = 20{,}5\ \text{Bq·kg}^{-1}$

$t < (5730\ \text{j} / 0{,}693) \times \ln(220\ \text{Bq·kg}^{-1} / 20{,}5\ \text{Bq·kg}^{-1}) = (5730\ \text{j} / 0{,}693) \times 2{,}37 = 19\ 596\ \text{j}$

Vraagstuk 2

1 meting 1 op $t = 0$:

volgens de gegevens is er alleen ^{89}Sr en ^{90}Sr

$T_{\text{bruto}} = 6450 / (1\ \text{h} \times 3600\ \text{s·h}^{-1}) = 1{,}79\ \text{tps}$

$T_{\text{netto}} = T_{\text{bruto}} - T_{\text{nul}} = 1{,}79\ \text{tps} - 0{,}02\ \text{tps} = 1{,}77\ \text{tps}$

$A(^{89}\text{Sr}, 0) + A(^{90}\text{Sr}, 0) = T_{\text{netto}} / 28\cdot 10^{-2} = 1{,}77\ \text{tps} / 0{,}28 = 6{,}32\ \text{Bq}$ (a)

meting 2 op $t = 30$ d:

^{89}Sr deels vervallen $A(^{89}\text{Sr}, 30\ \text{d}) = A(^{89}\text{Sr}, 0) \times e^{-0{,}693\times 30/50{,}5} = 0{,}66\ A(^{89}\text{Sr}, 0)$

^{90}Sr nauwelijks vervallen $A(^{90}\text{Sr}, 30\ \text{d}) = A(^{90}\text{Sr}, 0)$

^{90}Y in evenwicht met ^{90}Sr $A(^{90}\text{Y}, 30\ \text{d}) = A(^{90}\text{Sr}, 30\ \text{d}) = A(^{90}\text{Sr}, 0)$

$T_{\text{bruto}} = 7622 / (1\ \text{h} \times 3600\ \text{s·h}^{-1}) = 2{,}12\ \text{tps}$

$T_{\text{netto}} = T_{\text{bruto}} - T_{\text{nul}} = 2{,}12\ \text{tps} - 0{,}02\ \text{tps} = 2{,}10\ \text{tps}$

$0{,}66\ A(^{89}\text{Sr}, 0) + A(^{90}\text{Sr}, 0) + A(^{90}\text{Sr}, 0) = 2{,}10\ \text{tps} / 0{,}28 = 7{,}50\ \text{Bq}$ (b)

uit (a) en (b) volgen de volgende twee vergelijkingen:

$2\ A(^{89}\text{Sr}, 0) + 2\ A(^{90}\text{Sr}, 0) = 12{,}64\ \text{Bq}$

$0{,}66\ A(^{89}\text{Sr}, 0) + 2\ A(^{90}\text{Sr}, 0) = 7{,}50\ \text{Bq}$ -

$1{,}34\ A(^{89}\text{Sr}, 0) = 5{,}14\ \text{Bq}$

$A(^{89}\text{Sr}, 0) = 5{,}14\ \text{Bq} / 1{,}34 = 3{,}84\ \text{Bq}$

$2A(^{90}\text{Sr}, 0) = 12{,}64\ \text{Bq} - (2 \times 3{,}84\ \text{Bq})$

$A(^{90}\text{Sr}, 0) = 6{,}32\ \text{Bq} - 3{,}84\ \text{Bq} = 2{,}48\ \text{Bq}$

sinds 02-05-86 zijn 123 dagen verstreken:

$A(^{89}\text{Sr}) = A(^{89}\text{Sr}, 0)\ e^{+0{,}693\times 123/50{,}5} = 3{,}84\ \text{Bq} \times 5{,}41 = 20{,}8\ \text{Bq}$

$A(^{90}\text{Sr}) = A(^{90}\text{Sr}, 0) = 2{,}48\ \text{Bq}$

2 pomptijd t = 2 h
pompdebiet D = 50 $m^3 \cdot h^{-1}$
volume bemonsterde lucht $V = D \times t$ = 50 $m^3 \cdot h^{-1}$ × 2 h = 100 m^3
vangstpercentage is 100%, dus de activiteitsconcentraties zijn:
$c(^{89}Sr)$ = 20,8 Bq / 100 m^3 = 0,21 $Bq \cdot m^{-3}$
$c(^{90}Sr)$ = 2,48 Bq / 100 m^3 = 0,025 $Bq \cdot m^{-3}$

Vraagstuk 3
1 α-kanaal:
meettijd = 40 min × 60 $s \cdot min^{-1}$ = 2400 s
$T_\alpha(U_1) = T_{bruto}(U_1) - T_{nul}(U_1)$
= (400 / 40 min) - 0,2 tpm = 10,0 tpm - 0,2 tpm = 9,8 tpm = 0,163 tps
$\sigma_\alpha = \sqrt{[T_{bruto}(U_1) / t_{bruto}(U_1) + T_{nul}(U_1) / t_{nul}(U_1)]}$
= $\sqrt{}$[(10,0 tpm / 40 min) + (0,2 tpm / 40 min)] = 0,505 tpm = 0,008 tps
telrendement $\varepsilon_\alpha(U_1)$ = 0,25 $tps \cdot Bq^{-1}$
α-activiteit $A_\alpha = T_\alpha(U_1) / \varepsilon_\alpha(U_1)$ = (0,163 ± 0,008) tps / 0,25 $tps \cdot Bq^{-1}$
= 0,65 ± 0,03 Bq

β-kanaal:
bijdrage A_α is evenredig met telrendement
$T_\alpha(U_2)$ = 9,8 tpm × (0,30 / 0,25) = 11,8 tpm
$T_\beta(U_2) = T_{bruto}(U_2) - T_{nul}(U_2) - T_\alpha(U_2)$
= (700 / 40 min) - 1,0 tpm - 11,8 tpm
= 17,5 tpm - 1,0 tpm - 11,8 tpm = 4,7 tpm = 0,078 tps
σ_β = $\sqrt{}$[(17,5 tpm / 40 min) + (1,0 tpm / 40 min) + (11,8 tpm / 40 min)]
= 0,87 tpm = 0,015 tps
telrendement $\varepsilon_\beta(U_2)$ = 0,40 $tps \cdot Bq^{-1}$
β-activiteit $A_\beta = T_\beta(U_2) / \varepsilon_\beta(U_2)$ = (0,078 ± 0,015) tps / 0,40 $tps \cdot Bq^{-1}$
= 0,20 ± 0,04 Bq

2 netto-teltempo in α-kanaal:
$T_\alpha(U_1)$ = (500 / 40 min) - 0,2 tpm = 12,5 tpm - 0,2 tpm = 12,3 tpm
bijdrage α-activiteit tot β-kanaal:
$T_\alpha(U_2)$ = 12,3 tpm × (0,30 / 0,25) = 14,8 tpm
teltempo bij U_2 zonder β-activiteit:
$T_{bruto,\,\beta=0}(U_2) = T_\alpha(U_2) + T_{nul}(U_2)$ = 14,8 tpm + 1,0 tpm = 15,8 tpm
$\sigma_{bruto,\,\beta=0}(U_2)$ = $\sqrt{}$[(14,8 tpm / 40 min) + (1,0 tpm / 40 min)]
= 0,63 tpm = 0,011 tps
minimaal aantoonbare verhoging van het teltempo bij U_2 ten gevolge van β-straling:
$T_{min,\beta} = 2\sigma_{bruto,\,\beta=0}(U_2)$ = 2 × 0,011 tps = 0,022 tps
minimaal detecteerbare β-activiteit:
telrendement $\varepsilon_\beta(U_2)$ = 0,40 $tps \cdot Bq^{-1}$
minimale activiteit $A_{min,\beta} = T_{min,\beta} / \varepsilon_\beta(U_2)$ = 0,022 tps / 0,40 $tps \cdot Bq^{-1}$ = 0,055 Bq

Vraagstuk 4
1 de formule luidt $T_{werkelijk} = T_{gemeten} / (1 - \tau \times T_{gemeten})$
$T_{gemeten}$ = 50 000 tpm = 833 tps
dode tijd τ = 200 µs = $200 \cdot 10^{-6}$ s
dus $T_{werkelijk}$ = 50 000 tpm / (1 - $200 \cdot 10^{-6}$ s × 833 tps)
= 50 000 tpm / (1 - 0,17) = 60 000 tpm

2 $E_{\beta,max}(^{45}Ca)$ = 256 keV f_β = 1,0
$E_{\beta,max}(^{46}Sc)$ = 357 keV f_β = 1,0
omdat beide nucliden β-straling uitzenden tussen 200 en 400 keV is f_{det} = 40%
$A(^{45}Ca) + A(^{46}Sc) = T_{werkelijk} / (f_\beta \times f_{det})$ = $1{,}0 \cdot 10^3$ tps / (1,0 × $40 \cdot 10^{-2}$) = $2{,}5 \cdot 10^3$ Bq

3 ^{46}Sc zendt γ-straling uit met E_γ = 1,121 MeV en emissierendement f_γ = 1,0
rendement γ-spectrometer is f_{det} = 8%
teltempo is 1000 tpm = 16,7 tps
$A(^{46}Sc) = T / (f_\gamma \times f_{det})$ = 16,7 tps / (1,0 × 8·10^{-2}) = 2,1·10^2 Bq op 100 cm^2

4 $A(^{45}Ca)$ = 2,5·10^3 Bq - 2,1·10^2 Bq = 2,3·10^3 Bq op 100 cm^2
rekening houdende met de veegefficiëntie van 50%, worden de oppervlaktebesmettingen:
^{45}Ca 2 × 2,3·10^3 Bq / 100 cm^2 = 46 Bq·cm^{-2}
^{46}Sc 2 × 2,1·10^2 Bq / 100 cm^2 = 4,2 Bq·cm^{-2}

5 in totaal afgewreven is 2,5·10^3 Bq per 100 cm^2 = 25 Bq·cm^{-2}
volgens de (inmiddels oude) Richtlijn Radionuclidenlaboratoria is de maximaal toelaatbare afwrijfbare β- en γ-activiteit 4 Bq·cm^{-2}
de besmetting was niet toelaatbaar

Vraagstuk 5

1 massieke dikte NaI-kristal $d \times \rho$ = 10 mm × 10^{-1} cm·mm^{-1} × 3,67 g·cm^{-3}
= 3,67 g·cm^{-2}
transmissie $e^{-(\mu/\rho)(d\times\rho)} = e^{-0,093\times3,67} = 0,71$
totale rendement = 1 - transmissie = 1 - 0,71 = 0,29
fotopiekrendement = 0,30 × (totale rendement) = 0,30 × 0,29 = 0,087

2 aantal fotonen per cm^2 en per seconde $\varphi = A \times f_{lever} \times f_{verval} \times f_{em} \times f_{geom} \times f_{abs}$
10% gaat naar lever f_{lever} = 0,1
verval in 5 min $f_{verval} = e^{-0,693\times5/10}$ = 0,707
2 annihilatiefotonen per β^+ -deeltje f_{em} = 2 × 1,0 = 2,0
geometriefactor voor 1 cm^2 en 20 cm afstand f_{geom} = 1 cm^2 / [4π × (20 cm)^2] = 1,99·10^{-4}
transmissie door 8 cm weefsel $f_{abs} = e^{-0,095\times(8\times1,00)}$ = 0,47
φ = A × 0,1 × 0,707 × 2,0 × 1,99·10^{-4} × 0,47 = 1,32·10^{-5} A > 1000 cm^{-2}·s^{-1}
A > 1000 cm^{-2}·s^{-1} / 1,32·10^{-5} = 76·10^6 Bq = 76 MBq

Vraagstuk 6

1 meetkop A is ongevoelig bij 511 keV en 1275 keV → het is dus geen ^{22}Na
meetkop B is ongevoelig bij 6 keV → het is dus geen ^{55}Fe
meetkop B is ongevoelig bij 12 keV en krypton is gasvormig → het is dus geen ^{81}Kr
N_A / N_B = 10 862 tpm / 5440 tpm = 2,0
oppervlak$_A$ / oppervlak$_B$ = 4,5 cm^2 / 3,1 cm^2 = 1,45
→ efficiëntie$_A$ / efficiëntie$_B$ = 2,0 / 1,45 = 1,4
volgens efficiëntiecurve is E_γ ≈ 28 keV, dus het moet ^{125}I zijn
controle:
f_{geom} = 0,5 × [1 - cos(α)]
afstand bron-detector is 30 mm = 3,0 cm
meetkop A $r = \sqrt{(4,5\ cm^2 / \pi)}$ = 1,2 cm
tan(α) = 1,2 cm / 3,0 cm = 0,40
α = 22° → f_{geom}^A = 0,036
meetkop B $r = \sqrt{(3,1\ cm^2 / \pi)}$ = 1,0 cm
tan(α) = 1,0 cm / 3,0 cm = 0,33
α = 18° → f_{geom}^B = 0,024
$\sum_\gamma (f_\gamma \times f_{det}^A)$ = (1,39 × 0,95) + (0,07 × 0,98) = 1,39
$\sum_\gamma (f_\gamma \times f_{det}^B)$ = (1,39 × 0,65) + (0,07 × 0,73) = 0,95
$N_A / N_B = [f_{geom}^A \times \sum (f_\gamma \times f_{det}^A)] / [f_{geom}^B \times \sum (f_\gamma \times f_{det}^B)]$
= (0,036 × 1,39) / (0,024 × 0,95) = 2,2
→ het klopt dus

2 $N = A \times f_{geom} \times \sum_\gamma (f_\gamma \times f_{det}) \times t$
meetkop A $A \times 0{,}036 \times 1{,}39 \times 60$ s $= 3{,}0\ A = 10\,862$ tpm
$A = 10\,862$ tpm / $3{,}0 = 3{,}6 \cdot 10^3$ Bq
meetkop B $A \times 0{,}024 \times 0{,}95 \times 60$ s $= 1{,}4\ A = 5440$ tpm
$A = 5440$ tpm / $1{,}4 = 3{,}9 \cdot 10^3$ Bq

Vraagstuk 7

1 $N = A \times f_\beta \times (f_{geom} \times f_{det}) \times f_{abs} \times t$
sinds aankoop zijn er 5,33 j verlopen en is er inmiddels evenwicht tussen moeder en dochter
dus $A(^{90}\text{Sr}) = A(^{90}\text{Y}) = A = 185 \cdot 10^3 \times e^{-0{,}693 \times 5{,}33/28{,}7} = 185 \cdot 10^3 \times 0{,}879 = 1{,}63 \cdot 10^5$ Bq
zowel ^{90}Sr als ^{90}Y zenden een β-deeltje uit, dus $f_\beta = 2$
er is geen folie, dus geen absorptie, dus $f_{abs} = 1$
er zijn $N = 4899$ telpulsen gemeten in een meettijd $t = 10$ s
dus $f_{geom} \times f_{det} = N / (A \times f_\beta \times f_{abs} \times t)$
$= 4899 / (1{,}63 \cdot 10^5$ Bq $\times 2 \times 1 \times 10$ s$) = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$

2 gemeten transmissie 1952 telpulsen / 4899 telpulsen = 0,40
aflezen figuur 1 95 mg·cm^{-2}

3 transmissie bij 200 mg cm^{-2} 0,25
teltempo 0,25 × 4899 telpulsen / 10 s = 122 tps
nodig voor $\sigma_{rel} = 2{,}5\%$ $1 / (2{,}5 \cdot 10^{-2})^2 = 1600$ telpulsen
teltijd 1600 telpulsen / 122 tps = 13,1 s

4 $A(^{90}\text{Sr}) = A(^{90}\text{Y}) = 185$ MBq
volgens figuur 2 $D(^{90}\text{Sr}) = 185$ MBq $\times\ 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ mGy·h^{-1} per MBq $= 0{,}02$ mGy·h^{-1}
$D(^{90}\text{Y}) = 185$ MBq $\times\ 1{,}0 \cdot 10^{-2}$ mGy·h^{-1} per MBq $= 1{,}85$ mGy·h^{-1}
totaal $D(^{90}\text{Sr}) + D(^{90}\text{Y}) = 1{,}87$ mGy·h^{-1}

Vraagstuk 8

1 $t_{bruto} = 30$ min $\times 60$ s·min$^{-1} = 1800$ s
$t_{nul} = 8$ h $\times 3600$ s·h$^{-1} = 28\,800$ s
$T_{netto} = T_{bruto} - T_{nul} = N_{bruto} / t_{bruto} - N_{nul} / t_{nul}$
$= (240 / 1800$ s$) - (3361 / 28\,800$ s$) = 0{,}133$ tps $- 0{,}117$ tps $= 0{,}016$ tps
$T_{netto} = A \times f_\alpha \times (f_{geom} \times f_{det} \times f_{abs})$
$= A \times 1 \times 20 \cdot 10^{-2} = 0{,}20\ A$
$A = 0{,}016$ tps / $0{,}20 = 0{,}080$ Bq op moment van meting, dit is 30 d na monstername
$A(0) = 0{,}080$ (Bq) $\times\ e^{+0{,}693 \times 30/138} = 0{,}080$ (Bq) $\times\ 1{,}16 = 0{,}093$ Bq

2 $\sigma_{Tnetto} = \sqrt{(T_{bruto} / t_{bruto} + T_{nul} / t_{nul})}$
$= \sqrt{[(0{,}133$ tps $/ 1800$ s$) + (0{,}117$ tps $/ 28\,800$ s$)]} = 0{,}0088$ tps
$\sigma_A = \sigma_{Tnetto} / 0{,}20 = 0{,}0088$ tps $/ 0{,}20 = 0{,}044$ Bq
$\sigma_{A(0)} = 0{,}044$ Bq $\times\ 1{,}16 = 0{,}051$ Bq

3 invullen formule:
$A_{min} = (2 / 20 \cdot 10^{-2}) \times \sqrt{[0{,}117$ tps $\times (1 / 1800$ s $+ 1 / 28\,800$ s$)]} = 0{,}083$ Bq
$A_{min}(0) = 0{,}083$ Bq $\times\ 1{,}16 = 0{,}096$ Bq

4 per monstername wordt 20 m^3 lucht bemonsterd
minimale luchtactiviteit is dus:
0,096 Bq / 20 m^3 = 0,0048 Bq·m^{-3} = 4,8 mBq·m^{-3} << 50 mBq·m^{-3}
ruim binnen de vergunning

Vraagstuk 9

1 volgens Appendix, figuur 13 is E_γ = 514 keV en f_γ = 0,0043
$T_0 = A \times f_\gamma \times (f_{geom} \times f_{det}) \times f_{abs}$
$= 10{\cdot}10^9$ Bq × 0,0043 × $1{,}6{\cdot}10^{-4}$ × 1 = $6{,}9{\cdot}10^3$ tps

2 $f_{abs} = e^{-(\mu/\rho)(d\times\rho)} = e^{-0{,}0097\times(0{,}048\times1008)} = 0{,}625$
$T_1 = T_0 \times f_{abs} = 6{,}9{\cdot}10^3$ tps × 0,625 = $4{,}3{\cdot}10^3$ tps

3 in t = 20 ms worden $N = 20{\cdot}10^{-3}$ s × $4{,}3{\cdot}10^3$ tps = 86 telpulsen geteld
met standaarddeviatie $\sigma_N = \sqrt{N} = \sqrt{86}$ = 9,3 telpulsen
$\sigma_{T1} = \sigma_N / t$ = 9,3 / $20{\cdot}10^{-3}$ s = 465 tps

4 drempel ligt bij $(T_0 + T_1) / 2 = (6{,}9{\cdot}10^3$ tps + $4{,}3{\cdot}10^3$ tps$) / 2 = 5{,}6{\cdot}10^3$ tps
verschil met telsnelheid voor een vol blikje is $5{,}6{\cdot}10^3$ tps - $4{,}3{\cdot}10^3$ tps = $1{,}3{\cdot}10^3$ tps
dit komt overeen met $k = 1{,}3{\cdot}10^3$ tps / 465 tps = 2,8 standaarddeviaties
aflezen tabel 1 bij k = 2,8
→ eenzijdige overschrijdingskans is P(2,8) = 0,003

5 - bronsterkte vergroten → stralingshygiënische nadelen
- drempel hoger leggen → meer vals volle blikjes
- telefficiëntie vergroten → kost (misschien) meer geld
- integratietijd vergroten → productietempo daalt

Vraagstuk 10

1 aflezen figuur 1 en Appendix, figuur 20

E_γ (keV)	f_γ (Bq·s)$^{-1}$	$\varepsilon_\gamma = f_{geom} \times f_{det} \times f_{abs}$
80	0,026	0,05
284	0,061	0,10
365	0,812	0,11

ijkfactor = $\sum_\gamma (f_\gamma \times \varepsilon_\gamma)$
= 0,026×0,05 + 0,061×0,10 + 0,812 × 0,11 = 0,097 tps per Bq

2 A = 20 kg × 1 Bq·g^{-1} × 10^3 g·kg^{-1} = $2{,}0{\cdot}10^4$ Bq
$T_{netto} = 2{,}0{\cdot}10^4$ Bq × 0,097 tps per Bq = $1{,}9{\cdot}10^3$ tps
$T_{bruto} = T_{netto} + T_{nul} = 1{,}9{\cdot}10^3$ tps + 1398 tps = $3{,}3{\cdot}10^3$ tps

3 alleen nuleffect in t = 10 s worden er 10 s × 1398 tps = $1{,}4{\cdot}10^4$ pulsen geteld

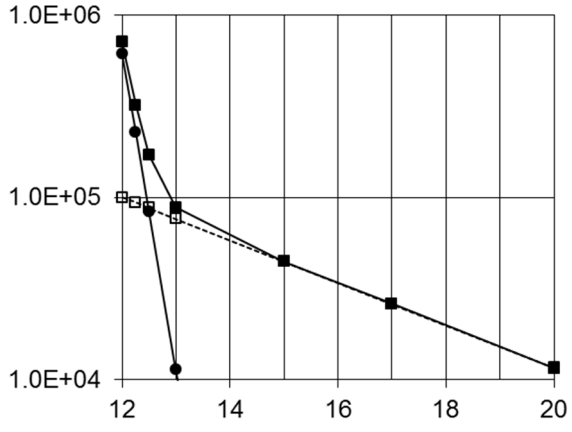
4 standaarddeviatie $\sigma_{nul} = \sqrt{1{,}4{\cdot}10^4}$ = 118 pulsen per 10 s

5 minimaal te detecteren activiteit correspondeert met $3\sigma_{nul}$
A_{min} × ijkfactor = $3\sigma_{nul} / t$ = 3 × 118 / 10 s = 35 tps
A_{min} = 35 tps / ijkfactor = 35 tps / 0,096 tps per Bq = 361 Bq

6 minimale massieke activiteit 361 Bq / 20 kg = 18 Bq·kg^{-1} = 0,018 Bq·g^{-1}
(zeer) ruim onder de vrijgavegrens van 100 Bq·g^{-1}

Vraagstuk 11

1 de grafiek bestaat uit 2 bijna rechte delen
trek een rechte door laatste 3 punten
dit geeft:
$\lambda(^{54}Mn)$ = 0,27 h^{-1}
$T_{½}(^{54}Mn)$ = 0,693 / 0,27 h^{-1} = 2,6 h
extrapoleer de rechte naar t = 0
trek deze bijdrage af van de experimentele waarden en trek een rechte door gecorrigeerde grafiek; dit geeft:
$\lambda(^{60m}Co)$ = 3,9 h^{-1}
$T_{½}(^{60m}Co)$ = 0,693 / 3,9 h^{-1} = 0,18 h



2 activiteit in t = 0,1 h (want λ in h^{-1})
$A = N\,\sigma_{th}\,\varphi_{th}\,(1 - e^{-\lambda \times 0,1})$
$N(^{55}Mn) = (m_{Mn} / M_{Mn}) \times N_A$
$= (1,1 \cdot 10^{-3}\ g / 54,9\ g \cdot mol^{-1}) \times 6,02 \cdot 10^{23}\ mol^{-1} = 1,21 \cdot 10^{19}$
$A(^{56}Mn) = 1,21 \cdot 10^{19} \times 13,3 \cdot 10^{-28}\ m^2 \times 1 \cdot 10^{16}\ m^{-2} \cdot s^{-1} \times (1 - e^{-0,27 \times 0,1})$
$= 4,28 \cdot 10^{6}\ Bq = 4,28\ MBq$
$N(^{59}Co) = (m_{Co} / M_{Co}) \times N_A$
$= (210 \cdot 10^{-3}\ g / 58,9\ g \cdot mol^{-1}) \times 6,02 \cdot 10^{23}\ mol^{-1} = 2,15 \cdot 10^{21}$
$A(^{60m}Co) = 2,15 \cdot 10^{21} \times 20 \cdot 10^{-28}\ m^2 \times 1 \cdot 10^{16}\ m^{-2} \cdot s^{-1} \times (1 - e^{-3,9 \times 0,1})$
$= 1,39 \cdot 10^{10}\ Bq = 13,9\ GBq$

3 aantal gevormde ^{60m}Co-kernen in t = 0,1 h = 360 s (in seconden, want φ_{th} in s^{-1}):
$N^*(^{60m}Co) = N(^{59}Co)\,\sigma_{th}\,\varphi_{th}\,t$
$= 2,15 \cdot 10^{21} \times 20 \cdot 10^{-28}\ m^2 \times 1 \cdot 10^{16}\ m^{-2} \cdot s^{-1} \times 360\ s = 1,55 \cdot 10^{13}$
deze vervallen allemaal naar ^{60}Co:
$N(^{60}Co) = N^*(^{60m}Co) = 1,55 \cdot 10^{13}$
$\lambda(^{60}Co) = 0,693 / (5,27\ j \times 365\ d \cdot j^{-1} \times 24\ h \cdot d^{-1} \times 3600\ s \cdot h^{-1}) = 4,17 \cdot 10^{-9}\ s^{-1}$
$A(^{60}Co) = \lambda(^{60}Co) \times N(^{60}Co)$
$= 4,17 \cdot 10^{-9}\ (s^{-1}) \times 1,55 \cdot 10^{13} = 6,46 \cdot 10^{4}\ Bq$

4 totale werkzame doorsnede voor de reactie $^{59}Co \rightarrow {}^{60}Co$ is:
$\sigma_{th,totaal} = 20 \cdot 10^{-28}\ m^2 + 18 \cdot 10^{-28}\ m^2 = 38 \cdot 10^{-28}\ m^2$
$A(^{60}Co)_{totaal} = (38 \cdot 10^{-28}\ m^2 / 20 \cdot 10^{-28}\ m^2) \times 6,46 \cdot 10^{4}\ Bq = 1,23 \cdot 10^{5}\ Bq$

5 massieke activiteit = $1,23 \cdot 10^{5}\ Bq / 510\ g = 241\ Bq \cdot g^{-1}$
vrijgavegrens is 10 $Bq \cdot g^{-1}$, dus:
$241\ Bq \cdot g^{-1} \times e^{-0,696\,t\,/5,272} = 10\ Bq \cdot g^{-1}$
$t = (5,272\ j / 0,693) \times \ln(241\ Bq \cdot g^{-1} / 10\ Bq \cdot g^{-1}) = (5,272\ j / 0,693) \times 3,18 = 24\ j$

Vraagstuk 12

1 Be-folie $\mu \times d = (\mu/\rho) \times (d \times \rho)$
$= 2,07\ cm^2 \cdot g^{-1} \times (0,10 \cdot 10^{-1}\ cm \times 1,85\ g \cdot cm^{-3}) = 0,038$
transmissie Be $e^{-\mu d} = e^{-0,038} = 0,96$

2 NaI-kristal $\mu \times d = (\mu/\rho) \times (d \times \rho)$
$= 450\ cm^2 \cdot g^{-1} \times (0,10 \cdot 10^{-1}\ cm \times 3,67\ g \cdot cm^{-3}) = 16,5$
transmissie NaI $e^{-\mu d} = e^{-16,5} = 7 \cdot 10^{-8}$
detectorrendement f_{det} = 1 - transmissie = $1 - 7 \cdot 10^{-8} \approx 1$

3 ijkfactor is per Bq cm^{-2}, oppervlak detector is 20 cm^2
dus A = 1 $Bq \cdot cm^{-2} \times 20\ cm^2 = 20\ Bq$ (per $Bq \cdot cm^{-2}$)
2π-geometrie, dus f_{geom} = 0,5
aflezen Appendix, figuur 10
$f_{röntgen} = 0,250 + 0,033 = 0,283$
$T_{netto} = A \times f_{röntgen} \times f_{geom} \times f_{abs} \times f_{det}$
$= 20$ Bq per $Bq \cdot cm^{-2} \times 0,283 \times 0,50 \times 0,96 \times 1 = 2,7$ tps per $Bq \cdot cm^{-2}$

4 gemeten teltempo N = 5000 tps
activiteit A = 2000 $Bq \cdot cm^{-2}$
experimentele ijkfactor N / A = 5000 tps / 2000 $Bq \cdot cm^{-2} = 2,5$ tps per $Bq \cdot cm^{-2}$

Vraagstuk 13

1 $N = A \times f_\gamma \times (f_{geom} \times f_{det}) \times f_{abs}$
$= 412 \cdot 10^{3}\ Bq \times (0,946 \times 0,898) \times (f_{geom} \times f_{det}) \times 1 = 3,5 \cdot 10^{5} \times (f_{geom} \times f_{det})$ tps
$f_{geom} \times f_{det} = N$ (in tps) / $3,5 \cdot 10^{5}$
gemeten voor 0 cm lood CNTS(0) = 130 089 cpm = $2,17 \cdot 10^{3}$ tps
$\varepsilon = f_{geom} \times f_{det} = 2,17 \cdot 10^{3}$ tps / $3,5 \cdot 10^{5}$ tps = $6,2 \cdot 10^{-3}$

2 gemeten voor 5 mm = 0,5 cm lood CNTS(0,5) = 72 859 cpm
transmissie = CNTS(0,5) / CNTS(0) = 72 859 cpm / 130 089 cpm = 0,560
$= e^{-\mu d}$
$\mu \times d = -\ln(0{,}560) = 0{,}58$
$\mu = 0{,}58 / d = 0{,}58 / 0{,}5$ (cm) $= 1{,}16\ cm^{-1}$
$\rho = 11\,340\ kg \cdot m^{-3} = 11{,}34\ g \cdot cm^{-3}$
$\mu/\rho = 1{,}16\ cm^{-1} / 11{,}34\ g \cdot cm^{-3} = 0{,}102\ cm^2 \cdot g^{-1}$
dosisopbouw speelt geen rol omdat verstrooide fotonen niet bijdragen tot de fotopiek
3 γ-straling geeft aanleiding tot foto-elektrisch effect en Compton-effect in lood, dus tot ionisaties
β-straling geeft eveneens aanleiding tot ionisaties in lood
karakteristieke K-röntgenstraling van lood volgt dan als secundaire straling

<u>Vraagstuk 14</u>

1 voor de combinatie telvloeistof/telflesje is
$\mu \times d = (\mu/\rho) \times (d \times \rho) = 3\ cm^2\ g^{-1} \times (3 \cdot 10^{-1}\ cm \times 1\ g \cdot cm^{-3}) = 0{,}9$
transmissie van fotonen met een energie van 30 keV is dus $e^{-\mu d} = e^{-0{,}9} = 0{,}41$
interactiekans = 1 - transmissie = 1 - 0,41 = 0,59
er is een 80% kans dat de interactie door de fotomultiplicatorbuis wordt "gezien"
$f_{det,fotonen\ 20\text{-}40\ keV} = 0{,}59 \times 80 \cdot 10^{-2} = 0{,}47$
2 $f_{elektronen\ >\ 10\ keV} = f_{ce\ L\gamma 1} + f_{KLL} + f_{KLX} = 0{,}105 + 0{,}132 + 0{,}060 = 0{,}297$
$f_{det,elektronen\ >\ 10\ keV} = 80 \cdot 10^{-2} = 0{,}80$
$\varepsilon_{elektronen} = f_{elektronen\ >\ 10\ keV} \times f_{det,elektronen\ >\ 10\ keV} = 0{,}297 \times 0{,}80 = 0{,}24\ tps \cdot Bq^{-1}$
3 $f_{fotonen\ 20\text{-}40\ keV} = f_{\gamma 1} + f_{K\alpha} + f_{K\beta} = 0{,}067 + 1{,}140 + 0{,}255 = 1{,}462$
$f_{det,fotonen\ 20\text{-}40\ keV} = 0{,}47$ (zie vraag 1)
$\varepsilon_{fotonen} = f_{fotonen\ 20\text{-}40\ keV} \times f_{det,fotonen\ 20\text{-}40\ keV} = 1{,}462 \times 0{,}47 = 0{,}69\ tps \cdot Bq^{-1}$
4 detectierendement $\varepsilon = \varepsilon_{elektronen} + \varepsilon_{fotonen}$
$= 0{,}24\ tps \cdot Bq^{-1} + 0{,}69\ tps \cdot Bq^{-1} = 0{,}93\ tps \cdot Bq^{-1}$
gemeten $N = 100\ tpm = 1{,}67\ tps$
activiteit $A = N / \varepsilon = 1{,}67\ tps / 0{,}93\ tps \cdot Bq^{-1} = 1{,}8\ Bq$

<u>Vraagstuk 15</u>

1 activiteit van ^{32}P in drie kanalen gemeten:
$T_A / (\varepsilon_A \times tijd \times volume) = 5{,}8 \cdot 10^5\ tpm / (0{,}05 \times 60\ s \cdot min^{-1} \times 2\ ml) = 97 \cdot 10^3\ Bq \cdot ml^{-1}$
$T_B / (\varepsilon_B \times tijd \times volume) = 3{,}0 \cdot 10^6\ tpm / (0{,}26 \times 60\ s \cdot min^{-1} \times 2\ ml) = 96 \cdot 10^3\ Bq \cdot ml^{-1}$
$T_C / (\varepsilon_C \times tijd \times volume) = 7{,}8 \cdot 10^6\ tpm / (0{,}65 \times 60\ s \cdot min^{-1} \times 2\ ml) = 100 \cdot 10^3\ Bq \cdot ml^{-1}$
gemiddelde waarde $\langle T \rangle = (97 + 96 + 100) \cdot 10^3\ Bq \cdot ml^{-1} / 3 = 98 \cdot 10^3\ Bq \cdot ml^{-1}$
benodigde reductiefactor = norm / $\langle T \rangle = 0{,}25 / 98 \cdot 10^3\ Bq \cdot ml^{-1} = 2{,}55 \cdot 10^{-6}$
$= e^{-0{,}693\ t/14{,}29}$
$t = -(14{,}29\ d / 0{,}693) \times \ln(2{,}55 \cdot 10^{-6}) = (14{,}29\ d / 0{,}693) \times 12{,}88 = 266\ d$
lozingsdatum: 25 oktober 1990

merk op: vrijgavegrens voor ^{32}P in <u>vast</u> materiaal volgens het huidige Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming is 1000 $Bq \cdot g^{-1}$; daarnaast geldt een lozingslimiet van 10 Re_{ing} op voorwaarde dat het op het riool mag worden geloosd

2 efficiëntiebepaling met 300 Bq ^{14}C in monster #4; dit wordt monster #6
$\delta T_A = 7498\ tpm - 1040\ tpm = 6458\ tpm$
$\varepsilon_{A,14C} = 6458\ tpm / (300\ Bq \times 60\ s \cdot min^{-1}) = 0{,}36$
$\delta T_B = 10\,265\ tpm - 1413\ tpm = 8852\ tpm$
$\varepsilon_{B,14C} = 8852\ tpm / (300\ Bq \times 60\ s \cdot min^{-1}) = 0{,}49$

3 efficiëntiebepaling met 160 Bq ^{3}H in monster #3; dit wordt monster #5
δT_A = 4187 tpm - 1002 tpm = 3185 tpm
$\varepsilon_{A,3H}$ = 3185 tpm / (160 Bq × 60 s·min^{-1}) = 0,33
δT_B = 1417 tpm - 1423 tpm ≈ 0
$\varepsilon_{B,3H}$ = 0 / (160 Bq × 60 s·min^{-1}) ≈ 0
nauwkeuriger:
$\delta T_B < \sigma_{\delta TB} = \sqrt{(T_B / t_B)}$
$= \sqrt{[(1417 \text{ tpm} / 10 \text{ min}) + (1423 \text{ tpm} / 10 \text{ tpm})]} = 17$ tpm
$\varepsilon_{B,3H} < 17 \text{ tpm} / (160 \text{ Bq} \times 60 \text{ s·min}^{-1}) = 0{,}002$

4 gemiddelden van monsters #2, #3 en #4 zijn T_A = 1023 tpm respectievelijk T_B = 1414 tpm
kanaal B bevat alleen een bijdrage van ^{14}C
kanaal A bevat (mogelijk) bijdragen van ^{3}H en ^{14}C
restactiviteit ^{32}P op 25 oktober 1990 is 0,25 Bq·ml^{-1} × 2 ml = 0,5 Bq, dus:
bijdrage tot kanaal A activiteit × $\varepsilon_{A,32P}$ × tijd = 0,5 Bq × 0,05 × 60 s·min^{-1} = 1,5 tpm
bijdrage tot kanaal B activiteit × $\varepsilon_{B,32P}$ × tijd = 0,5 Bq × 0,26 × 60 s·min^{-1} = 7,8 tpm
verontreiniging ^{14}C:
bijdrage ^{14}C tot kanaal B T_{netto} / ($\varepsilon_{B,14C}$ × tijd) =
(1414 tpm - 7,8 tpm) / (0,49 × 60 s·min^{-1}) = 48 Bq
concentratie ^{14}C 48 Bq / 2 ml = 24 Bq·ml^{-1}

merk op: de vrijgavegrens voor ^{14}C in <u>vast</u> materiaal volgens het huidige Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming is 1 Bq·g^{-1}

verontreiniging ^{3}H:
bijdrage ^{14}C in kanaal A activiteit × $\varepsilon_{A,14C}$ × tijd = 48 Bq × 0,36 × 60 s·min^{-1}
= 1037 tpm
bijdrage ^{3}H in kanaal A T_{netto} / ($\varepsilon_{A,3H}$ × tijd) =
(1023 tpm - 1,5 tpm - 1037 tpm) / (0,33 × 60 s·min^{-1}) ≈ 0
nauwkeuriger:
$\sigma_{Tnetto} = \sqrt{[(1023 \text{ tpm} / 10 \text{ min}) + (1{,}5 \text{ tpm} / 10 \text{ min}) + (1037 \text{ tmp} / 10 \text{ min})]} = 14$ tpm
$T_{netto} < \sigma_{Tnetto} / (\varepsilon_{A,3H} \times \text{tijd}) = 14 \text{ tpm} / (0{,}33 \times 60 \text{ s·min}^{-1}) = 0{,}7$ Bq
concentratie ^{3}H < 0,7 Bq / 2 ml = 0,35 Bq·ml^{-1}

merk op: de vrijgavegrens voor ^{3}H in <u>vast</u> materiaal volgens het huidige Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming is 100 Bq·g^{-1}

5 de standaarddeviatie van het teltempo in kanaal B op 1 februari 1990 is:
$\sigma = \sqrt{(T / t)} = \sqrt{(3{,}0 \cdot 10^{6} \text{ tpm} / 1 \text{ min})} = 1732$ tpm
bijdrage van ^{14}C tot teltempo in kanaal B is 1414 tpm - 7,8 tpm = 1406 tpm < σ (zie vraag 4)
het was dus onmogelijk geweest om de aanwezigheid van ^{14}C in het afvalwater vast te stellen

<u>Vraagstuk 16</u>
1 debiet $D = 10 \text{ h}^{-1} \times V_{lab}$
$= 10 \text{ h}^{-1} \times 50 \text{ m}^3 = 500 \text{ m}^3\text{·h}^{-1}$
maximale activiteitsconcentratie $a_{max} = 250 \text{ mBq·m}^{-3} = 0{,}25 \text{ Bq·m}^{-3}$
maximaal afgevoerde activiteit $dA/dt = a_{max} \times D$
$= 0{,}25 \text{ Bq·m}^{-3} \times 500 \text{ m}^3\text{·h}^{-1} = 125 \text{ Bq·h}^{-1}$
het maximale lek is dus 125 Bq·h^{-1}

2 beginconcentratie $20\ \text{mBq}\cdot\text{m}^{-3} = 0{,}02\ \text{Bq}\ \text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$
bij maximaal lek komt er per uur bij $125\ \text{Bq}\cdot\text{h}^{-1} / 50\ \text{m}^3 = 2{,}5\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
de gevraagde formule $a(t) = 0{,}02 + (2{,}5 \times t)$
met $a(t)$ in $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ en t in h

3 gemiddelde concentratie tijdens eerste uur $a(0{,}5) = 0{,}02 + (2{,}5 \times 0{,}5) = 1{,}27\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
gemiddelde concentratie tijdens vijfde uur $a(4{,}5) = 0{,}02 + (2{,}5 \times 4{,}5) = 11{,}27\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
gemiddelde concentratie $a_{\text{gemiddeld}} = (1{,}27 + 11{,}27)\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3} / 2 = 6{,}27\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
maximum concentratie is 10 keer groter $a_{\text{max}} = 10 \times a_{\text{gemiddeld}} = 10 \times 6{,}27\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3} = 62{,}7\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
maximaal ingeademde activiteit $A_{\text{max}} = 2\ \text{h} \times 1{,}2\ \text{m}^3\cdot\text{h}^{-1} \times 62{,}7\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3} = 150\ \text{Bq}$

Vraagstuk 17

1 vervalcorrectie $e^{-0{,}693\times 30/46{,}61} = 0{,}64$
benodigde productie $300\ \text{MBq} / 0{,}64 = 469\ \text{MBq}$

2 $N(^{202}\text{Hg}) = (\text{massa} / \text{atoomgewicht}) \times \text{abundantie}(^{202}\text{Hg}) \times \text{getal van Avogadro}$
$= (1\ \text{g} / 200{,}59\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}) \times 29{,}86\cdot10^{-2} \times 6{,}02\cdot10^{23}\ \text{mol}^{-1} = 9{,}0\cdot10^{20}$ per gram

3 $\text{d}N(^{203}\text{Hg})/\text{dt} = N(^{202}\text{Hg})\ \varphi_{\text{th}}\ \sigma_{\text{th}}$
productietempo $\text{d}N(^{203}\text{Hg})/\text{d}t = 9{,}0\cdot10^{20}$ per gram $\times\ 1\cdot10^{18}\ \text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \times 5\cdot10^{-28}\ \text{m}^2 = 4{,}5\cdot10^{11}\ \text{s}^{-1}$ per gram

4 $\lambda(^{203}\text{Hg}) = 0{,}693 / (46{,}61\ \text{d} \times 24\ \text{h}\cdot\text{d}^{-1} \times 3600\ \text{s}\cdot\text{h}^{-1}) = 1{,}72\cdot10^{-7}\ \text{s}^{-1}$
activiteit $= \lambda(^{203}\text{Hg}) \times N(^{203}\text{Hg})$
$= 1{,}72\cdot10^{-7}\ \text{s}^{-1} \times 4{,}5\cdot10^{11}$ per gram $= 7{,}74\cdot10^4\ \text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$ per gram

5 bestralingstijd volgt uit: $7{,}74\cdot10^4\ \text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$ per gram $\times\ t = 300\cdot10^6$ Bq per gram
$t = 300\cdot10^6$ Bq per gram $/\ 7{,}74\cdot10^4\ \text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$ per gram
$= 3876\ \text{s} = 1{,}08\ \text{h}$

6 25% wordt via lucht afgevoerd, dus $25\cdot10^{-2} \times 300\cdot10^6\ \text{Bq} = 7{,}5\cdot10^7\ \text{Bq}$
kwikdamp behoort tot klasse SR-1 met een $\text{Re}_{\text{inh}}(^{203}\text{Hg}) = 1{,}4\cdot10^8$ Bq
lozing bedraagt dus $7{,}5\cdot10^7\ \text{Bq} / 1{,}4\cdot10^8\ \text{Bq} = 0{,}54\ \text{Re}_{\text{inh}}$
dit is binnen de vergunning

7 1% komt in de bodem-as, dus $1\cdot10^{-2} \times 300\cdot10^6\ \text{Bq} = 3{,}0\cdot10^6\ \text{Bq}$
activiteit komt binnen een uur in de as terecht
productie bodem-as is $3{,}3\cdot10^3\ \text{kg}\cdot\text{h}^{-1} \times 1\ \text{h} = 3{,}3\cdot10^3\ \text{kg}$
maximale activiteitsconcentratie $= 3{,}0\cdot10^6\ \text{Bq} / 3{,}3\cdot10^3\ \text{kg} = 0{,}9\cdot10^3\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} = 0{,}9\ \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$
dit is ruim binnen de vergunning
40% komt in de vlieg-as, dus $40\cdot10^{-2} \times 300\cdot10^6\ \text{Bq} = 1{,}2\cdot10^8\ \text{Bq}$
productie bodem-as is $24{,}2\cdot10^3\ \text{kg}\cdot\text{h}^{-1} \times 1\ \text{h} = 2{,}42\cdot10^4\ \text{kg}$
maximale activiteitsconcentratie $= 1{,}2\cdot10^8\ \text{Bq} / 2{,}42\cdot10^4\ \text{kg} = 5{,}0\cdot10^3\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1} = 5{,}0\ \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$
beide concentaries zijn (ruim) binnen de vergunning

8 $H^*(10) = h\,A / r^2 = 0{,}040\ \mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1} \times 300\ \text{MBq} / r^2 = 12\ \mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1} / r^2 < 1\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
dus $r > \sqrt{12} = 3{,}5$ m

Vraagstuk 18

1 vanwege de lange halveringstijd van ^{137}Cs speelt radioactief verval geen rol
activiteit A = concentratie × debiet × vangstrendement × tijd
$= 10\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3} \times 9{,}5\ \text{m}^3\cdot\text{h}^{-1} \times 1 \times 2\ \text{h} = 190\ \text{Bq}$

2 de activiteit bouwt lineair op gedurende de monstername (en dus gedurende de meting)
we mogen dus de gemiddelde activiteit nemen $\langle A\rangle = (0 + 190)\ \text{Bq} / 2 = 95\ \text{Bq}$
volgens de gegevens is het emissierendement $f_\gamma = 0{,}947 \times 0{,}898 = 0{,}85$
aflezen fotopiekrendement uit figuur 2 $\varepsilon = 0{,}05$
$N = \langle A\rangle \times f_\gamma \times \varepsilon \times t = 95\ \text{Bq} \times 0{,}85 \times 0{,}05 \times (2\ \text{h} \times 3600\ \text{s}\cdot\text{h}^{-1}) = 2{,}9\cdot10^4$ telpulsen

3 10 Bq·m^{-3} geeft 2,9·10^{4} telpulsen
30 telpulsen komen overeen met (30 / 2,9·10^{4}) × 10 Bq·m^{-3} = 0,010 Bq·m^{-3} = 10 mBq·m^{-3}

Vraagstuk 19

1 $T_{½}$(^{88}Rb) = 17,77 min
λ = 0,693 / $T_{½}$(^{88}Rb) = 0,693 / 17,77 min = 0,0390 min^{-1} = 6,50·10^{-4} s^{-1}
$N = f_{\beta} \times f_{det} \times {}_{0}\int^{30} A(0)\, e^{-\lambda t}\, dt$
$= 1 \times 10 \cdot 10^{-2} \times A(0) \times (1 - e^{-0{,}0390 \times 30}) / 6{,}50 \cdot 10^{-4}$ s^{-1}
$= 1 \times 10 \cdot 10^{-2} \times A(0) \times 0{,}69 / 6{,}50 \cdot 10^{-4}$ s^{-1} $= 106\, A(0)$
= 150 000

let wel: in de exponent is λ uitgedrukt in min^{-1} omdat de meettijd is gegeven in minuten; in de noemer is λ uitgedrukt in s^{-1} omdat we de activiteit willen uitdrukken in Bq

activiteit bij begin meting $A(0) = 150\,000 / 106 = 1{,}4 \cdot 10^{3}$ Bq
2 vervalcorrectie $e^{+0{,}0390 \times 10} = 1{,}48$
activiteit bij eind monstername $A(-10) = 1{,}48 \times 1{,}4 \cdot 10^{3}$ Bq = 2,1·10^{3} Bq
3 stel ^{88}Rb-concentratie a_{Rb} Bq·m^{-3}
debiet D = 30 l·min^{-1} × 10^{-3} m^{3}·l^{-1} = 3,0·10^{-2} m^{3}·min^{-1}
tijdens monstername vervalt de activiteit
$A(-10) = D \times {}_{0}\int^{30} a_{Rb}\, e^{-\lambda t}\, dt = 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ m^{3}·min^{-1} × a_{Rb} × (1 - e$^{-0{,}0390 \times 30}$) / 0,0390 min^{-1}
= 3,0·10^{-2} m^{3}·min^{-1} × a_{Rb} Bq·m^{-3} × 0,69 / 0,0390 min^{-1} = 0,53 m^{3} × a_{Rb}
dus ^{88}Rb-concentratie is $a_{Rb} = A(-10)$ / 0,53 m^{3} = 2,1·10^{3} Bq / 0,53 m^{3} = 4,0·10^{3} Bq·m^{-3}
4 omdat $T_{½}$(^{88}Rb) << $T_{½}$(^{88}Kr) << 1 week, is er inmiddels evenwicht tussen moeder en dochter
dus $a_{Kr} = a_{Rb}$ = 4,0·10^{3} Bq·m^{-3}

Vraagstuk 20

1 uit het feit dat de massieke activiteiten van ^{226}Ra en ^{214}Bi volgens de meting vrijwel gelijk zijn, volgt dat er geen ^{222}Rn ontsnapt uit het materiaal
hetzelfde geldt voor de activiteiten van ^{228}Ac en ^{212}Pb, waaruit blijkt dat er geen noemenswaardige hoeveelheid ^{220}Rn uit het materiaal ontsnapt
dus beide reeksen verkeren in evenwicht en binnen een (sub)reeks zijn alle activiteiten gelijk
2 ^{226}Ra-subreeks:
omvat negen radioactieve radionucliden die alle in evenwicht zijn
de totale massieke activiteit wordt derhalve negen keer de gemiddelde meetwaarde
9 × (127 + 120 + 130) / 3 Bq·kg^{-1} = 1,13·10^{3} Bq·kg^{-1} = 1,13 Bq·g^{-1}
^{232}Th-reeks:
omvat tien radioactieve radionucliden die alle in evenwicht zijn
de totale massieke activiteit wordt derhalve tien keer de gemiddelde meetwaarde
10 × (153 + 164 + 139 + 133 + 181) / 5 Bq·kg^{-1} = 1,54·10^{3} Bq·kg^{-1} = 1,54 Bq·g^{-1}
3 massieke activiteit ^{226}Ra 1,13 Bq·g^{-1} / 9 = 0,13 Bq·g^{-1}
massieke activiteit ^{232}Th 1,54 Bq·g^{-1} / 10 = 0,15 Bq·g^{-1}
gewogen som van beide waarden:
(0,13 Bq·g^{-1} / 1 Bq·g^{-1}) + (0,15 Bq·g^{-1} / 1 Bq·g^{-1}) = 0,13 + 0,15 = 0,28
dit is ruim onder de vrijstellingsgrens, er is dus geen vergunningsplicht
totale activiteit ^{226}Ra 100 × 390 g × 0,13 Bq·g^{-1} = 5,1·10^{3} Bq
totale activiteit ^{232}Th 100 × 390 g × 0,15 Bq·g^{-1} = 5,9·10^{3} Bq
gewogen som van beide waarden:
(5,1·10^{3} Bq / 1·10^{4} Bq) + (5,9·10^{3} Bq / 1·10^{3} Bq) = 0,51 + 5,9 = 6,4
dit is weliswaar boven de vrijstellingsgrens, maar dat doet er nu niet toe

UITWENDIGE DOSIMETRIE EN AFSCHERMING

21 Fluentietempo en fotonentelling (1984-1-4)

Men wil het omgevingsdosisequivalent in lucht bepalen van een gemengd stralingsveld van fotonen met energieën van 511 keV en 60 keV. De fluxdichtheden van de beide soorten fotonen zijn gelijk. Men beschikt over een NaI(Tl)-detector met een oppervlak van 10 cm^2 en een dikte van 1 mm.

Gegeven

- Appendix, figuren 27 en 28
- fluxdichtheid = fluentietempo = aantal fotonen per cm^2 per seconde
- de soortelijke massa van NaI is 3,67 $g \cdot cm^{-3}$
- de massieke verzwakkingscoëfficiënten van NaI zijn μ/ρ = 6,62 $cm^2 \cdot g^{-1}$ voor 60 keV en μ/ρ = 0,0941 $cm^2 \cdot g^{-1}$ voor 511 keV
- absorptie in de omhulling van het NaI(Tl)-kristal mag worden verwaarloosd
- men mag aannemen dat elk γ-foton dat interactie pleegt met het NaI een elektrische telpuls veroorzaakt en wordt geregistreerd

Vragen

1 Bepaal voor elk van de genoemde energieën het kermatempo in lucht ten gevolge van 1 foton per cm^2 per seconde.

2 Bereken het aantal telpulsen per seconde als het kermatempo in lucht 10 $\mu Gy \cdot h^{-1}$ bedraagt.

3 Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ per tijdseenheid in dit stralingsveld (in $\mu Sv \cdot h^{-1}$).

22 Verontreinigd $^{51}CrCl_3$ (1987-1-2)

Voor een labelingsexperiment heeft men een hoeveelheid met ^{51}Cr gemerkt chroomchloride besteld. Na aankomst in het C-laboratorium blijkt het preparaat ook β-straling uit te zenden. Er wordt vastgesteld dat het preparaat is verontreinigd met kaliumchloride dat gemerkt is met ^{42}K. De stralingsdeskundige heeft als detectoren tot zijn beschikking een met atmosferische lucht gevulde ionisatiekamer en een GM-telbuis met eindvenster.

Eerst plaatst de deskundige de ionisatiekamer op 50 cm van het preparaat. Gedurende 6 minuten wordt een elektrische lading van 94,6 pC verzameld. Vervolgens plaatst hij de eindvenster GM-telbuis op 50 cm van het preparaat en na correctie voor dode tijd en nuleffect meet hij $3{,}53 \cdot 10^6$ telpulsen per minuut.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{42}K (zie Appendix, figuur 6)
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{51}Cr (zie Appendix, figuur 9)
- de gereduceerde dracht van β-deeltjes (zie Appendix, figuur 25)
- het volume van de ionisatiekamer is 100 cm^3
- de massieke wanddikte van de ionisatiekamer is 2,5 $g \cdot cm^{-2}$
- verzwakking van fotonen in de wand van de ionisatiekamer mag worden verwaarloosd
- het effectief detectieoppervlak van de GM-telbuis is 1 cm^2
- het detectorrendement van de GM-telbuis is nul voor γ-fotonen en 100% voor β-deeltjes
- het preparaat mag worden opgevat als een puntbron
- eventuele zelfabsorptie mag worden verwaarloosd
- de soortelijke massa van lucht is $1{,}205 \cdot 10^{-3}$ $g \cdot cm^{-3}$
- een ladingsdichtheid van 1 $C \cdot kg^{-1}$ in lucht komt overeen met een kerma van 33,7 Gy in lucht

Vragen

1 Toon aan dat de β-deeltjes de lucht in het ionisatievat niet kunnen bereiken.

2 Bereken het dosistempo in lucht ten gevolge van de γ-straling op 50 cm afstand van het preparaat.

3 Bereken de ^{42}K-activiteit ten tijde van de metingen.

4 Bereken de ^{51}Cr-activiteit ten tijde van de metingen.

5 Bereken globaal het dosistempo in weefsel ten gevolge van de β-straling op 50 cm afstand van het preparaat.

6 Welke maatregel moet worden genomen ter bescherming tegen de β-straling?

23 Reefer Rio (1988-2-4)

Een koelschip bevat vlees dat licht besmet is met ^{137}Cs. Het vlees is verpakt in kubusvormige dozen met een ribbe van 30 cm die elk 27 kg vlees bevatten. Er wordt een massieke activiteit van 150 $Bq \cdot kg^{-1}$ verondersteld. U wordt als deskundige gevraagd antwoord te geven op een paar vragen.

Gegeven

- een situatieschets (zie figuur 1)
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{137}Cs (zie Appendix, figuur 21)
- de massieke verzwakkingscoëfficiënt van vlees voor een fotonenergie van 662 keV is $\mu/\rho = 0{,}085\ cm^2 \cdot g^{-1}$
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat de dosisopbouwfactor (*build-up factor*) kan worden geschreven als $B = 1 + 0{,}2\ d$ waarin de dikte d is uitgedrukt in cm
- de remstralingsproductie in vlees en de verzwakking in lucht mogen worden verwaarloosd

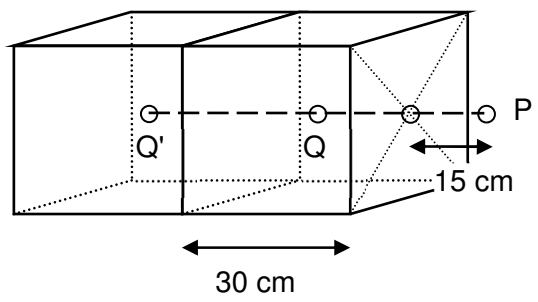
Vragen

1 Maak een schatting van het kermatempo in lucht ten gevolge van de fotonen op 15 cm afstand van een doos (punt P in figuur 1). Ga er bij deze schatting vanuit dat alle activiteit zich in het centrum Q van de doos bevindt.

2 Bereken de bijdrage tot het kermatempo in lucht in punt P van de doos die direct achter de eerste doos is geplaatst. Ga er bij deze schatting vanuit dat alle activiteit zich in het centrum Q' van de tweede doos bevindt.

3 Maak een schatting van het kermatempo in weefsel ten gevolge van de fotonen in de directe nabijheid van de wand van enkele duizenden gestapelde dozen, waarbij wordt aangenomen dat de activiteit homogeen over het vlees is verdeeld.

Aanwijzing: Bedenk dat in een dergelijke stapel de geabsorbeerde en de uitgezonden fotonenergieën bij benadering gelijk zijn, en dat het kermatempo in de buurt van de wand bij benadering de helft is van het kermatempo in het inwendige van de stapel (submersiemodel).



Figuur 1. Situatieschets van de kubusvormige dozen.

24 TLD-persoonsdosismeter (1988-1-1)

Een bepaalde persoonsdosismeter is opgebouwd uit twee verschillende thermoluminescentiedetectoren (TLD's), te weten lithiumboraat ($Li_2B_4O_7$) en calciumsulfaat ($CaSO_4$). Deze thermoluminescentiedetectoren zijn met behulp van een ionisatiekamer geijkt voor vele fotonenergieen tussen 10 keV en 2 MeV. De personen P en Q dragen beide een dergelijke persoonsdosismeter. Op een zekere dag worden de volgende uitslagen geregistreerd in schaaldelen (sd):

persoon	$Li_2B_4O_7$	$CaSO_4$
P	85	85
Q	35	315

Gegeven

- de uitslagen van lithiumboraat en calciumsulfaat, uitgedrukt in schaaldelen per eenheid van exposie ($sd \cdot R^{-1}$) (zie figuur 1)
- de omrekeningsfactor van kerma vrij in lucht K_a naar persoonsdosisequivalent $H_{p,slab}(10)$ in een ICRU-slab (zie Appendix, figuur 28)
- het persoonsdosisequivalent $H_p(10)$ is gedefiniëerd als het dosisequivalent op 10 mm diepte in het menselijk lichaam
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat een exposie van 1 R overeenkomt met een kerma in lucht van 10 mGy

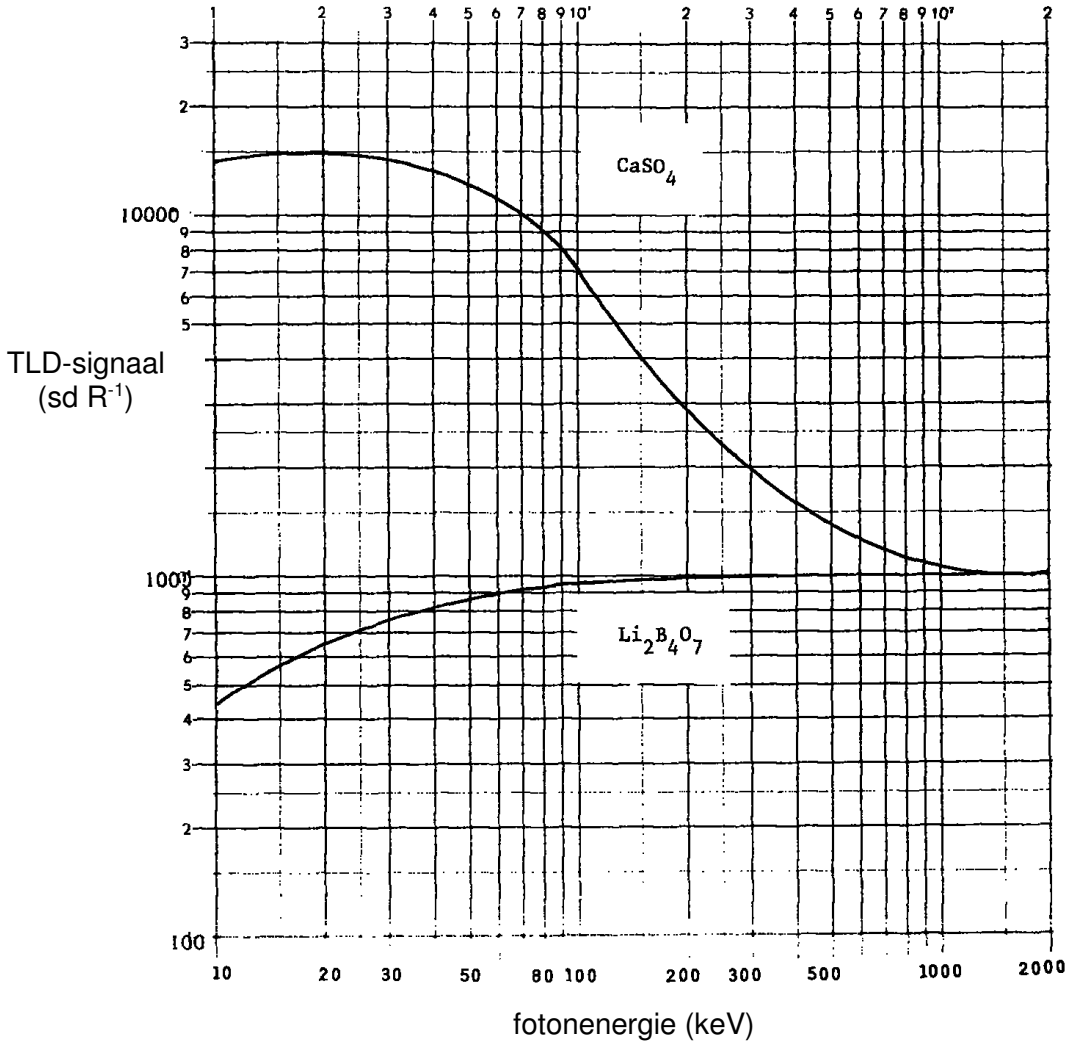
Vragen

1 Hoe groot is het TLD-signaal, uitgedrukt in schaaldelen, van de beide TLD's bij een kerma in lucht van 1 mGy ten gevolge van fotonen met een energie van 60 keV?

2 Hoe groot is het persoonsdosisequivalent $H_p(10)$ bij blootstelling aan een kerma in lucht van 1 mGy ten gevolge van fotonen met een energie van 60 keV?

3 Welk persoonsdosisequivalent hebben de personen P en Q opgelopen? Neem hierbij aan dat elke persoon is blootgesteld aan mono-energetische fotonen.

Aanwijzing: Bepaal de fotonenergie uit de verhouding van de beide TLD-sigalen.



Figuur 1. Relatief TLD-signaal, genormeerd op 1000 sd·R⁻¹ bij 1500 keV, als functie van de fotonenergie, voor de TLD-materialen $Li_2B_4O_7$ en $CaSO_4$.

25 ^{32}P-dosimetrie (1998-2-2)

In moleculair-biologisch onderzoek wordt veel gebruik gemaakt van het radionuclide ^{32}P. Dit radionuclide wordt ingebouwd in DNA (in-vitro-labelingsreacties). Dergelijke ^{32}P-bevattende vloeistoffen worden vaak gehanteerd in zogenaamde Eppendorf-buisjes, die naar onderen toe min of meer in een punt uitlopen. Een klein volume van de oplossing in zo'n Eppendorf-buisje mag als een puntbron worden opgevat. Metingen van het dosistempo ten gevolge van β$^-$- en remstraling op verschillende afstanden x van 1,0 MBq ^{32}P in 0,1 ml oplossing in een Eppendorf-buisje zijn hieronder samengevat:

x (cm)	*gemeten dosistempo en waarde volgens de kwadratenwet (in μGy·min^{-1})*	
0,29 *	1 444	
10	4,67	4,67
20	1,25	---
30	0,58	---
40	0,25	---
50	0,17	---
60	0,13	---

* gemeten op het oppervlak in de punt van het buisje

Gegeven

- het vervalschema van ^{32}P (zie Appendix, figuur 3)
- de gereduceerde dracht van β-deeltjes (zie Appendix, figuur 25)
- de soortelijke massa van lucht is 1,205·10^{-3} g·cm^{-3}
- de huiddosis ten gevolge van huidcontaminatie:

$$D_{\text{huid}} = 1{,}602 \times 10^{-10}\ \Phi\ (S_{\text{col}}/\rho)$$

D_{huid} = huiddosis (in Gy)
Φ = fluentie van de β-deeltjes (in cm^{-2})
S_{col}/ρ = massieke energieverliesdoorsnede voor botsingen (in MeV per g·cm^{-2})

- voor elektronen in weefsel, in het energiegebied waarbinnen de door ^{32}P uitgezonden β-deeltjes vallen, mag voor S_{col}/ρ de waarde 2 MeV per g·cm^{-2} worden aangenomen

Vragen

1 Bepaal de dracht in lucht en in water van de door ^{32}P uitgezonden β-deeltjes (in cm).

2 Bereken de niet ingevulde getallen in de derde kolom van bovenstaande tabel. Wat kunt u concluderen ten aanzien van de verzwakking in lucht van de door ^{32}P uitgezonden β-straling binnen de gebruikelijke bron-werkafstand van 10 tot 60 cm?

3 Bereken het equivalente dosistempo in de huid (in mSv·h^{-1}) ten gevolge van ^{32}P bij een homogene huidbesmetting van 1 MBq·cm^{-2}, uitgaande van bovenstaande formule voor D_{huid}. Herhaal de berekening met de gegevens in figuur 3 van de Appendix.

4 Bereken hoe lang het duurt tot bij deze besmettingssituatie de deterministische jaarlimiet voor de equivalente huiddosis bij beroepsmatige blootstelling wordt bereikt.

26 Incident met een gammagrafiebron (2000-2-2)

Bij groot onderhoud aan een stoomgenerator in een grote hal werd een bron met een activiteit van 20 GBq ^{170}Tm gebruikt om de lasnaden van de pijpen te inspecteren. Om het karwei zo snel mogelijk uit te voeren werd er met ploegendiensten van 8 uur gewerkt. Aan het eind van een ploegendienst werd de bron in één van de pijpen achtergelaten terwijl de radiogrammen werden ontwikkeld.

Bij de evaluatie van de radiogrammen door de radiografiemedewerker van de nieuwe ploeg bleek dat de lasnaad ondeugdelijk was en aan twee medewerkers werd opdracht gegeven om de lasnaad uit te snijden. De nieuwe radiografiewerker had zich nog niet vergewist van het feit dat de bron niet in de container was teruggehaald. Daardoor wisten ook de onderhoudsmedewerkers niet dat de bron nog op de plaats van de lasnaad aanwezig was.

Pas na het uitsnijden realiseerde de radiografiemedewerker zich dat de bron nog in de pijp zat. Het bleek dat de bron bij de snijwerkzaamheden zodanig was beschadigd dat een groot deel van de radioactieve inhoud in de omgeving was verspreid. Metingen wezen uit dat er in de omgeving van de stoomgenerator talloze *hot spots* te vinden waren. Men besloot om de omgeving met een industriële stofzuiger te reinigen, maar omdat deze niet voorzien was van een absoluutfilter werd de activiteit alleen nog maar verder verspreid. Intussen werd het werk in de hal echter niet stilgelegd.

Pas aan het eind van de ploegendienst werd het incident gemeld aan de verantwoordelijk stralingsdeskundige van het radiografiebedrijf, die vervolgens onmiddellijk alle werkzaamheden stopzette. Inmiddels waren ongeveer 70 onderhoudsmedewerkers voor kortere of langere tijd in de hal werkzaam geweest en bij het merendeel van hen werden uitwendige besmettingen op huid en kleren aangetroffen. De grootste gemeten waarde bedroeg 26 kBq·cm^{-2}.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{170}Tm (zie Appendix, figuur 22)
- de verhouding effectieve dosis / omgevingsdosisequivalent (zie Appendix, figuur 29)
- de transmissie van de γ-straling door de pijp bedraagt 5·10^{-2}

Vragen

1 Bereken het omgevingsdosisequivalent ten gevolge van externe straling die de onderhoudsmedewerker heeft opgelopen tijdens het uitsnijden van de lasnaad. Neem hierbij aan dat de afstand van de werknemer tot de bron 0,5 m bedroeg en dat het karwei 45 minuten in beslag nam.

2 Maak een schatting van de effectieve dosis ten gevolge van de externe straling die de onderhoudsmedewerker heeft opgelopen.

3 Wat is de hoogste equivalente huiddosis geweest, aannemende dat de activiteit 8 uur op de huid aanwezig is geweest?

4 Noem tenminste twee stralingshygiënische tekortkomingen die naar aanleiding van dit incident zijn te constateren.

27 Afscherming van een ^{24}Na-bron (1991-2-2)

Voor een experiment is 37 GBq nodig van het nuclide ^{24}Na. Men stelt zich voor deze activiteit te verkrijgen door activering van een geschikte natriumverbinding in een kernreactor. In verband met de nodige beveiliging dienen enige berekeningen te worden gemaakt. Voor de activering wordt de natriumverbinding in een aluminium capsule gebracht die de β-straling zal tegenhouden. Na de activering wordt de capsule onder water opgeborgen.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{24}Na (zie Appendix, figuur 2)
- de gereduceerde dracht van β-deeltjes (zie Appendix, figuur 25)
- de soortelijke massa van lucht is 1,205 kg·m^{-3}
- de soortelijke massa van aluminium is 2,7·10^{3} kg·m^{-3}
- de lineïeke energieoverdrachtscoëfficiënten van lucht zijn μ_{tr} = 3,16·10^{-3} m^{-1} voor 1,37 MeV en μ_{tr} = 2,57·10^{-3} m^{-1} voor 2,75 MeV
- de lineïeke verzwakkingscoëfficiënten van water zijn μ = 6,1 m^{-1} voor 1,37 MeV en μ = 4,3 m^{-1} voor 2,75 MeV
- dosisopbouwfactoren (zie Appendix, figuur 30)

Vragen

1 Bereken de minimale dikte van de aluminium capsule, opdat alle door het bestraalde monster uitgezonden β-deeltjes van ^{24}Na worden tegengehouden.

2 Bereken het te verwachten kermatempo in lucht ten gevolge van de 1,37 MeV γ-fotonen op een afstand van 1 meter van een onafgeschermde bron van 37 GBq ^{24}Na.

3 Bereken het te verwachten kermatempo in lucht ten gevolge van de 2,75 MeV γ-fotonen op een afstand van 1 meter van een onafgeschermde bron van 37 GBq ^{24}Na.

4 Bereken het kermatempo in lucht op 1 meter hoogte boven het wateroppervlak indien een puntvormige ^{24}Na-bron van 37 GBq zich op een diepte van 2 meter onder het wateroppervlak bevindt.

28 Afscherming van geactiveerd materiaal (1993-2-3)

Om een stukje radioactief materiaal uit een kernreactor te kunnen onderzoeken, moet het worden vervoerd. Het stukje, in het vervolg bron geheten, is te beschouwen als puntbron van verwaarloosbare afmetingen. Ook de zelfabsorptie in de bron kan worden verwaarloosd. De metingen worden verricht met een monitor die alleen gevoelig is voor γ-straling.

Een eerste meting aan de onafgeschermde bron wijst uit dat het kermatempo in lucht op een afstand van 1 meter van de bron 50 $mGy \cdot h^{-1}$ bedraagt. Metingen aan vergelijkbaar materiaal hebben aangetoond dat het materiaal voornamelijk de nucliden ^{51}Cr en ^{60}Co bevat, met bijdragen van 40% respectievelijk 60% van de activiteit.

Twee weken na de meting zal het transport plaatsvinden in een kubusvormige kist met een ribbe van 50 cm waarin zich, goed gecentreerd, een bolvormige loden afscherming bevindt. De bron wordt geplaatst in het centrum van de bol.

In afwachting van het transport wordt de onafgeschermde bron onder water bewaard op een diepte van 160 cm.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{51}Cr (zie Appendix, figuur 9)
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{60}Co (zie Appendix, figuur 11)
- de soortelijke massa van lood is 11,35 $g \cdot cm^{-3}$
- de massieke verzwakkingscoëfficiënten van water zijn μ/ρ = 0,0620 $cm^2 \cdot g^{-1}$ voor 1,33 MeV en μ/ρ = 0,1164 $cm^2 \cdot g^{-1}$ voor 0,32 MeV
- dosisopbouwfactoren (zie Appendix, figuur 30)
- de transmissie van brede bundels γ-straling door lood (zie Appendix, figuur 31)
- de eisen te stellen aan het kermatempo tijdens het vervoer zijn:
  1. minder dan 2 $mGy \cdot h^{-1}$ op het oppervlak van de verpakking
  2. minder dan 0,1 $mGy \cdot h^{-1}$ op 1 meter afstand van het oppervlak van de verpakking

Vragen

1 Bereken de activiteit van de bron ten tijde van de meting.

2 Het kermatempo in lucht aan het wateroppervlak moet beneden 25 $\mu Gy \cdot h^{-1}$ blijven. Ga na of aan deze eis is voldaan. Doe voor de berekening van de verzwakking alsof ^{60}Co vervalt onder uitzending van twee fotonen met elk een energie van 1,33 MeV.

3 Bij welke afmeting van een kubusvormige verpakking leiden de twee transporteisen tot dezelfde afschermingseis?

4 Bereken de minimale dikte (in hele cm) van de loden afscherming opdat aan beide transporteisen is voldaan.

29 Afscherming van moeder en dochter (1990-1-2)

Vanuit een laboratorium moet een hoeveelheid van het radioactieve nuclide A worden verzonden. Daartoe beschikt men over enkele bolvormige containers, zoals bij onderstaande gegevens is vermeld. Het nuclide A heeft een radioactieve dochter B. De eigenschappen staan vermeld in nevenstaande tabel.

Tabel 1. Eigenschappen van nucliden A en B.

eigenschap	*nuclide A*	*nuclide B*
$T_{½}$	30 j	3 h
$f_{\text{emissie},\beta}$	1	1
$f_{\text{emissie},\gamma}$	1	1
$E_{\beta,\max}$ (MeV)	0,5	0,9
E_{γ} (MeV)	0,6	1,9
h ($\mu Sv \cdot m^2 \cdot MBq^{-1} \cdot h^{-1}$)	0,07	0,23

Een technicus isoleert nuclide A in een zuivere vorm. Voor het vervoer plaatst hij het preparaat achtereenvolgens in een aantal containers en bepaalt telkens het omgevingsdosisequivalenttempo op 1 m van het oppervlak van de container. Bij een wanddikte van 50 mm lood meet hij 80 $\mu Sv \cdot h^{-1}$. Hoewel hij bekend is met de eigenschappen van nuclide A en met het feit dat het transport drie volle dagen zal duren, verzendt hij het preparaat in deze container.

Gegeven

- alle containers zijn bolvormig en hebben dezelfde uitwendige diameter van 40 cm
- alle containers hebben in het centrum een holte met een diameter van 2 cm waarin het preparaat precies past; de radioactieve bron bevindt zich dus in het middelpunt
- de containers verschillen door de dikte van de loden wand: de kleinste dikte is 3 cm lood en de volgende wanddiktes zijn telkens 1 cm groter; de invloed van de overige delen van de container op de doorgelaten straling mag worden verwaarloosd
- de soortelijk massa van lood is 11 350 $kg \cdot m^{-3}$
- het tijdsverloop tussen de radiochemische isolatie en de meting mag worden verwaarloosd
- de invloed van de door de nucliden A en B uitgezonden β-straling en de daarmee gepaard gaande remstraling mag bij dit vraagstuk worden verwaarloosd
- de verzwakking in lood van de γ-straling uitgezonden door de nucliden A en B (zie figuur 1)
- de eisen te stellen aan het omgevingsdosisequivalenttempo tijdens het vervoer zijn:
  1. minder dan 2 $mSv \cdot h^{-1}$ op het oppervlak van de verpakking
  2. minder dan 0,1 $mSv \cdot h^{-1}$ op 1 meter afstand van het oppervlak van de verpakking

Vragen

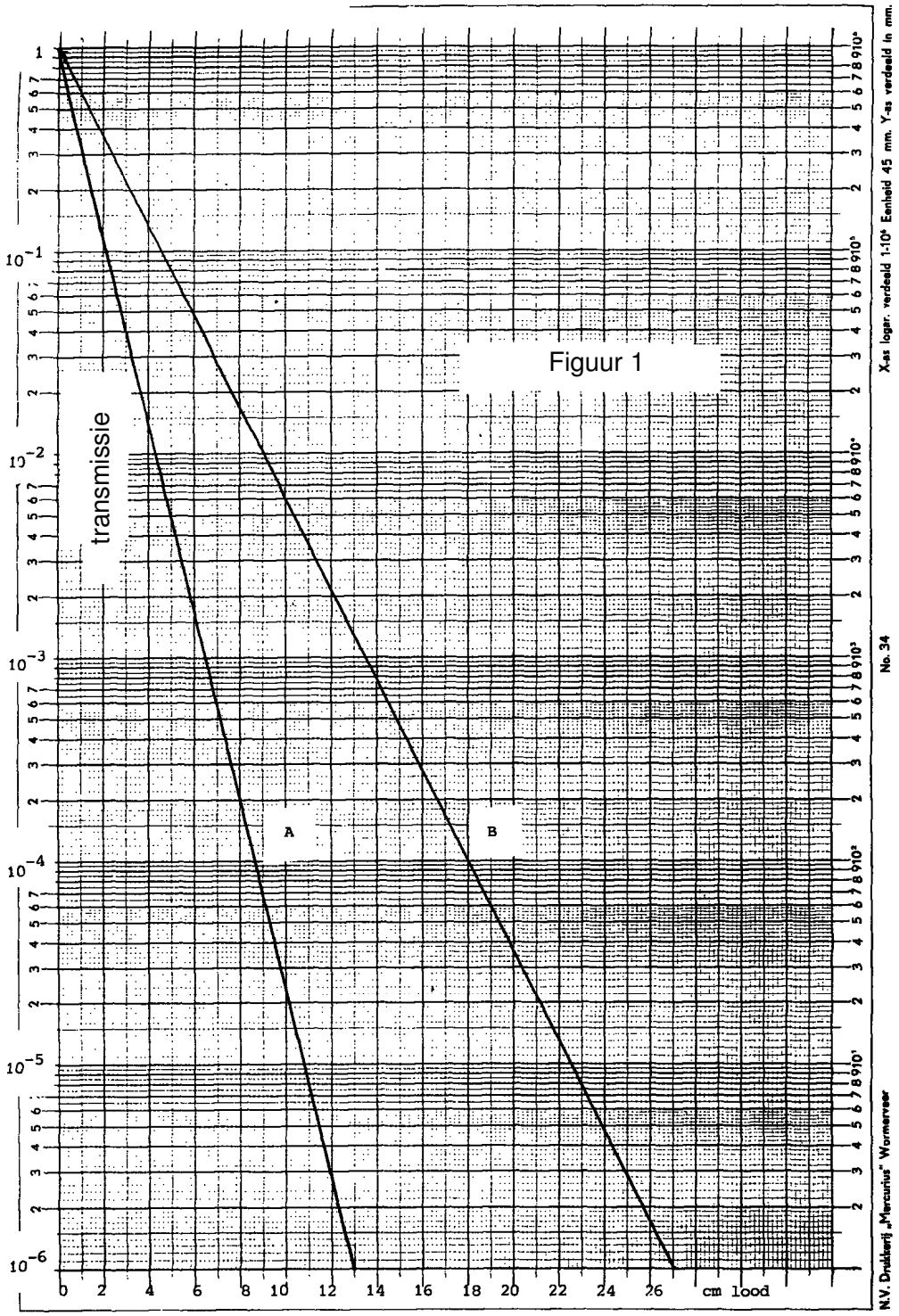
1 De technicus vergeet twee dingen. Welke zijn deze?

2 Bereken de activiteit van nuclide A op het tijdstip van de isolatie.

3 Bereken de activiteit van nuclide B op het moment van aflevering van de container.

4 Wat had de wanddikte moeten zijn?

5 Bereken de massa van het lood in de gebruikte en in de noodzakelijke container.



Figuur 1. Transmissie van de γ-straling van de nucliden A en B door lood.

30 Container voor opslag van ^{60}Co (1995-1-3)

Voor de opslag van ^{60}Co-bronnen moeten cylindrische containers worden ontworpen. De cylinders krijgen in het midden, evenwijdig aan de lengte-as, een boring met een diameter van 1 cm en een diepte van 10 cm. In deze holte zullen één of meer bronnen worden geplaatst. Voor de verdere berekeningen mogen de bronnen als puntvormig worden beschouwd. De bodem en het deksel van de containers worden even dik genomen als de zijwand.

Als ontwerpeis met betrekking tot het stralingsniveau geldt dat het luchtkermatempo ten gevolge van de γ-straling aan het oppervlak van een container ten hoogste 50 $\mu Gy \cdot h^{-1}$ mag bedragen, indien zich in de container 10 MBq ^{60}Co bevindt.

Men heeft de beschikking over de afschermingsmaterialen lood en verarmd uranium. Uranium heeft de beste afschermingseigenschappen maar is licht radioactief. De berekende wanddikte en massa van de containers zullen mede de uiteindelijke keuze bepalen.

Gegeven

- de bronconstante van ^{60}Co voor kerma in lucht is k = 0,305 $\mu Gy \cdot m^2 \cdot MBq^{-1} \cdot h^{-1}$
- transmissie van fotonen door ijzer, lood en uranium (zie figuur 1)
- de soortelijke massa van lood is 11,35 $g \cdot cm^{-3}$
- de soortelijke massa van uranium is 18,9 $g \cdot cm^{-3}$
- het atoomgewicht van uranium is 238,03 $g \cdot mol^{-1}$
- de samenstelling van verarmd uranium is 99,75% ^{238}U ($T_{½}$ = $4{,}468 \cdot 10^9$ j) en 0,25% ^{235}U ($T_{½}$ = $7{,}038 \cdot 10^8$ j)
- de radioactiviteit van het uranium veroorzaakt aan het oppervlak een kermatempo in lucht van 20 $\mu Gy \cdot h^{-1}$
- het getal van Avogadro is $6{,}02 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}

Vragen

1 Bereken de minimaal benodigde wanddikte van de container indien deze van lood wordt gemaakt (afgerond naar boven op een veelvoud van een halve cm).

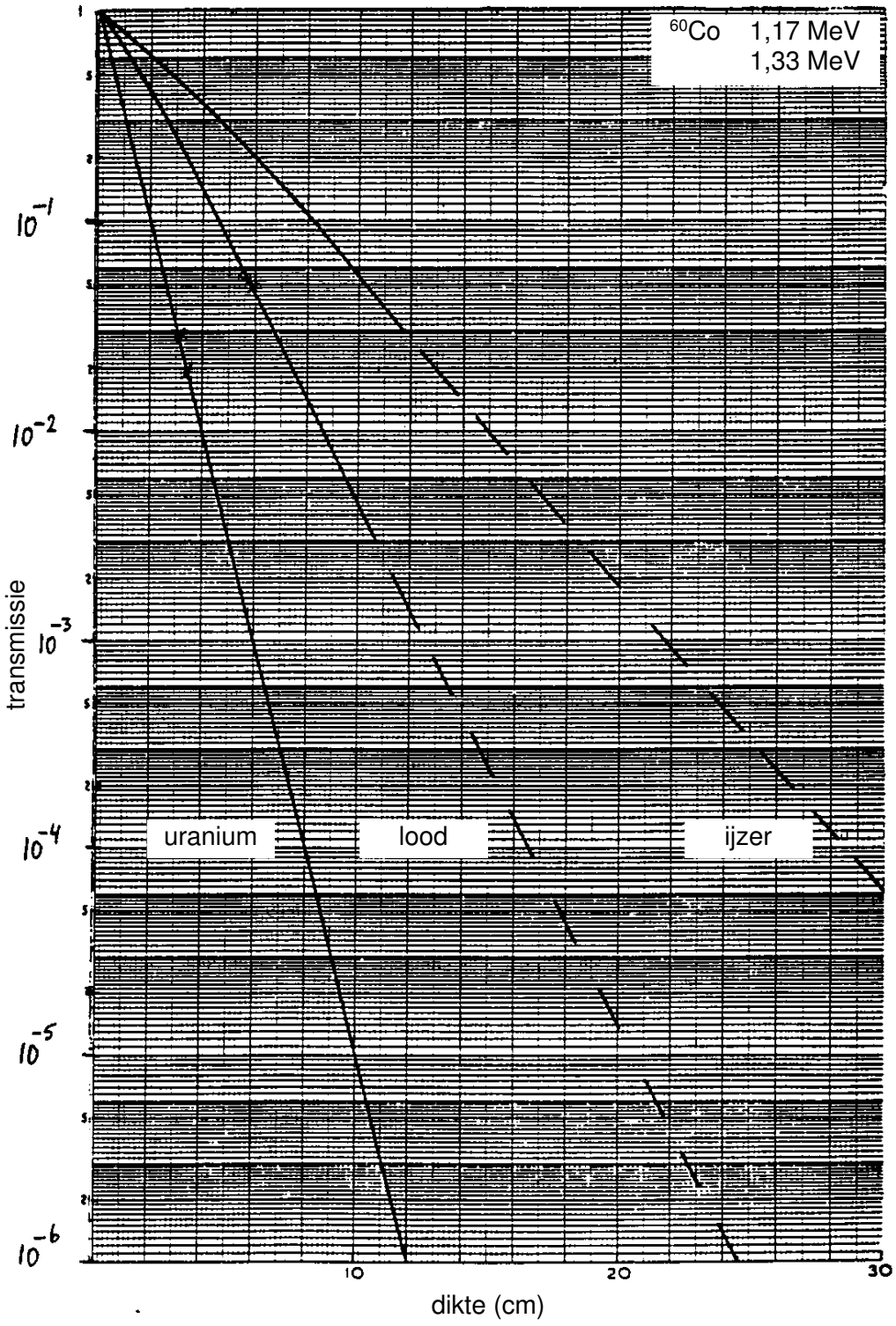
Aanwijzing: Benader de gezochte dikte door proberen.

2 Bereken de minimaal benodigde wanddikte van de container indien deze van uranium wordt gemaakt (afgerond naar boven op een veelvoud van een halve cm).

3 Bereken de massa van een container van lood met wanddikte als berekend bij vraag 1 (afgerond op 0,1 kg).

4 Bereken de massa van een container van uranium met wanddikte als berekend bij vraag 2 (afgerond op 0,1 kg).

5 Bereken de activiteit van ^{238}U en ^{235}U tezamen, dochternucliden niet meegerekend, voor een container van uranium met massa als berekend bij vraag 4.



Figuur 1. Transmissie van brede bundels γ-straling van ^{60}Co door ijzer, lood en uranium.

31 Afscherming van een ionenwisselaar (1997-1-1)

Het water van het primaire koelsysteem van een kernreactor wordt gezuiverd van radioactiviteit door dit water continu door een ionenwisselaar te pompen. Radioactieve stoffen in dit koelwater worden in meerdere of mindere mate door deze ionenwisselaar vastgehouden. Enkele malen per jaar moet de ionenwisselaar worden geregenereerd.

Tijdens het reactorbedrijf wordt de activiteit van het koelwater dat door de ionenwisselaar stroomt gedomineerd door radionucliden met een betrekkelijk korte halveringstijd. De activiteit die in de ionenwisselaar is verzameld maakt afscherming noodzakelijk. Bij de beschouwde reactor blijkt het radionuclide ^{24}Na bepalend te zijn voor de benodigde afscherming van de ionenwisselaar.

De reactor is gewoonlijk ongeveer 110 uur per week volcontinu in bedrijf. Halverwege deze periode heeft de ^{24}Na-activiteit in het koelwater reeds zijn maximale waarde (= verzadigingswaarde) bereikt. Op dat moment is de activiteitsconcentratie 40 $MBq \cdot m^{-3}$. Als benadering mag u deze activiteitsconcentratie van het koelwater voor de gehele bedrijfsweek toepassen.

Gegeven

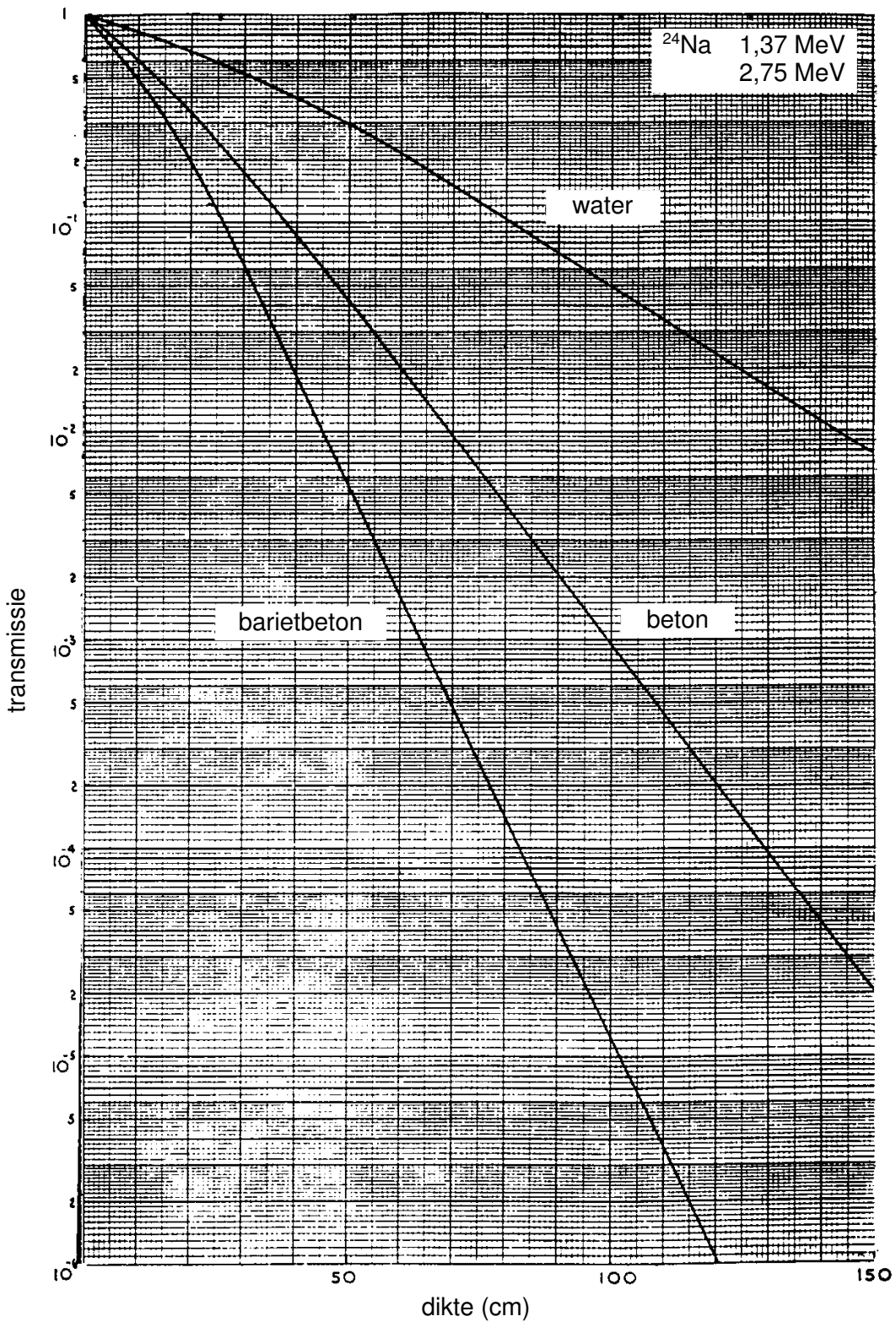
- per uur stroomt 4,0 m^3 water door de ionenwisselaar
- het vangstrendement van de ionenwisselaar voor Na^+-ionen is 95%
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{24}Na (zie Appendix, figuur 2)
- de transmissie van brede bundels γ-straling van ^{24}Na door enige materialen
- (zie figuur 1)
- verzwakking door de ionenwisselaar mag worden verwaarloosd

Vragen

1 Bereken de maximale ^{24}Na-activiteit die zich tijdens een bedrijfsweek in de ionenwisselaar kan bevinden. Verwaarloos de activiteit in de ionenwisselaar aan het begin van de bedrijfsweek.

2 Bereken het kermatempo in lucht op 2 meter afstand van de ionenwisselaar indien zich daarin de bij vraag 1 berekende ^{24}Na-activiteit bevindt. Beschouw deze als een puntbron.

3 Bereken de dikte van de betonnen muur die nodig is om het bij vraag 2 berekende kermatempo in lucht op 2 meter afstand van de ionenwisselaar terug te brengen tot 1 $\mu Gy \cdot h^{-1}$. Maak de berekening voor zowel normaal beton als voor verzwaard barietbeton.



Figuur 1. Transmissievan brede bundels γ-straling van ^{24}Na door water, beton en barietbeton.

32 Afscherming van een ^{137}Cs-bron (1993-2-2)

In een meetruimte staat een opstelling voor gammaspectrometrie. De detector is een NaI(Tl)-kristal dat alzijdig is afgeschermd met lood ter dikte van 10 cm. In een daarnaast gelegen ruimte wil men een experimenteeropstelling bouwen, waarin een ingekapselde, puntvormige bron van 1 GBq ^{137}Cs zal worden gebruikt. Deze moet worden voorzien van een afscherming van lood die een tweetal doelen dient: (1) bescherming van de experimentatoren, en (2) reductie van het nuleffect van de gammaspectrometer.

In verband met doelstelling (2) stelt men de eis dat de verhoging van het nuleffect van de gammaspectrometer bij E_γ = 0,66 MeV, dit is ter plaatse van de fotopiek in het spectrum van ^{137}Cs, als gevolg van de ^{137}Cs-bron in de nieuwe experimenteeropstelling niet meer mag bedragen dan 10^{-2} telpulsen per seconde.

Gegeven

- de energieresolutie van de NaI(Tl)-detector bij 0,66 MeV is beter dan 8%
- de afstand tussen de nieuwe bron en het NaI(Tl)-kristal bedraagt 5 m
- de beide vertrekken zijn gescheiden door een 20 cm dikke betonnen muur
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{137}Cs (zie Appendix, figuur 21)
- de transmissie van brede bundels γ-straling door lood (zie Appendix, figuur 31)
- de soortelijke massa's (in $kg \cdot m^{-3}$) zijn ρ_{NaI} = 3670, ρ_{beton} = 2350 en ρ_{lood} = 11 350
- de massieke energieabsorptiecoëfficiënt van NaI voor een γ-energie van 0,66 MeV is $(\mu/\rho)_{en} = 3{,}2 \cdot 10^{-3}\ m^2 \cdot kg^{-1}$
- de massieke verzwakkingscoëfficiënten (in $m^2 \cdot kg^{-1}$) voor een γ-energie van 0,66 MeV zijn $(\mu/\rho)_{NaI} = 7{,}6 \cdot 10^{-3}$, $(\mu/\rho)_{beton} = 7{,}7 \cdot 10^{-3}$ en $(\mu/\rho)_{lood} = 10{,}8 \cdot 10^{-3}$
- beschouw het NaI(Tl)-kristal als een kubus met ribben van 10 cm die met één zijde naar de ^{137}Cs-bron in de nieuwe experimenteeropstelling is toegekeerd
- voor de NaI-detector is geconstateerd dat 100 interacties van invallende fotonen met een energie van 0,66 MeV gemiddeld 60 telpulsen in de fotopiek veroorzaken

Vragen

1 Bereken de dikte van de loodafscherming van de ^{137}Cs-bron opdat het kermatempo vrij in lucht op 0,5 meter afstand van de bron ten hoogste 10 $\mu Gy \cdot h^{-1}$ bedraagt.

2 Spelen de fotonen van ^{137}Cs-bron die bij de interacties in lood en beton worden verstrooid (*build up*) een rol van betekenis in het teltempo van de spectrometer ter plaatse van de fotopiek? Motiveer uw antwoord.

3 Bereken het fluentietempo van de 0,66 MeV fotonen van de ^{137}Cs-bron ter plaatse van het NaI(Tl)-kristal, rekening houdende met de verzwakking van de betonnen muur en de loodafscherming van de NaI(Tl)-detector in de spectrometer. Laat hierbij de bij vraag 1 berekende afscherming van de ^{137}Cs-bron buiten beschouwing.

4 Bereken de dikte van de loodafscherming van de ^{137}Cs-bron, opdat aan bovengenoemde eis voor de maximale verhoging van het teltempo van de spectrometer wordt voldaan.

33 Afscherming van een ^{60}Co-bron (1990-1-1)

In een betonnen ruimte met een vloeroppervlak van 8 m × 5 m bevindt zich een bestralingsopstelling voorzien van een ^{60}Co-bron van 75 GBq. De bron is in een loodkasteel geplaatst. Door een cirkelvormige, gecollimeerde opening treedt een bundel naar buiten. De stralingsbundel heeft een diameter van 15 cm op 1 m afstand van de bron.

Gegeven

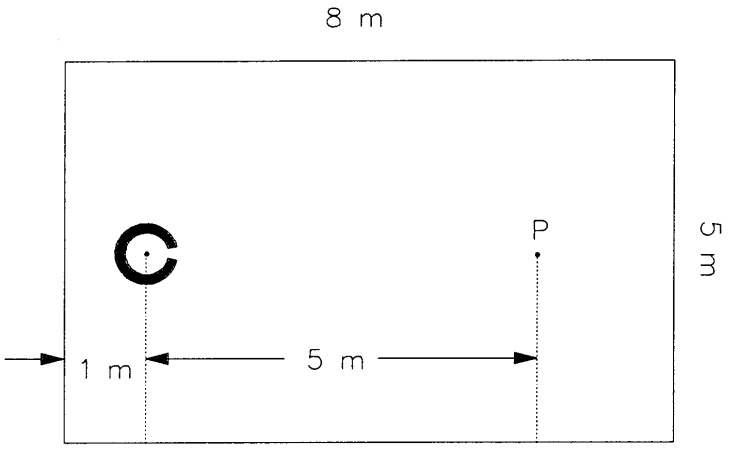
- situatieschets (zie figuur 1)
- de bronconstante van ^{60}Co voor kerma in lucht is k = 0,305 μGy·m^2·MBq^{-1}·h^{-1}
- verstrooiingsfactoren voor beton (zie Appendix, figuur 44)

Vragen

1 Bereken het kermatempo in lucht ten gevolge van de directe straling in punt P, als de afstand van dit punt tot de bron 5 m bedraagt.

2 Bereken in hetzelfde punt P de bijdrage tot het kermatempo in lucht ten gevolge van de straling die via de muur is terugverstrooid.

3 Wat is de maximale afstand tussen bron en het te bestralen object (punt P in figuur 1), indien de eis wordt gesteld dat de bijdrage van de terugverstrooide straling ten opzichte van de directe straling niet meer bedraagt dan 1%?



Figuur 1. Plattegrond van de bestralingsruimte. Het te bestralen object bevindt zich in punt P.

34 Afscherming van ^{60}Co-activiteit (1988-1-2)

In een laboratorium wordt metaalkundig onderzoek verricht aan een sterk geactiveerd onderdeel uit een nucleaire installatie. De activiteit van het voorwerp is $1{,}5 \cdot 10^{12}$ Bq. Het voorwerp wordt in een loden afschermkast gebracht en gepositioneerd op lokatie P (zie figuur 1). Door een fout blijft de invoeropening gedeeltelijk open staan. Het oppervlak van deze opening wordt gesteld op 100 cm^2. De onderzoeker staat op lokatie E.

Gegeven

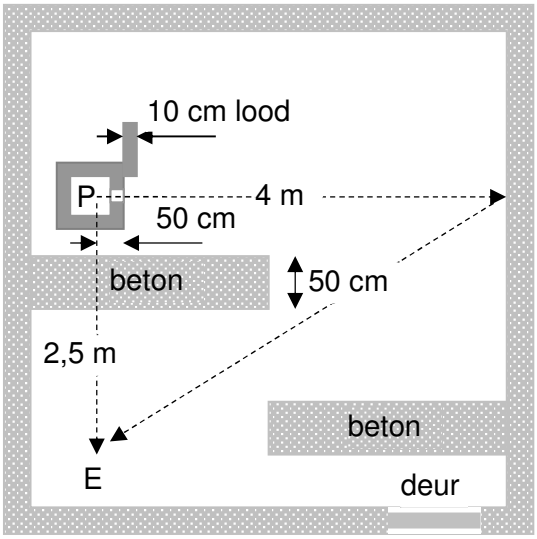
- een situatieschets (zie figuur 1)
- de bron mag worden opgevat als een puntbron zonder zelfabsorptie
- de wanddikte van de loden afschermkast bedraagt 10 cm
- de bronconstante van ^{60}Co voor kerma in lucht is k = 0,305 μGy·m^2·MBq^{-1}·h^{-1}
- de transmissie van brede bundels γ-straling door lood (zie Appendix, figuur 31)
- de transmissie van brede bundels γ-straling door beton (zie Appendix, figuur 33)
- verstrooiingsfactoren voor beton (zie Appendix, figuur 44)

Vragen

1 Waarom mag de transmissiegrafiek voor beton worden gebruikt voor de straling die reeds door het lood is verzwakt?

2 Bereken het kermatempo in lucht op lokatie E ten gevolge van de directe straling.

3 Bereken het kermatempo ten gevolge van de straling die via de opening in de loodkast en de tegenoverliggende betonnen wand het punt E bereikt.



Figuur 1. Plattegrond van de onderzoeksruimte.

35 Afscherming van een ^{60}Co-bestralingsinrichting (2000-1-4)

Voor een ^{60}Co-bestralingsinrichting voor therapeutische doeleinden moet de benodigde afscherming worden berekend. De positie van de bron in de bestralingsruimte is schematisch aangegeven in figuur 1. Tijdens de bestraling bevindt de bron zich op positie S en is de primaire bundel gericht langs de lijn S-B. De patiënt wordt op positie P geplaatst. Op positie A bevindt zich het bedieningspaneel van de bestralingsinstallatie. De punten A en B liggen juist aan de buitenzijde van de betonnen wanden van de bestralingsruimte.

Ten behoeve van de bestralingen wordt de bron vanuit een volledig afgeschermde rustpositie naar de bestralingspositie S in de afgeschermde kop van het toestel gebracht. Daarin bevindt zich nog een sluiter, die pas wordt geopend wanneer de patiënt geheel gereed is om te worden bestraald. Als de bron zich in de kop bevindt, veroorzaakt de lekstraling op 1 meter van S een dosistempo in weefsel van 2 $mGy \cdot h^{-1}$.

De bron bevindt zich per week gemiddeld 20 uur op positie S. Van die tijd wordt gemiddeld een vierde deel besteed aan het bestralen van patiënten; gedurende het resterende deel van de 20 uur is de sluiter dicht. Op jaarbasis is de bron 50 werkweken in gebruik. De veldgrootte van de primaire stralingsbundel bedraagt 20 cm × 20 cm ter plaatse van het intreevlak bij de patiënt op positie P.

Voor het personeel op posities A en B geldt de eis dat de gemiddelde effectieve weekdosis maximaal 0,02 mSv mag bedragen (1 mSv per jaar, op basis van 50 werkweken per jaar). Voor deze personen wordt een verblijfsfactor van 1 aangenomen.

De wand bij punt B is tevens een buitenmuur van het gebouw. Aan deze muur grenst een voor publiek toegankelijk terreingedeelte, met een omheining tot een minimale afstand van 10 m tot de muur. Buiten deze omheining ligt een openbaar parkeerterrein dat zowel door bezoekers van het ziekenhuis als door omwonenden wordt gebruikt.

Gegeven

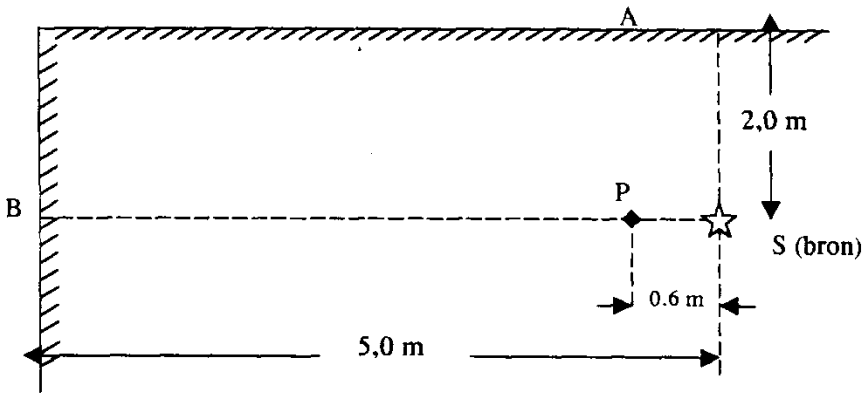
- een situatieschets van de inrichting (zie figuur 1)
- de afstand SA bedraagt 2,1 m
- de onafgeschermde ^{60}Co-bron levert op 1 m afstand een dosistempo in weefsel van 100 $Gy \cdot h^{-1}$
- de transmissie van brede bundels γ-straling door beton (zie Appendix, figuur 33)
- de transmissie van verstrooide γ-straling van ^{60}Co door beton (zie Appendix, figuur 38)
- verstrooiingsfactoren voor beton (zie Appendix, figuur 44); deze figuur mag in dit vraagstuk ook worden gebruikt voor verstrooiing aan een patiënt
- ga bij de berekeningen uit van de verhouding (effectieve dosis) / (dosis in weefsel) = 1 $Sv \cdot Gy^{-1}$
- de actuele individuele dosis (AID) is de individuele dosis (ID) gecorrigeerd voor de actuele blootstellingscorrectiefactor (ABC-factor), welke voor parkeerterreinen op 0,01 is gesteld

Vragen

1 Bereken de benodigde dikte van de betonnen muur tussen S en A, rekening houdende met de lekstraling en de via de patiënt verstrooide straling.

2 Bereken de benodigde dikte van de betonnen muur tussen S en B, rekening houdende met de primaire bundel en de lekstraling.

3 Bereken de maximale waarde voor de AID op het parkeerterrein.



Figuur 1. Plattegrond van de bestralingsruimte.

36 Afscherming van een betatron (1992-2-2)

Een elektronenversneller (betatron) wordt gebruikt voor medisch-therapeutische bestralingen, hetzij met elektronen, hetzij met door de elektronenbundel opgewekte remstraling. De gebruikelijke instellingen zijn 10 MV voor bestralingen met elektronen en 30 MV voor bestralingen met fotonen. Per week worden gemiddeld 200 bestralingen uitgevoerd met een gemiddelde dosis van 4 Gy in lucht op 1 meter van de trefplaat.

De bestralingsruimte is omgeven door een afschermingsmuur. Ter bescherming van het personeel stelt men de eis dat aan de buitenzijde van die muur, op 5 m van de trefplaat, per week maximaal een dosis van 0,04 mGy in lucht kan worden ontvangen. Richtingsfactor en bezettingsgraad zijn beide gelijk aan 1.

Gegeven

- de equivalente dosis in weefsel bij bestraling met elektronen (zie figuur 1)
- de dracht van elektronen in water (geldt ook voor zacht weefsel) (zie figuur 2)
- de remstralingsopbrengst (zie figuur 3)
- de transmissie van brede bundels remstraling door lood (zie Appendix, figuur 39)
- de transmissie van brede bundels remstraling door beton (zie Appendix, figuur 40)
- de omrekeningsfactor 1 rad = 0,01 Gy
- de soortelijke massa van beton is 2350 $kg \cdot m^{-3}$
- de soortelijke massa van lood is 11 350 $kg \cdot m^{-3}$

Vragen bij bestraling met elektronen

1 Bepaal de dracht (in cm) van 10 MeV elektronen in zacht weefsel.

2 Bereken het maximale dosisequivalenttempo in zacht weefsel ten gevolge van de elektronenbundel bij een versnelspanning van 10 MV, een bundelstroom van 1 nA en een veldgrootte van 10 cm^2.

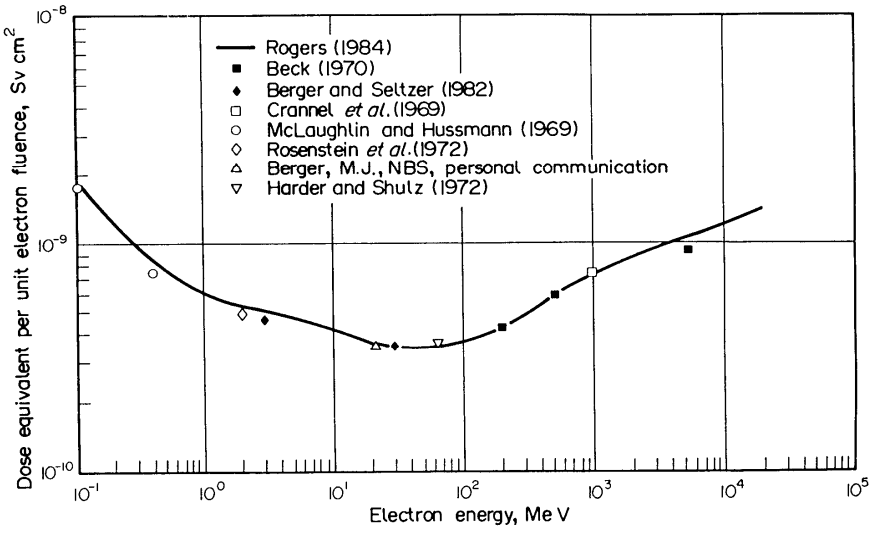
3 Veronderstel dat door een combinatie van fouten een elektronenbestraling wordt uitgevoerd bij een versnelspanning van 30 MV in plaats van 10 MV. De overige instellingen zijn als vermeld bij vraag 2. Wat zijn in dat geval de dracht en het maximale dosisequivalenttempo?

Vragen bij bestraling met fotonen

4 Bereken de bestralingstijd die nodig is om bij een versnelspanning van 30 MV en een bundelstroom van 1 μA op een afstand van 1 m van de trefplaat een dosis van 4 Gy in lucht te verkrijgen.

5 Bereken de benodigde dikte van de afscherming voor de materialen lood en beton.

6 Voor het vloerdeel waarop de afschermingsmuur is geplaatst, geldt een maximaal toegestane vloerbelasting van 10 000 $kg \cdot m^{-2}$. De hoogte van de afscherming is 2,7 m. Geef aan de hand van een berekening aan, welke van de bij vraag 5 genoemde materialen op grond van de toegestane vloerbelasting bruikbaar zijn.



Figuur 1. Dosisequivalent per eenheid van fluentie voor elektronen loodrecht op een vlakke laag weefselequivalent materiaal van 30 cm dikte.

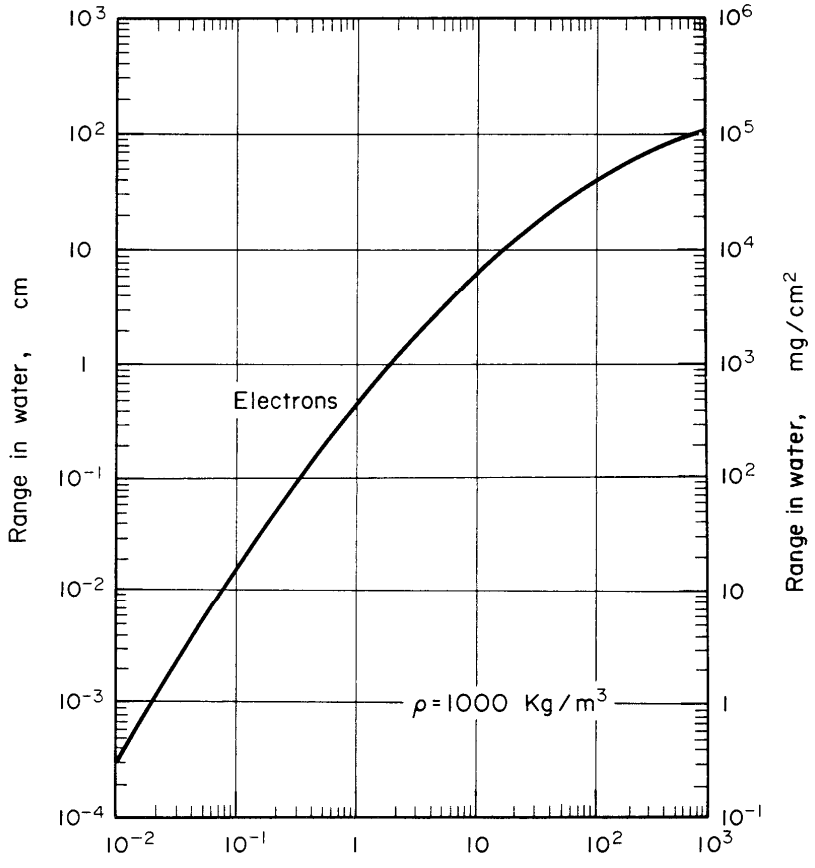
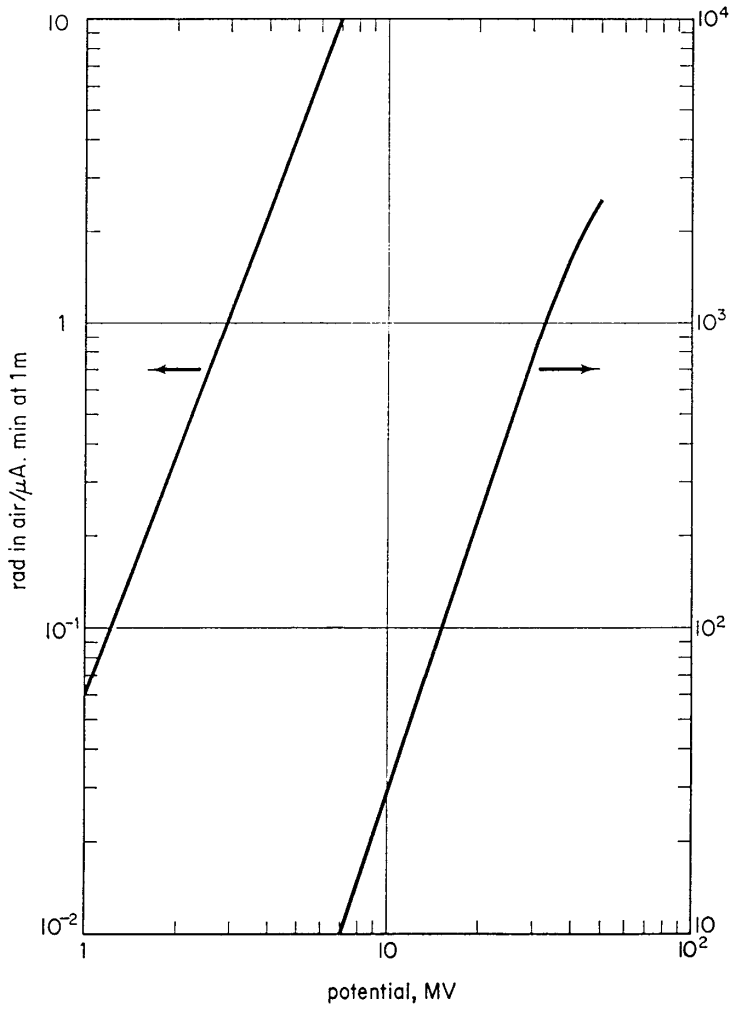


Fig. 28. Range of electrons in water.

Figuur 2. Dracht in water van elektronen als functie van hun energie (in MeV) (ICRP-33).



Figuur 3. Remstralingsopbrengst op 1 m van het target.

37 Dosis bij radiodiagnostisch onderzoek (1993-2-4)

Een radiodiagnostisch onderzoek van de buik van een vrouwelijke patiënt bestaat uit het doorlichten met behulp van een beeldversterker en het maken van een röntgenfoto. Tijdens het onderzoek ligt de patiënt op een onderzoektafel. Tijdens het doorlichten staat de arts naast de patiënt.

Gegeven

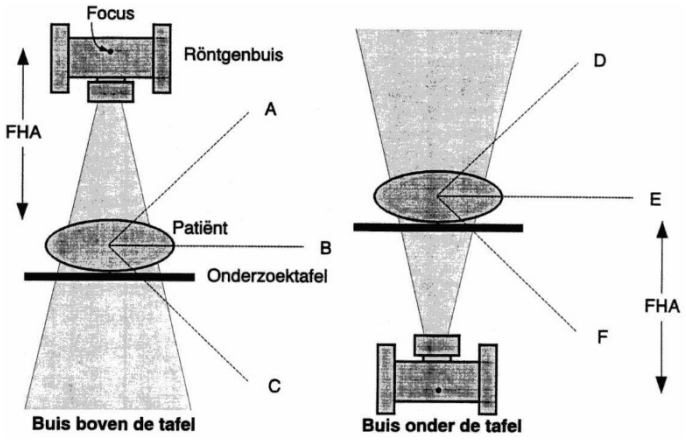
- een situatieschets van de opstelling (zie figuur 1)
- opbrengst van de röntgenbuis (zie Appendix, figuur 41)
- het totale filter bedraagt 2,5 mm Al
- er wordt 60 s doorlicht bij een buisspanning van 100 kV en een buisstroom van 0,5 mA
- tijdens het doorlichten is de veldgrootte 30 cm × 20 cm op de huid van de patiënt, en de focus-huidafstand (FHA) bedraagt 1 m
- bij het maken van de röntgenfoto is de buisspanning 80 kV, en het product van buisstroom en opnametijd bedraagt 90 mA·s
- bij het maken van de röntgenfoto is de veldgrootte 30 cm × 40 cm en de focus-huid-afstand (FHA) is 85 cm
- verstrooiingsfactoren voor weefsel (zie tabel 1)
- de conversiefactor C_f = (equivalente orgaandosis) / (dosis vrij in lucht) (zie tabel 2)
- de massa's van de doelorganen (zie Appendix, figuur 46)
- de orgaanweegfactoren (zie Appendix, figuur 47)
- verzwakking door en verstrooiing aan de onderzoektafel mogen worden verwaarloosd

Vragen

1 Bereken de verstrooide dosis bij het doorlichten op 100 cm van de patiënt, voor een FHA = 1 m, voor beide geometrieën en voor verstrooihoeken van 45°, 90° en 135° (dus voor de posities A t/m F).

2 Bereken voor de omstandigheden waaronder de röntgenfoto wordt gemaakt de dosis vrij in lucht D_{lucht} voor een FHA = 85 cm.

3 Bereken de effectieve dosis die de patiënt ontvangt ten gevolge van de röntgenfoto. Gebruik hierbij de gegevens van tabel 2.



Figuur 1. Schematische voorstelling van de bestralingssituatie.

Tabel 1. Percentage van de invallende straling dat wordt verstrooid, gemeten op 1 m van het verstrooiend object bij een veldgrootte van 400 cm², als functie van de verstrooihoek.

verstrooihoek	*versnelspanning*				
	100 kV	*200 kV*	*300 kV*	*^{60}Co*	*6 MV*
15°	---	---	---	---	0,65
30°	0,02	0,24	0,34	---	0,30
45°	0,03	0,23	0,26	0,18	0,14
60°	0,04	0,19	0,22	0,14	0,08
90°	0,05	0,14	0,19	0,07	0,04
120°	0,12	0,23	0,25	0,05	0,03
135°	0,17	0,30	0,33	0,04	0,03
150°	0,21	0,37	0,48	---	---

Tabel 2. Conversiefactor C_f (in Sv·Gy^{-1}) voor onderzoek van de buik (AP-geometrie, veldafmeting 30 cm × 40 cm, focus-huidafstand 85 cm, en buisspanning 80 kV).

orgaan	*C_f (man)*	*C_f (vrouw)*
borstweefsel	---	0,01
longen	---	0,02
milt	0,09	0,13
alvleesklier	0,18	0,24
maagwand	0,42	0,53
dunne darm	0,35	0,39
dikke darm (boven)	0,42	0,45
dikke darm (onder)	0,20	0,22
eierstokken	---	0,29
baarmoeder	---	0,36
rood beenmerg	0,04	0,04
botoppervlak	0,05	0,06

38 Dosimetrie van röntgenstraling (1995-1-2)

Op de afdeling radiobiologie moet een röntgenapparaat met een 3 mm Al filter, een maximale buisspanning van 300 kV (halve-sinusgenerator), een wolfraam-reflectieanode en een maximale buisstroom van 10 mA worden geïnstalleerd in een nieuwe bestralingskamer met wanden van beton. Het stralingsniveau ter plaatse van het bedieningspaneel, dat zich buiten de bestralingskamer bevindt, mag in de meest ongunstige situatie niet hoger zijn dan de wettelijke jaarlimiet voor niet blootgestelde werknemers.

Gegeven

- opbrengst van het röntgentoestel en transmissie van de opgewekte straling door beton (zie Appendix, figuur 43)
- massieke energieoverdracht- en energieabsorptiecoëfficiënten (zie Appendix, figuur 26)
- de *workload W* is 10 000 mA·min per week gedurende 50 weken per jaar
- de afstand van het bedieningspaneel tot de focus bedraagt 5 m
- de primaire bundel is gedurende de helft van de bestralingstijd gericht op het bedieningspaneel (*use factor U* = 0,5)
- het bedieningspaneel is voortdurend bezet (*occupancy factor T* = 1)
- voor de berekening wordt het dosisequivalent in weefsel als maatgevend beschouwd
- ga er bij de berekeningen vanuit dat er geen wijziging optreedt in de effectieve energie als gevolg van de interactie met lucht en beton
- de benodigde afschermingsdikte kan worden berekend door gebruik te maken van de formule:

$$k = K_{\max}\frac{l^2}{WUT}$$

k = opbrengst van het röntgentoestel op 1 m van de focus (in mGy·m^2·mA^{-1}·min^{-1})
K_{max} = maximaal toegelaten kerma (in mGy per jaar)
l = afstand tot de focus (in m)
W = *workload* (in mA·min per jaar)
U = *use factor*
T = *occupancy factor*

Vragen

1 Bepaal het maximale dosistempo (in mGy·min^{-1}) in lucht zonder afscherming ter plaatse van het bedieningspaneel.

2 Bepaal het hiermee samenhangende geabsorbeerde dosistempo in weefsel.

3 Bepaal de minimale betondikte die nodig is om aan de gestelde eis te voldoen.

39 Afscherming van een röntgentoestel (1999-1-2)

In een technisch-wetenschappelijk onderzoeksinstituut krijgt men de beschikking over een röntgenapparaat voor algemeen gebruik. De buisspanning van het toestel kan worden gevarieerd tussen 50 kV en 100 kV. Ook de filtratie van de uittredende bundel kan worden gevarieerd. Het toestel zal vast worden opgesteld.

Als eis wordt gesteld dat de individuele effectieve jaardosis buiten de bestralingsruimte ten gevolge van het bedrijven van het röntgenapparaat maximaal 1 mSv mag bedragen. Personen mogen zich niet in de eigenlijke bestralingsruimte bevinden terwijl het toestel in bedrijf is. De bedieningslessenaar bevindt zich buiten deze bestralingsruimte, achter een betonnen muur voorzien van een loodglasvenster en een met lood beklede houten deur.

Ter plaatse van de muur A-B (zie figuur 1) beslaat de bundelvlek een oppervlakte van 2×10^3 cm^2, met het punt P als centrum. Daarvandaan wordt straling terug verstrooid in de richting van de nevenruimte, waar de bedieningslessenaar staat. Neem aan dat voor die richting de verstrooihoek 180° bedraagt.

Gegeven

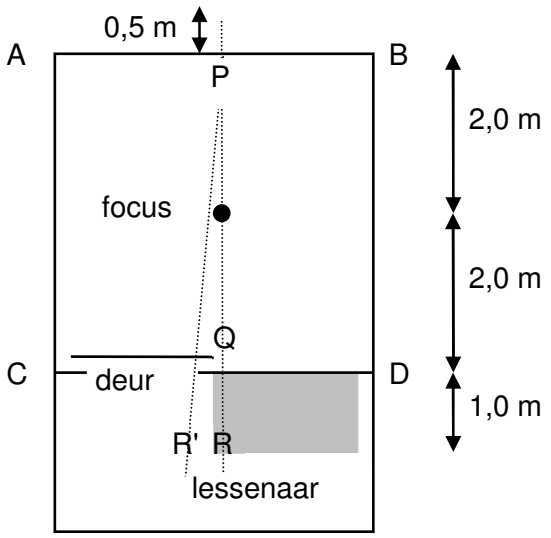
- een situatieschets van de bestralingsruimte (zie figuur 1)
- opbrengst van het röntgentoestel en transmissie van de opgewekte straling door lood (zie Appendix, figuur 42)
- de (constante) buisspanning is 100 kV
- de workload van het toestel is $12{,}5\cdot10^3$ mA·min per week, gedurende 50 weken per jaar
- de bundelfiltratie is 2 mm Al
- de transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton (zie figuur 2)
- verstrooiingsfactoren voor beton (zie Appendix, figuur 44)
- de effectieve energie van de onder 180° verstrooide straling is vergelijkbaar met die van een röntgenspectrum opgewekt bij een spanning van 70 à 75 kV; hiervoor mogen de transmissiegrafieken behorende bij deze buisspanningen worden gebruikt

Vragen

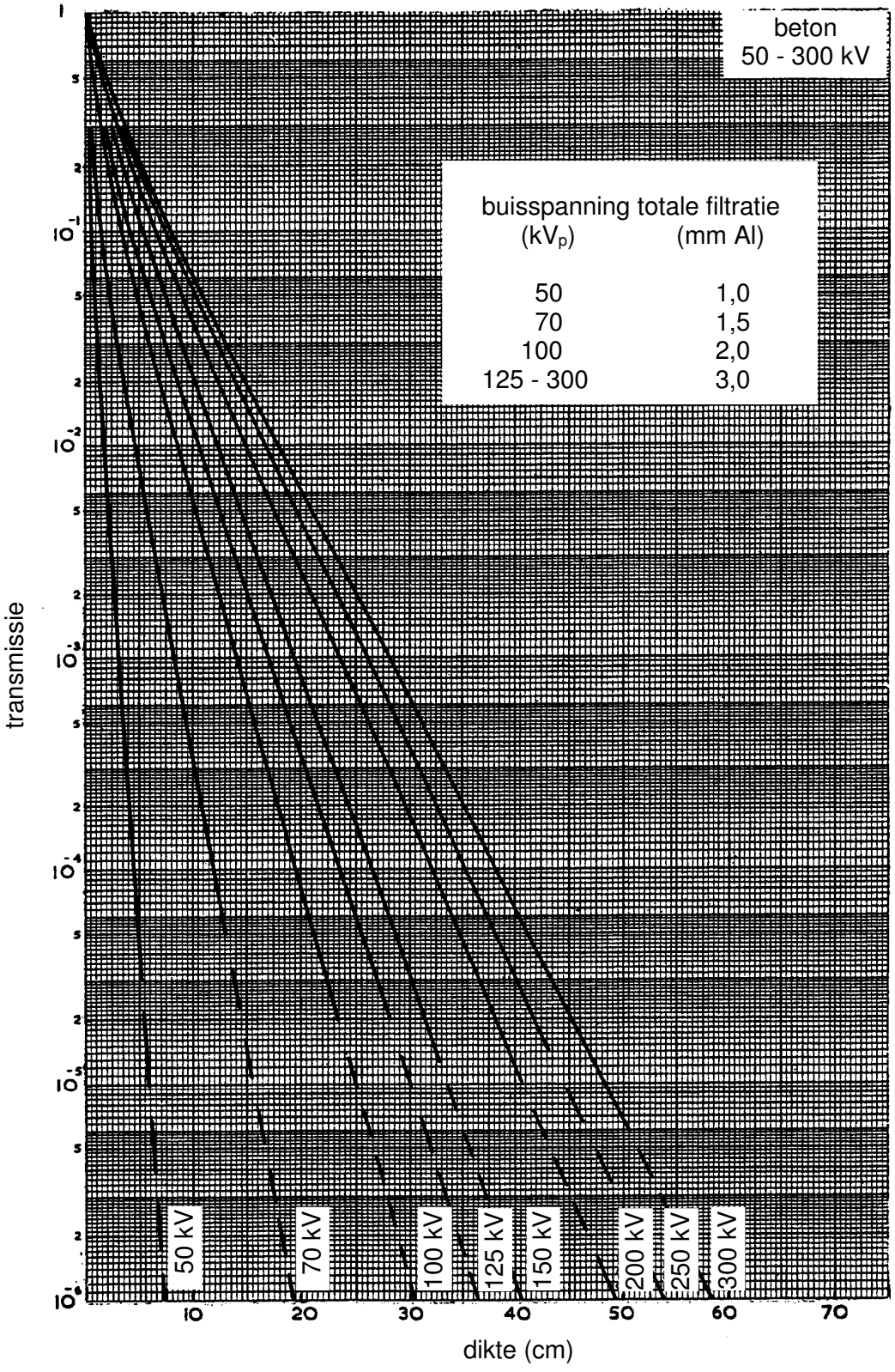
1 Bereken de benodigde dikte van de muur waarop de horizontale bundel is gericht (A-B in figuur 1). Neem hiervoor aan dat de bundel gedurende de volle bedrijfstijd op deze muur is gericht en dat eenzelfde persoon zich gedurende die tijd achter de muur ophoudt op 0,5 m afstand van het punt P waar de bundel-as de muur A-B treft.

2 Bereken de benodigde dikte van de muur waarachter de bedieningslessenaar komt te staan (C-D in figuur 1). Neem hiervoor aan dat eenzelfde persoon gedurende de volle bedrijfstijd verblijft op de positie R, op 1 m van het punt Q waar de as van de verstrooide bundel de betonmuur snijdt. Ga uit van dezelfde veronderstelling als in vraag 1 met betrekking tot de richting van de primaire bundel.

3 Bereken de benodigde dikte van het laagje lood op de deur. De verzwakking van de straling door het hout mag worden verwaarloosd. Ga voor de positie R' uit van dezelfde aanname als voor positie R in vraag 2.



Figuur 1. Plattegrond van de ruimte met het röntgentoestel.



Figuur 2. Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton.

40 Afscherming van een neutronengenerator (2000-2-4)

Een researchinstituut wil een neutronengenerator aanschaffen. Een stralingsbeschermingsdeskundige wordt gevraagd de afscherming te berekenen. De generator bestaat uit een versneller die deuteronen (d) versnelt naar een trefplaat met tritium (T). De neutronen worden geproduceerd volgens de kernreactie:

$$d + T \rightarrow {}^{4}He + n$$

De geproduceerde neutronen worden isotroop uitgezonden en hebben een energie van 14 MeV. De plaats waar de neutronen gegenereerd worden is zo klein, dat de trefplaat als een puntbron van neutronen mag worden opgevat. Het aantal gegenereerde neutronen bedraagt $1{\cdot}10^{11}$ s^{-1}.

De generator wordt geplaatst in een bunker met 25 cm dikke wanden van beton. De bunker wordt aan de buitenkant voorzien van een aarden wal. Ook het dak van de bunker wordt bedekt met een laag aarde.

Gegeven

- een horizontale doorsnede door de bunker (zie figuur 1)
- omgevingsdosisequivalent voor mono-energetische neutronen (zie tabel 1)
- de transmissie van neutronen met een energie van 14 MeV door beton is:

$$T_{\text{beton}} = 6{,}6\ \mathrm{e}^{-d/13} \quad (d \text{ in cm})$$

- de transmissie van neutronen met een energie van 14 MeV door aarde kan op dezelfde wijze worden beschreven als die door beton, met dien verstande dat de transmissie door d cm beton hetzelfde is als door $2d$ cm aarde

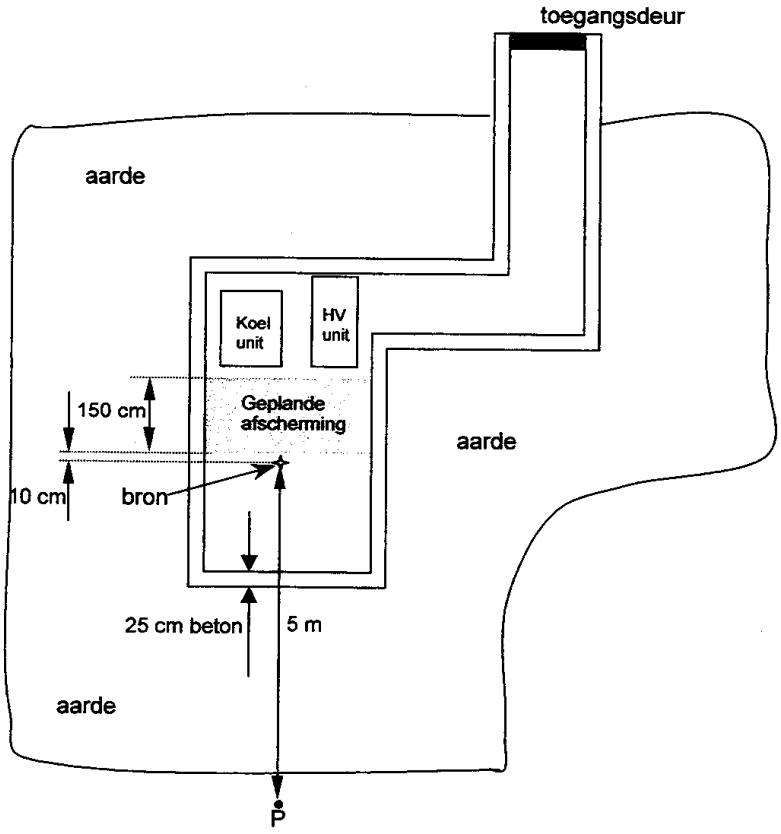
Vragen

1 Bereken het fluentietempo in punt P op 5 m afstand van de trefplaat (zie figuur 1) bij een niet afgeschermde generator.

2 Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo (in μSv·h^{-1}) in punt P op 5 m afstand van de trefplaat bij een niet afgeschermde generator.

3 Hoe dik moet de aarden wal zijn opdat het omgevingsdosisequivalenttempo in punt P op 5 m afstand van de trefplaat niet groter is dan 1 μSv·h^{-1}. Ga uit van alleen de bijdrage van de directe straling (dus geen *sky shine*). Neem verder aan dat achter de afscherming de meest bepalende neutronenenergie nog steeds 14 MeV bedraagt.

4 In de bunker moeten werkzaamheden worden verricht aan de hoogspannings- en koelunit. Er zijn betonnen klinkers beschikbaar waarmee op 10 cm vanaf de bron een wand ter dikte van 150 cm kan worden geconstrueerd, die nog net voldoende ruimte overlaat om achter de afscherming de werkzaamheden uit te voeren. Als eis wordt gesteld dat het omgevingsdosisequivalenttempo direct achter de afscherming niet meer dan 10 μSv·h^{-1} mag bedragen. Ga na of de betonnen wand aan die eis voldoet.



Figuur 1. Horizontale doorsnede van de bunker met labyrint.

Tabel 1. Operationele grootheden per eenheid van neutronenfluentie uitgedrukt in pSv·cm^2 voor mono-energetische neutronen.

Energy (MeV)	$H^*(10)/\Phi$	$H_{p,slab}(10,0°)/\Phi$	$H_{p,slab}(10,15°)/\Phi$	$H_{p,slab}(10,30°)/\Phi$	$H_{p,slab}(10,45°)/\Phi$	$H_{p,slab}(10,60°)/\Phi$	$H_{p,slab}(10,75°)/\Phi$
1.00×10^{-9}	6.60	8.19	7.64	6.57	4.23	2.61	1.13
1.00×10^{-8}	9.00	9.97	9.35	7.90	5.38	3.37	1.50
2.53×10^{-8}	10.6	11.4	10.6	9.11	6.61	4.04	1.73
1.00×10^{-7}	12.9	12.6	11.7	10.3	7.84	4.70	1.94
2.00×10^{-7}	13.5	13.5	12.6	11.1	8.73	5.21	2.12
5.00×10^{-7}	13.6	14.2	13.5	11.8	9.40	5.65	2.31
1.00×10^{-6}	13.3	14.4	13.9	12.0	9.56	5.82	2.40
2.00×10^{-6}	12.9	14.3	14.0	11.9	9.49	5.85	2.46
5.00×10^{-6}	12.0	13.8	13.9	11.5	9.11	5.71	2.48
1.00×10^{-5}	11.3	13.2	13.4	11.0	8.65	5.47	2.44
2.00×10^{-5}	10.6	12.4	12.6	10.4	8.10	5.14	2.35
5.00×10^{-5}	9.90	11.2	11.2	9.42	7.32	4.57	2.16
1.00×10^{-4}	9.40	10.3	9.85	8.64	6.74	4.10	1.99
2.00×10^{-4}	8.90	9.84	9.41	8.22	6.21	3.91	1.83
5.00×10^{-4}	8.30	9.34	8.66	7.66	5.67	3.58	1.68
1.00×10^{-3}	7.90	8.78	8.20	7.29	5.43	3.46	1.66
2.00×10^{-3}	7.70	8.72	8.22	7.27	5.43	3.46	1.67
5.00×10^{-3}	8.00	9.36	8.79	7.46	5.71	3.59	1.69
1.00×10^{-2}	10.5	11.2	10.8	9.18	7.09	4.32	1.77
2.00×10^{-2}	16.6	17.1	17.0	14.6	11.6	6.64	2.11
3.00×10^{-2}	23.7	24.9	24.1	21.3	16.7	9.81	2.85
5.00×10^{-2}	41.1	39.0	36.0	34.4	27.5	16.7	4.78
7.00×10^{-2}	60.0	59.0	55.8	52.6	42.9	27.3	8.10
1.00×10^{-1}	88.0	90.6	87.8	81.3	67.1	44.6	13.7
1.50×10^{-1}	132	139	137	126	106	73.3	24.2
2.00×10^{-1}	170	180	179	166	141	100	35.5
3.00×10^{-1}	233	246	244	232	201	149	58.5
5.00×10^{-1}	322	335	330	326	291	226	102
7.00×10^{-1}	375	386	379	382	348	279	139
9.00×10^{-1}	400	414	407	415	383	317	171
1.00×10^{0}	416	422	416	426	395	332	180
1.20×10^{0}	425	433	427	440	412	355	210
2.00×10^{0}	420	442	438	457	439	402	274
3.00×10^{0}	412	431	429	449	440	412	306
4.00×10^{0}	408	422	421	440	435	409	320
5.00×10^{0}	405	420	418	437	435	409	331
6.00×10^{0}	400	423	422	440	439	414	345
7.00×10^{0}	405	432	432	449	448	425	361
8.00×10^{0}	409	445	445	462	460	440	379
9.00×10^{0}	420	461	462	478	476	458	399
1.00×10^{1}	440	480	481	497	493	480	421
1.20×10^{1}	480	517	519	536	529	523	464
1.40×10^{1}	520	550	552	570	561	562	503
1.50×10^{1}	540	564	565	584	575	579	520
1.60×10^{1}	555	576	577	597	588	593	535
1.80×10^{1}	570	595	593	617	609	615	561
2.00×10^{1}	600	600	595	619	615	619	570
3.00×10^{1}	515	na[a]	na	na	na	na	na[a]
5.00×10^{1}	400	na	na	na	na	na	na
7.50×10^{1}	330	na	na	na	na	na	na
1.00×10^{2}	285	na	na	na	na	na	na
1.25×10^{2}	260	na	na	na	na	na	na
1.50×10^{2}	245	na	na	na	na	na	na
1.75×10^{2}	250	na	na	na	na	na	na
2.01×10^{2}	260	na	na	na	na	na	na

[a]Not available.

(ICRP-74)

Uitwerkingen

Vraagstuk 21

1 aflezen bij K_{lucht} = 1 µGy·h^{-1} in Appendix, figuur 27:
- 60 keV: $\varphi_{60\ keV}$ = 1,0·10^{7} m^{-2}·s^{-1} = 1,0·10^{3} cm^{-2}·s^{-1}
  als $\varphi_{60\ keV}$ = 1 cm^{-2}·s^{-1} dan is
  K_{lucht} = 1 µGy·h^{-1} / 1,0·10^{3} = 1,0·10^{-3} µGy·h^{-1}
- 511 keV: $\varphi_{511\ keV}$ = 1,2·10^{6} m^{-2}·s^{-1} = 1,2·10^{2} cm^{-2}·s^{-1}
  als $\varphi_{511\ keV}$ = 1 cm^{-2}·s^{-1} dan is
  K_{lucht} = 1 µGy·h^{-1} / 1,2·10^{2} = 8,3·10^{-3} µGy·h^{-1}

2 1 foton cm^{-2}·s^{-1} van elk
K_{lucht} = 1,0·10^{-3} µGy·h^{-1} + 8,3·10^{-3} µGy·h^{-1} = 9,3·10^{-3} µGy·h^{-1}
als K_{lucht} = 10 µGy·h^{-1} dan is
φ = (10 µGy·h^{-1} / 9,3·10^{-3} µGy·h^{-1}) × 1 cm^{-2}·s^{-1} = 1075 cm^{-2}·s^{-1}
teltempo = fluentietempo × oppervlak × (1 - transmissie)
massieke dikte detector $d \times \rho$ = 1·10^{-1} cm × 3,67 g·cm^{-3} = 0,367 g·cm^{-2}
oppervlak detector 10 cm^2
- 60 keV: transmissie = $e^{-(\mu/\rho)(d\times\rho)} = e^{-6,62\times0,367}$ = 0,088
  teltempo = 1075 cm^{-2}·s^{-1} × 10 cm^2 × (1 - 0,088) = 9804 tps
- 511 keV: transmissie = $e^{-(\mu/\rho)(d\times\rho)} = e^{-0,0941\times0,367}$ = 0,966
  teltempo = 1075 cm^{-2}·s^{-1} × 10 cm^2 × (1 - 0,966) = 366 tps
- totaal: 9804 tps + 366 tps = 10 170 tps

3 H* = φ × (K / φ) × (H* / K)
invullen van K / φ (zie vraag 1) en H* / K (zie Appendix, figuur 28) levert:
- 60 keV: K / φ = 1,0·10^{-3} µGy·h^{-1} per (foton cm^{-2}·s^{-1}); H* / K = 1,75 Sv·Gy^{-1}
  $H^*(10)$ = 1075 cm^{-2}·s^{-1} × 1,0·10^{-3} µGy·h^{-1} per cm^{-2}·s^{-1} × 1,75 Sv·Gy^{-1}
  = 2 µSv·h^{-1}
- 511 keV: K / φ = 8,3·10^{-3} µGy·h^{-1} per (foton cm^{-2}·s^{-1}); H* / K = 1,21 Sv·Gy^{-1}
  $H^*(10)$ = 1075 cm^{-2}·s^{-1} × 8,3·10^{-3} µGy·h^{-1} per cm^{-2}·s^{-1} × 1,21 Sv·Gy^{-1}
  = 11 µSv·h^{-1}
- totaal: $H^*(10)$ = 2 µSv·h^{-1} + 11 µSv·h^{-1} = 13 µSv·h^{-1}

Vraagstuk 22

1 $E_{\beta,max}(^{42}K)$ = 3521 keV = 3,5 MeV
aflezen Appendix, figuur 25 R(3,5 MeV) = 1750 mg·cm^{-2}
= 1,75 g cm^{-2} < wanddikte ionisatiekamer

2 massa lucht in ionisatiekamer 100 cm^3 × 1,205·10^{-3} g·cm^{-3} = 1,205·10^{-1} g = 1,205·10^{-4} kg
X = lading / massa 94,6·10^{-12} C / 1,205·10^{-4} kg = 7,85·10^{-7} C·kg^{-1}
D = 33,7 Gy per C·kg^{-1} × 7,85·10^{-7} C·kg^{-1} = 2,65·10^{-5} Gy = 26,5 µGy
dD/dt = 26,5 µGy / 6 min = 4,42 µGy·min^{-1} = 265 µGy·h^{-1}
afkomstig van γ-straling van ^{42}K en ^{51}Cr

3 GM-telbuis f_{geom} = 1 cm^2 / [4π × (50 cm)^2] = 3,2·10^{-5}
$T_\beta = A(^{42}K) \times f_\beta \times f_{geom} \times f_{det}$
$= A(^{42}K) \times 1 \times 3,2\cdot10^{-5} \times 1 = 3,2\cdot10^{-5}\ A(^{42}K)$
gemeten T_β = 3,53·10^6 tpm = 5,9·10^4 tps
activiteit $A(^{42}K)$ = 5,9·10^4 tps / 3,2·10^{-5} = 1,8·10^9 Bq = 1,8·10^3 MBq

4 bijdrage van ^{42}K tot kermatempo:
0,032 µGy·m^2·MBq^{-1}·h^{-1} × 1,8·10^3 MBq / (50·10^{-2} m)^2 = 230 µGy·h^{-1}
bijdrage van ^{51}Cr tot kermatempo:
265 µGy·h^{-1} - 230 µGy·h^{-1} = 35 µGy·h^{-1}
activiteit $A(^{51}Cr)$ = 35 µGy·h^{-1} × (50·10^{-2} m)^2 / 0,0042 µGy·m^2·MBq^{-1}·h^{-1} = 2,1·10^3 MBq

5 volgens Appendix , figuur 6 is $h_{huid} = 7{\cdot}10^{-10}$ Sv·s^{-1}·Bq^{-1}·cm^2
geometriefactor GM-telbuis is $f_{geom} = 3{,}2{\cdot}10^{-5}$ (zie vraag 3)
$H_{huid} = h_{huid} \times f_{geom} \times A(^{42}\text{K})$
$= 7{\cdot}10^{-10}$ Sv·s^{-1}·Bq^{-1}·cm^2 × $3{,}2{\cdot}10^{-5}$ per cm^2 × $1{,}8{\cdot}10^{9}$ Bq = $4{,}0{\cdot}10^{-5}$ Sv·s^{-1} = 0,14 Sv·h^{-1}

6 opstelling alzijdig afschermen met tenminste R(3,5 MeV) = 1,75 g·cm^{-2} kunststof (bijvoorbeeld 1,5 cm perspex)

Vraagstuk 23

1 15 cm vanaf het oppervlak is 15 cm + (30 cm / 2) = 30 cm = 0,3 m vanaf het centrum
1 doos bevat 27 kg × 150 Bq·kg^{-1} = 4 050 Bq = $4{,}05{\cdot}10^{-3}$ MBq
effectieve soortelijke massa vlees is ρ = 27 kg × 10^3 g·kg^{-1} / (30 cm)^3 = 1,0 g·cm^{-3}
$dK_1/dt = B\, e^{-(\mu/\rho)(d\times\rho)} \times (k\,A / r^2)$
$= (1 + 0,\ 2 \times 15) \times e^{-0{,}085\times(15\times1{,}0)} \times 0{,}077$ µGy·m^2·MBq^{-1}·h^{-1} × $4{,}05{\cdot}10^{-3}$ MBq / (0,3 m)^2
$= 3{,}9{\cdot}10^{-3}$ µGy·h^{-1}

2 15 cm vanaf het oppervlak is 15 cm + 30 cm + (30 cm / 2) = 60 cm = 0,6 m vanaf het centrum van de tweede doos
dK_2/dt
$= (1 + 0{,}2 \times 45) \times e^{-0{,}085\times(45\times1)} \times 0{,}077$ µGy·m^2·MBq^{-1}·h^{-1} × $4{,}05{\cdot}10^{-3}$ MBq / (0,6 m)^2
$= 1{,}9{\cdot}10^{-4}$ µGy·h^{-1}

3 uitgezonden energie = $f_\gamma \times E_\gamma$
$= (0{,}946 \times 0{,}898) \times 662$ keV per Bq·s = 563 keV per Bq·s
uitgezonden energie per kg vlees = 150 Bq·kg^{-1} × 563 keV per Bq·s × $1{,}6{\cdot}10^{-16}$ J·keV^{-1}
$= 1{,}35{\cdot}10^{-11}$ J·kg^{-1} per s = $1{,}35{\cdot}10^{-11}$ Gy·s^{-1}
$dK_\gamma/dt = 0{,}5 \times 1{,}35{\cdot}10^{-11}$ Gy·s^{-1} = $6{,}8{\cdot}10^{-12}$ Gy·s^{-1} = $2{,}4{\cdot}10^{-2}$ µGy·h^{-1} = 24 nGy·h^{-1}

Vraagstuk 24

1 aflezen figuur 1 bij 60 keV
TLD($CaSO_4$) / K_a = 12 000 sd·R^{-1} = 1200 sd·mGy^{-1}
TLD($CaSO_4$) = 1200 sd·mGy^{-1} × 1 mGy = 1200 sd
TLD($Li_2B_4O_7$) / K_a = 900 sd·R^{-1} = 90 sd·mGy^{-1}
TLD($Li_2B_4O_7$) = 90 sd·mGy^{-1} × 1 mGy = 90 sd

2 aflezen bij bij E = 60 keV in Appendix, figuur 28
$H_p(10) / K_a$ = 1,9 mSv·mGy^{-1}
$H_p(10)$ = 1,9 mSv·mGy^{-1} × 1 mGy = 1,9 mSv

3 persoon P
verhouding TLD($CaSO_4$) / TLD($Li_2B_4O_7$) = 85 sd / 85 sd = 1
aflezen figuur 1 E_γ > 1 MeV
TLD($Li_2B_4O_7$) / K_a = 1000 sd·R^{-1} = 100 sd·mGy^{-1}
aflezen bij E > 1 MeV in Appendix, figuur 28
$H_p(10) / K \approx 1{,}1$ Sv·Gy^{-1}
$H_p(10) \approx$ (85 sd / 100 sd·mGy^{-1}) × 1,1 Sv·Gy^{-1} = 0,94 mSv

persoon Q
verhouding TLD($CaSO_4$) / TLD($Li_2B_4O_7$) = 315 sd / 35 sd = 9
aflezen figuur 1 $E_\gamma \approx$ 85 keV
TLD($CaSO_4$) / K_a = 8500 sd·R^{-1} = 850 sd·mGy^{-1}
TLD($Li_2B_4O_7$) / K_a = 950 sd·R^{-1} = 95 sd·mGy^{-1}
aflezen bij E = 85 keV in Appendix, figuur 28
$H_p(10) / K_a$ = 1,85 Sv·Gy^{-1}
$H_p(10)$ = (315 sd / 850 sd) × 1,85 Sv·Gy^{-1} = 0,69 mSv voor $CaSO_4$
= (35 sd / 95 sd) × 1,85 Sv·Gy^{-1} = 0,68 mSv voor $Li_2B_4O_7$

Vraagstuk 25

1 $E_{\beta,max}(^{32}P)$ = 1710 keV = 1,7 MeV
aflezen Appendix, figuur 25 R(1,7 MeV) = 800 mg·cm^{-2} = 0,8 g·cm^{-2}
dracht in lucht 0,8 g·cm^{-2} / 1,205·10^{-3} g·cm^{-3} = 660 cm
dracht in water 0,8 g·cm^{-2} / 1,0 g·cm^{-3} = 0,8 cm

2
20 cm	4,67 µGy·min^{-1} × (10 cm / 20 cm)^2 = 1,17 µGy·min^{-1}	gemeten = 1,25 µGy·min^{-1}
30 cm	4,67 µGy min^{-1} × (10 cm / 30 cm)^2 = 0,52 µGy·min^{-1}	gemeten = 0,58 µGy·min^{-1}
40 cm	4,67 µGy·min^{-1} × (10 cm / 40 cm)^2 = 0,29 µGy·min^{-1}	gemeten = 0,25 µGy·min^{-1}
50 cm	4,67 µGy min^{-1} × (10 cm / 50 cm)^2 = 0,19 µGy·min^{-1}	gemeten = 0,17 µGy·min^{-1}
60 cm	4,67 µGy·min^{-1} × (10 cm / 60 cm)^2 = 0,13 µGy·min^{-1}	gemeten = 0,13 µGy·min^{-1}

verzwakking speelt kennelijk geen rol gezien de goede overeenstemming met de kwadratenwet

3 de helft van de uitgezonden β-deeltjes gaat naar de huid, dus
$\varphi = 1{\cdot}10^6$ Bq·cm^{-2} / 2 = 5·10^5 cm^{-2}·s^{-1}
dD_{huid}/dt = 1,602·10^{-10} Gy·per·MeV·g^{-1} × 5·10^5 cm^{-2}·s^{-1} × 2 MeV·cm^2·g^{-1}
= 1,6·10^{-4} Gy·s^{-1} = 0,58 Gy·h^{-1}
voor β-deeltjes is w_R = 1 Sv·Gy^{-1}
$dH_{huid}/dt = w_R \times dD_{huid}/dt$ = 1 Sv·Gy^{-1} × 0,58 Gy·h^{-1} = 0,58 Sv·h^{-1} = 580 mSv·h^{-1}
$dH_{huid}/dt = h_{huid} \times A(^{32}P)$
volgens figuur 3 van de Appendix is h_{huid} = 6·10^{-10} Sv·s^{-1}·Bq^{-1}·cm^2
hieruit volgt dH_{huid}/dt = 6·10^{-10} Sv·s^{-1} Bq^{-1}·cm^2 × 1·10^6 Bq·cm^{-2}
= 6,0·10^{-4} Sv·s^{-1} = 2,16 Sv·h^{-1} = 2160 mSv·h^{-1}

4 uitgaande van formule voor D_{huid} 500 mSv / 580 Sv·h^{-1} = 0,86 h = 52 min
uitgaande van h_{huid} 500 mSv / 2160 Sv·h^{-1} = 0,23 h = 14 min

het verschil tussen de resultaten van beide benaderingswijzen is toe te schrijven aan het feit dat de dikte van de huidlaag waarin de β-energie wordt gedeponeerd, gedefinieerd is in de richting loodrecht op deze laag, terwijl de β-deeltjes isotroop worden uitgezonden en merendeels schuin door de huid gaan

voor β-deeltjes die onder een hoek α met de normaal worden uitgezonden, is de effectieve laagdikte evenredig met cos(α) en de bijdrage tot de dosis dus evenredig met cos^{-1}(α)

het aantal β-deeltjes dat tussen de hoeken α en α+dα met de normaal wordt uitgezonden, is 2π sin(α) dα (dit is analoog aan de berekening van de formule voor de geometriefactor; de dosis volgt nu door integreren over α tussen de grenzen 0 en α_{max} en normeren door de volledige ruimtehoek 4π:

$$\int_0^{\alpha_{max}} \cos^{-1}(\alpha)\, 2\pi \sin(\alpha)\, d\alpha / 4\pi = -0{,}5 \times \int_{\cos(0)}^{\cos(\alpha_{max})} \cos^{-1}(\alpha)\, d\cos(\alpha)$$

$\rightarrow$ *integraal = -0,5 × ln[cos(α_{max})]*

de halveringsdikte is $d_{½} \approx 0{,}1\, R_{\beta,max} \approx 0{,}1 \times 0{,}5\, E_{\beta,max} = 0{,}05\, E_{\beta,max}$ cm
stel dat de huiddiepte d niet wordt bereikt als $d > d_{½} \times \cos(\alpha) / \ln(2)$
$\rightarrow$ *$\cos(\alpha_{max}) = d \times \ln(2) / d_{½}$*
$\rightarrow$ *integraal = 0,5 × ln(0,072 $E_{\beta,max}$ / d)*

neem $E_{\beta,max}(^{32}P)$ = 1,710 MeV en d = 0,07 mm = 0,007 cm (ondiepe dosis)
$\rightarrow$ *integraal = 0,5 × ln(0,072 × 1,710 / 0,007) = 0,5×2,9 = 1,45 (= effectieve ruimtehoek)*

uitgaande van 1 Bq·cm^{-2} wordt daarmee
$h_{huid} = w_R \times 1{,}602{\times}10^{-10}$ Gy per MeV·g^{-1} × fluentietempo × S/ρ × integraal
= 1,602·10^{-10} Sv per MeV·g^{-1} × 1 cm^{-2}·s^{-1} × 2 MeV per g·cm^{-2} × 1,45
= 4,6·10^{-10} Sv·s^{-1} per Bq·cm^{-2}

Vraagstuk 26

1 $H^*(10) = h\,A\,t\,/\,r^2$
zonder afscherming:
$H^*(10)$
$= 0{,}0012\ \mathrm{Sv{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1}} \times 20{\cdot}10^3\ \mathrm{MBq} \times (45\ \mathrm{min} / 60\ \mathrm{min{\cdot}h^{-1}}) / (0{,}5\ \mathrm{m})^2$
$= 72\ \mu\mathrm{Sv}$
met afscherming:
$H^*(10) = 5{\cdot}10^{-2} \times 72\ \mu\mathrm{Sv} = 3{,}6\ \mu\mathrm{Sv}$

2 ga uit van AP-geometrie (van voren naar achteren) omdat dit de meest waarschijnlijke geometrie is en bovendien de grootste conversiefactor levert
aflezen bij $E_\gamma = 84\ \mathrm{keV} = 8{,}4{\cdot}10^{-2}\ \mathrm{MeV}$ in Appendix, figuur 29
$E(\mathrm{AP}) / H^*(10) = 0{,}85$
effectieve dosis
$E = 0{,}85 \times 3{,}6\ \mu\mathrm{Sv} = 3{,}1\ \mu\mathrm{Sv}$

3 $H_{\mathrm{huid}} = h_{\mathrm{huid}} \times A(^{170}\mathrm{Tm}) \times t$
$= 5{\cdot}10^{-10}\ \mathrm{Sv{\cdot}s^{-1}{\cdot}Bq^{-1}{\cdot}cm^2} \times 26{\cdot}10^3\ \mathrm{Bq{\cdot}cm^{-2}} \times 8\ \mathrm{h} \times 3600\ \mathrm{s{\cdot}h^{-1}} = 0{,}37\ \mathrm{Sv}$

4 er ging heel veel mis
- bron werd niet in container geplaatst nadat radiogram was gemaakt
- besmetting in hal werd op ondeugdelijke manier schoongemaakt
- tijdens opruimingsactie werden andere werkzaamheden niet stilgelegd
- verantwoordelijk deskundige werd niet onmiddellijk gewaarschuwd

Vraagstuk 27

1 $E_{\beta,\max} = 1390\ \mathrm{keV} = 1{,}39\ \mathrm{MeV}$
aflezen Appendix, figuur 25 $R(1{,}39\ \mathrm{MeV}) = 620\ \mathrm{mg{\cdot}cm^{-2}} = 6{,}2\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-2}}$
minimale dikte $6{,}2\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-2}} / 2{,}7{\cdot}10^3\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}} = 2{,}3{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m} = 2{,}3\ \mathrm{mm\ aluminium}$

2 $\mathrm{d}K/\mathrm{d}t = \varphi \times (\mu_{\mathrm{en}}/\rho) \times E_\gamma$
$\varphi = 0{,}999 \times 37{\cdot}10^9\ \mathrm{Bq} / [4\pi \times (1\ \mathrm{m})^2] = 2{,}94{\cdot}10^9\ \mathrm{m^{-2}{\cdot}s^{-1}}$
$\mu_{\mathrm{tr}}/\rho = 3{,}16{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m^{-1}} / 1{,}205\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}} = 2{,}62{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m^2{\cdot}kg^{-1}}$
$E_\gamma = 1{,}37\ \mathrm{MeV} \times 1{,}6{\cdot}10^{-13}\ \mathrm{J{\cdot}MeV^{-1}} = 2{,}19{\cdot}10^{-13}\ \mathrm{J}$
$\mathrm{d}K(1{,}37\ \mathrm{MeV})/\mathrm{d}t = 2{,}94{\cdot}10^9\ \mathrm{m^{-2}{\cdot}s^{-1}} \times 2{,}62{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m^2{\cdot}kg^{-1}} \times 2{,}19{\cdot}10^{-13}\ \mathrm{J}$
$= 1{,}69{\cdot}10^{-6}\ \mathrm{J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}s^{-1}} = 1{,}69\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}s^{-1}}$ op 1 meter

3 $\mathrm{d}K/\mathrm{d}t = \varphi \times (\mu_{\mathrm{en}}/\rho) \times E_\gamma$
$\varphi = 0{,}999 \times 37{\cdot}10^9\ \mathrm{Bq} / [4\pi \times (1\ \mathrm{m})^2] = 2{,}94{\cdot}10^9\ \mathrm{m^{-2}{\cdot}s^{-1}}$
$\mu_{\mathrm{tr}}/\rho = 2{,}57{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m^{-1}} / 1{,}205\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}} = 2{,}13{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m^2{\cdot}kg^{-1}}$
$E_\gamma = 2{,}75\ \mathrm{MeV} \times 1{,}6{\cdot}10^{-13}\ \mathrm{J{\cdot}MeV^{-1}} = 4{,}40{\cdot}10^{-13}\ \mathrm{J}$
$\mathrm{d}K(2{,}75\ \mathrm{MeV})/\mathrm{d}t = 2{,}94{\cdot}10^9\ \mathrm{m^{-2}{\cdot}s^{-1}} \times 2{,}13{\cdot}10^{-3}\ \mathrm{m^2{\cdot}kg^{-1}} \times 4{,}40{\cdot}10^{-13}\ \mathrm{J}$
$= 2{,}76{\cdot}10^{-6}\ \mathrm{J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}s^{-1}} = 2{,}76\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}s^{-1}}$ op 1 meter

4 in beide richtingen lineair interpoleren in Appendix, figuur 30:
1,37 MeV $\mu \times d = 6{,}1\ \mathrm{m^{-1}} \times 2{,}0\ \mathrm{m} = 12{,}2$
$B(12{,}2) = 29{,}3$
verzwakking $= B\,\mathrm{e}^{-\mu d} = 29{,}3\ \mathrm{e}^{-12{,}2} = 1{,}5{\cdot}10^{-4}$
2,75 MeV $\mu \times d = 4{,}3\ \mathrm{m^{-1}} \times 2{,}0\ \mathrm{m} = 8{,}6$
$B(8{,}6) = 8{,}3$
verzwakking $= B\,\mathrm{e}^{-\mu d} = 8{,}3\ \mathrm{e}^{-8{,}6} = 1{,}5{\cdot}10^{-3}$
verwaarloos verzwakking door lucht
totale afstand tot bron is 2 m water + 1 m lucht = 3 m
$\mathrm{d}K/\mathrm{d}t = 1{,}5{\cdot}10^{-4} \times \mathrm{d}K(1{,}37\ \mathrm{MeV})/\mathrm{d}t + 1{,}5{\cdot}10^{-3} \times \mathrm{d}K(2{,}75\ \mathrm{MeV})/\mathrm{d}t$
$= 1{,}5{\cdot}10^{-4} \times 1{,}69\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}s^{-1}} / (3\ \mathrm{m})^2 + 1{,}5{\cdot}10^{-3} \times 2{,}76\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}s^{-1}} / (3\ \mathrm{m})^2$
$= 2{,}8{\cdot}10^{-5}\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}s^{-1}} + 4{,}6{\cdot}10^{-4}\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}s^{-1}}$
$= 4{,}9{\cdot}10^{-4}\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}s^{-1}} = 1{,}8\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}}$

Vraagstuk 28

1 kermatempo = $40{\cdot}10^{-2} \times A \times k(^{51}\mathrm{Cr}) + 60{\cdot}10^{-2} \times A \times k(^{60}\mathrm{Co})$
= $(40{\cdot}10^{-2} \times 0{,}0042\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1}} + 60{\cdot}10^{-2} \times 0{,}31\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1}}) \times A$
= $0{,}188\ A\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}}$ per MBq op 1 meter
gemeten $\mathrm{d}K/\mathrm{d}t = 50\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}} = 5{,}0{\cdot}10^4\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}}$
activiteit $A = 5{,}0{\cdot}10^4\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}} / 0{,}188\ \mu\mathrm{Gy\ h^{-1}} = 2{,}66{\cdot}10^5\ \mathrm{MBq} = 266\ \mathrm{GBq}$

2 in beide richtingen lineair interpoleren in Appendix, figuur 30:
0,32 MeV $\mu \times d = 0{,}1164\ \mathrm{cm^2{\cdot}g^{-1}} \times 1\ \mathrm{g{\cdot}cm^{-3}} \times 160\ \mathrm{cm} = 18{,}6$
$B(18{,}6) = 684$
verzwakking = $B\ \mathrm{e}^{-\mu d} = 684\ \mathrm{e}^{-18{,}6} = 5{,}7{\cdot}10^{-6}$
1,33 MeV $\mu \times d = 0{,}062\ \mathrm{cm^2{\cdot}g^{-1}} \times 1\ \mathrm{g{\cdot}cm^{-3}} \times 160\ \mathrm{cm} = 9{,}9$
$B(9{,}9) = 22{,}0$
verzwakking = $B\ \mathrm{e}^{-\mu d} = 22{,}0\ \mathrm{e}^{-9{,}9} = 1{,}1{\cdot}10^{-3}$
kermatempo op 160 cm = 1,6 m boven wateroppervlak:
$\mathrm{d}K_{0{,}32\ \mathrm{MeV}}/\mathrm{d}t$
= $40{\cdot}10^{-2} \times 0{,}0042\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1}} \times 2{,}66{\cdot}10^5\ \mathrm{MBq} \times 5{,}7{\cdot}10^{-6} / (1{,}6\ \mathrm{m})^2$
= $1{,}0{\times}10^{-3}\ \mu\mathrm{Gy\ h^{-1}}$
$\mathrm{d}K_{1{,}33\ \mathrm{MeV}}/\mathrm{d}t$
= $60{\cdot}10^{-2} \times 0{,}31\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1}} \times 2{,}66{\cdot}10^5\ \mathrm{MBq} \times 1{,}1{\cdot}10^{-3} / (1{,}6\ \mathrm{m})^2$
= $21\ \mu\mathrm{Gy\ h^{-1}}$
$\mathrm{d}K/\mathrm{d}t = \mathrm{d}K_{0{,}32\ \mathrm{MeV}}/\mathrm{d}t + \mathrm{d}K_{1{,}33\ \mathrm{MeV}}/\mathrm{d}t = 1{,}0{\cdot}10^{-3}\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}} + 21\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}} = 21\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}}$
voldaan aan de eis

3 transporteis (1) $k\,A\,T / d^2 < 2\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}}$
$d = \sqrt{(k\,A\,T / 2\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}})}$
transporteis (2) $k\,A\,T / (d + 100\ \mathrm{cm})^2 < 0{,}1\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}}$
$d + 100\ \mathrm{cm} = \sqrt{(k\,A\,T / 0{,}1\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}})}$
de twee vergelijkingen leiden tot dezelfde waarde van d als:
$(d + 100\ \mathrm{cm}) / d = \sqrt{(2\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}} / 0{,}1\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}})} = \sqrt{20} = 4{,}47$
$d + 100\ \mathrm{cm} = 4{,}47\ d$
$d = 100\ \mathrm{cm} / (4{,}47 - 1) = 100\ \mathrm{cm} / 3{,}47 = 29\ \mathrm{cm}$
als de ribbe $2 \times 29\ \mathrm{cm} = 58\ \mathrm{cm}$ is, leiden de twee transporteisen tot dezelfde afscherming

4 na 2 weken is $A(^{51}\mathrm{Cr})$ met factor $\mathrm{e}^{-0{,}693\times(2\times7)/27{,}71} = 0{,}70$ gedaald, terwijl $A(^{60}\mathrm{Co})$ nagenoeg onveranderd is
de loodafscherming zal ongetwijfeld door $^{60}\mathrm{Co}$ worden bepaald
de kist heeft een ribbe van 50 cm
dit is kleiner dan 58 cm, dus transporteis (1) is bepalend
op 50 cm / 2 = 25 cm (oppervlak)
dosistempo $60{\cdot}10^{-2} \times 0{,}31\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1}} \times 2{,}66{\cdot}10^5\ \mathrm{MBq} / (0{,}25\ \mathrm{m})^2$
$= 7{,}9{\cdot}10^5\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}} = 790\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}}$
limiet $2\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}}$
benodigde transmissie $T = 2\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}} / 790\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}} = 2{,}5{\cdot}10^{-3}$
aflezen figuur 31 11 cm lood
de transmissie van de γ-straling van $^{137}\mathrm{Cs}$ (0,66 MeV) is ongeveer 2 ordes van grootte kleiner
de transmissie van de γ-straling van $^{51}\mathrm{Cr}$ (0,32 MeV) zal nog veel kleiner zijn

controle dosistempo op 100 cm + (50 cm / 2) = 125 cm (= 1 m vanaf het oppervlak):
dosistempo = $(25\ \mathrm{cm} / 125\ \mathrm{cm})^2 \times 2\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}} = 0{,}08\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}} < 0{,}1\ \mathrm{mGy{\cdot}h^{-1}}$
voldoet aan de transporteis (2)

Vraagstuk 29

1 - hij meet niet aan het oppervlak van de container
- hij vergeet de ingroei van het dochternuclide B

2 aflezen figuur 1 bij 5 cm lood en nuclide A:
transmissie $T_A = 5{,}0\cdot10^{-3}$
afstand r = 1 m + (0,40 m / 2) = 1,2 m
$dH_A^*/dt = h\,A_A\,T_A / r^2$
$= 0{,}07\ \mu Sv\cdot m^2\cdot MBq^{-1}\cdot h^{-1} \times A_A\ MBq \times 5{,}0\cdot10^{-3} / (1{,}2\ m)^2$
$= 2{,}4\cdot10^{-4}\ A_A\ \mu Gy\cdot h^{-1}$
gemeten waarde $80\ \mu Gy\cdot h^{-1}$
activiteit van A $A_A = 80\ \mu Gy\cdot h^{-1} / 2{,}4\cdot10^{-4}\ \mu Gy\cdot h^{-1} = 3{,}3\cdot10^5$ MBq

3 $T_{½,A} >> 3\ d >> T_{½,B}$
op moment van aflevering is B dus in evenwicht met A, terwijl A nauwelijks is vervallen
de activiteit van B $A_B = A_A = 3{,}3\cdot10^5$ MBq

4 aflezen figuur 1 bij 5 cm lood en nuclide B:
transmissie $T_B = 8{,}0\cdot10^{-2}$
dus H^* nagenoeg geheel bepaald door nuclide B
zonder afscherming op afstand van 1 m + (0,40 m / 2) = 1,2 m (1 m vanaf het oppervlak):
$dH_B^*/dt = 0{,}23\ \mu Sv\cdot m^2\cdot MBq^{-1}\cdot h^{-1} \times 3{,}3\cdot10^5\ MBq / (1{,}2\ m)^2$
$= 5{,}3\cdot10^4\ \mu Gy\cdot h^{-1} = 53\ mGy\ h^{-1}$
limiet $0{,}1\ mSv\cdot h^{-1}$
benodigde transmissie $T_B = 0{,}1\ mGy\cdot h^{-1} / 53\ mGy\cdot h^{-1} = 1{,}9\cdot10^{-3}$
aflezen figuur 1 bij $1{,}9\times10^{-3}$ en nuclide B wanddikte = 12,2 cm lood
zonder afscherming op afstand van 0,40 m / 2 = 0,2 m (op het oppervlak):
$dH_B^*/dt = 0{,}23\ \mu Sv\cdot m^2\cdot MBq^{-1}\cdot h^{-1} \times 3{,}3\cdot10^5\ MBq / (0{,}2\ m)^2$
$= 1{,}9\cdot10^6\ \mu Gy\cdot h^{-1} = 1900\ mGy\cdot h^{-1}$
benodigde transmissie $T_B = 2\ mGy\cdot h^{-1} / 1900\ mGy\cdot h^{-1} = 1{,}1\cdot10^{-3}$
aflezen figuur 1 bij $1{,}1\cdot10^{-3}$ en nuclide B wanddikte = 13,3 cm lood
dus H^* op oppervlak is bepalend; afronden op hele centimeters geeft 14 cm lood
aflezen figuur 1 bij 14 cm lood en nuclide A transmissie = $T_A < 1{,}0\cdot10^{-6} << T_B$
dus bijdrage nuclide A is verwaarloosbaar

5 binnenstraal lood = 1 cm buitenstraal lood = wanddikte + 1 cm
massa = $(4\pi/3) \times (R_{buiten}^3 - R_{binnen}^3) \times \rho_{lood}$
$\rho_{lood} = 11\ 359\ kg\ m^{-3} = 11{,}35\ g\ cm^{-3}$
gebruikte container $(4\pi/3) \times [(6\ cm)^3 - (1\ cm)^3] \times 11{,}35\ g\cdot cm^{-3} = 1{,}0\cdot10^4\ g = 10\ kg$
benodigde container $(4\pi/3) \times [(15\ cm)^3 - (1\ cm)^3] \times 11{,}35\ g\cdot cm^{-3} = 1{,}6\cdot10^5\ g = 160\ kg$

<u>Vraagstuk 30</u>
de buitenstraal van de container met een wanddikte d (in m) en een boring van 1 cm = 0,01 m
$r = d + (0{,}01\ m / 2) = d + 0{,}005$ m

1 de wanddikte volgt uit:
$dK/dt = k\,A\,T(d) / r^2$
$= 0{,}305\ \mu Gy\cdot m^2\cdot MBq^{-1}\cdot h^{-1} \times 10\ MBq \times T(d) / (d + 0{,}005\ m)^2$
$\leq 50\ \mu Gy\cdot h^{-1}$
$T(d) / (d + 0{,}005\ m)^2 \leq 50\ \mu Gy\cdot h^{-1} / (0{,}305\ \mu Gy\cdot m^2\cdot MBq^{-1}\cdot h^{-1} \times 10\ MBq) = 16{,}4\ m^{-2}$
de transmissie $T(d)$ volgt uit aflezen van figuur 1 voor lood:
d = 0,050 m
$T(5) = 7{,}5\cdot10^{-2}$
$T(5) / (0{,}050\ m + 0{,}005\ m)^2 = 7{,}5\cdot10^{-2} / (0{,}055\ m)^2 = 24{,}8\ m^{-2} > 16{,}4\ m^{-2}$
d = 0,055 m
$T(5{,}5) = 5{,}8\cdot10^{-2}$
$T(5{,}5) / (0{,}055\ m + 0{,}005\ m)^2 = 5{,}8\cdot10^{-2} / (0{,}060\ m)^2 = 16{,}1\ m^{-2} < 16{,}4\ m^{-2}$
d = 0,060 m
$T(6) = 4{,}4\cdot10^{-2}$
$T(6) / (0{,}060\ m + 0{,}005\ m)^2 = 4{,}4\cdot10^{-2} / (0{,}065\ m)^2 = 10{,}4\ m^2 < 16{,}4\ m^{-2}$
dus d(Pb) = 5,5 cm is voldoende

2 het kermatempo aan het oppervlak van uranium is 20 μGy·h^{-1}; de wanddikte volgt uit:
$\mathrm{d}K/\mathrm{d}t = k\,A\,T(d) / r^2$
$= 0{,}305\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{MBq}^{-1}\cdot\mathrm{h}^{-1} \times 10\ \mathrm{MBq} \times T(d) / (d + 0{,}005\ \mathrm{m})^2$
$\leq 50\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1} - 20\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1} = 30\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1}$
$T(d) / (d + 0{,}005\ \mathrm{m})^2 \leq 30\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1} / (0{,}305\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{MBq}^{-1}\cdot\mathrm{h}^{-1} \times 10\ \mathrm{MBq}) = 9{,}8\ \mathrm{m}^{-2}$
de transmissie $T(d)$ volgt uit aflezen van figuur 1 voor uranium:
$d = 0{,}030$ m
$T(3) = 3{,}1\cdot10^{-2}$
$T(3) / (0{,}030\ \mathrm{m} + 0{,}005\ \mathrm{m})^2 = 3{,}1\cdot10^{-2} / (0{,}035\ \mathrm{m})^2 = 25{,}3\ \mathrm{m}^{-2} > 9{,}8\ \mathrm{m}^{-2}$
$d = 0{,}035$ m
$T(3{,}5) = 1{,}7\cdot10^{-2}$
$T(3{,}5) / (0{,}035\ \mathrm{m} + 0{,}005\ \mathrm{m})^2 = 1{,}7\cdot10^{-2} / (0{,}040\ \mathrm{m})^2 = 10{,}6\ \mathrm{m}^{-2} > 9{,}8\ \mathrm{m}^{-2}$
$d = 0{,}040$ m
$T(4) = 9{,}8\cdot10^{-3}$
$T(4) / (0{,}040\ \mathrm{m} + 0{,}005\ \mathrm{m})^2 = 9{,}8\cdot10^{-3} / (0{,}045\ \mathrm{m})^2 = 4{,}8\ \mathrm{m}^{-2} < 9{,}8\ \mathrm{m}^{-2}$
dus d(U) = 4,0 cm is voldoende

3 volume gehele container $V_{\mathrm{buiten}} = \pi \times (d + 0{,}5\ \mathrm{cm})^2 \times (10\ \mathrm{cm} + 2 \times d)$
volume van de holte $V_{\mathrm{binnen}} = \pi \times (0{,}5\ \mathrm{cm})^2 \times 10\ \mathrm{cm} = 2{,}5\pi\ \mathrm{cm}^3$
massa $m = (V_{\mathrm{buiten}} - V_{\mathrm{binnen}}) \times \rho$
lood (d = 5,5 cm) $m = \pi \times [(6{,}0\ \mathrm{cm})^2 \times 21\ \mathrm{cm} - 2{,}5\ \mathrm{cm}^3] \times 11{,}35\ \mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-3}$
$= 26{,}9\cdot10^3\ \mathrm{g} = 26{,}9\ \mathrm{kg}$

4 uraan (d = 4 cm) $m = \pi \times [(4{,}5\ \mathrm{cm})^2 \times 18\ \mathrm{cm} - 2{,}5\ \mathrm{cm}^3] \times 18{,}9\ \mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-3}$
$= 21{,}5\cdot10^3\ \mathrm{g} = 21{,}5\ \mathrm{kg}$

5 $A = \lambda \times N = \lambda \times$ (massa / atoomgewicht) × abundantie × N_{Avogadro}
$\lambda(^{238}\mathrm{U}) = 0{,}693 / (4{,}468\cdot10^9\ \mathrm{j} \times 365\ \mathrm{d}\cdot\mathrm{j}^{-1} \times 24\ \mathrm{h}\cdot\mathrm{d}^{-1} \times 3600\ \mathrm{s}\cdot\mathrm{h}^{-1}) = 4{,}9\cdot10^{-18}\ \mathrm{s}^{-1}$
$A(^{238}\mathrm{U}) = 4{,}9\cdot10^{-18}\ \mathrm{s}^{-1} \times (21{,}5\cdot10^3\ \mathrm{g} / 238{,}03\ \mathrm{g}\cdot\mathrm{mol}^{-1}) \times 99{,}75\cdot10^{-2} \times 6{,}02\cdot10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$
$= 2{,}66\cdot10^8\ \mathrm{Bq} = 266\ \mathrm{MBq}$
$\lambda(^{235}\mathrm{U}) = 0{,}693 / (7{,}038\cdot10^8\ \mathrm{j} \times 365\ \mathrm{d}\cdot\mathrm{j}^{-1} \times 24\ \mathrm{h}\cdot\mathrm{d}^{-1} \times 3600\ \mathrm{s}\cdot\mathrm{h}^{-1}) = 3{,}1\cdot10^{-17}\ \mathrm{s}^{-1}$
$A(^{235}\mathrm{U}) = 3{,}1\cdot10^{-17}\ \mathrm{s}^{-1} \times (21{,}5\cdot10^3\ \mathrm{g} / 238{,}03\ \mathrm{g}\cdot\mathrm{mol}^{-1}) \times 0{,}25\cdot10^{-2} \times 6{,}02\cdot10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$
$= 4{,}21\cdot10^6\ \mathrm{Bq} = 4\ \mathrm{MBq}$
totale activiteit = 266 MBq + 4 MBq = 270 MBq

Vraagstuk 31

1 de vangst van $^{24}\mathrm{Na}^+$-ionen wordt beschreven door de differentiaalvergelijking:
$\mathrm{d}A/\mathrm{d}t + \lambda A = P$
$T_{½} = 14{,}96\ \mathrm{h} = 0{,}09$ week << 1 week, dus na 1 week is er nagenoeg volledig evenwicht
in de evenwichtssituatie is $\mathrm{d}A/\mathrm{d}t = 0$, dus $\lambda A_{\mathrm{evenwicht}} = P$
$P = 4{,}0\ \mathrm{m}^3\cdot\mathrm{h}^{-1} \times 40\ \mathrm{MBq}\cdot\mathrm{m}^{-3} \times 95\cdot10^{-2} = 152\ \mathrm{MBq}\cdot\mathrm{h}^{-1}$
$\lambda = 0{,}693 / 14{,}96\ \mathrm{h} = 0{,}046\ \mathrm{h}^{-1}$
$A_{\mathrm{evenwicht}} = P / \lambda = 152\ \mathrm{MBq}\cdot\mathrm{h}^{-1} / 0{,}046\ \mathrm{h}^{-1} = 3{,}3\cdot10^3\ \mathrm{MBq} = 3{,}3\ \mathrm{GBq}$

2 $\mathrm{d}K/\mathrm{d}t = 0{,}43\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{MBq}^{-1}\cdot\mathrm{h}^{-1} \times 3{,}3\cdot10^3\ \mathrm{MBq} / (2\ \mathrm{m})^2 = 355\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1}$

3 benodigde transmissie $T = 1\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1} / 355\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1} = 2{,}8\cdot10^{-3}$
aflezen figuur 1 86 cm gewoon beton, of 55 cm barietbeton

Vraagstuk 32

1 $\mathrm{d}K/\mathrm{d}t = 0{,}077\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{MBq}^{-1}\cdot\mathrm{h}^{-1} \times 1\cdot10^3\ \mathrm{MBq} / (0{,}5\ \mathrm{m})^2$
$= 308\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1} = 3{,}08\cdot10^{-4}\ \mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1}$
benodigde transmissie $T = 10\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1} / 308\ \mu\mathrm{Gy}\cdot\mathrm{h}^{-1} = 3{,}2\cdot10^{-2}$
aflezen Appendix, figuur 31 $d = 3{,}3$ cm

2 de verstrooide fotonen hebben energie verloren en komen dus niet in de fotopiek bij 0,66 MeV terecht
er mag bij vraag 3 dus geen rekening worden gehouden met de *build-up factor*
en daarom mag er geen transmissiegrafiek worden gebruikt

3 $\varphi = A \times f_\gamma \times f_{abs,beton} \times f_{abs,lood} / (4\pi r^2)$
beton $(\mu/\rho) \times (d \times \rho) = 7{,}7{\cdot}10^{-3}\ m^2{\cdot}kg^{-1} \times 20{\cdot}10^{-2}\ m \times 2350\ kg{\cdot}m^{-3} = 3{,}62$
$f_{abs,beton} = e^{-3{,}62} = 2{,}7{\cdot}10^{-2}$
lood $(\mu/\rho) \times (d \times \rho) = 10{,}8{\cdot}10^{-3}\ m^2{\cdot}kg^{-1} \times 10{\cdot}10^{-2}\ m \times 11\,350\ kg{\cdot}m^{-3} = 12{,}26$
$f_{abs,beton} = e^{-12{,}26} = 4{,}7{\cdot}10^{-6}$
$\varphi = 1{\times}10^9\ Bq \times (0{,}946 \times 0{,}898) \times 2{,}7{\times}10^{-2} \times 4{,}7{\times}10^{-6} / [4\pi \times (5\ m)^2] = 0{,}34\ m^{-2}{\cdot}s^{-1}$
4 oppervlak detector $O = 10\ cm \times 10\ cm = 100\ cm^2 = 0{,}010\ m^2$
aantal fotonen op detector $dN/dt = \varphi \times O = 0{,}34\ m^{-2}{\cdot}s^{-1} \times 0{,}010\ m^2 = 3{,}4{\cdot}10^{-3}\ s^{-1}$
NaI $(\mu/\rho) \times (d \times \rho) = 7{,}6{\cdot}10^{-3}\ m^2{\cdot}kg^{-1} \times 10{\cdot}10^{-2}\ m \times 3670\ kg{\cdot}m^{-3} = 2{,}79$
detectorrendement
ε = (1 - transmissie) × (relatief fotopiekrendement)
$= (1 - e^{-2{,}79}) \times (60 / 100) = 0{,}56$
teltempo $T = dN/dt \times \varepsilon = 3{,}4{\cdot}10^{-3}\ s^{-1} \times 0{,}56 = 1{,}9{\cdot}10^{-3}\ tps < 10^{-2}\ tps$
er is dus geen extra loodafscherming nodig

Vraagstuk 33
1 $dK_{direct}/dt = k\,A / r^2$
$= 0{,}305\ \mu Gy{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1} \times 75{\cdot}10^3\ MBq / (5\ m)^2 = 9{,}15{\cdot}10^2\ \mu Gy{\cdot}h^{-1}$
2 afstand van bron tot muur 8 m - 1 m = 7 m
kermatempo op de muur $dK_{muur}/dt = k\,A / r^2$
$= 0{,}305\ \mu Gy{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1} \times 75{\cdot}10^3\ MBq / (7\ m)^2$
$= 4{,}67{\cdot}10^2\ \mu Gy{\cdot}h^{-1}$
bundelvlek op 1 m $\pi r^2 = \pi \times (15\ cm / 2)^2 = 177\ cm^2$
bundelvlek op de muur $177\ cm^2 \times (7\ m / 1\ m)^2 = 8{,}7{\cdot}10^3\ cm^2$
aflezen figuur 44 verstrooiingsfactor = 0,0125% per 100 cm² op 1 m
afstand vanaf muur 8 m - (1 m + 5 m) = 2 m
dK_{strooi}/dt
$= dK_{muur}/dt \times$ verstrooiingsfactor × (bundelvlek op muur / 100 cm²) × (1 m / r)²
$= 4{,}67{\cdot}10^2\ \mu Gy{\cdot}h^{-1} \times 0{,}0125{\cdot}10^{-2} \times (8{,}7{\cdot}10^3\ cm^2 / 100\ cm^2) \times (1\ m / 2\ m)^2$
$= 1{,}27\ \mu Gy{\cdot}h^{-1}$
3 afstand van P tot bron x
afstand vanaf muur tot P 8 m - (1 m + x) = 7 m - x
$dK_{direct}/dt = 9{,}15{\cdot}10^2\ \mu Gy{\cdot}h^{-1} \times (5\ m / x)^2 = 2{,}3{\cdot}10^4\ \mu Gy{\cdot}m^2{\cdot}h^{-1} / x^2$ (zie vraag 1)
$dK_{strooi}/dt = 1{,}27\ \mu Gy{\cdot}h^{-1} \times [\,2\ m / (7\ m - x)]^2 = 5{,}1\ \mu Gy{\cdot}m^2{\cdot}h^{-1} / (7\ m - x)^2$ (zie vraag 2)

de afstand van bron tot muur speelt geen rol bij de berekening van de strooistraling: K_{muur} neemt weliswaar af met $1/r^2$, maar het oppervlak van de bundelvlek op de muur neemt toe met r^2 en dus is K_{strooi} op 1 meter van de muur onafhankelijk van r

nu x oplossen uit de vergelijking $dK_{strooi}/dt < 10^{-2} \times dK_{direct}/dt$
$5{,}1 / (7\ m - x)^2 < 10^{-2} \times 2{,}3{\cdot}10^4 / x^2 = 230 / x^2$
$x^2 / (7\ m - x)^2 < 230 / 5{,}1 = 45$
$x / (7\ m - x) < \sqrt{45} = 6{,}7$
$x < 6{,}7 \times (7\ m - x) = 47\ m - 6{,}7x$
$x < 47\ m / (1 + 6{,}7) = 47\ m / 7{,}7 = 6{,}1\ m$

Vraagstuk 34
1 na transmissie door lood is er relatief weinig verstrooide straling in de bundel
het doorgelaten spectrum is daarom nagenoeg gelijk aan het primaire spectrum van ^{60}Co
2 aflezen bij 10 cm lood in Appendix, figuur 31 $T_{lood} = 4{,}5{\cdot}10^{-3}$
aflezen bij 50 cm beton in Appendix, figuur 33 $T_{beton} = 9{,}0{\cdot}10^{-3}$
$dK/dt = k\,A\,T_{lood}\,T_{beton} / r^2$
$= 0{,}305\ \mu Gy{\cdot}m^2{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}h^{-1} \times 1{,}5{\cdot}10^6\ MBq \times 4{,}5{\cdot}10^{-3} \times 9{,}0{\cdot}10^{-3} / (2{,}5\ m)^2 = 2{,}96\ \mu Gy{\cdot}h^{-1}$

3 afstand tot muur 4 m
kermatempo op muur $dK_{muur}/dt = 0{,}305\ \mu Gy \cdot m^2 \cdot MBq^{-1} \cdot h^{-1} \times 1{,}5 \cdot 10^6\ MBq / (4\ m)^2$
$= 2{,}86 \cdot 10^4\ \mu Gy \cdot h^{-1}$
bundelvlek op 50 cm $100\ cm^2$
bundelvlek op muur $100\ cm^2 \times (4\ m / 0{,}5\ m)^2 = 6{,}4 \cdot 10^3\ cm^2$
verstrooihoek $180° - \arctan(2{,}5 / 4{,}0) = 180° - 32° = 148°$
aflezen in Appendix, figuur 44
verstrooiingsfactor = 0,012% per 100 cm² op 1 m
afstand vanaf muur $\sqrt{[(4\ m)^2 + (2{,}5\ m)^2]} = 4{,}7\ m$
$dK_{verstrooid}/dt$
$= dK_{muur}/dt \times$ verstrooiingsfactor $\times$ (bundelvlek op muur / 100 cm²) $\times (1\ m / r)^2$
$= 2{,}86 \cdot 10^4\ \mu Gy \cdot h^{-1} \times 0{,}012 \cdot 10^{-2} \times (6{,}4 \cdot 10^3\ cm^2 / 100\ cm^2) \times (1\ m / 4{,}7\ m)^2 = 9{,}9\ \mu Gy \cdot h^{-1}$

<u>Vraagstuk 35</u>
1 lekstraling op r = 2,1 m:
weekdosis $D_{lek}(2{,}1) = dD_{lek}(1)/dt \times t \times (1\ m / r)^2$
$= 2\ mGy \cdot h^{-1} \times 20\ h \cdot wk^{-1} \times (1\ m / 2{,}1\ m)^2$
$= 9{,}1\ mGy \cdot wk^{-1}$
effectieve weekdosis $E_{lek}(2{,}1) = D_{lek}(2{,}1) \times 1\ Sv \cdot Gy^{-1} = 9{,}1\ mSv \cdot wk^{-1}$
benodigde transmissie $T = 0{,}02\ mSv \cdot wk^{-1} / 9{,}1\ mSv \cdot wk^{-1} = 2{,}2 \cdot 10^{-3}$
aflezen in Appendix, figuur 33
d = 65 cm beton
strooistraling op r = 2 m:
afstand tot patiënt 0,6 m
weekdosis op patiënt $D(0{,}6) = dD(1)/dt \times t \times (1\ m / r)^2$
$= 100\ Gy \cdot h^{-1} \times (20 / 4)\ h \cdot wk^{-1} \times (1\ m / 0{,}6\ m)^2$
$= 1{,}4 \cdot 10^3\ Gy \cdot wk^{-1}$
bundelvlek $20\ cm \times 20\ cm = 400\ cm^2$
aflezen bij 90° in Appendix, figuur 44
verstrooiingsfactor = 0,002% per 100 cm² op 1 m
afstand vanaf patiënt 2 m
$D_{verstrooid}(2)$
$= D(0{,}6) \times$ verstrooiingsfactor $\times$ (bundelvlek / 100 cm²) $\times (1\ m / r)^2$
$= 1{,}4 \cdot 10^3\ Gy \cdot wk^{-1} \times 0{,}002 \cdot 10^{-2} \times (400\ cm^2 / 100\ cm^2) \times (1\ m / 2\ m)^2 = 0{,}028\ Gy \cdot wk^{-1}$
$E_{verstrooid}(2) = D_{verstrooid}(2) \times 1\ Sv \cdot Gy^{-1} = 0{,}028\ Sv \cdot wk^{-1} = 28\ mSv \cdot wk^{-1}$
benodigde transmissie $T = 0{,}02\ mSv \cdot wk^{-1} / 28\ mSv \cdot wk^{-1} = 7{,}1 \cdot 10^{-4}$
aflezen bij 90° in Appendix, figuur 38
d = 42 cm beton
dus de lekstraling is bepalend
2 directe dosis op r = 5 m
weekdosis $D(5) = dD(1)/dt \times t \times (1\ m / r)^2$
$= 100\ Gy \cdot h^{-1} \times (20 / 4)\ h \cdot wk^{-1} \times (1\ m / 5\ m)^2 = 20\ Gy \cdot wk^{-1}$
effectieve weekdosis $E(5) = D(5) \times 1\ Sv \cdot Gy^{-1} = 20\ Sv \cdot wk^{-1} = 2{,}0 \cdot 10^4\ mSv \cdot wk^{-1}$
benodigde transmissie $T = 0{,}02\ mSv \cdot wk^{-1} / 2{,}0 \cdot 10^4\ mSv \cdot wk^{-1} = 1{,}0 \cdot 10^{-6}$
aflezen in Appendix, figuur 33
d = 130 cm beton
volgens vraag 1 is 65 cm beton voldoende voor lekstraling op 2,1 m
dus 130 cm op 5 m is zeker voldoende

3 kortste afstand tot parkeerterrein 5 m + 10 m = 15 m
maximale effectieve jaardosis:
ID = (weeklimiet in punt B) × 50 wk·j^{-1} × (5 m / 15 m)^2
= 0,02 mSv·wk^{-1} × 50 wk·j^{-1} / 9 = 0,11 mSv·j^{-1}
maximale waarde AID:
AID = ID × ABC = 0,11 mSv·j^{-1} × 0,01 = 1,1·10^{-3} mSv·j^{-1} = 1,1 µSv·j^{-1}

Vraagstuk 36

1	aflezen figuur 2 bij 10 MeV	6 cm water	
2	stroomdichtheid	1 nA / 10 cm^2 = 1,0·10^{-10} C·s^{-1}·cm^{-2}	
	fluentietempo	1,0·10^{-10} C·s^{-1}·cm^{-2} / 1,6·10^{-19} C = 6,25·10^8 cm^{-2}·s^{-1}	
	aflezen figuur 1 bij 10 MeV	4,2×10^{-10} Sv·cm^2	
	dosisequivalenttempo	6,25·10^8 cm^{-2}·s^{-1} × 4,2·10^{-10} Sv·cm^2 = 0,26 Sv·s^{-1}	
3	aflezen figuur 2 bij 30 MeV	17 cm water	
	aflezen figuur 1 bij 30 MeV	3,4·10^{-10} Sv·cm^2	
	dosisequivalenttempo	6,25·10^8 cm^{-2}·s^{-1} × 3,4·10^{-10} Sv·cm^2 = 0,21 Sv·s^{-1}	
4	aflezen figuur 3 bij 30 MV	700 rad·µA^{-1}·min^{-1} = 7 Gy·µA^{-1}·min^{-1} op 1 m	
	benodigde bundeltijd	4 Gy / 7 Gy·µA^{-1}·min^{-1} = 0,57 µA·min = 0,57 min bij 1 µA	
5	weekdosis	200 wk^{-1} × 4 Gy × (1 m / 5 m)^2 = 32 Gy·wk^{-1}	
	benodigde transmissie	T = 0,04 mGy·wk^{-1} × 10^{-3} Gy·mGy^{-1} / 32 Gy·wk^{-1} = 1,25·10^{-6}	
	aflezen in Appendix, figuur 39	31 cm lood	
	aflezen in Appendix, figuur 40	280 cm beton	
6	massa muur per m^2	2,7 m × 11 350 kg·m^{-3} = 30 645 kg·m^{-2}	lood
		2,7 m × 2350 kg·m^{-3} = 6345 kg·m^{-2}	beton

vloerbelasting bij lood is groter dan de maximaal toegestane waarde van 10 000 kg·m^{-2}
dus beton is de enige optie

Vraagstuk 37

1. aflezen bij 100 kV en 2,5 mm Al in Appendix, figuur 41
8 mGy per mA min op 1 m
belichtingstijd 60 s = 1 min
anodestroom 0,5 mA
primaire dosis 8 mGy per mA·min × 0,5 mA × 1 min / (1 m)^2 = 4 mGy op 1 m
bundelvlek 30 cm × 20 cm = 600 cm^2
verstrooide dosis primaire dosis × verstrooiingsfactor × (bundelvlek / 400 cm^2)
= 4 mGy × verstrooiingsfactor × (600 cm^2 / 400 cm^2)
= 6 × verstrooiingsfactor (in mGy)

positie	*hoek*	*verstrooiingsfactor*	*verstrooide dosis (mGy)*
(A,F)	135°	0,0017	0,0102
(B,E)	90°	0,0005	0,0030
(C,D)	45°	0,0003	0,0018

2. aflezen bij 80 kV en 2,5 mm Al in Appendix, figuur 41
5,5 mGy per mA·min op 1 m
belichting 90 mA s = 1,5 mA min
primaire dosis D = 5,5 mGy per mA·min × 1,5 mA·min × (1 m / 0,85 m)^2 = 11,4 mGy

3 verdeel de weegfactor 0,12 voor de restgroep evenredig over de 13 overige organen
verdeel de weegfactor 0,12 voor de dikke darm naar rato van de massa's van ULI en LLI

orgaan	w_T *(Sv·Gy⁻¹)*	$C_{f,T}$	$w_T \times C_{f,T}$ *(Sv·Gy⁻¹)*
borstweefsel	0,12	0,01	0,00120
longen	0,12	0,02	0,00240
milt *	0,00923	0,13	0,00120
alvleesklier *	0,00923	0,24	0,00222
maagwand	0,12	0,53	0,06360
dunne darm *	0,00923	0,39	0,00360
dikke darm boven #	0,068	0,45	0,03060
dikke darm onder #	0,052	0,22	0,01144
gonaden	0,20	0,29	0,05800
baarmoeder *	0,00923	0,36	0,00332
rood beenmerg	0,12	0,04	0,00480
botoppervlakken	0,01	0,06	0,00060
totaal			0,183

* $w_T = 0{,}12 / 13 = 0{,}00923$
\# w_T = 0,12 gewogen met factor 210 g / 370 g = 0,57 respectievelijk 160 g / 370 g = 0,43

$E = \sum_T (w_T \times H_T) = D \times \sum_T (w_T \times C_{f,T}) = 11{,}4$ mGy × 0,183 Sv·Gy^{-1} = 2,1 mSv

Vraagstuk 38

1 aflezen onderschrift Appendix, figuur 43 bij 300 kV
20,9 mGy per mA·min op 1 m
buisstroom 10 mA
afstand 5 m
kermatempo dK_{lucht}/dt = 20,9 mGy per mA·min × 10 mA × (1 m / 5 m)^2
= 8,4 mGy·min^{-1}
aflezen bij 300 keV in Appendix, figuur 26
$(\mu_{en}/\rho)_{lucht} = (\mu_{tr}/\rho)_{lucht}$ = 0,00287 m^2·kg^{-1}
dosistempo $dD_{lucht}/dt = dK_{lucht}/dt \times (\mu_{en} / \mu_{tr})_{lucht}$
= 8,4 mGy·min^{-1} × 1 = 8,4 mGy·min^{-1}

2 aflezen bij 300 keV in Appendix, figuur 26
$(\mu_{en}/\rho)_{weefsel}$ = 0,00315 m^2·kg^{-1}
dosistempo $dD_{weefsel}/dt = dD_{lucht}/dt \times (\mu_{en}/\rho)_{weefsel} / (\mu_{en}/\rho)_{lucht}$
= 8,4 mGy·min^{-1} × 0,00315 m^2·kg^{-1} / 0,00287 m^2·kg^{-1}
= 9,2 mGy·min^{-1}

3 bij vraag 2 is de waarde $D_{weefsel}$ = 9,2 mGy berekend voor 10 mA × 1 min = 10 mA·min
work load W = 10 000 mA·min·wk^{-1} × 50 wk·j^{-1} = 5·10^5 mA·min
use factor U = 0,5
occupancy factor T = 1
dosis $(W\,U\,T$ / 10 mA min) × $D_{weefsel}$
= (5·10^5 mA·min × 0,5 × 1 / 10 mA·min) × 9,2 mGy
= 2,3·10^5 mGy·j^{-1}
wettelijke jaarlimiet 1 mSv·j^{-1} / 1 Sv·Gy^{-1} = 1 mGy·j^{-1}
benodigde transmissie 1 mGy·j^{-1} / 2,3·10^5 mGy·j^{-1} = 4,3·10^{-6}
gewenste opbrengst 4,3·10^{-6} × 20,9 mGy per mA·min = 9,0·10^{-5} mGy per mA·min
aflezen bij 300 kV en 9,0·10^{-5} mGy per mA·min in Appendix, figuur 43
dikte = 52 cm beton

Vraagstuk 39

1 aflezen onderschrift Appendix, figuur 42 bij 100 kV
opbrengst = 9,6 mGy per mA·min op 1 m
work load per jaar $W = 12{,}5{\cdot}10^3$ mA·min·wk^{-1} × 50 wk·j^{-1} = $6{,}25{\cdot}10^5$ mA·min
afstand r = 2 m + 0,5 m = 2,5 m
kerma in lucht K_{lucht} = 9,6 mGy per mA·min × $6{,}25{\cdot}10^5$ mA·min × (1 m / 2,5 m)^2
= $9{,}6{\cdot}10^5$ mGy
effectieve jaardosis $E \approx 9{,}6{\cdot}10^5$ mGy × 1 Sv·Gy^{-1} = $9{,}6{\cdot}10^5$ mSv
benodigde transmissie 1 mSv / $9{,}6{\cdot}10^5$ mSv = $1{,}0{\cdot}10^{-6}$
aflezen bij 100 kV in figuur 2
dikte = 31 cm beton (naar boven afgerond op hele cm)

2 afstand tot muur r = 2 m
primaire kerma K_{p} = 9,6 mGy per mA·min × $6{,}25{\cdot}10^5$ mA·min × (1 m / 2 m)^2
= $1{,}5{\cdot}10^6$ mGy
bundelvlek $O = 2{\cdot}10^3$ cm^2
aflezen bij 180° in Appendix, figuur 44
$C_{\text{verstrooi}} = 0{,}072{\cdot}10^{-2}$ per 100 cm^2 op 1 m
afstand vanaf muur r = 2 m + 2 m + 1 m = 5 m
verstrooide kerma $K_{\text{verstrooid}} = K_{\text{p}} \times C_{\text{verstrooi}} \times (O$ / 100 cm$^2) \times (1$ m / $r)^2$ =
$1{,}5{\cdot}10^6$ mGy × $0{,}072{\cdot}10^{-2}$ × ($2{\cdot}10^3$ cm^2 / 100 cm^2) × (1 m / 5 m)^2
= $8{,}6{\cdot}10^2$ mGy
effectieve jaardosis $E \approx 8{,}6{\cdot}10^2$ mGy × 1 Sv·Gy^{-1} = $8{,}6{\cdot}10^2$ mSv
benodigde transmissie 1 mSv / $8{,}6{\cdot}10^2$ mSv = $1{,}2{\cdot}10^{-3}$
aflezen bij 70 kV in figuur 2
dikte = 8 cm beton

3 voor deur moet dezelfde transmissie gelden als gevonden bij vraag 2, maar nu voor lood
aflezen onderschrift Appendix, figuur 42 bij 75 kV
opbrengst = 6,1 mGy per mA·min op 1 m
gewenste opbrengst $1{,}2{\cdot}10^{-3}$ × 6,1 mGy per mA·min = $7{,}3{\cdot}10^{-3}$ mGy per mA·min
aflezen bij 75 keV en $7{,}3{\cdot}10^{-3}$ mGy per mA·min in Appendix, figuur 42
dikte = 0,07 cm lood

Vraagstuk 40

1 flux $1{\cdot}10^{11}$ s^{-1}
afstand tot trefplaat r = 5 m = 500 cm
fluentietempo = fluxdichtheid $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t = \varphi$ = flux / ($4\pi\, r^2$)
= $1{\cdot}10^{11}$ s^{-1} / [4π × (500 cm)^2]
= $3{,}2{\cdot}10^4$ cm^{-2}·s^{-1}

2 aflezen figuur 2 bij 14 MeV H^* / Φ = 520 pSv·cm^2
omgevingsdosisequivalenttempo $\mathrm{d}H^*/\mathrm{d}t$ = 520 pSv·cm^2 × $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$ = 520 pSv·cm^2 × φ
= 520 pSv·cm^2 × $3{,}2{\cdot}10^4$ cm^{-2}·s^{-1}
= $1{,}66{\cdot}10^7$ pSv·s^{-1} = $6{,}0{\cdot}10^{10}$ pSv·h^{-1} = $6{,}0{\cdot}10^4$ µSv·h^{-1}

3 transmissie van beton $T_{\text{beton}} = 6{,}6\ \mathrm{e}^{-d/13}$
benodigde transmissie 1 µSv·h^{-1} / $6{,}0{\cdot}10^4$ µSv·h^{-1} = $1{,}7{\cdot}10^{-5}$
= $6{,}6\ \mathrm{e}^{-d/13}$
benodigde dikte beton d = 13 cm × ln(6,6 / $1{,}7{\cdot}10^{-5}$)
= 13 cm × 12,9 = 168 cm
(naar boven afgerond op hele cm)
er is al een muur van 25 cm beton, er ontbreekt dus 168 cm - 25 cm = 143 cm beton
dit kan vervangen worden door 2 × 143 cm = 286 cm aarde

4 transmissie muur $T_{muur} = 6{,}6\ e^{-150/13} = 6{,}4 \cdot 10^{-5}$

afstand tot trefplaat $r = 10\ cm + 150\ cm = 160\ cm$

fluentietempo = fluxdichtheid $d\Phi/dt = \varphi = flux \times T_{muur} / (4\pi r^2)$

$= 1 \cdot 10^{11}\ s^{-1} \times 6{,}4 \cdot 10^{-5} / [4\pi \times (160\ cm)^2]$

$= 20\ cm^{-2} \cdot s^{-1}$

omgevingsdosisequivalenttempo

$dH^*/dt = 520\ pSv \cdot cm^2 \times d\Phi/dt$

$= 520\ pSv \cdot cm^2 \times \varphi$

$= 520\ pSv \cdot cm^2 \times 20\ cm^{-2} \cdot s^{-1}$

$= 1{,}04 \cdot 10^4\ pSv \cdot s^{-1} = 3{,}7 \cdot 10^{-5}\ Sv \cdot h^{-1} = 37\ \mu Sv \cdot h^{-1} > 10\ \mu Sv \cdot h^{-1}$

de afscherming is dus onvoldoende

INWENDIGE DOSIMETRIE

Formules gebruikt bij inwendige dosimetrie

De retentie wordt beschreven door een som van exponentiële functies:

$$R(t) = C_1 \mathrm{e}^{-0{,}693\ t/T_{½,1}} + C_2 \mathrm{e}^{-0{,}693\ t/T_{½,2}} + \ldots + C_\mathrm{n} \mathrm{e}^{-0{,}693\ t/T_{½,\mathrm{n}}}$$

met $\sum_\mathrm{n} C_\mathrm{n} = 1$

Het is gebruikelijk dat de eerste term van deze reeks de rechtstreekse uitscheiding vanuit het *transfer compartiment* naar de urine beschrijft.

Het aantal desintegraties in bronorgaan S:

$$U_\mathrm{S} = f_1 C_\mathrm{S} A_\mathrm{S}(0) \int_{\mathrm{t_0}}^{\mathrm{t_0+50}} \mathrm{e}^{-0{,}693\ t/T_{½}^{\mathrm{eff}}}\, \mathrm{d}t \approx f_1 C_\mathrm{S} A_\mathrm{S}(0) T_{½}^{\mathrm{eff}}/0{,}693 \qquad (\mathrm{Bq{\cdot}s})$$

Hierin is $A_\mathrm{S}(0)$ de beginactiviteit in bronorgaan S. De benadering geldt als de effectieve halveringstijd veel korter is dan 50 jaar. Merk op dat:

$$\frac{1}{T_{½}^{\mathrm{eff}}} = \frac{1}{T_{½}^{\mathrm{biol}}} + \frac{1}{T_{½}^{\mathrm{fys}}}$$

De specifieke effectieve energie die per desintegratie vanuit bronorgaan S in doelorgaan T wordt gedeponeerd:

$$SEE(T \leftarrow S) = Y \times E \times SAF(T \leftarrow S) \quad (\mathrm{MeV{\cdot}g^{-1}})$$
$$SAF(T \leftarrow S) = AF(T \leftarrow S)/m_\mathrm{T} \quad (\mathrm{g^{-1}})$$

Met uitzondering van het maag-darmmodel en botmodel, geldt voor α- en β-straling:

$$AF(T \leftarrow S) = 1 \quad \text{als } T = S$$
$$AF(T \leftarrow S) = 0 \quad \text{als } T \neq S$$

De equivalente volgdosis in doelorgaan T wordt verkregen door te sommeren over alle bronorganen S en alle stralingssoorten i:

$$H_{50,\mathrm{T}} = 1{,}6 \times 10^{-10} \sum_{\mathrm{S,i}} U_{\mathrm{S,i}} w_{\mathrm{R,i}} SEE_\mathrm{i}(T \leftarrow S) \quad (\mathrm{Sv})$$

De effectieve volgdosis volgt uit een gewogen sommatie over alle doelorganen:

$$E_{50} = \sum_\mathrm{T} w_\mathrm{T} H_{50,\mathrm{T}} \quad (\mathrm{Sv})$$

41 Equivalente orgaandosis ten gevolge van ^{198}Au in de lever

Ten gevolge van inwendige besmetting bevindt zich op een gegeven moment 1,0 MBq ^{198}Au in de lever.

Gegeven
- het radioactieve verval van ^{198}Au (zie figuur 1)
- massa's van bron- en doelorganen van de referentiemens (zie Appendix, figuur 46)
- specifieke geabsorbeerde fracties SAF voor bronorgaan lever (zie Appendix, figuur 48)
- de biologische halveringstijd is 3 d voor alle organen

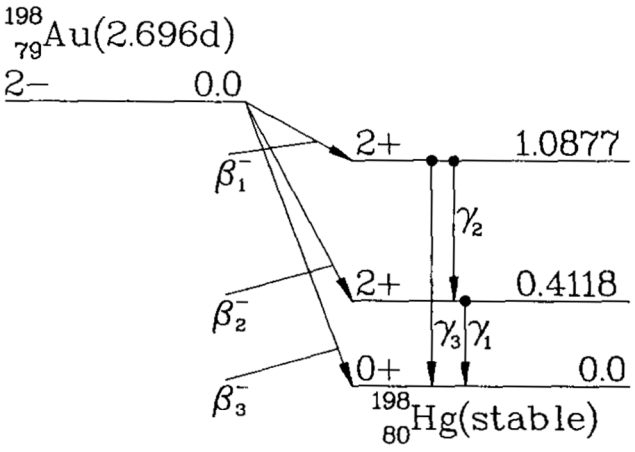
Vragen

1 Bereken het aantal desintegraties U_S in de lever (in Bq·s).

2 Bereken de gemiddelde energie die per desintegratie in de lever wordt gedeponeerd (in MeV per Bq·s).

3 Bereken de specifieke effectieve energie *SEE*(lever←lever).

4 Bereken de equivalente volgdosis $H_T(50)$ in de lever.



79-GOLD-198

HALFLIFE = 2.696 DAYS 22-DEC-78
DECAY MODE(S): β^-

RADIATION	y(i) $(Bq-s)^{-1}$	E(i) (MeV)	y(i)×E(i)
β^- 1	1.30E-02	7.982E-02*	1.04E-03
β^- 2	9.87E-01	3.150E-01*	3.11E-01
γ 1	9.55E-01	4.118E-01	3.93E-01
ce-K, γ 1	2.88E-02	3.287E-01	9.46E-03
ce-L_1, γ 1	4.07E-03	3.970E-01	1.61E-03
ce-L_2, γ 1	4.29E-03	3.976E-01	1.71E-03
ce-L_3, γ 1	1.84E-03	3.995E-01	7.37E-04
ce-M, γ 1	2.54E-03	4.089E-01*	1.04E-03
γ 2	1.06E-02	6.759E-01	7.16E-03
γ 3	2.29E-03	1.088E 00	2.49E-03
$K\alpha_1$ X-ray	1.38E-02	7.082E-02	9.75E-04
$K\alpha_2$ X-ray	8.10E-03	6.889E-02	5.58E-04
LISTED X, γ AND $\gamma\pm$ RADIATIONS			4.04E-01
OMITTED X, γ AND $\gamma\pm$ RADIATIONS**			6.32E-04
LISTED β, ce AND Auger RADIATIONS			3.26E-01
OMITTED β, ce AND Auger RADIATIONS**			1.02E-03
LISTED RADIATIONS			7.31E-01
OMITTED RADIATIONS**			1.66E-03

* AVERAGE ENERGY (MeV)
** EACH OMITTED TRANSITION CONTRIBUTES <0.100% TO $\Sigma y(i)\times E(i)$ IN ITS CATEGORY.
MERCURY-198 DAUGHTER IS STABLE.

Figuur 1. Radioactief verval van ^{198}Au (ICRP-30).

42 ^{87}Rb in voedsel (1993-2-1)

Het element rubidium komt als sporenelement voor in het voedsel. ICRP-23 schat de dagelijkse opname op 2,2 mg. Rubidium is licht radioactief ten gevolge van de aanwezigheid van het lang levende radionuclide ^{87}Rb.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{87}Rb (zie Appendix, figuur 14)
- om het rekenwerk te beperken mag u er vanuit gaan dat rubidium zich vanuit het bloed homogeen over het gehele lichaam verdeelt
- het atoomgewicht van Rb is 85,5 g·mol^{-1}
- natuurlijk Rb bestaat voor 27,8 atoom% uit ^{87}Rb
- het getal van Avogadro is 6,02·10^{23} mol^{-1}
- massa's van bron- en doelorganen van de referentiemens (zie Appendix, figuur 46)

Vragen

1 Bereken de specifieke activiteit van het element Rb (in Bq·g^{-1}).

2 Bereken de jaarlijkse inname via ingestie van ^{87}Rb (in Bq).

3 Bereken de effectieve volgdosis uitgaande van de gegeven waarde van $e_{ing}(50)$.

4 Bereken de evenwichtsactiviteit van ^{87}Rb in het lichaam ten gevolge van de jaarlijkse inname.

5 Bereken het aantal desintegraties U_S in het lichaam per Bq inname.

6 Bereken de specifieke effectieve energie *SEE*.

7 Bereken $e_{ing}(50)$ uitgaande van de bij vraag 5 en 6 gevonden waarden van U_S en *SEE*.

43 Berekening van e(50) van ^{35}S voor een volwassene

Het radionuclide ^{35}S wordt veelvuldig toegepast in biomedisch onderzoek.

Gegeven
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{35}S (zie Appendix, figuur 4)
- ga er vanuit dat zwavel als organische verbinding wordt toegediend
- met "alle organen/weefsels" wordt het gehele lichaam bedoeld
- massa's van bron- en doelorganen van de referentiemens (zie Appendix, figuur 46)

Vragen

1 Bereken het aantal desintegraties U_S (in Bq·s) per Bq ingestie.

2 Bereken de specifieke effectieve energie *SEE* (in $MeV \cdot g^{-1}$ per Bq·s).

3 Bereken de effectieve volgdosis E_{50} per Bq ingestie, uitgaande van de bij vraag 1 en vraag 2 gevonden waarden van U_S en *SEE*.

4 Waaraan is het verschil tussen E_{50} en $e_{ing}(50)$ toe te schrijven?

44 Berekening van e(50) van ^{35}S voor een baby (1980-1-3)

De mens neemt het element zwavel op via de voedselketen, als bouwstof voor aminozuren. Bij een baby van 6 maanden geschiedt de opname van dit element uitsluitend via melk. Ten gevolge van lozingen van kernreactoren kunnen uiterst geringe hoeveelheden van het radionuclide ^{35}S in het milieu en in de melk terecht komen, waardoor er gevaar voor inwendige besmetting bestaat.

Omdat het metabole model voor kinderen afwijkt van dat voor volwassenen, wordt in dit vraagstuk een schatting gemaakt van $e_{ing}(50)$ voor zuigelingen.

Gegeven

- $T_{½}(^{35}S) = 87{,}44$ d
- ^{35}S zendt uitsluitend β^--deeltjes uit met een gemiddelde energie van 0,049 MeV
- zwavel verdeelt zich homogeen over het gehele lichaam
- de uitscheiding van zwavel wordt beschreven door een enkele exponentiële functie
- volgens ICRP-56 is $f_1 = 1$ voor een 3 maanden oude baby; ga er in dit vraagstuk vanuit dat dit ook geldt voor een baby van 6 maanden
- voor een referentiebaby geldt: massa van het lichaam is 7700 g, zwavelgehalte van het lichaam is 500 $mg \cdot kg^{-1}$, melkconsumptie is 700 g per etmaal, en zwavelgehalte van melk is 140 $mg \cdot kg^{-1}$ melk
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat het gewicht van de baby, de melkconsumptie en de zwavelopname constant zijn

Vragen

1 Bereken de biologische halfwaardetijd van zwavel in het lichaam voor deze groep zuigelingen.

2 Bereken het aantal desintegraties U_S in het lichaam per Bq inname.

3 Bereken de specifieke effectieve energie *SEE*.

4 Bereken $e_{ing}(50)$ van ^{35}S voor deze groep zuigelingen, uitgaande van de bij vraag 2 en 3 gevonden waarden van U_S en *SEE*. Vergelijk het verkregen resultaat met de effectieve dosiscoëfficiënt voor volwassenen (zie Appendix, figuur 4).

45 Berekening van e(50) van ^{3}H voor een volwassene

Het radionuclide ^{3}H wordt veelvuldig toegepast in biomedisch onderzoek.

Gegeven
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{3}H (zie Appendix, figuur 1)
- met "alle organen/weefsels" wordt het gehele lichaam bedoeld
- massa's van bron- en doelorganen van de referentiemens (zie Appendix, figuur 46)

Vragen

1 Bereken het aantal desintegraties U_S per Bq inhalatie.

2 Bereken de specifieke effectieve energie *SEE*.

3 Bereken $e_{inh}(50)$ uitgaande van de bij vraag 1 en 2 gevonden waarden van U_S en *SEE*.

46 Berekening van e(50) van ^{3}H voor een kind (1991-2-4)

Teneinde de bevolkingsdosis te bepalen als gevolg van de lozing van radioactieve stoffen in lucht en water is het nodig om de effectieve dosiscoëfficiënt te kennen voor personen van verschillende leeftijden. Hiertoe zijn in ICRP-56 enige modellen opgesteld, onder meer voor een referentiekind van 1 jaar oud.

Gegeven

- $T_{½}(^{3}H)$ = 12,35 j
- ^{3}H zendt uitsluitend β^--deeltjes uit met een gemiddelde energie van 0,0057 MeV
- tritiumoxide verdeelt zich vrijwel onmiddellijk homogeen over het gehele lichaam
- het metabole model van een eenjarig kind bestaat uit twee compartimenten die beide het hele lichaam omvatten; de verdeling over deze compartimenten is als volgt: 97% met een biologische halveringstijd van 3,5 d en 3% met een biologische halveringstijd van 15 d
- de massa van een eenjarig referentiekind bedraagt 9800 g

Vragen

1 Bereken het aantal desintegraties U_S in het lichaam van een eenjarig kind per Bq ingestie.

2 Bereken de specifieke effectieve energie *SEE*.

3 Bereken $e_{ing}(50)$ voor een eenjarig kind, uitgaande van de bij vraag 1 en 2 gevonden waarden van U_S en *SEE*. Vergelijk het verkregen resultaat met de effectieve dosiscoëfficiënt voor volwassenen (zie Appendix, figuur 1).

47 Inhalatie van getritieerd waterdamp

Uit de hal van een zogenoemde zwembadreactor wordt per uur 30 MBq ^{3}H in de vorm van waterdamp geloosd.

Gegeven

- het debiet van de ventilatie bedraagt 2000 m^3 per uur
- ga in dit vraagstuk uit van een ademtempo van 1,2 $m^3 \cdot h^{-1}$
- bij een ademtempo van 1,2 $m^3 \cdot h^{-1}$ is de effectieve inname 50% groter dan de geïnhaleerde activiteit als gevolg van opname van tritium via de huid
- de waterbalans van de referentiemens:
  - 1,4 $l \cdot d^{-1}$ urine
  - 0,65 $l \cdot d^{-1}$ zweet
  - 0,95 $l \cdot d^{-1}$ overig vocht
- de effectieve dosiscoëfficiënt voor inhalatie is $e_{inh}(50) = 1{,}8 \cdot 10^{-11}$ $Sv \cdot Bq^{-1}$

Vragen

1 Bereken de effectieve volgdosis van een werknemer die 2000 uur per jaar in de hal werkt.

2 Bereken de activiteitsconcentratie van tritium in de urine van deze werknemer gedurende de tijd dat hij in de hal werkt.

48 Inwendige besmetting met ^{3}H (1987-2-2)

Tijdens een onderzoek naar inwendige besmetting door tritium via urine-analyse wordt bij een blootgestelde werknemer een verhoogde tritiumconcentratie vastgesteld. Bij nader onderzoek blijkt deze een met tritiumhoudende verf lichtgevend gemaakt horloge te dragen.

De telmonsters bevatten 8 ml urine. Het telrendement van de meetopstelling bedraagt 40%. De urine-analyse levert een bruto-teltempo van 14,0 telpulsen per minuut (tpm). Een meting aan 8 ml gedestilleerd water levert een teltempo van 1,2 tpm.

Vervolgens wordt het horloge afgedaan en opgeborgen. Na de verwijdering van het horloge zijn de bruto-teltempi:

tijdstip (d)	*bruto-teltempo (tpm)*
7	9,6
14	6,8
21	5,0
28	3,4
63	1,4

Gegeven

- $T_{½}(^{3}H) = 12{,}35$ j
- de standaardmens bevat 42 l lichaamswater
- de waterbalans van de referentiemens:
  - 1,4 $l \cdot d^{-1}$ urine
  - 0,65 $l \cdot d^{-1}$ zweet
  - 0,95 $l \cdot d^{-1}$ overig vocht
- de effectieve dosiscoëfficiënt is $e(50) = 1{,}8 \cdot 10^{-11}$ $Sv \cdot Bq^{-1}$

Vragen

1 Bereken de activiteitsconcentratie in $Bq \cdot ml^{-1}$, zet deze waarden uit op enkel-logaritmisch grafiekpapier en bepaal de effectieve halveringstijd.

2 Bereken de jaarlijkse effectieve volgdosis voor de verwijdering van het horloge, aangenomen dat de evenwichtstoestand was ingetreden voordat het horloge werd afgedaan.

3 Bereken de effectieve volgdosis in het geval dat deze meting betrekking had op een eenmalige inname vlak voor de productie van het eerste urinemonster.

49 Tritiumoxide in de lucht (1985-2-3)

Tritiumverbindingen in dieren worden voor het overgrote deel gekataboliseerd, waarna het tritium vrijkomt als getritieerd water. De deskundige van een C-laboratorium met dierenstal tracht inzicht te krijgen in de mogelijke stralingsbelasting van de dierenverzorger via inademing van besmette lucht en voert daartoe tritiummetingen uit aan lucht en aan de urine van deze werknemer. In de stal wordt de temperatuur op 24 °C gehouden bij een relatieve vochtigheid van 80%.

De tritiumconcentratie in lucht wordt bepaald door waterdamp op een koud oppervlak te laten bevriezen. Telflesjes worden gevuld met 1,0 ml van dit water, waarna ze worden aangevuld met telvloeistof. Deze monsters leveren een gemiddeld teltempo van 80 telpulsen per minuut (tpm). De urinemonsters leveren een gemiddeld teltempo van 50 tpm, waarbij steeds 10 ml urine wordt geteld.

Gegeven

- bij 24 °C bevat verzadigde lucht 22 g water per m^3 lucht
- de vloeistofscintillatieteller heeft in het tritiumkanaal een nuleffect van 20 tpm
- het telrendement voor tritium bedraagt 25%
- ga in dit vraagstuk uit van een ademtempo van 1,2 $m^3 \cdot h^{-1}$
- bij een ademtempo van 1,2 $m^3 \cdot h^{-1}$ is de effectieve inname 50% groter dan de geïnhaleerde activiteit als gevolg van opname van tritium via de huid
- de standaardmens bevat 42 l lichaamswater
- de effectieve dosiscoëfficiënt voor inhalatie is $e_{inh}(50) = 1{,}8 \cdot 10^{-11}$ Sv·Bq^{-1}
- bij continue inname van tritium en een lichaamsactiviteit van 1 Bq bedraagt de effectieve volgdosis $4{,}4 \cdot 10^{-10}$ Sv·j^{-1}

Vragen

1 Bereken de activiteitsconcentratie in het uitgevroren water (in Bq·ml^{-1}).

2 Bereken de activiteitsconcentratie in de lucht (in Bq·m^{-3}).

3 Bereken de effectieve volgdosis die de dierenverzorger oploopt als hij 2000 uur per jaar in de dierenstal werkt.

4 Bereken de gemiddelde tritiumconcentratie in de urine van deze werknemer.

5 Bereken de totale tritiumactiviteit in het lichaam van deze werknemer.

6 Bereken de jaarlijkse effectieve volgdosis uitgaande van een continue inname van tritium.

50 Inwendige besmetting met ^{32}P

Een student meldt een incident bij een synthese met ^{32}P. De stralingsbeschermingsdeskundige laat hem over elke 24 uur na het incident urine inleveren, alsmede alle faeces die hij de eerste vijf dagen zal uitscheiden. Omdat het een gemakkelijk oplosbare fosforverbinding was, wordt uitgegaan van klasse F. Verder wordt een AMAD van 1 µm verondersteld.

De urinebepalingen leveren 1980 Bq voor de eerste dag, 820 Bq voor de tweede dag en 436 Bq voor de derde dag. De activiteit in de faeces bedraagt 500 Bq.

Naar aanleiding van dit incident besluit de deskundige om in het vervolg de inwendige besmetting als gevolg van inhalatie van ^{32}P te bewaken door aan het begin van elke maand een urinemonster van elke werknemer te meten. De minimaal meetbare activiteitsconcentratie is 5 $Bq \cdot l^{-1}$.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{32}P (zie Appendix, figuur 3)
- longdepositiefracties voor een normale neusademer (zie Appendix, figuur 50)
- de urineproductie van de referentiemens bedraagt 1,4 l per dag

Vragen

1 Stel de retentieformule op.

2 Bereken de effectieve volgdosis als gevolg van inhalatie op basis van de urinemetingen.

3 Bereken de effectieve volgdosis als gevolg van inhalatie op basis van de faecesmeting.

4 Bereken de maximale volgdosis die per jaar onopgemerkt kan worden ontvangen.

51 Urinemetingen na een besmetting met $H^{36}Cl$

Na een incident met $H^{36}Cl$ besluit de bestralingsbeschermingsdeskundige tot urineanalyse bij de betrokken werknemer. Hij vraagt de medewerker om gedurende de eerstvolgende 24 uur alle urine te verzamelen, wat na 14 dagen wordt herhaald. Elk telmonster bevat 8 ml urine en wordt geteld in een vloeistofscintillatieapparaat. De gemeten nettoteltempi bedragen 11 520 telpulsen per minuut (tpm) respectievelijk 5130 tpm.

Gegeven

- het telrendement van de vloeistofscintillatieteller is 0,80 telpulsen per β-deeltje
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{36}Cl (zie Appendix, figuur 5)
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat 48% van de ingeademde activiteit in de longen achterblijft
- chloor wordt binnen enkele uren geheel opgenomen in het bloed
- de urineproductie van de referentiemens bedraagt 1,4 l per dag

Vragen

1 Bereken de biologische halveringstijd van HCl uitgaande van de gemeten activiteitsconcentraties in de urine.

2 Bereken de hoeveelheid activiteit die is ingeademd.

3 Bereken de effectieve volgdosis.

52 Ongeval met ^{51}Cr-poeder (1997-2-4)

Bij opruimwerkzaamheden komt per ongeluk de inhoud van een flesje met ^{51}Cr-houdend poeder vrij in de lucht. Bij een longtelling 1 uur na het gebeurde blijkt een werknemer besmet te zijn met ^{51}Cr. Een proef met een luchtstofmeter geeft als resultaat dat de AMAD van het poeder 5 μm bedraagt. De chemische verbinding is echter niet bekend.

Omdat de verbinding onbekend is, wordt de longtelling enige malen herhaald. Bij de longtellingen wordt uitsluitend de activiteit in de longen en de lymfeklieren onder het borstbeen gemeten. De resultaten van de metingen zijn:

datum	*activiteit (kBq)*
08-01-96	1,64
09-01-96	1,33
11-01-96	1,30
10-02-96	0,48

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{51}Cr (zie Appendix, figuur 9)
- longdepositiefracties voor een normale neusademer (zie Appendix, figuur 50)

Vragen

1 Bepaal de klasse (F, M of S) van de betreffende verbinding uitgaande van de longmetingen.

2 Bereken de ingenomen activiteit.

3 Bereken de effectieve volgdosis.

53 Injectie met ^{67}Ga-citraat (1997-1-2)

Op de afdeling nucleaire geneeskunde worden patiënten ingespoten met ^{67}Ga-citraat ten behoeve van de opsporing van groeiende tumoren. De activiteit die bij een normaal onderzoek in de bloedbaan wordt geïnjecteerd, bedraagt 200 MBq.

Na enkele dagen is het gallium voldoende in de tumor opgenomen om een afbeelding met behulp van een gammacamera mogelijk te maken. De meting met behulp van de gammacamera vindt 72 uur na toediening plaats.

Op een dag laat de verpleegkundige de spuit vallen en wel zo dat deze terecht komt op de zuiger, waardoor een deel van de radioactieve inhoud in de vorm van aerosolen vrijkomt in de werkruimte. Een dag na deze gebeurtenis wordt de verpleegkundige in een totale-lichaamsteller gemeten. Uit de meting blijkt dat er op dat moment 8500 Bq ^{67}Ga in zijn lichaam aanwezig is.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{67}Ga (zie Appendix, figuur 12)

Vragen

1 Maak een schatting van de effectieve volgdosis die een volwassen persoon bij een normaal galliumonderzoek ontvangt.

2 Welke activiteit is er op het tijdstip van de opname nog in de patiënt aanwezig?

3 Maak een schatting van de effectieve volgdosis voor de verpleegkundige.

54 Toediening van ^{99m}Tc-fosfonaat (1999-1-3)

Bij een volwassen nierpatiënt bestaat verdenking van uitzaaiingen van een onbekende primaire tumor. Er wordt een botscan aangevraagd bij de afdeling nucleaire geneeskunde. De botscan wordt uitgevoerd op een dag dat deze patiënt toch al in het ziekenhuis aanwezig is om een dialysebehandeling te ondergaan.

De patiënt zal eerst een injectie krijgen met 600 MBq ^{99m}Tc-fosfonaat, een stof die gedeeltelijk in het botweefsel zal worden opgenomen. Daarna gaat de patiënt naar de dialyse-afdeling waar zijn bloed gedurende 3 uur wordt ontdaan van afvalstoffen. Na de nierdialyse gaat de patiënt terug naar de afdeling nucleaire geneeskunde, waar de botscan zal worden uitgevoerd.

De betreffende patiënt produceert zelf geen urine. Bij dergelijke patiënten wordt 70% van het toegediende radiofarmacon met een halveringstijd van 15 min in het bot opgenomen en blijft het daar permanent aanwezig. De effectieve halveringstijd zal hierdoor verschillen van die voor een normale patiënt.

Gegeven

- volgende nierdialyse vindt over 2 dagen plaats
- $T_{½}(^{99m}\text{Tc}) = 6{,}006$ h
- in dit vraagstuk wordt de effectieve halveringstijd voor het lichaam van deze patiënt als geheel op 2,8 h gesteld
- de effectieve dosiscoëfficiënt bij intraveneuze toediening is $e(50) = 6{,}0 \cdot 10^{-12}$ Sv·Bq^{-1}

Vragen

1 Bereken de effectieve volgdosis ten gevolge van een botonderzoek met ^{99m}Tc voor een patiënt met een normale nierfunctie.

2 Beredeneer of de effectieve volgdosis voor de dialysepatiënt hoger dan wel lager wordt wanneer het botonderzoek, inclusief injectie, vlak na de dialyse plaatsvindt, in tegenstelling tot het hier boven beschreven protocol.

55 Ingestie van ^{137}Cs (1987-1-4)

Een groep volwassen personen neemt 1 jaar lang elke dag via ingestie dezelfde hoeveelheid ^{137}Cs in. Na een jaar blijkt de gemiddelde activiteit in hun lichaam 520 Bq te zijn.

Gegeven
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{137}Cs (zie Appendix, figuur 21)
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat de uitscheiding beschreven wordt door een enkelvoudige exponentiële functie met een halveringstijd van 110 d

Vragen

1 Toon aan dat na een jaar 90% van de verzadigingsconcentratie is bereikt.

2 Berekende de dagelijkse inname uitgaande van de gemeten ^{137}Cs-activiteit in het lichaam.

3 Wat is de effectieve volgdosis ten gevolge van een jaar lang dagelijkse inname?

56 Inwendige besmetting met ^{195m}Pt (1991-1-2)

Na afloop van een kortstondige radiochemische bewerking met het radionuclide ^{195m}Pt blijkt een analist een uitwendige besmetting te hebben opgelopen. Na reiniging besluit men de betrokken persoon te controleren op inwendige besmetting. Hiertoe wordt tijdens de 24 uur volgend op de bewerking de urine van de analist verzameld: in totaal 1,4 liter met een concentratie van 25 Bq·l^{-1}.

Gegeven

- $T_{½}(^{195m}\text{Pt}) = 4{,}02$ d
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat AMAD = 1 µm
- de retentieformule is $R(t) = 0{,}20\ e^{-0{,}693\ t/0{,}25} + 0{,}76\ e^{-0{,}693\ t/8} + 0{,}04\ e^{-0{,}693\ t/200}$
- (alle biologische halveringstijden in d)
- voor alle verbindingen is $f_1 = 0{,}01$
- alle verbindingen behoren tot klasse F
- longdepositiefracties voor een normale neusademer (zie Appendix, figuur 50)
- de effectieve dosiscoëfficiënten voor ingestie en inhalatie zijn respectievelijk $e_{ing}(50) = 6{,}3 \cdot 10^{-10}$ Sv·Bq^{-1} en $e_{inh}(50) = 1{,}9 \cdot 10^{-10}$ Sv·Bq^{-1}

Vragen

1 Maak een schatting van de effectieve volgdosis indien de inname het gevolg was van ingestie.

2 Maak een schatting van de effectieve volgdosis indien de inname het gevolg was van inhalatie.

57 Incident met een ^{241}Am-bron (2000-1-3)

De radioactieve ^{241}Am-bron in een vloeistofniveaumeter van een brouwerij moet vervangen worden door een nieuwe. De monteur voert de werkzaamheden uit in de laadruimte van zijn vrachtwagen. Bij demontage blijkt dat de bron vast zit door corrosie van de bronhouder. Met behulp van een schroevendraaier wrikt de monteur de bron los en brengt deze over in de transportcontainer.

De monteur rijdt eerst naar huis voor het middageten en levert daarna de bron als radioactief afval af bij het ontvangststation. Daar blijkt bij controle dat de container en de vrachtwagen aanzienlijk besmet zijn.

Er wordt besloten om gedurende een aantal dagen de urine van de monteur te verzamelen. Daarin worden de volgende activiteiten aangetroffen:

tijdstip (d)	*activiteit (Bq·d^{-1})*
1	0,22
2	0,16
3	0,11

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{241}Am (zie Appendix, figuur 24)

Vragen

1 Maak een schatting van de effectieve volgdosis indien de inname het gevolg was van ingestie.

2 Maak een schatting van de effectieve volgdosis indien de inname het gevolg was van inhalatie.

58 Bepaling van ^{241}Am in de urine

Na werkzaamheden met ^{241}Am wordt ter controle de 48-uursurine opgevangen. De activiteit in de urine bedraagt 0,15 Bq·l^{-1} bij een volume van 2,8 l.

Gegeven
- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{241}Am (zie Appendix, figuur 24)
- volgens het metabole model voor americium wordt vanuit het transfer compartiment 10% rechtstreeks via de urine uitgescheiden
- de longdepositiefracties voor een normale neusademer (zie Appendix, figuur 50)

Vragen

1 Maak een schatting van de inname en de effectieve volgdosis bij ingestie.

2 Maak een schatting van de inname en de effectieve volgdosis bij inhalatie uitgaande van een AMAD van 1 µm.

3 Maak een schatting van de inname en de effectieve volgdosis bij inhalatie uitgaande van een AMAD van 5 µm.

59 Lekkende cilinder met ^{85}Kr

In een opslagruimte van 500 m^3 met een ventilatievoud van 1 keer per uur lekt een cilinder met het edelgasisotoop ^{85}Kr. Het lektempo wordt geschat op 40 $MBq \cdot h^{-1}$.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{85}Kr (zie Appendix, figuur 13)

Vraag

1 Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo in deze ruimte.

60 ^{85}Kr-concentratie in de buitenlucht (1989-1-4)

In kernreactoren en opwerkingsbedrijven komt het edelgasisotoop ^{85}Kr vrij in de atmosfeer. Om de mate van blootstelling van de bevolking als gevolg van deze lozingen vast te stellen, wordt de ^{85}Kr-concentratie in de buitenlucht bepaald. Dit gebeurt door het krypton uit te vriezen.

Na destillatie wordt een monster van zuiver krypton verkregen, waarvan de activiteit door middel van γ-spectrometrie wordt bepaald. Het gemeten netto-teltempo bedraagt 89 telpulsen per uur.

Gegeven

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ^{85}Kr (zie Appendix, figuur 13)
- de buitenlucht bevat 4,2 mg krypton per m^3
- de massa van het kryptonmonster bedraagt 8,0 g
- het telrendement in de fotopiek bedraagt $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ telpulsen per desintegratie
- de orgaanweegfactoren (zie Appendix, figuur 47)
- volgens het submersiemodel wordt het equivalente dosistempo ten gevolge van een half-oneindige radioactieve gaswolk gegeven door de formule:

$$H_{\text{submersie}} = 2{,}5 \times 10^{-10}\, g \times E \times C$$

$H_{\text{submersie}}$	equivalente dosistempo (in Sv·h^{-1})
g	fractie van de straling die in het lichaam wordt geabsorbeerd
E	effectieve energie per desintegratie (in MeV per Bq·s)
C	activiteitsconcentratie in de gaswolk (in Bq·m^{-3})

Vragen

1 Bereken de ^{85}Kr-concentratie in de buitenlucht.

2 Bereken de effectieve dosis voor personen buitenshuis voor 2000 uren per jaar uitgaande van de effectieve dosiscoëfficiënt voor submersie.

3 Bereken de effectieve dosis voor personen buitenshuis voor 2000 uren per jaar uitgaande van de hier boven gegeven formule voor $H_{\text{submersie}}$. Verklaar het verschil met het resultaat van vraag 2.

4 Maak een schatting van de equivalente huiddosis voor personen buitenshuis voor 2000 uren per jaar.

Uitwerkingen

Vraagstuk 41

1 $1 / T_{½,eff} = 1 / T_{½,fys} + 1 / T_{½,biol}$
$= (1 / 2{,}696\ d) + (1 / 3\ d) = 0{,}704\ d^{-1}$
$T_{½,\,eff} = 1{,}42\ d = 1{,}23 \cdot 10^{5}\ s$
$U_S = A \times T_{½,eff} / 0{,}693$
$= 1 \cdot 10^{6}\ Bq \times 1{,}23 \cdot 10^{5}\ s / 0{,}693 = 1{,}77 \cdot 10^{11}\ Bq \cdot s$

2 volgens Appendix, figuur 46 $m_{lever} = 1800\ g$
$<E> = \sum Y \times E \times AF(lever \leftarrow lever)$
$AF(lever \leftarrow lever) = SAF(lever \leftarrow lever) \times m_{lever}$
elektronen: $AF(lever \leftarrow lever) = 1$
volgens figuur 1, "listed radiations" is $\sum Y_i \times E_i = 3{,}26 \cdot 10^{-1}$ MeV per Bq·s
$<E_\beta> = 3{,}26 \cdot 10^{-1}$ MeV per Bq·s $\times$ 1 = 0,326 MeV per Bq·s
fotonen: volgens figuur 1
$E_{\gamma 1} = 0{,}4118$ MeV $Y_{\gamma 1} \times E_{\gamma 1} = 3{,}93 \cdot 10^{-1}$ MeV per Bq·s
$E_{\gamma 2} = 0{,}6759$ MeV $Y_{\gamma 2} \times E_{\gamma 2} = 7{,}16 \cdot 10^{-3}$ MeV per Bq·s
$E_{\gamma 3} = 1{,}088$ MeV $Y_{\gamma 3} \times E_{\gamma 3} = 2{,}49 \cdot 10^{-3}$ MeV per Bq·s
lineair interpoleren in Appendix, figuur 48
412 keV $SAF(lever \leftarrow lever) = 8{,}84 \cdot 10^{-5}\ g^{-1}$
$AF = 8{,}84 \cdot 10^{-5}\ g^{-1} \times 1800\ g = 0{,}159$
676 keV $SAF(lever \leftarrow lever) = 8{,}58 \cdot 10^{-5}\ g^{-1}$
$AF = 8{,}58 \cdot 10^{-5}\ g^{-1} \times 1800\ g = 0{,}154$
1088 keV $SAF(lever \leftarrow lever) = 7{,}97 \cdot 10^{-5}\ g^{-1}$
$AF = 7{,}97 \cdot 10^{-5}\ g^{-1} \times 1800\ g = 0{,}143$
$<E_\gamma> = \sum Y \times E \times AF$
$= 3{,}93 \times 10^{-1}$ MeV per Bq·s $\times$ 0,159 +
$7{,}16 \times 10^{-3}$ MeV per Bq·s $\times$ 0,154 +
$2{,}49 \times 10^{-3}$ MeV per Bq s $\times$ 0,143 = 0,064 MeV per Bq·s
totaal $<E> = <E_\beta> + <E_\gamma> = 0{,}326$ MeV per Bq·s + 0,064 MeV per Bq·s
$= 0{,}390$ MeV per Bq·s

3 $SEE = <E> / m_{lever}$
$= 1 \times 0{,}390$ MeV per Bq·s / 1800 g $= 2{,}22 \cdot 10^{-4}$ MeV·g^{-1} per Bq·s

4 $H_{50,T} = 1{,}6 \cdot 10^{-10} \times U_S \times w_R \times SEE$
$= 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} $\times$ $1{,}77 \cdot 10^{11}$ Bq·s $\times$ 1 Sv·Gy^{-1} $\times$ $2{,}22 \cdot 10^{-4}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
$= 6{,}3 \cdot 10^{-3}$ Sv = 6,3 mSv

Vraagstuk 42

1 vervalconstante $\lambda = 0{,}693 / T_{½}$
$= 0{,}693 / (4{,}7 \cdot 10^{10}\ j \times 365\ d \cdot j^{-1} \times 24\ h \cdot d^{-1} \times 3600\ s \cdot h^{-1})$
$= 4{,}7 \times 10^{-19}\ s^{-1}$
aantal atomen per gram $N = (massa \times abundantie / atoomgewicht) \times N_{Avogadro}$
$= (1\ g \times 27{,}8 \cdot 10^{-2} / 85{,}5\ g \cdot mol^{-1}) \times 6{,}02 \cdot 10^{23}\ mol^{-1}$
$= 2{,}0 \times 10^{21}$ per gram natuurlijk rubidium
specifieke activiteit $\lambda \times N = 4{,}7 \cdot 10^{-19}\ s^{-1} \times 2{,}0 \cdot 10^{21}\ g^{-1}$
$= 9{,}4 \cdot 10^{2}\ Bq \cdot g^{-1} = 0{,}94\ Bq \cdot mg^{-1}$

2 jaarlijkse inname $A = 2{,}2\ mg \cdot d^{-1} \times 365\ d \cdot j^{-1} \times 0{,}94\ Bq \cdot mg^{-1} = 7{,}5 \cdot 10^{2}\ Bq \cdot j^{-1}$

3 $E_{50} = A \times e_{ing}(50) = 7{,}5 \cdot 10^{2}\ Bq \times 1{,}5 \cdot 10^{-9}\ Sv \cdot Bq^{-1} = 1{,}1 \cdot 10^{-6}\ Sv = 1{,}1\ \mu Sv$

4 de uitwisseling van rubidium wordt beschreven door de differentiaalvergelijking
$dm/dt + \lambda m = P$
in de evenwichtssituatie is $dm/dt = 0$, dus $\lambda m = P$
hoeveelheid rubidium die erin gaat $P = 2{,}2$ mg·d^{-1}
$T_{½,\text{eff}} >> T_{½,\text{biol}}$ $T_{½,\text{eff}} \approx T_{½,\text{biol}} = 44$ d
$\lambda = 0{,}693 / T_{½,\text{eff}} = 0{,}693 / 44$ d $= 0{,}016$ d^{-1}
hoeveelheid rubidium in lichaam $m = P / \lambda = 2{,}2$ mg·d^{-1} / 0,016 d^{-1} = 138 mg
activiteit in lichaam $A = 138$ mg × 0,94 Bq·mg^{-1} = 130 Bq
5 $U_S = A \times f_1 \times T_{½,\text{eff}} / 0{,}693 = 1$ Bq × 1 × 44 d / 0,693 = 63,5 Bq·d = $5{,}5 \cdot 10^6$ Bq·s
6 volgens Appendix, figuur 46 $m_{\text{totale lichaam}} = 70\,000$ g
$SEE = E_{\text{eff}} \times \text{AF} / m_{\text{totale lichaam}}$
= 0,112 MeV per Bq·s × 1 / 70 000 g = $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
7 $e_{\text{ing}}(50) = 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} × $U_S \times w_R \times SEE$
= $1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} × $5{,}5 \cdot 10^6$ Bq·s per Bq × 1 Sv·Gy^{-1} × $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
= $1{,}4 \cdot 10^{-9}$ Sv·Bq^{-1}

Vraagstuk 43

1 de effectieve halveringstijd is:
$1 / T_{½,\text{eff}} = (1 / 87{,}44$ d) + (1 / 140 d) = 0,0186 d^{-1} → $T_{½,\text{eff}} = 54$ d
$U_S = A \times f_1 \times T_{½,\text{ eff}} / 0{,}693 = 1$ Bq × 1 × 54 d / 0,693 = 78 Bq d = $6{,}7 \cdot 10^6$ Bq·s
2 volgens Appendix, figuur 46 $m_{\text{totale lichaam}} = 70\,000$ g
specifieke effectieve energie $SEE = E_{\text{eff}} / m_{\text{totale lichaam}}$
= 0,049 MeV per Bq·s / 70 000 g
= $7{,}0 \cdot 10^{-7}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
3 $E_{50} = 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} × $U_S \times w_R \times SEE$
= $1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} × $6{,}7 \cdot 10^6$ Bq·s per Bq × 1 Sv·Gy^{-1} × $7{,}0 \cdot 10^{-7}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
= $7{,}5 \cdot 10^{-10}$ Sv (per Bq inname)
4 $e(50) - E_{50} = 7{,}7 \cdot 10^{-10}$ Sv·Bq^{-1} - $7{,}5 \cdot 10^{-10}$ Sv·Bq^{-1} = $0{,}2 \cdot 10^{-10}$ Sv·Bq^{-1}
het verschil is toe te schrijven aan afrondingsfouten

Vraagstuk 44

1 de uitwisseling van zwavel wordt beschreven door de differentiaalvergelijking
$dm/dt + \lambda m = P$
in de evenwichtssituatie is $dm/dt = 0$, dus $\lambda m = P$
hoeveelheid zwavel die erin gaat $P = 700$ g·d^{-1} × 10^{-3} kg g^{-1} × 140 mg·kg^{-1} = 98 mg·d^{-1}
hoeveelheid zwavel die eruit gaat $\lambda m = \lambda \times 7700$ g × 10^{-3} kg·g^{-1} × 500 mg·kg^{-1}
= $3{,}85 \cdot 10^3 \lambda$ mg
$\lambda = P / m = 98$ mg·d^{-1} / $3{,}85 \cdot 10^3$ mg = 0,0255 d^{-1}
$T_{½,\text{biol}} = 0{,}693 / \lambda = 0{,}693 / 0{,}0255$ d^{-1} = 27 d
2 de effectieve halveringstijd is:
$1 / T_{½,\text{eff}} = (1 / 87{,}44$ d) + (1 / 27 d) = 0,0485 d^{-1} → $T_{½,\text{eff}} = 21$ d
$U_S = A \times f_1 \times T_{½,\text{eff}} / 0{,}693 = 1$ Bq × 1 × 21 d / 0,693 = 30 Bq·d = $2{,}6 \cdot 10^6$ Bq·s
3 $SEE = E_{\text{eff}} / m = 0{,}049$ MeV per Bq·s / 7700 g = $6{,}4 \cdot 10^{-6}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
4 $e_{\text{ing}}(50) = 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} × $U_S \times w_R \times SEE$
= $1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} × $2{,}6 \cdot 10^6$ Bq·s per Bq × 1 Sv·Gy^{-1} × $6{,}4 \cdot 10^{-6}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
= $2{,}7 \cdot 10^{-9}$ Sv·Bq^{-1}
dit is een factor $2{,}7 \cdot 10^{-9}$ Sv·Bq^{-1} / $7{,}7 \cdot 10^{-10}$ Sv·Bq^{-1} ≈ 3,5 groter dan voor een volwassene
dit ligt enerzijds aan de 70 000 g / 7700 g ≈ 9 keer kleinere lichaamsmassa (maakt de volgdosis groter) en anderzijds aan de 44 d / 21 d ≈ 2 keer kortere effectieve halveringstijd (maakt de volgdosis kleiner)

Vraagstuk 45

1 $T_{½,fys} >> T_{½,biol}$, dus $T_{½,eff} \approx T_{½,biol}$
$U_S = A \times f_1 \times (0{,}97 \times T_{½,eff,1} + 0{,}03 \times T_{½,eff,2}) / 0{,}693$
$= 1$ Bq $\times 1 \times (0{,}97 \times 10$ d $+ 0{,}03 \times 40$ d$) / 0{,}693 = 15{,}7$ Bq·d $= 1{,}4 \cdot 10^6$ Bq·s

2 volgens Appendix, figuur 46 $m_{\text{totale lichaam}} = 70\,000$ g
$SEE = E_{eff} / m_{\text{totale lichaam}}$
$= 0{,}0057$ MeV per Bq·s / 70 000 g $= 8{,}1 \cdot 10^{-8}$ MeV·g^{-1} per Bq·s

3 $e_{ing}(50) = 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} $\times U_S \times w_R \times SEE$
$= 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} $\times 1{,}4 \cdot 10^6$ Bq·s per Bq $\times 1$ Sv·Gy^{-1} $\times 8{,}1 \cdot 10^{-8}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
$= 1{,}8 \cdot 10^{-11}$ Sv·Bq^{-1}

Vraagstuk 46

1 $T_{½,fys} >> T_{½,biol}$, dus $T_{½,eff} \approx T_{½,biol}$
$U_S = A \times f_1 \times (0{,}97 \times T_{½,eff,1} + 0{,}03 \times T_{½,eff,2}) / 0{,}693$
$= 1$ Bq $\times 1 \times (0{,}97 \times 3{,}5$ d $+ 0{,}03 \times 15$ d$) / 0{,}693 = 5{,}55$ Bq·d $= 4{,}8 \cdot 10^5$ Bq·s

2 $SEE = E_{eff} / m$
$= 0{,}0057$ MeV per Bq·s / 9800 g $= 5{,}8 \cdot 10^{-7}$ MeV·g^{-1} per Bq·s

3 $e_{ing}(50) = 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} $\times U_S \times w_R \times SEE$
$= 1{,}6 \cdot 10^{-10}$ J·kg^{-1} per MeV·g^{-1} $\times 4{,}8 \cdot 10^5$ Bq·s per Bq $\times 1$ Sv·Gy^{-1} $\times 5{,}8 \cdot 10^{-7}$ MeV·g^{-1} per Bq·s
$= 4{,}5 \cdot 10^{-11}$ Sv·Bq^{-1}
dit is een factor $4{,}5 \cdot 10^{-11}$ Sv·Bq^{-1} / $1{,}8 \cdot 10^{-11}$ Sv·Bq^{-1} $\approx 2{,}5$ groter dan voor een volwassene

Vraagstuk 47

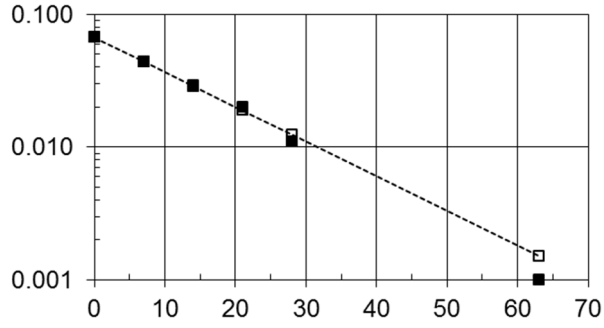
1 in de evenwichtssituatie zit de activiteit die per uur uit het basin ontsnapt in de lucht die per uur wordt geloosd
de activiteitsconcentratie is dus 30 MBq / 2000 m^3 $= 1{,}5 \cdot 10^4$ Bq·m^{-3}
in 2000 uur wordt geïnhaleerd 2000 h $\times 1{,}2$ m^3·h^{-1} $\times 1{,}5 \cdot 10^4$ Bq·m^{-3} $= 3{,}6 \cdot 10^7$ Bq
effectieve inname $A = (1 + 50 \cdot 10^{-2}) \times 3{,}6 \cdot 10^7$ Bq $= 5{,}4 \cdot 10^7$ Bq
$E_{50} = A \times e(50) = 5{,}4 \cdot 10^7$ Bq $\times 1{,}8 \cdot 10^{-11}$ Sv·Bq^{-1} $= 9{,}7 \cdot 10^{-4}$ Sv $= 0{,}97$ mSv

2 activiteitsinname per dag (8 h·d^{-1} / 2000 h) $\times 5{,}4 \cdot 10^7$ Bq $= 2{,}2 \cdot 10^5$ Bq·d^{-1}
totale wateruitwisseling per dag 1,4 l·d^{-1} + 0,65 l·d^{-1} + 0,95 l·d^{-1} = 3,0 l·d^{-1} = $3{,}0 \cdot 10^3$ ml·d^{-1}
activiteitsconcentratie in uitgescheiden water (dus ook in de urine):
$2{,}2 \cdot 10^5$ Bq·d^{-1} / $3{,}0 \cdot 10^3$ ml·d^{-1} $= 73$ Bq·ml^{-1}

Vraagstuk 48

1 activiteit volgt uit $N_{netto} = N_{bruto} - N_{blanco}$
$= A \times$ telrendement $\times$ teltijd
$= A \times 40 \cdot 10^{-2} \times 1$ min $\times 60$ s·min$^{-1} = 24$ A
$A = N_{netto} / 24$
activiteitsconcentratie $a = A / 8$ ml $= N_{netto} / 192$ ml
invullen van gegevens in spreadsheet + lineaire regressie levert $T_{½,biol} = 11{,}5(2)$ d

t (d)	N_{bruto} (tpm)	N_{netto} (tpm)	*a* (Bq·ml^{-1})
0	14,0	12,8	0,067
7	9,6	8,4	0,044
14	6,8	5,6	0,029
21	5,0	3,8	0,020
28	3,4	2,2	0,011
63	1,4	0,2	0,001



2 activiteitsconcentratie voor verwijdering 0,067 Bq·ml^{-1}
totale wateruitwisseling per dag 1,4 l·d^{-1} + 0,65 l·d^{-1} + 0,95 l·d^{-1} = 3,0 l·d^{-1} = 3000 ml·d^{-1}
activiteitsuitwisseling A = 3000 ml·d^{-1} × 0,067 Bq·ml^{-1} = 201 Bq·d^{-1} = 7,3·10^{4} Bq·j^{-1}
$E_{50} = A \times e(50)$ = 7,3·10^{4} Bq × 1,8·10^{-11} Sv·Bq^{-1} = 1,3·10^{-6} Sv = 1,3 µSv
3 na eenmalige inname bevat lichaam 42 l water met activiteitsconcentratie 0,067 Bq·ml^{-1}
A = 42 l × 10^{3} ml·l^{-1} × 0,067 Bq·ml^{-1} = 2,8·10^{3} Bq
$E_{50} = A \times e(50)$ = 2,8·10^{3} Bq × 1,8·10^{-11} Sv·Bq^{-1} = 5,0·10^{-8} Sv = 0,05 µSv

Vraagstuk 49

1 netto-teltempo voor 1 ml water 80 tpm·ml^{-1} - 20 tpm·ml^{-1} = 60 tpm·ml^{-1} = 1,0 tps·ml^{-1}
activiteitsconcentratie in het water 1,0 tps·ml^{-1} / 25·10^{-2} = 4,0 Bq·ml^{-1} = 4,0 Bq·g^{-1}
2 bij een relatieve luchtvochtigheid van 80% bevat de lucht:
80·10^{-2} × 22 g·m^{-3} = 17,6 g·m^{-3} water
activiteitsconcentratie in de lucht 4,0 Bq·g^{-1} × 17,6 g·m^{-3} = 70 Bq·m^{-3}
3 ingeademde activiteit 2000 h × 1,2 m^{3}·h^{-1} × 70 Bq·m^{-3} = 1,7·10^{5} Bq
effectieve inname A = (1 + 50·10^{-2}) × 1,7·10^{5} Bq = 2,6·10^{5} Bq
effectieve volgdosis $A \times e(50)$ = 2,6·10^{5} Bq × 1,8·10^{-11} Sv·Bq^{-1} = 4,7·10^{-6} Sv = 4,7 µSv
4 netto-teltempo 50 tpm - 20 tpm = 30 tpm = 0,50 tps per 10 ml
activiteitsconcentratie urine 0,50 tps per 10 ml / 25·10^{-2} = 2,0 Bq per 10 ml = 200 Bq·l^{-1}
5 de activiteitsconcentratie in het lichaamswater is gelijk aan die in de urine
totale lichaamsactiviteit 200 Bq·l^{-1} × 42 l = 8,4·10^{3} Bq
6 effectieve volgdosis 8,4·10^{3} Bq × 4,4·10^{-10} Sv·j^{-1} per Bq = 3,7·10^{-6} Sv·j^{-1} = 3,7 µSv·j^{-1}

Vraagstuk 50

1 volgens Appendix, figuur 3
$R(t)$ = 0,15 e$^{-0,693\ t/0,5}$ + 0,15 e$^{-0,693\ t/2}$ + 0,40 e$^{-0,693\ t/19}$ + 0,30
(alle biologische halveringstijden in d)
2 AMAD = 1 ET_1 doet niet mee
ET_2 = 0,21
BB + bb + AI = 0,0066 + 0,0058 + 0,0084 + 0,0081 + 0,11 = 0,14
voor klasse F 50% van ET_2 gaat rechtstreeks naar TC
50% van ET_2 gaat naar maag-darmkanaal, waarvan f_1 = 0,8 naar TC
100% van BB + bb + AI gaat naar TC
totaal naar TC 50·10^{-2} × 0,21 + 50·10^{-2} × 0,21 × 0,8 + 100·10^{-2} × 0,14 = 0,33
invullen retentieformule $R(0) = 1$, $R(1)$ = 0,8293 , $R(2)$ = 0,7563 en $R(3)$ = 0,7139
uitscheiding eerste dag $R(0) - R(1)$ = 1 - 0,8293 = 0,171
uitscheiding tweede dag $R(1) - R(2)$ = 0,8293 - 0,7563 = 0,073
uitscheiding derde dag $R(2) - R(3)$ = 0,7563 - 0,7139 = 0,042
tijdens uitscheiding vervalt de activiteit volgens $C(t)$ = e$^{-0,693\ t/14,29}$
invullen vervalscorrectie $C(1)$ = 0,953, $C(2)$ = 0,908 en $C(3)$ = 0,865
eerste dag 0,33 × 0,171 × 0,953 × inname = 0,054 × inname = 1980 Bq
inname = 1980 Bq / 0,054 = 3,67·10^{4} Bq
tweede dag 0,33 × 0,073 × 0,908 × inname = 0,022 × inname = 820 Bq
inname = 820 Bq / 0,022 = 3,73·10^{4} Bq

derde dag $0{,}33 \times 0{,}042 \times 0{,}865 \times \text{inname} = 0{,}012 \times \text{inname} = 436$ Bq
$\text{inname} = 436 \text{ Bq} / 0{,}012 = 3{,}63 \cdot 10^4$ Bq
gemiddelde inhalatie $\langle A_{inh} \rangle = (3{,}67 \cdot 10^4 + 3{,}73 \cdot 10^4 + 3{,}63 \cdot 10^4) / 3$ Bq $= 3{,}7 \cdot 10^4$ Bq
effectieve volgdosis $E_{50} = \langle A_{inh} \rangle \times e(50)_{inh}$
$= 3{,}7 \cdot 10^4$ Bq $\times 1{,}1 \cdot 10^{-9}$ Sv·Bq^{-1} $= 4{,}1 \cdot 10^{-5}$ Sv $= 41$ µSv

3 50% van ET_2 gaat naar maag-darmkanaal, waarvan $1 - f_1 = 0{,}2$ via faeces uitgescheiden
invullen vervalscorrectie $C(5) = 0{,}785$
activiteit in faeces:
$50 \cdot 10^{-2} \times 0{,}21 \times 0{,}2 \times 0{,}785 \times \text{inname} = 0{,}0165 \times \text{inname} = 500$ Bq
$\text{inname} = 500 \text{ Bq} / 0{,}0165 = 3{,}0 \cdot 10^4$ Bq
effectieve volgdosis $\text{inname} \times e(50) = 3{,}0 \cdot 10^4$ Bq $\times 1{,}1 \cdot 10^{-9}$ Sv·Bq^{-1}
$= 3{,}3 \cdot 10^{-5}$ Sv $= 33$ µSv

4 totaal naar TC 0,33
in het ongunstigste geval vindt de inname plaats op de eerste dag van de maand
invullen retentieformule $R(29) = 0{,}4389$, $R(30) = 0{,}4339$ (alleen laatste 2 termen)
uitscheiding $R(29) - R(30) = 0{,}4389 - 0{,}4339 = 0{,}005$
vervalscorrectie $C(30) = 0{,}233$
activiteit $0{,}33 \times 0{,}005 \times 0{,}233 \times \text{iname} = 0{,}0004 \times \text{inname}$
detectielimiet 5 Bq·l^{-1} × 1,4 l·d^{-1} × 12 d·j^{-1} = 84 Bq·j^{-1} (12 keer per jaar gemeten)
maximale inname $84 \text{ Bq·j}^{-1} / 0{,}0004 = 2{,}1 \cdot 10^5$ Bq·j^{-1}
maximale volgdosis $2{,}1 \cdot 10^5$ Bq $\times 1{,}1 \cdot 10^{-9}$ Sv·Bq^{-1} $= 2{,}3 \cdot 10^{-4}$ Sv $= 0{,}23$ mSv

Vraagstuk 51

1 $T_{½,fys} >> T_{½,biol}$, dus $T_{½,eff} \approx T_{½,biol}$
uitscheiding is evenredig met gemeten netto-teltempo
$T(14) = T(0) \times e^{-0{,}693 \times 14 / T_{½,biol}}$
$T_{½,biol} = 0{,}693 \times 14 \text{ d} / \ln[T(0) / T(14)]$
$= 0{,}693 \times 14 \text{ d} / \ln(11\,520 \text{ tpm} / 5130 \text{ tpm}) = 0{,}693 \times 14 \text{ d} / 0{,}809 = 12$ d

2 teltempo (in tpm) = activiteit (in Bq) × telrendement × teltijd (in s)
$= A(t) \times 80 \cdot 10^{-2} \times 60 \text{ s} = 48\, A(t)$
activiteit in 8 ml urine $A(0) = 11\,520 \text{ tpm} / 48 = 240$ Bq
activiteit in 1,4 l urine $240 \text{ Bq} \times (1{,}4 \text{ l} \times 10^3 \text{ ml·l}^{-1} / 8 \text{ ml}) = 4{,}2 \cdot 10^4$ Bq
bij een verbinding van klasse F en $f_1 = 1$ wordt alle gedeponeerde activiteit in TC opgenomen
invullen retentieformule $R(0) = 1$ en $R(1) = e^{-0{,}693 \times 1/12} = 0{,}944$
afname retentie $R(0) - R(1) = 1 - 0{,}944 = 0{,}056$
uitscheiding per Bq inname = longdepositie × afname retentie
$= 48 \cdot 10^{-2} \times 0{,}056 = 0{,}027$ Bq·d^{-1} per Bq inname
inname $4{,}2 \cdot 10^4 \text{ Bq} / 0{,}027 = 1{,}6 \cdot 10^6$ Bq

3 effectieve volgdosis $E_{50} = A(0) \times e(50)$
$= 1{,}6 \cdot 10^6$ Bq $\times 4{,}9 \cdot 10^{-10}$ Sv·Bq^{-1} $= 7{,}8 \cdot 10^{-4}$ Sv $= 0{,}8$ mSv

Vraagstuk 52

1 de afname van de longactiviteit gedurende de eerste dag is ongeveer 20%
- voor klasse F is er 100% snelle afvoer naar TC
  de verbinding kan dus niet van klasse F zijn
- voor klasse M is er 10% snelle afvoer naar TC
  daarnaast voert de snelle component BB_{fast}+bb_{fast} van de mechanische longreiniging een deel via ET_2 af naar het maag-darmkanaal
  het kan dus wel klasse M zijn
- voor klasse S is er 0,1% snelle snelle afvoer TC plus de snelle mechanische reiniging
  klasse S kan dus ook

volgens de beide laatste metingen is de activiteit in de longen in 30 dagen afgenomen met een factor:

$e^{-0{,}693\times 30/T_{½,\mathrm{eff}}} = 0{,}48$ kBq / 1,30 kBq = 1 / 2,71

$T_{½,\mathrm{eff}} = 0{,}693 \times 30$ d / ln(2,71) = 21 d

$1 / T_{½,\mathrm{biol}} = 1 / T_{½,\mathrm{eff}} - 1 / T_{½,\mathrm{fys}} = (1 / 21\text{ d}) - (1 / 27{,}71\text{ d}) = 0{,}0115\text{ d}^{-1}$

$T_{½,\mathrm{biol}} = 1 / 0{,}0115\text{ d}^{-1} = 87$ d

dit is redelijk in overeenstemming met de langzame verwijderingstijd voor klasse M (140 d), maar niet met die voor klasse S (7000 d); het moet dus wel een verbinding van klasse M zijn

2 AMAD = 5 BB + bb + AI = 0,012 + 0,0059 + 0,0066 + 0,0044 + 0,053 = 0,082
na 1 uur is hiervan alleen de langzame component van 90% over
volgens de eerste meting was de inname dus ongeveer

$A = 1{,}64\text{ kBq} / (90\cdot 10^{-2} \times 0{,}082) = 22\text{ kBq} = 2{,}2\cdot 10^{4}$ Bq

3 effectieve volgdosis $E_{50} = A \times e(50)$
$= 2{,}2\cdot 10^{4}\text{ Bq} \times 3{,}4\cdot 10^{-11}\text{ Sv·Bq}^{-1} = 7{,}5\cdot 10^{-7}\text{ Sv} = 0{,}75\ \mu\text{Sv}$

Vraagstuk 53

1 gegeven is de effectieve dosiscoëfficiënt voor wondbesmetting $e(50) = 8{,}4\cdot 10^{-11}$ Sv·Bq^{-1}
ingespoten activiteit $A(0) = 200\text{ MBq} = 2{,}0\cdot 10^{8}$ Bq
effectieve volgdosis $E_{50} = A(0) \times e_{\mathrm{wond}}(50)$
$= 2{,}0\cdot 10^{8}\text{ Bq} \times 8{,}4\cdot 10^{-11}\text{ Sv·Bq}^{-1} = 1{,}7\cdot 10^{-2}\text{ Sv} = 17\text{ mSv}$

2 gegeven is de retentieformule $R(t) = 0{,}3\ e^{-0{,}693\ t/1} + 0{,}7\ e^{-0{,}693\ t/50}$ (halveringstijden in d)
gegeven is $T_{½,\mathrm{fys}} = 78{,}23\text{ h} = 3{,}26$ d
resterende fractie na 72 h = 3 d $R(3) = 0{,}3\ e^{-0{,}693\times 3/1} + 0{,}7\ e^{-0{,}693\times 3/50} = 0{,}709$
intussen vervalt de activiteit volgens $C(3) = e^{-0{,}693\times 3/3{,}26} = 0{,}528$
resterende activiteit $A(3) = R(3) \times C(3) \times A(0) = 0{,}709 \times 0{,}528 \times 200\text{ MBq} = 75\text{ MBq}$

3 volgens de gevens behoort galliumcitraat tot klasse F
voor deze klasse is $e_{\mathrm{inh}}(50) = 1{,}1\cdot 10^{-10}$ Sv·Bq^{-1} en is 1 dag na inhalatie nog een fractie $4{,}3\cdot 10^{-1}$ van de geïnhaleerde activiteit in het lichaam aanwezig
gemeten activiteit 8500 Bq
inhalatie $A = 8500\text{ Bq} / 4{,}3\cdot 10^{-1} = 2{,}0\cdot 10^{4}$ Bq
effectieve volgdosis $E_{50} = A \times e_{\mathrm{inh}}(50)$
$= 2{,}0\cdot 10^{4}\text{ Bq} \times 1{,}1\cdot 10^{-10}\text{ Sv·Bq}^{-1} = 2{,}2\cdot 10^{-6}\text{ Sv} = 2{,}2\ \mu\text{Sv}$

Vraagstuk 54

1 effectieve volgdosis $E_{50} = A \times e_{\mathrm{injectie}}(50)$
$= 600\cdot 10^{6}\text{ Bq} \times 6{,}0\cdot 10^{-12}\text{ Sv·Bq}^{-1} = 3{,}6\cdot 10^{-3}\text{ Sv} = 3{,}6\text{ mSv}$

2 vergelijk de twee situaties
- bij een patiënt die zelf geen urine produceert zal het bloed niet gezuiverd worden van afvalstoffen, zodat de activiteit die niet in het bot is opgenomen pas 2 dagen later bij de volgende nierdialyse zal worden uitgescheiden
  de toegediende activiteit zal het lichaam niet (biologisch) verlaten en vervalt met de fysische halveringstijd van 6,0 h
- tijdens de dialyse wordt het bloed wel gezuiverd en zal de activiteit in de nierpatiënt afnemen met een effectieve halveringstijd van 2,8 h
  conclusie: dezelfde activiteit $^{99\mathrm{m}}$Tc zal bij toediening na dialyse een hogere effectieve dosis veroorzaken dan bij toediening vlak voor dialyse

Vraagstuk 55

1 de uitwisseling van cesium wordt beschreven door de differentiaalvergelijking:
$dA/dt + \lambda A = P$
P is de inname, λ is de biologische vervaltijd
de oplossing is $A(t) = (P / \lambda) \times (1 - e^{-\lambda t})$
$\lambda = 0{,}693 / T_{½,biol} = 0{,}693 / 110\ d = 6{,}3 \cdot 10^{-3}\ d^{-1} = 2{,}3\ j^{-1}$
verzadigingsactiviteit ($t = \infty$) $A(\infty) = P / \lambda$
activiteit na 1 jaar $A(1\ j) = A(\infty) \times (1 - e^{-2{,}3 \times 1}) = A(\infty) \times (1 - 0{,}10) = 0{,}90\ A(\infty)$
$A(\infty) = A(1\ j) / 0{,}90 = 520\ Bq / 0{,}90 = 578\ Bq$

2 in de evenwichtssituatie is $dA/dt = 0$, dus $\lambda A(\infty) = P$
dagelijkse inname cesium $P = \lambda A(\infty) = 6{,}3 \cdot 10^{-3}\ d^{-1} \times 578\ Bq = 3{,}64\ Bq \cdot d^{-1}$

3 jaarlijkse inname cesium $365\ d \times 3{,}64\ Bq \cdot d^{-1} = 1{,}3 \cdot 10^{3}\ Bq$
effectieve volgdosis $E_{50} = A \times e_{ing}(50)$
$= 1{,}3 \cdot 10^{3}\ Bq \times 1{,}3 \cdot 10^{-8}\ Sv \cdot Bq^{-1}$
$= 1{,}7 \cdot 10^{-5}\ Sv = 17\ \mu Sv$

Vraagstuk 56

1 $R(t) = 0{,}20\ e^{-0{,}693\ t/0{,}25} + 0{,}76\ e^{-0{,}693\ t/8} + 0{,}04\ e^{-0{,}693\ t/200}$
(alle biologische halveringstijden in d)
invullen retentieformule $R(0) = 1$ en $R(1) = 0{,}75$
uitscheiding eerste dag $R(0) - R(1) = 1 - 0{,}75 = 0{,}25$
tijdens uitscheiding vervalt de activiteit volgens $C(t) = e^{-0{,}693\ t/4{,}02}$
invullen vervalscorrectie $C(1) = 0{,}84$
uitgescheiden activiteit $A_{ing} \times f_1 \times [R(0) - R(1)] \times C(1) = A_{ing} \times 0{,}01 \times 0{,}25 \times 0{,}84$
$= 0{,}0021\ A_{ing}$
$= 1{,}4\ l \times 25\ Bq \cdot l^{-1} = 35\ Bq$
inname $A_{ing} = 35\ Bq / 0{,}0021 = 17 \cdot 10^{3}\ Bq$
effectieve volgdosis $E_{50} = A_{ing} \times e_{ing}(50)$
$= 17 \cdot 10^{3}\ Bq \times 6{,}3 \cdot 10^{-10}\ Sv \cdot Bq^{-1} = 1{,}1 \cdot 10^{-5}\ Sv = 11\ \mu Sv$

2 AMAD = 1 ET_1 doet niet mee
$ET_2 = 0{,}21$
$BB + bb + AI = 0{,}0066 + 0{,}0058 + 0{,}0084 + 0{,}0081 + 0{,}11 = 0{,}139$
klasse F van ET_2 gaat 50% naar TC en 50% naar het maag-darmkanaal
(voor beide processen is de halveringstijd 10 min)
vanuit maag-darmkanaal gaat $f_1 = 0{,}01$ alsnog naar TC
van BB + bb + AI gaat 100% naar TC
totaal TC $50 \cdot 10^{-2} \times 0{,}21 + 50 \cdot 10^{-2} \times 0{,}21 \times 0{,}01 + 100 \cdot 10^{-2} \times 0{,}139 = 0{,}245$
uitgescheiden activiteit $A_{inh} \times 0{,}245 \times [R(0) - R(1)] \times C(1) = A_{inh} \times 0{,}245 \times 0{,}25 \times 0{,}84$
$= 0{,}051\ A_{inh}$
$= 35\ Bq$
inname $A_{inh} = 35\ Bq / 0{,}051 = 0{,}69 \cdot 10^{3}\ Bq$
effectieve volgdosis $E_{50} = A_{inh} \times e_{inh}(50)$
$= 0{,}69 \cdot 10^{3}\ Bq \times 1{,}9 \cdot 10^{-10}\ Sv \cdot Bq^{-1} = 1{,}3 \cdot 10^{-7}\ Sv = 0{,}13\ \mu Sv$

Vraagstuk 57

1 maak gebruik van de activiteitsconcentraties in de urine na ingestie en na inhalatie (zie gegevens); hieruit volgt inname = gemeten activiteit / concentratie

1 d concentratie = $3{,}0\cdot10^{-5}$ Bq·d^{-1} per Bq
ingestie = 0,22 Bq d^{-1} / $3{,}0\cdot10^{-5}$ Bq·d^{-1} per Bq = $0{,}7\cdot10^{4}$ Bq

2 d concentratie = $4{,}8\cdot10^{-6}$ Bq·d^{-1} per Bq
ingestie = 0,16 Bq d^{-1} / $4{,}8\cdot10^{-6}$ Bq·d^{-1} per Bq = $3{,}3\cdot10^{4}$ Bq

3 d concentratie = $2{,}2\cdot10^{-6}$ Bq·d^{-1} per Bq
ingestie = 0,11 Bq d^{-1} / $2{,}2\cdot10^{-6}$ Bq·d^{-1} per Bq = $5{,}0\cdot10^{4}$ Bq

gemiddelde waarde $\langle A_{ing}\rangle = (0{,}7 + 3{,}3 + 5{,}0)\cdot10^{4} / 3$ Bq = $3{,}0\cdot10^{4}$ Bq

effectieve volgdosis $E_{50} = \langle A_{ing}\rangle \times e_{ing}(50)$
$= 3{,}0\cdot10^{4}$ Bq × $2{,}0\cdot10^{-7}$ Sv·Bq^{-1} = $6{,}0\cdot10^{-3}$ Sv = 6 mSv

2 maak gebruik van de activiteitsconcentratie in de urine na inhalatie (zie gegevens) hieruit volgt inhalatie = gemeten activiteit / concentratie

1 d concentratie = $1{,}8\cdot10^{-3}$ Bq·d^{-1} per Bq
inhalatie = 0,22 Bq·d^{-1} / $1{,}8\cdot10^{-3}$ Bq·d^{-1} per Bq = $1{,}2\cdot10^{2}$ Bq

2 d concentratie = $2{,}3\cdot10^{-4}$ Bq·d^{-1} per Bq
inhalatie = 0,16 Bq·d^{-1} / $2{,}3\cdot10^{-4}$ Bq·d^{-1} per Bq = $7{,}0\cdot10^{2}$ Bq

3 d concentratie = $1{,}3\cdot10^{-4}$ Bq·d^{-1} per Bq
inhalatie = 0,11 Bq·d^{-1} / $1{,}3\cdot10^{-4}$ Bq·d^{-1} per Bq = $8{,}5\cdot10^{2}$ Bq

gemiddelde waarde $\langle A_{inh}\rangle = (1{,}2 + 7{,}0 + 8{,}5)\cdot10^{2} / 3$ Bq = $5{,}6\cdot10^{2}$ Bq

effectieve volgdosis $E_{50} = \langle A_{inh}\rangle \times e_{inh}(50)$
$= 5{,}6\cdot10^{2}$ Bq × $2{,}7\cdot10^{-5}$ Sv·Bq^{-1} = $1{,}5\cdot10^{-2}$ Sv = 15 mSv

Vraagstuk 58

1 uitgescheiden activiteit $A_{ing} \times f_1 \times 10\cdot10^{-2} = A_{ing} \times 5\cdot10^{-4} \times 10\cdot10^{-2} = 5\cdot10^{-5}\, A_{ing}$
$= 2{,}8$ l × 0,15 Bq·l^{-1} = 0,42 Bq

inname $A_{ing} = 0{,}42$ Bq / $5\cdot10^{-5} = 8{,}4\cdot10^{3}$ Bq

effectieve volgdosis $E_{50} = A_{ing} \times e_{ing}(50)$
$= 8{,}4\cdot10^{3}$ Bq × $2{,}0\cdot10^{-7}$ Sv·Bq^{-1} = $1{,}7\cdot10^{-3}$ Sv = 1,7 mSv

let wel: bij de berekening van de $e_{inh}(50)(w)$ voor werkers wordt uitgegaan van AMAD = 5 en bij de berekening van de $e_{inh}(50)(b)$ voor de bevolking van AMAD = 1

2 AMAD = 1 ET_1 doet niet mee
$ET_2 = 0{,}21$
BB + bb + AI = 0,0066 + 0,0058 + 0,0084 + 0,0081 + 0,11 = 0,139

type M van ET_2 gaat de helft van 10% naar TC en de andere helft naar het maag-darmkanaal (snelle bloedopname en mechanische reiniging hebben beide een halveringstijd van 10 min), en 90% in zijn geheel naar het maag-darmkanaal (mechanische reiniging wint het van de langzame opname in het bloed)
vanuit het maag-darmkanaal gaat $f_1 = 5\cdot10^{-4}$ alsnog naar TC
van BB+bb+AI gaat 10% naar TC

totaal TC $0{,}21 \times [10\cdot10^{-2} \times 0{,}5 \times (1+ 5\cdot10^{-4}) + 90\cdot10^{-2} \times 5\cdot10^{-4}] + 0{,}139 \times 10\cdot10^{-2}$
$= 0{,}0245$

uitgescheiden activiteit $A_{inh} \times 0{,}0245 \times 10\cdot10^{-2} = 2{,}45\cdot10^{-3}\, A_{inh}$
$= 0{,}42$ Bq

inname $A_{inh} = 0{,}42$ Bq / $2{,}45\cdot10^{-3} = 1{,}7\cdot10^{2}$ Bq

effectieve volgdosis $E_{50} = A_{inh} \times e_{inh}(50)$
$= 1{,}7\cdot10^{2}$ Bq × $3{,}9\cdot10^{-5}$ Sv·Bq^{-1} = $6{,}6\cdot10^{-3}$ Sv = 6,6 mSv

3 AMAD = 5 ET_1 doet niet mee
$ET_2 = 0{,}40$
$BB + bb + AI = 0{,}012 + 0{,}0059 + 0{,}0066 + 0{,}0044 + 0{,}053 = 0{,}082$
totaal TC $0{,}40 \times [10\times10^{-2} \times 0{,}5 \times (1 + 5\cdot10^{-4}) + 90\cdot10^{-2} \times 5\cdot10^{-4}] + 0{,}082 \times 10\cdot10^{-2}$
$= 0{,}0282$
uitgescheiden activiteit $0{,}42$ Bq $= A_{inh} \times 0{,}0282 \times 10\cdot10^{-2} = 2{,}82\cdot10^{-3} A_{inh}$
inname $A_{inh} = 0{,}42$ Bq $/ 2{,}82\times10^{-3} = 149$ Bq
effectieve volgdosis $E_{50} = A_{inh} \times e_{inh}(50)$
$= 149$ Bq $\times 2{,}7\cdot10^{-5}$ Sv·Bq^{-1} $= 4{,}0\cdot10^{-3}$ Sv $= 4{,}0$ mSv

Vraagstuk 59

1 de uitwisseling van krypton met de buitenwereld wordt beschreven door de differentiaalvergelijking:
$dA/dt + \lambda A = P$
A (in Bq) = activiteitsconcentratie (in Bq·m^{-3}) × ruimtevolume (in m^3)
λ = ventilatievoud = ruimtevolumes per uur (in h^{-1}) = 1 h^{-1}
P = lek = 40 MBq·h^{-1} = $40\cdot10^6$ Bq·h^{-1}
in evenwicht is $dA/dt = 0$ $A = P / \lambda = 40\cdot10^6$ Bq·h^{-1} / 1 h^{-1} = $40\cdot10^6$ Bq
activiteitsconcentratie $a = 40\cdot10^6$ Bq $/ 500$ m^3 = $8\cdot10^4$ Bq·m^{-3}
equivalente dosistempo $dH/dt = a \times e$
$= 8\cdot10^4$ Bq·m^{-3} × $9{,}2\cdot10^{-13}$ Sv·h^{-1} per Bq·m^{-3}
$= 7{,}4\cdot10^{-8}$ Sv·h^{-1} = 74 nSv·h^{-1}

Vraagstuk 60

1 aantal telpulsen $N = A \times$ emisiewaarschijnlijkheid × telrendement × t
$= A \times 0{,}43\cdot10^{-2} \times 2{,}5\cdot10^{-3} \times 3600$ s $= 0{,}0387 A$
$= 89$ telpulsen
gemeten activiteit $A = 89 / 0{,}0387 = 2{,}3\cdot10^3$ Bq
bemonsterd volume $V = (8{,}0$ g $\times 10^3$ g·mg$^{-1}) / 4{,}2$ mg·m^{-3} = $1{,}9\cdot10^3$ m^3 lucht
activiteitsconcentratie $C = A / V = 2{,}3\cdot10^3$ Bq $/ 1{,}9\cdot10^3$ m^3 = 1,2 Bq·m^{-3}
2 effectieve jaardosis $E = C \times e \times t$
$= 1{,}2$ Bq·m^{-3} × $9{,}2\cdot10^{-13}$ Sv·h^{-1} per Bq·m^{-3} × 2000 h·j^{-1}
$= 2{,}2\cdot10^{-9}$ Sv·j^{-1} = 2,2 nSv·j^{-1}
3 energie per Bq·s $f_\beta E_\beta + f_\gamma E_\gamma = 0{,}996 \times 0{,}251$ MeV $+ 0{,}0043 \times 0{,}514$ MeV
$= 0{,}250$ MeV $+ 0{,}002$ MeV
equivalente dosistempo $dH/dt = 2{,}5\cdot10^{-10}\, g\, C\, E$
$= 2{,}5\cdot10^{-10} \times 1{,}2$ Bq·m^{-3} × ($g_\beta \times 0{,}250$ MeV $+ g_\gamma \times 0{,}002$ MeV)
$= (7{,}6\cdot10^{-11}\, g_\beta + 6{,}0\cdot10^{-13}\, g_\gamma)$ Sv·h^{-1}
effectieve jaardosis $E = 2000$ h·j^{-1} × $(7{,}6\cdot10^{-11}\, g_\beta + 6{,}0\cdot10^{-13}\, g_\gamma)$ Sv·h^{-1}
$= (1{,}5\cdot10^{-7}\, g_\beta + 1{,}2\cdot10^{-7}\, g_\gamma)$ Sv·j^{-1} = $(150\, g_\beta + 1{,}2\, g_\gamma)$ nSv·j^{-1}
het verschil met het resultaat van vraag 2 is als volgt te begrijpen:

- de effectieve dosis wordt vooral bepaald door de diep doordringende γ-straling, waarvoor $g_\gamma \approx 0{,}7$ (zie de waarden van AF voor $E_\gamma = 0{,}514$ MeV), maar de γ-straling draagt slechts voor ongeveer 1% bij aan de energiedepositie
- de huiddosis wordt vooral bepaald door de niet diep doordringende β-straling, waarvoor $g_\beta \approx 1$, maar de huid draagt slechts voor $w_{huid} = 1\%$ bij tot de effectieve dosis

4 stel g_β = 1,0 voor β-straling:
dan wordt de huiddosis $H_{huid} = 1{,}0 \times 150\ nSv \cdot j^{-1} = 150\ nSv \cdot j^{-1}$
bijdrage β-straling tot effectieve dosis $w_{huid} \times H_{huid} = 0{,}01 \times 150\ nSv \cdot j^{-1} = 1{,}5\ nSv \cdot j^{-1}$
bijdrage γ-straling tot effectieve dosis $2{,}2\ nSv \cdot j^{-1} - 1{,}5\ nSv \cdot j^{-1} = 0{,}7\ nSv \cdot j^{-1}$
stel g_γ = 0,7 voor γ-straling:
bijdrage γ-straling tot effectieve dosis $0{,}7 \times 1{,}2\ nSv \cdot j^{-1} = 0{,}84\ nSv \cdot j^{-1}$
bijdrage β-straling tot effectieve dosis $2{,}2\ nSv \cdot j^{-1} - 0{,}84\ nSv \cdot j^{-1} = 1{,}36\ nSv \cdot j^{-1}$
beide analyses komen redelijk met elkaar overeen

merk op: de (verouderde) DAC-waardes leveren een effectieve dosis van 1,2 $nSv \cdot j^{-1}$ voor het lichaam en een equivalente orgaandosis van 120 $nSv \cdot j^{-1}$ voor het kritische orgaan (= huid)

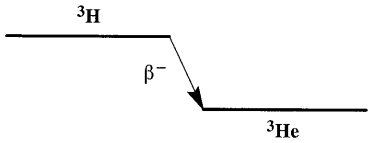
APPENDIX

^3H Z = 1 N = 2 ^3H

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 12,35 j = 3,90×10^8 s λ = 1,78×10^{-9} s^{-1}

Vervalschema



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	5,7 | 18,6

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 3,57×10^{14} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^6 Bq/g en A_v = 10^9 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} < 10^{-14} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	e(50) = 1,8×10^{-11} Sv/Bq (water)
Wondbesmetting; Injectie	e(50) = 4,1×10^{-11} Sv/Bq (organisch)
Vervoer	A_1 = 40 TBq
	A_2 = 40 TBq

Productie en toepassingen

Tritium wordt geproduceerd door bestraling van lithium met neutronen: ^{6}Li(n,α)^{3}H. Tritium ontstaat ook op natuurlijke wijze. Het wordt gevormd in de buitenste lagen van de atmosfeer, door interactie van kosmische straling met stikstof, voornamelijk via de reactie ^{14}N(n,^{3}H)^{12}C. 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 belangrijkst:
– tritium-houdende trefplaat voor neutronengenerator via D,T-reactie;
– als lichtbron (o.a. EXIT-bord en horloge): β-light;
– als grondstof voor thermonucleaire reactie (waterstofbom)
– als merker van biologische verbindingen, o.a. voor geneesmiddelenonderzoek
– als merker bij geologische onderzoekingen, o.a. bij olie-exploratie
– als bron in een electroncapture-detector.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat tritium bij inhalatie en ingestie volledig en instantaan in het lichaam wordt opgenomen. Verder wordt het ook via de intacte huid 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	
Waterdamp	SR-2
Organisch	SR-2

Voor waterdamp geldt een extra inname van 0,6 Bq/h per Bq/m^3 ten gevolge van opname door de huid.

Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent zowel voor werknemers als voor leden van de bevolking

	Ingestie en inhalatie Water(damp)	Ingestie en inhalatie Organisch	
e(50)	1,8×10^{-11}	4,1×10^{-11}	Sv/Bq
A_{Re}	5,6×10^{10}	2,4×10^{10}	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

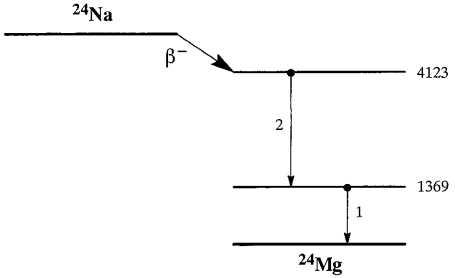
Tijd (d)	Urineconcentratie (Bq/l per Bq inname)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)
1	2,3×10^{-2}	1,3×10^{-2}
2	2,1×10^{-2}	2,3×10^{-2}
3	2,0×10^{-2}	2,2×10^{-2}
5	1,7×10^{-2}	2,0×10^{-2}
7	1,5×10^{-2}	1,8×10^{-2}

^{24}Na Z = 11 N = 13 ^{24}Na

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 14,96 h = 5,39×10^4 s λ = 1,29×10^{-5} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	0,999	554 | 1390
γ_1	1,000	1369
γ_2	0,999	2754

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,43 μGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,49 μSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 3,22×10^{17} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^1 Bq/g en A_v = 10^5 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 4×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	e(50) = 3,1×10^{-10} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 0,2 TBq
	A_2 = 0,2 TBq

Productie en toepassingen

Het nuclide wordt gevormd in een reactor door de vangst van thermische neutronen in natrium (^{23}Na). Het is dus een activeringsproduct. Toepassingen liggen op het gebied van biologisch onderzoek, nucleaire-activeringsanalyse en dosimetrie van personen na overbestraling met neutronen.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat natrium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 30% naar bot en 70% verdeeld over de overige organen/weefsels.
De biologische halveringstijden in het botweefsel zijn: 10 dagen (99%) en 500 dagen (1%). De biologische halveringstijd voor de overige organen/weefsels wordt gesteld op 10 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

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

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

	Ingestie	Inhalatie	
	f_1 = 1	F	
e(50)(w)	4,3×10^{-10}	5,3×10^{-10}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	2,3×10^9	1,9×10^9	Bq
e(50)(b)	4,3×10^{-10}	2,9×10^{-10}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	2,3×10^9	3,4×10^9	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

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

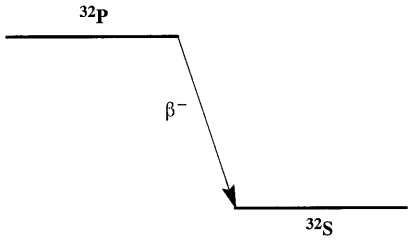
Figuur 2 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{24}Na

^{32}P Z = 15 N = 17 ^{32}P

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 14,29 d = 1,23×10^{6} s λ = 5,61×10^{-7} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	695 | 1710

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp}	= 1,06×10^{16} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v	= 10^3 Bq/g en A_v = 10^5 Bq
Huidbesmetting	H_{huid}	= 6×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$	= 2,2×10^{-9} Sv/Bq
Vervoer	A_1	= 0,5 TBq
	A_2	= 0,5 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{32}P is een activeringsproduct. Het nuclide wordt toegepast bij medisch-biologisch onderzoek als merker.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat fosfor zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 15% directe uitscheiding, 15% naar intracellulaire vloeistof, 40% naar zacht weefsel en 30% naar bot. De aangenomen biologische halveringstijden zijn:

Bloed	0,5 d
Intracellulair	2 d
Zachte weefsel	19 d
Bot	oneindig

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 0,8	
Inhalatie		
Fosfaat van Zn, Sn, Mg, Fe, Bi, lantaniden	f_1 = 0,8	Klasse M
Overige verbindingen	f_1 = 0,8	Klasse F

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

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie	
	f_1 = 0,8	F	M	
$e(50)(w)$	2,4×10^{-9}	1,1×10^{-9}	2,9×10^{-9}	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	4,2×10^8	9,1×10^8	3,4×10^8	Bq
$e(50)(b)$	2,4×10^{-9}	8,0×10^{-10}	3,2×10^{-9}	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	4,2×10^8	1,3×10^9	3,1×10^8	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

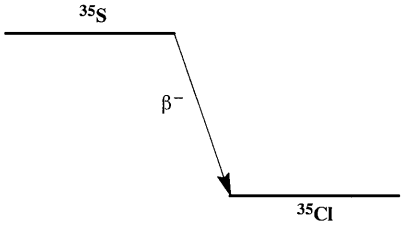
Tijd (d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)		
1	8,5×10^{-2}	4,9×10^{-2}	3,6×10^{-2}
2	5,2×10^{-2}	2,8×10^{-2}	2,3×10^{-2}
3	3,1×10^{-2}	1,7×10^{-2}	1,4×10^{-2}
5	1,6×10^{-2}	8,9×10^{-3}	7,2×10^{-3}
7	1,0×10^{-2}	5,6×10^{-3}	4,5×10^{-3}

^{35}S Z = 16 N = 19 ^{35}S

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 87,44 d = 7,55×10^{6} s λ = 9,17×10^{-8} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	49 | 167

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} =	1,58×10^{15} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v =	10^{6} Bq/g en A_v = 10^{9} Bq (damp)
	C_v =	10^{5} Bq/g en A_v = 10^{8} Bq(overig)
Huidbesmetting	H_{huid} =	3×10^{-11} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ =	7,7×10^{-10} Sv/Bq (organisch)
	$e(50)$ =	1,2×10^{-10} Sv/Bq (anorganisch)
Vervoer	A_1 =	40 TBq
	A_2 =	3 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{35}S is een activeringsproduct. Het nuclide wordt toegepast bij medisch-biologisch onderzoek als merker.

Metabool model

Organisch zwavel

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat organisch zwavel zich homogeen over het lichaam verdeelt en met een biologische halveringstijd van 140 dagen wordt uitgescheiden.

Ingestie		
Zwavel in voedsel	f_1 = 1	$e(50)$ = 7,7×10^{-10} Sv/Bq
Inhalatie		
CS_2, H_2S, COS	SR-1	$e(50)$ = 7,0×10^{-10} Sv/Bq

Anorganisch zwavel

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat anorganisch zwavel zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 80% directe uitscheiding en 20% verdeeld over alle organen/weefsels.

De biologische halveringstijden voor de alle organen/weefsels wordt gesteld op:

Fractie	$T_{1/2}$	Fractie	$T_{1/2}$
0,75	20 d	0,25	2000 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Elementair zwavel	f_1 = 0,1	
Overige anorg. verbindingen	f_1 = 0,8	
Inhalatie		
Elementair zwavel, de meeste sulfiden	f_1 = 0,8	Klasse M
Overige anorganische verbindingen	f_1 = 0,8	Klasse F
SO_2	Gas	Klasse SR-1, 85% depositie

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

	Ingestie f_1 = 0,1	Ingestie f_1 = 0,8	Inhalatie F	Inhalatie M	Inhalatie SO_2	
$e(50)(w)$	1,9×10^{-10}	1,4×10^{-10}	8,0×10^{-11}	1,1×10^{-9}	1,1×10^{-10}	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	5,3×10^{9}	7,1×10^{9}	1,2×10^{10}	9,1×10^{8}	9,1×10^{9}	Bq
$e(50)(b)$	1,9×10^{-10}	1,4×10^{-10}	5,3×10^{-11}	1,3×10^{-9}	1,1×10^{-10}	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	5,3×10^{9}	7,1×10^{9}	1,9×10^{10}	7,7×10^{8}	9,1×10^{9}	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Tijd (d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)				
1	6,1×10^{-2}	5,2×10^{-1}	2,9×10^{-1}	2,2×10^{-1}	4,9×10^{-1}
2	1,1×10^{-2}	5,7×10^{-2}	2,8×10^{-2}	2,7×10^{-2}	4,6×10^{-2}
3	1,1×10^{-3}	6,8×10^{-3}	3,5×10^{-3}	3,7×10^{-3}	5,8×10^{-3}
5	4,0×10^{-4}	3,2×10^{-3}	1,7×10^{-3}	1,9×10^{-3}	2,9×10^{-3}
7	3,6×10^{-4}	2,9×10^{-3}	1,6×10^{-3}	1,7×10^{-3}	2,7×10^{-3}

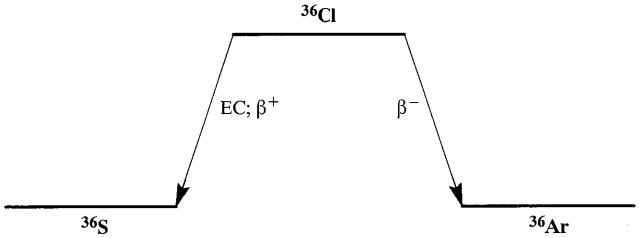
Figuur 4 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{35}S

^{36}Cl Z = 17 N = 19 ^{36}Cl

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 3{,}01\times10^{5}$ j $= 9{,}50\times10^{12}$ s $\qquad \lambda = 7{,}30\times10^{-14}$ s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	0,981	279 | 710

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,0 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,0 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = $1{,}22\times10^{9}$ Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^{4} Bq/g en A_v = 10^{6} Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 5×10^{-11} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = $8{,}2\times10^{-10}$ Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 10 TBq
	A_2 = 0,6 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{36}Cl wordt geproduceerd door vangst van thermische neutronen in chloor. Het nuclide wordt toegepast als beta-ijkbron. Een speciale toepassing werd gevonden bij de reconstructie van de neutronenfluentie ten gevolge van de kern-explosies in Hiroshima en Nagasaki.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat chloor zich vanuit het bloed homogeen over alle organen/weefsels verdeelt.
De biologische halveringstijden voor de alle organen/weefsels wordt gesteld op 10 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 1	
Inhalatie		
Chloride van H, Li, Na, K, Rb en Cs	f_1 = 1	Klasse F
Overige chloriden	f_1 = 1	Klasse M

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

	Ingestie f_1 = 1	Inhalatie F	Inhalatie M	
$e(50)(w)$	$9{,}3\times10^{-10}$	$4{,}9\times10^{-10}$	$5{,}1\times10^{-9}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$1{,}1\times10^{9}$	$2{,}0\times10^{9}$	$2{,}0\times10^{8}$	Bq
$e(50)(b)$	$9{,}3\times10^{-10}$	$3{,}4\times10^{-10}$	$6{,}9\times10^{-9}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$1{,}1\times10^{9}$	$2{,}9\times10^{9}$	$1{,}4\times10^{8}$	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

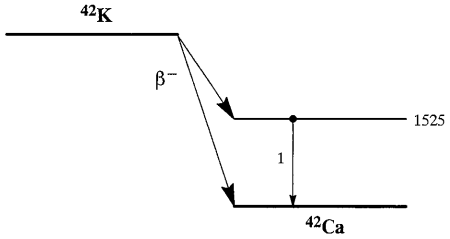
Tijd (d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)		
1	$6{,}8\times10^{-2}$	$1{,}9\times10^{-2}$	$1{,}5\times10^{-2}$
2	$6{,}3\times10^{-2}$	$3{,}0\times10^{-2}$	$2{,}6\times10^{-2}$
3	$5{,}7\times10^{-2}$	$2{,}9\times10^{-2}$	$2{,}5\times10^{-2}$
5	$5{,}0\times10^{-2}$	$2{,}5\times10^{-2}$	$2{,}2\times10^{-2}$
7	$4{,}3\times10^{-2}$	$2{,}2\times10^{-2}$	$2{,}0\times10^{-2}$

^{42}K Z = 19 N = 23 ^{42}K

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 12,36 h = $4,45\times10^4$ s $\lambda = 1,56\times10^{-5}$ s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y $(Bq\cdot s)^{-1}$	E (keV)
β^-	0,175	822 | 1996
β^-	0,821	1564 | 3521
γ_1	0,179	1525

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,032 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,037 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = $2,24\times10^{17}$ Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^2 Bq/g en A_v = 10^6 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 7×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = $2,3\times10^{-10}$ Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 0,2 TBq
	A_2 = 0,2 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{42}K is een activeringsproduct. Het nuclide wordt onder meer gebruikt als merker bij medisch-biologisch onderzoek.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat kalium zich vanuit het bloed homogeen over alle organen/weefsels verdeelt.
De biologische halveringstijd voor deze organen/weefsels wordt gesteld op 30 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

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

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

	Ingestie	Inhalatie	
	f_1 = 1	F	
$e(50)(w)$	$4,3\times10^{-10}$	$2,0\times10^{-10}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$2,3\times10^9$	$5,0\times10^9$	Bq
$e(50)(b)$	$4,3\times10^{-10}$	$1,3\times10^{-10}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$2,3\times10^9$	$7,7\times10^9$	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)	
0,25	$7,1\times10^{-1}$	$5,3\times10^{-1}$
1	$2,6\times10^{-1}$	$1,6\times10^{-1}$
2	$6,5\times10^{-2}$	$3,5\times10^{-2}$
3	$1,6\times10^{-2}$	$8,4\times10^{-3}$
5	$1,1\times10^{-3}$	$5,3\times10^{-4}$
7	$6,9\times10^{-5}$	$3,4\times10^{-5}$

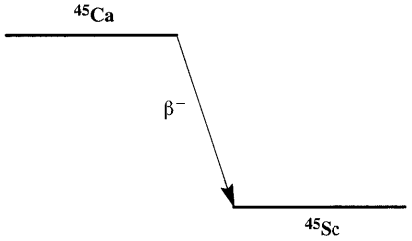
Figuur 6 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{42}K

^{45}Ca Z = 20 N = 25 ^{45}Ca

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 163 d = 1,41×10^{7} s λ = 4,92×10^{-8} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	77 | 256

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 6,58×10^{14} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^4 Bq/g en A_v = 10^7 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 2×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = 1,8×10^{-9} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 40 TBq
	A_2 = 1 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{45}Ca is een activeringsproduct. Het nuclide wordt onder meer gebruikt als merker bij medisch-biologisch onderzoek.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat calcium zich vanuit het bloed verdeelt naar bot en zacht weefsel. Een speciaal model is gepresenteerd in ICRP-20. Als benadering kan de volgende verdeling met bijbehorende biologische halveringstijden worden aangenomen:

Sponsachtig bot (32%)		Compact bot (33%)		Zacht weefsel (35%)	
Fractie	$T_{1/2}$	Fractie	$T_{1/2}$	Fractie	$T_{1/2}$
0,34	10 d	0,30	10 d	0,37	1,5 d
0,16	700 d	0,15	1100 d	0,29	45 d
0,50	2900 d	0,55	10500 d	0,14	100 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 0,3	
Inhalatie		
Alle verbindingen	f_1 = 0,3	Klasse M

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

	Ingestie	Inhalatie	
	f_1 = 0,3	M	
$e(50)(w)$	7,6×10^{-10}	2,3×10^{-9}	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	1,3×10^9	4,3×10^8	Bq
$e(50)(b)$	7,6×10^{-10}	2,7×10^{-9}	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	1,3×10^9	3,7×10^8	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

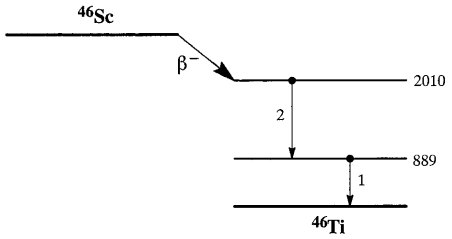
Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)	
0,25	9,9×10^{-1}	7,4×10^{-1}
1	7,8×10^{-1}	5,1×10^{-1}
2	4,9×10^{-1}	3,2×10^{-1}
3	3,4×10^{-1}	2,4×10^{-1}
5	2,4×10^{-1}	1,8×10^{-1}
7	2,2×10^{-1}	1,7×10^{-1}

^{46}Sc Z = 21 N = 25 ^{46}Sc

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 83,80 d = 7,24×10^6 s λ = 9,57×10^{-8} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	112 ¦ 357
γ_1	1,000	889
γ_2	1,000	1121

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,26 μGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,30 μSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 1,25×10^{15} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^1 Bq/g en A_v = 10^6 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 3×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = 2,3×10^{-8} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 0,5 TBq
	A_2 = 0,5 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{46}Sc is een activeringsproduct.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat scandium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 40% naar bot, 30% naar lever, 10% naar milt en de rest homogeen verdeeld over de overige organen/weefsels. De biologische halveringstijden zijn:

Fractie	$T_{1/2}$
0,1	5 d
0,9	1500 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 1×10^{-4}	
Inhalatie		
Alle verbindingen	f_1 = 1×10^{-4}	Klasse S

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

	Ingestie f_1 = 1×10^{-4}	Inhalatie S	
$e(50)$(w)	1,5×10^{-9}	4,8×10^{-9}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	6,7×10^8	2,1×10^8	Bq
$e(50)$(b)	1,5×10^{-9}	6,4×10^{-9}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	6,7×10^8	1,6×10^8	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)	
0,25	9,9×10^{-1}	7,4×10^{-1}
1	7,1×10^{-1}	4,9×10^{-1}
2	3,2×10^{-1}	2,4×10^{-1}
3	1,3×10^{-1}	1,3×10^{-1}
5	1,8×10^{-2}	6,9×10^{-2}
7	2,5×10^{-3}	5,9×10^{-2}

Figuur 8 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{46}Sc

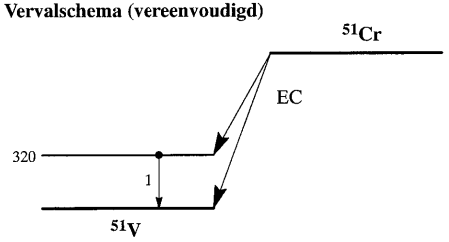
^{51}Cr Z = 24 N = 27 ^{51}Cr

Figuur 9 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{51}Cr

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 27,71 d = 2,39×10^{6} s λ = 2,90×10^{-7} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
γ_1	0,098	320
K_α	0,200	5
KLL	0,558	4
KLX	0,113	5

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,0042 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,0054 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 3,42×10^{15} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^3 Bq/g en A_v = 10^7 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 1×10^{-12} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	e(50) = 5,6×10^{-11} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 30 TBq
	A_2 = 30 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{51}Cr is een bijzonder activeringsproduct: het zendt geen beta's uit en wordt zodoende niet waargenomen door de gebruikelijke besmettingsmeters. Voor de detectie van ^{51}Cr zijn daarom speciale instrumenten ontwikkeld. Het nuclide wordt gebruikt als mono-energetische gammareferentiebron.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat chroom zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 30% directe uitscheiding, 5% naar bot en de rest homogeen verdeeld over de overige organen/weefsels.
De biologische halveringstijden zijn gesteld op:

Bloed		0,5 d
Bot		1000 d
Rest	0,62	6 d
	0,38	80 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Driewaardig chroom	f_1 = 0,01	
Zeswaardig chroom	f_1 = 0,1	
Inhalatie		
Oxide, hydroxide	f_1 = 0,1	Klasse S
Halogenide, nitraat	f_1 = 0,1	Klasse M
Overige verbindingen	f_1 = 0,1	Klasse F

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

	Ingestie f_1 = 0,01	Ingestie f_1 = 0,1	Inhalatie F	Inhalatie M	Inhalatie S	
e(50)(w)	3,7×10^{-11}	3,8×10^{-11}	3,0×10^{-11}	3,4×10^{-11}	3,6×10^{-11}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	2,7×10^{10}	2,6×10^{10}	3,3×10^{10}	2,9×10^{10}	2,8×10^{10}	Bq
e(50)(b)	3,7×10^{-11}	3,8×10^{-11}	2,1×10^{-11}	3,1×10^{-11}	3,6×10^{-11}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	2,7×10^{10}	2,6×10^{10}	4,8×10^{10}	3,2×10^{10}	2,8×10^{10}	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

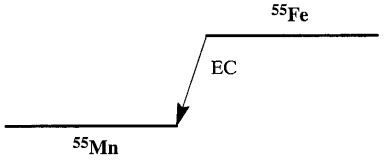
Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)				
0,25	9,8×10^{-1}	9,8×10^{-1}	7,3×10^{-1}	7,3×10^{-1}	7,4×10^{-1}
1	7,0×10^{-1}	7,1×10^{-1}	5,0×10^{-1}	4,8×10^{-1}	4,8×10^{-1}
2	3,2×10^{-1}	3,5×10^{-1}	3,1×10^{-1}	2,6×10^{-1}	2,5×10^{-1}
3	1,3×10^{-1}	1,7×10^{-1}	2,2×10^{-1}	1,5×10^{-1}	1,5×10^{-1}
5	2,1×10^{-2}	6,6×10^{-2}	1,6×10^{-1}	9,1×10^{-2}	8,4×10^{-2}
7	6,4×10^{-3}	4,5×10^{-2}	1,3×10^{-1}	7,6×10^{-2}	7,0×10^{-2}

^{55}Fe Z = 26 N = 29 ^{55}Fe

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 985,4 d = 8,51×10^{7} s λ = 8,14×10^{-9} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
K_α	0,250	6
K_β	0,033	6
KLL	0,495	5
KLX	0,112	6

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,000 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,000 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 8,91×10^{13} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^4 Bq/g en A_v = 10^6 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 1×10^{-12} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = 3,0×10^{-9} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 40 TBq
	A_2 = 40 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{55}Fe is een activeringsproduct dat ontstaat uit de reactie: ^{54}Fe(n,γ)^{55}Fe. Het nuclide zendt alleen karakteristieke röntgenstraling uit. Daarom is voor detectie een speciale detector ontwikkeld (zgn. Fe-55-detector). Het nuclide wordt gebruikt in een electroncapture-detector en bij röntgen-fluorescentie.

Metabool model

Het model wordt beschreven in ICRP-69. Het model bevat 17 compartimenten en 21 transportconstanten. Het gedrag van ijzer in het lichaam wordt voornamelijk bepaald door opname in het haemoglobine.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 0,1	
Inhalatie		
Oxide, hydroxide, halogenide	f_1 = 0,1	Klasse M
Overige verbindingen	f_1 = 0,1	Klasse F

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

	Ingestie f_1 = 0,1	Inhalatie F	Inhalatie M	
$e(50)(w)$	3,3×10^{-10}	9,2×10^{-10}	3,3×10^{-10}	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	3,0×10^9	1,1×10^9	3,0×10^9	Bq
$e(50)(b)$	3,3×10^{-10}	7,7×10^{-10}	3,7×10^{-10}	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	3,0×10^9	1,3×10^9	2,7×10^9	Bq

Gegevens voor urine–analyse

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Urine–uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)		
1	2,0×10^{-4}	6,1×10^{-4}	1,3×10^{-4}
2	2,1×10^{-5}	5,4×10^{-5}	1,4×10^{-5}
3	1,2×10^{-5}	3,5×10^{-5}	9,0×10^{-6}
5	6,2×10^{-6}	1,8×10^{-5}	4,9×10^{-6}
7	3,8×10^{-6}	1,1×10^{-5}	3,4×10^{-6}

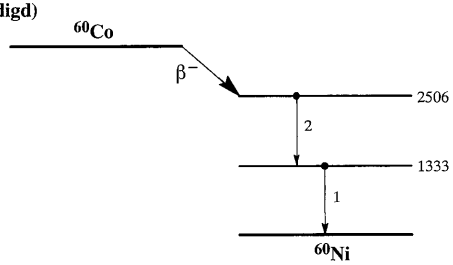
Figuur 10 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{55}Fe

^{60}Co Z = 27 N = 33 ^{60}Co

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 5,272 j = 1,66×10^{8} s λ = 4,17×10^{-9} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	0,999	96 | 318
γ_1	1,000	1333
γ_2	0,999	1173

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,31 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,36 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 4,18×10^{13} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^0 = 1 Bq/g !!
	A_v = 10^5 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 3×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = 1,9×10^{-8} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 0,4 TBq
	A_2 = 0,4 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{60}Co is een activeringsproduct. Het komt voor als bijproduct in reactoren ten gevolge van de activering van staal. Daarnaast wordt het op velerlei terreinen toegepast. Voorbeelden zijn: radiotherapie, gammagrafie, doorstraling, ijking, demonstratie.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat kobalt zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 50% directe uitscheiding, 5% naar lever en 45% naar de rest van het lichaam, met een biologische halveringstijd van 0,5 dag.
De biologische halveringstijden voor de organen zijn:

Fractie	$T_{1/2}$
0,6	6 d
0,2	60 d
0,2	800 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Oxide, hydroxide en anorganisch	f_1 = 0,05	
Overige verbindingen	f_1 = 0,1	
Inhalatie		
Oxide, hydroxide, halogenide, nitraat	f_1 = 0,05	Klasse S
Overige	f_1 = 0,1	Klasse M

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

	Ingestie f_1 = 0,05	Ingestie f_1 = 0,1	Inhalatie M	Inhalatie S	
$e(50)(w)$	2,5×10^{-9}	3,4×10^{-9}	7,1×10^{-9}	1,7×10^{-8}	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	4,0×10^8	2,9×10^8	1,4×10^8	5,9×10^7	Bq
$e(50)(b)$	2,5×10^{-9}	3,4×10^{-9}	9,6×10^{-9}	2,9×10^{-8}	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	4,0×10^8	2,9×10^8	1,0×10^8	3,4×10^7	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

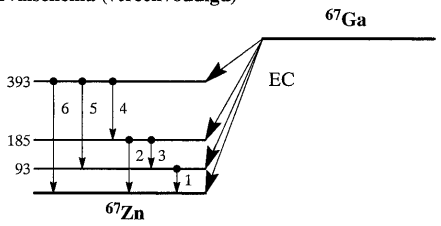
Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)			
0,25	9,9×10^{-1}	9,9×10^{-1}	7,4×10^{-1}	7,4×10^{-1}
1	7,1×10^{-1}	7,1×10^{-1}	4,9×10^{-1}	4,9×10^{-1}
2	3,4×10^{-1}	3,5×10^{-1}	2,6×10^{-1}	2,5×10^{-1}
3	1,5×10^{-1}	1,6×10^{-1}	1,5×10^{-1}	1,4×10^{-1}
5	3,7×10^{-2}	5,6×10^{-2}	9,1×10^{-2}	8,0×10^{-2}
7	2,0×10^{-2}	3,7×10^{-2}	7,8×10^{-2}	6,9×10^{-2}

^{67}Ga Z = 31 N = 36 ^{67}Ga

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 78,23 h = 2,82×10^5 s λ = 2,46×10^{-6} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)	Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
γ_1	0,383	93	ce K γ_1	0,287	84
γ_2	0,209	185	K_α	0,495	9
γ_3	0,031	91	KLL	0,467	7
γ_4	0,024	209	KLX	0,133	8
γ_5	0,168	300			
γ_6	0,047	393			

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,018 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,025 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 2,21×10^{16} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^2 Bq/g en A_v = 10^6 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 9×10^{-11} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	e(50) = 8,4×10^{-11} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 7 TBq
	A_2 = 3 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{67}Ga is een cyclotronproduct: protonen op zink. Het wordt toegepast in de nucleaire geneeskunde voor het lokaliseren van tumoren.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat gallium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 9% naar lever, 30% naar bot, 1% naar de milt en 60% naar de rest van het lichaam. De biologische halveringstijd voor alle organen is gesteld op:

Fractie	$T_{1/2}$	Fractie	$T_{1/2}$
0,3	1 d	0,7	50 d

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

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 0,001	
Inhalatie		
Oxide, hydroxide, carbide, halogenide, nitraat	f_1 = 0,001	Klasse M
Overige	f_1 = 0,001	Klasse F

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

	Ingestie f_1 = 0,001	Inhalatie F	Inhalatie M	
e(50)(w)	1,9×10^{-10}	1,1×10^{-10}	2,8×10^{-10}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	5,3×10^9	9,1×10^9	3,6×10^9	Bq
e(50)(b)	1,9×10^{-10}	6,8×10^{-11}	2,3×10^{-10}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	5,3×10^9	1,5×10^{10}	4,3×10^9	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)		
0,25	9,4×10^{-1}	7,0×10^{-1}	7,0×10^{-1}
1	5,8×10^{-1}	4,3×10^{-1}	4,0×10^{-1}
2	2,1×10^{-1}	2,3×10^{-1}	1,7×10^{-1}
3	7,0×10^{-2}	1,4×10^{-1}	7,8×10^{-2}
5	6,7×10^{-3}	6,9×10^{-2}	2,9×10^{-2}
7	7,2×10^{-4}	4,2×10^{-2}	1,7×10^{-2}

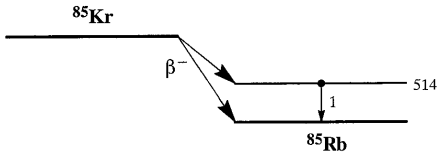
Figuur 12 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{67}Ga

^{85}Kr Z = 36 N = 49 ^{85}Kr

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 10,70 j = 3,38×10^{8} s λ = 2,05×10^{-9} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	0,996	251 | 687
γ_1	0,0043	514

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 3,0×10^{-4} µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 3,7×10^{-4} µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 1,45×10^{13} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^5 Bq/g
	A_v = 10^4 Bq
	A_v = 10^{10} Bq (gebruiksartikelen zoals lampen en starters)
Huidbesmetting	H_{huid} = 5×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	Niet van toepassing
Vervoer	A_1 = 10 TBq
	A_2 = 10 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{85}Kr is een splijtingsproduct dat vrijkomt bij de verwerking van gebruikte splijtstof. Hierdoor komt het voor in de atmosfeer met een concentratie van ongeveer 1 Bq·m^{-3}. Het wordt gebruikt onder andere in een vulhoogtemeter (als gammastraler) of in een diktemeter (als betastraler). Omdat krypton een edelgas is, kan bij een ongeval met de bron geen oppervlaktebesmetting plaatsvinden.

Dosisconversiecoëfficiënt klasse SR-0

e = 9,2×10^{-13} Sv/h per Bq/m^3

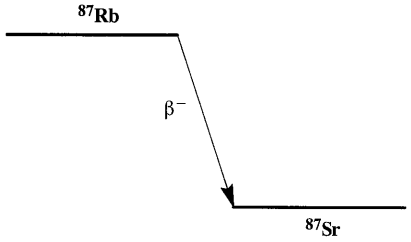
Figuur 13 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{85}Kr

^{87}Rb Z = 37 N = 50 ^{87}Rb

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 4{,}7\times10^{10}$ j $= 1{,}5\times10^{18}$ s $\qquad \lambda = 4{,}7\times10^{-19}$ s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	112 | 273

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp}	= $3{,}2\times10^{3}$ Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v	= 10^{4} Bq/g
	A_v	= 10^{7} Bq
Huidbesmetting	H_{huid}	= 3×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$	= $1{,}3\times10^{-9}$ Sv/Bq
Vervoer	A_1	= Onbeperkt
	A_2	= Onbeperkt

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{87}Rb is van primordiale oorsprong. Het komt in geringe mate voor in de natuur: de referentiemens bevat ongeveer 500 Bq ^{87}Rb.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat rubidium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 25% naar het skelet en 75% naar alle overige organen. De biologische halveringstijd voor alle organen is gesteld op 44 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

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

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

	Ingestie	Inhalatie	
	$f_1 = 1$	F	
$e(50)(w)$	$1{,}5\times10^{-9}$	$7{,}6\times10^{-10}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$6{,}7\times10^{8}$	$1{,}3\times10^{9}$	Bq
$e(50)(b)$	$1{,}5\times10^{-9}$	$5{,}1\times10^{-10}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$6{,}7\times10^{8}$	$2{,}0\times10^{9}$	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)	
0,25	$1{,}0\times10^{-0}$	$7{,}4\times10^{-1}$
1	$9{,}9\times10^{-1}$	$6{,}0\times10^{-1}$
2	$9{,}7\times10^{-1}$	$5{,}2\times10^{-1}$
3	$9{,}6\times10^{-1}$	$4{,}8\times10^{-1}$
5	$9{,}3\times10^{-1}$	$4{,}5\times10^{-1}$
7	$9{,}0\times10^{-1}$	$4{,}4\times10^{-1}$

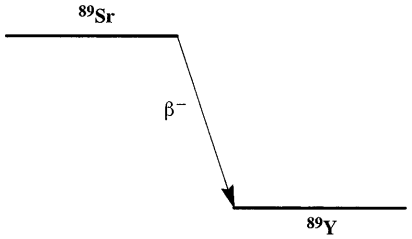
Figuur 14 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{87}Rb

^{89}Sr Z = 38 N = 51 ^{89}Sr

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 50,5 d = 4,36×10^{6} s λ = 1,59×10^{-7} s^{-1}

Vervalschema



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β$^-$	1,000	583 | 1491

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp}	= 1,07×10^{15} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v	= 10^3 Bq/g en A_v = 10^6 Bq
Huidbesmetting	H_{huid}	= 4×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	e(50)	= 3,1×10^{-9} Sv/Bq
Vervoer	A_1	= 0,6 TBq
	A_2	= 0,6 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{89}Sr is een splijtingsproduct.

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

	Ingestie f_1 = 0,01	Ingestie f_1 = 0,3	Inhalatie F	Inhalatie S	
e(50)(w)	2,3×10^{-9}	2,6×10^{-9}	1,4×10^{-9}	5,6×10^{-9}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	4,3×10^8	3,8×10^8	7,1×10^8	1,8×10^8	Bq
e(50)(b)	2,3×10^{-9}	2,6×10^{-9}	1,0×10^{-9}	7,5×10^{-9}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	4,3×10^8	3,8×10^8	1,0×10^9	1,3×10^8	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)			
1	1,8×10^{-3}	5,6×10^{-2}	6,7×10^{-2}	8,0×10^{-4}
2	7,4×10^{-4}	2,1×10^{-2}	2,3×10^{-2}	3,3×10^{-4}
3	4,7×10^{-4}	1,4×10^{-2}	1,5×10^{-2}	2,1×10^{-4}
5	2,6×10^{-4}	7,8×10^{-3}	8,6×10^{-3}	1,2×10^{-4}
7	1,7×10^{-4}	5,1×10^{-3}	5,7×10^{-3}	8,2×10^{-5}

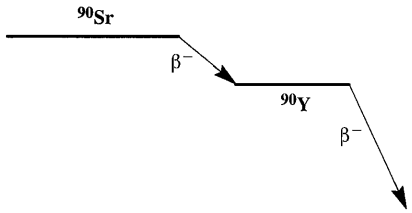
Figuur 15 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{89}Sr

^{90}Sr Z = 38 N = 52 ^{90}Sr

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 28,7 j = 9,06×10^{8} s λ = 7,65×10^{-10} s^{-1}

Vervalschema



Belangrijkste uitgezonden straling Van dochter ^{90}Y ($T_{1/2}$ = 64 h):

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)	Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	196 | 546	β^-	1,000	935 | 2284

Diversen

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

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{90}Sr is een splijtingsproduct dat door bovengrondse kernexplosies in de atmosfeer is gebracht. Door zijn lange halveringstijd en zijn chemische eigenschappen (botzoeker) is ^{90}Sr een belangrijke contaminant.
Het wordt gebruikt, vanwege de hoge beta-energie van dochter ^{90}Y, als beta-standaard, bron voor diktemeting, bij brachytherapie en in een ophtalmisch 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 radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie f_1 = 0,01	Ingestie f_1 = 0,3	Inhalatie F	Inhalatie S	
$e(50)(w)$	2,7×10^{-9}	2,8×10^{-8}	3,0×10^{-8}	7,7×10^{-8}	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	3,7×10^{8}	3,6×10^{7}	3,3×10^{7}	1,3×10^{7}	Bq
$e(50)(b)$	2,7×10^{-9}	2,8×10^{-8}	2,4×10^{-8}	1,5×10^{-7}	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	3,7×10^{8}	3,6×10^{7}	4,2×10^{7}	6,7×10^{6}	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)			
1	1,8×10^{-3}	5,6×10^{-2}	6,8×10^{-2}	8,1×10^{-4}
2	7,6×10^{-4}	2,2×10^{-2}	2,3×10^{-2}	3,4×10^{-4}
3	4,9×10^{-4}	1,4×10^{-2}	1,6×10^{-2}	2,2×10^{-4}
5	2,8×10^{-4}	8,3×10^{-3}	9,2×10^{-3}	1,3×10^{-4}
7	1,9×10^{-4}	5,7×10^{-3}	6,3×10^{-3}	9,0×10^{-5}

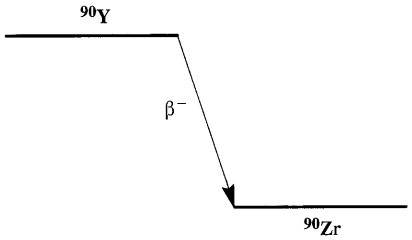
Figuur 16 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{90}Sr

^{90}Y Z = 39 N = 51 ^{90}Y

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 64,1 h = $2{,}31\times10^{5}$ s $\lambda = 3{,}00\times10^{-6}$ s^{-1}

Vervalschema



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	935 | 2284

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp}	= $2{,}01\times10^{16}$ Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v	= 10^3 Bq/g en $A_v = 10^5$ Bq
Huidbesmetting	H_{huid}	= 4×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$	= $1{,}2\times10^{-9}$ Sv/Bq
Vervoer	A_1	= 0,3 TBq
	A_2	= 0,3 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{90}Y is de dochter van ^{90}Sr. De toepassingen van de combinatie $^{90}Sr/Y$ zijn aangegeven bij het moedernuclide.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat yttrium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 25% directe uitscheiding, 50% naar het skelet, 15% naar de lever en 10% verdeeld over de overige organen/weefsels.
De biologische halveringstijd wordt oneindig verondersteld. Omdat er geen langlevende yttrium-isotopen zijn, is deze rekenwijze voor de stralingshygiëne verantwoord.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	$f_1 = 1\times10^{-4}$	
Inhalatie		
Oxide, hydroxide	$f_1 = 1\times10^{-4}$	Klasse S
Overige verbindingen	$f_1 = 1\times10^{-4}$	Klasse M

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

	Ingestie $f_1 = 1\times10^{-4}$	Inhalatie M	Inhalatie S	
$e(50)(w)$	$2{,}7\times10^{-9}$	$1{,}6\times10^{-9}$	$1{,}7\times10^{-9}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$3{,}7\times10^{8}$	$6{,}3\times10^{8}$	$5{,}9\times10^{8}$	Bq
$e(50)(b)$	$2{,}7\times10^{-9}$	$1{,}4\times10^{-9}$	$1{,}5\times10^{-9}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$3{,}7\times10^{8}$	$7{,}1\times10^{8}$	$6{,}7\times10^{8}$	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

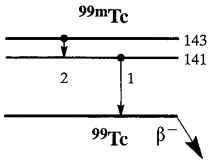
Tijd (d)	Urine-uitscheidingsconcentratie (Bq/d per Bq inname)		
1	$8{,}0\times10^{-6}$	$2{,}5\times10^{-3}$	$2{,}9\times10^{-5}$
2	$1{,}1\times10^{-6}$	$1{,}8\times10^{-4}$	$2{,}6\times10^{-6}$
3	$5{,}7\times10^{-8}$	$2{,}4\times10^{-5}$	$4{,}7\times10^{-7}$
5	$1{,}3\times10^{-10}$	$9{,}3\times10^{-6}$	$2{,}1\times10^{-7}$
7	$3{,}1\times10^{-13}$	$5{,}3\times10^{-6}$	$1{,}2\times10^{-7}$

^{99m}Tc Z = 43 N = 56 ^{99m}Tc

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 6,006 h = 2,17×10^4 s λ = 3,21×10^{-5} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
γ_1	0,889	141
ce M γ_2	0,914	2
ce N γ_2	0,076	2
K_α	0,062	18
LMX	0,102	2

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,018 μGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,023 μSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 1,95×10^{17} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^2 Bq/g en A_v = 10^7 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 5×10^{-11} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	e(50) = 1,1×10^{-11} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 10 TBq
	A_2 = 4 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{99m}Tc is de dochter van ^{99}Mo. Het wordt geproduceerd in een Mo/Tc-generator en op zeer grote schaal in de nucleaire geneeskunde gebruikt voor diagnostische doeleinden: voor afbeeldingen en functiestudies.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat technetium zich vanuit het bloed als volgt over de verschillende organen en weefsels van het lichaam verdeelt: 4% naar de schildklier, 10% naar de maagwand, 3% naar de lever en de rest naar de overige organen/weefsels. De biologische halveringstijd voor verblijf in het bloed is gesteld op 0,02 dagen, terwijl voor de organen/weefsels wordt aangenomen:

Fractie	$T_{1/2}$
0,75	1,6 d
0,20	3,7 d
0,05	22 d

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

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 0,8	
Inhalatie		
Halogenide, nitraat, hydroxide, oxide	f_1 = 0,8	Klasse M
Overige verbindingen	f_1 = 0,8	Klasse F

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

	Ingestie f_1 = 0,8	Inhalatie F	Inhalatie M	
e(50)(w)	2,2×10^{-11}	2,0×10^{-11}	2,9×10^{-11}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	4,5×10^{10}	5,0×10^{10}	3,4×10^{10}	Bq
e(50)(b)	2,2×10^{-11}	1,2×10^{-11}	1,9×10^{-11}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	4,5×10^{10}	8,3×10^{10}	5,3×10^{10}	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)		
0,25	4,8×10^{-1}	3,6×10^{-1}	3,7×10^{-1}
1	4,4×10^{-2}	3,2×10^{-2}	3,7×10^{-2}
2	1,8×10^{-3}	1,3×10^{-3}	1,4×10^{-3}
3	7,9×10^{-5}	5,7×10^{-5}	6,1×10^{-5}
5	1,7×10^{-7}	1,2×10^{-7}	1,5×10^{-7}
7	4,1×10^{-10}	2,7×10^{-10}	4,2×10^{-10}

Figuur 18 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{99m}Tc

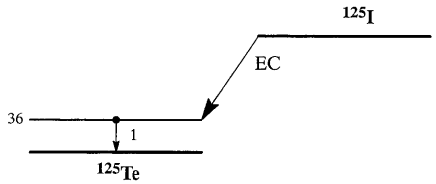
^{125}I Z = 53 N = 72 ^{125}I

Figuur 19 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{125}I

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 59,39 d = 5,13×10^{6} s λ = 1,35×10^{-7} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)	Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
γ_1	0,067	35	L_α	0,061	4
ce K γ_1	0,803	4	L_β	0,059	4
ce L γ_1	0,105	31	KLL	0,132	23
K_α	1,140	27	KLX	0,060	26
K_β	0,255	31	LMM	1,010	3
			LXY	0,590	4

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,034 μGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,034 μSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 6,51×10^{14} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^3 Bq/g en A_v = 10^6 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 4×10^{-12} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	e(50) = 1,5×10^{-8} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 20 TBq
	A_2 = 3 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{125}I is een cyclotronproduct. Het wordt toegepast in de nucleaire geneeskunde, onder meer bij brachytherapie. Het vindt tevens toepassing als gamma-referentiebron.

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_3I)	f_1 = 1	Klasse SR-1 70% depositie
Overige verbindingen	f_1 = 1	Klasse F

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

	Ingestie f_1 = 1	Inhalatie F	Inhalatie I_2	Inhalatie CH_3I	
e(50)(w)	1,5×10^{-8}	7,3×10^{-9}	1,4×10^{-8}	1,1×10^{-8}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	6,7×10^7	1,4×10^8	7,1×10^7	9,1×10^7	Bq
e(50)(b)	1,5×10^{-8}	5,3×10^{-9}	1,4×10^{-8}	1,1×10^{-8}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	6,7×10^7	1,9×10^8	7,1×10^7	9,1×10^7	Bq

Gegevens voor schildkliertelling (na eenmalige inname)

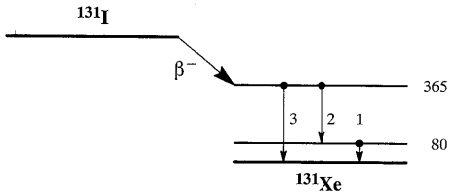
Tijd (d)	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)			
	f_1 = 1	F	I_2	CH_3I
0,25	6,1×10^{-2}	5,3×10^{-2}	1,1×10^{-1}	1,1×10^{-1}
1	2,6×10^{-1}	1,3×10^{-1}	2,4×10^{-1}	1,9×10^{-1}
2	2,9×10^{-1}	1,4×10^{-1}	2,6×10^{-1}	2,0×10^{-1}
3	2,8×10^{-1}	1,4×10^{-1}	2,6×10^{-1}	2,0×10^{-1}
5	2,7×10^{-1}	1,3×10^{-1}	2,5×10^{-1}	1,9×10^{-1}
7	2,6×10^{-1}	1,3×10^{-1}	2,4×10^{-1}	1,8×10^{-1}

^{131}I Z = 53 N = 78 ^{131}I

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 8,021 d = 6,93×10^5 s λ = 1,00×10^{-6} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (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

Kermatempo in lucht	k = 0,052 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,066 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

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

Productie en toepassingen

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

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_3I)	f_1 = 1	Klasse SR-1 70% depositie
Overige verbindingen	f_1 = 1	Klasse F

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

	Ingestie f_1 = 1	Inhalatie F	Inhalatie I_2	Inhalatie CH_3I	
e(50)(w)	2,2×10^{-8}	1,1×10^{-8}	2,0×10^{-8}	1,5×10^{-8}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	4,5×10^7	9,1×10^7	5,0×10^7	6,7×10^7	Bq
e(50)(b)	2,2×10^{-8}	7,6×10^{-9}	2,0×10^{-8}	1,5×10^{-8}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	4,5×10^7	1,3×10^8	5,0×10^7	6,7×10^7	Bq

Gegevens voor schildkliertelling (na eenmalige inname)

Tijd (d)	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)			
	f_1 = 1	F	I_2	CH_3I
0,25	6,0×10^{-2}	5,2×10^{-2}	1,1×10^{-1}	1,0×10^{-1}
1	2,4×10^{-1}	1,2×10^{-1}	2,3×10^{-1}	1,8×10^{-1}
2	2,5×10^{-1}	1,2×10^{-1}	2,2×10^{-1}	1,7×10^{-1}
3	2,3×10^{-1}	1,1×10^{-1}	2,0×10^{-1}	1,6×10^{-1}
5	1,9×10^{-1}	9,0×10^{-2}	1,7×10^{-1}	1,3×10^{-1}
7	1,6×10^{-1}	7,5×10^{-2}	1,4×10^{-1}	1,1×10^{-1}

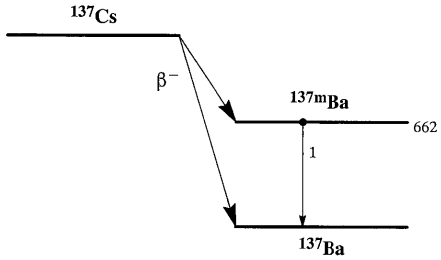
Figuur 20 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{131}I

^{137}Cs Z = 55 N = 82 ^{137}Cs

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 30,25 j = 9,55×10^{8} s λ = 7,26×10^{-10} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



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

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)	Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	0,946	173 | 512	γ_1	0,898	662
β^-	0,054	425 | 1173	ce K γ_1	0,083	624

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

Kermatempo in lucht	k = 0,077 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,093 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 3,19×10^{12} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^1 Bq/g en A_v = 10^4 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 5×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2 (incl. ^{137m}Ba)
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = 1,4×10^{-8} Sv/Bq (incl. ^{137m}Ba)
Vervoer	A_1 = 2 TBq
	A_2 = 0,6 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		
Alle verbindingen	f_1 = 1	
Inhalatie		
Alle verbindingen	f_1 = 1	Klasse F

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

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

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

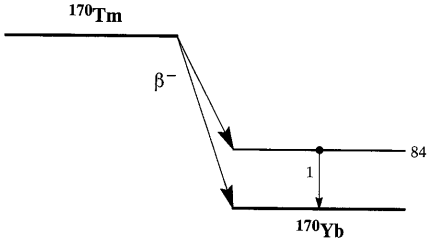
Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)	
0,25	1,0×10^0	7,4×10^{-1}
1	9,9×10^{-1}	6,0×10^{-1}
2	9,6×10^{-1}	5,1×10^{-1}
3	9,4×10^{-1}	4,7×10^{-1}
5	9,0×10^{-1}	4,4×10^{-1}
7	8,8×10^{-1}	4,2×10^{-1}

^{170}Tm Z = 69 N = 101 ^{170}Tm

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 128,6 d = 1,11×10^{7} s λ = 6,24×10^{-8} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)	Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-_1	0,240	298 | 884	K_α	0,035	52
β^-_2	0,759	323 | 968	LMM	0,073	6
γ_1	0,033	84	LMX	0,045	8
ce K γ_1	0,047	23	MXY	0,259	2
ce L γ_1	0,122	74			

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,0007 μGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,0012 μSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 2,21×10^{14} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^3 Bq/g en A_v = 10^6 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 5×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = 1,4×10^{-8} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 3 TBq
	A_2 = 0,6 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{170}Tm is een activeringsproduct. Het wordt toegepast als bron voor gammagrafie.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat thulium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 21% directe uitscheiding, 65% naar bot, 4% naar lever, 10% naar de overige organen/weefsels.
De biologische halveringstijd voor alle organen/weefsels wordt gesteld op 3500 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 5×10^{-4}	
Inhalatie		
Alle verbindingen	f_1 = 5×10^{-4}	Klasse M

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

	Ingestie	Inhalatie	
	f_1 = 5×10^{-4}	M	
$e(50)$(w)	1,3×10^{-9}	5,2×10^{-9}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	7,7×10^8	1,9×10^8	Bq
$e(50)$(b)	1,3×10^{-9}	6,6×10^{-9}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	7,7×10^8	1,5×10^8	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)	
0,25	9,9×10^{-1}	7,4×10^{-1}
1	7,1×10^{-1}	4,9×10^{-1}
2	3,3×10^{-1}	2,5×10^{-1}
3	1,3×10^{-1}	1,5×10^{-1}
5	1,9×10^{-2}	8,5×10^{-2}
7	2,7×10^{-3}	7,5×10^{-2}

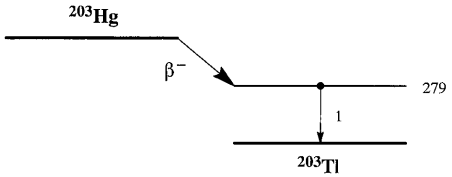
Figuur 22 Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{170}Tm

^{203}Hg Z = 80 N = 123 ^{203}Hg

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 46,61 d = 4,03×10^6 s λ = 1,72×10^{-7} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^-	1,000	58 | 212
γ_1	0,815	279
ce K γ_1	0,138	194
$K_{\alpha 1}$	0,066	73
$K_{\alpha 2}$	0,039	71

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,044 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,040 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 5,10×10^{14} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^2 Bq/g en A_v = 10^5 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 3×10^{-10} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = 1,7×10^{-9} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 5 TBq
	A_2 = 1 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{203}Hg is een activeringsproduct. Het nuclide wordt onder meer toegepast als gamma-ijkbron.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat anorganisch kwik zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 8% naar nieren en 92% verdeeld over de overige organen/weefsels. Van organisch kwik wordt aangenomen dat 5% naar de nieren gaat, 20% naar de hersens en de rest uniform over de overige organen/weefsels verdeeld is. De aangenomen biologische halveringstijden zijn:

Anorganisch kwik		Organisch kwik	
Fractie	$T_{1/2}$	Fractie	$T_{1/2}$
0,95	40 d	0,95	80 d
0,05	10000 d	0,05	10000 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Anorganisch kwik	f_1 = 0,02	
Organische kwik	f_1 = 0,4, behalve	
Methyl-kwik	f_1 = 1	
Inhalatie		
Kwikdamp	f_1 = 0,02	Klasse SR-1, 70% depositie
Oxide, hydroxide, halogenide, nitraat, sulfide	f_1 = 0,02	Klasse M
Organisch kwik	f_1 = 1	Klasse F
Overige verbindingen	f_1 = 0,02	Klasse F

Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b), na inwendige besmetting met kwik

Anorganisch	Ingestie f_1 = 0,02	Inhalatie F	Inhalatie M	Inhalatie SR-1	
$e(50)(w)$	5,4×10^{-10}	5,9×10^{-10}	1,9×10^{-9}	7,0×10^{-9}	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	1,9×10^9	1,7×10^9	5,3×10^8	1,4×10^8	Bq
$e(50)(b)$	5,4×10^{-10}	4,7×10^{-10}	2,3×10^{-9}	7,0×10^{-9}	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	1,9×10^9	2,1×10^9	4,3×10^8	1,4×10^8	Bq

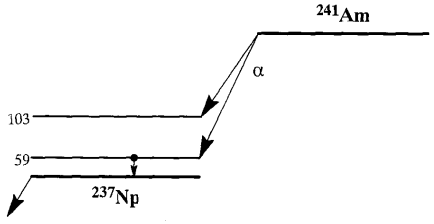
Organisch	Ingestie f_1 = 0,4	Ingestie f_1 = 1	Inhalatie F
$e(50)(w)$	1,1×10^{-9}	1,9×10^{-9}	7,5×10^{-10}
$A_{Re}(w)$	9,1×10^8	5,3×10^8	1,3×10^9
$e(50)(b)$	1,1×10^{-9}	1,9×10^{-9}	5,7×10^{-10}
$A_{Re}(b)$	9,1×10^8	5,3×10^8	1,8×10^9

^{241}Am Z = 95 N = 146 ^{241}Am

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 432,0 j = 1,36×10^{10} s λ = 5,08×10^{-11} s^{-1}

Vervalschema (vereenvoudigd)



Figuur 24 *Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{241}Am*

Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)	Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
α_1	0,852	5486	γ_1	0,357	60
α terugstoot	0,852	93	ce-L γ_1	0,308	39
α_2	0,128	5443	ce-M γ_1	0,076	55
α terugstoot	0,128	92			
L_α	0,244	14	L_β	0,305	18

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,048 μGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,017 μSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 1,27×10^{11} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^0 = 1 Bq/g
	A_v = 10^4 Bq
Huidbesmetting	H_{huid} = 5×10^{-12} Sv/s per Bq/cm^2
Wondbesmetting; Injectie	$e(50)$ = 4,0×10^{-4} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 10 TBq
	A_2 = 0,001 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{241}Am wordt geproduceerd in een kernreactor. Het nuclide wordt toegepast in brandmelders (ionisatiekamer), als ijkbron voor alfa- en gammastraling en in een neutronenbron (Am/Be-bron).

Metabool model

Het gedetailleerde metabole model voor americium wordt beschreven in ICRP-67.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 5×10^{-4}	
Inhalatie		
Alle verbindingen	f_1 = 5×10^{-4}	Klasse M

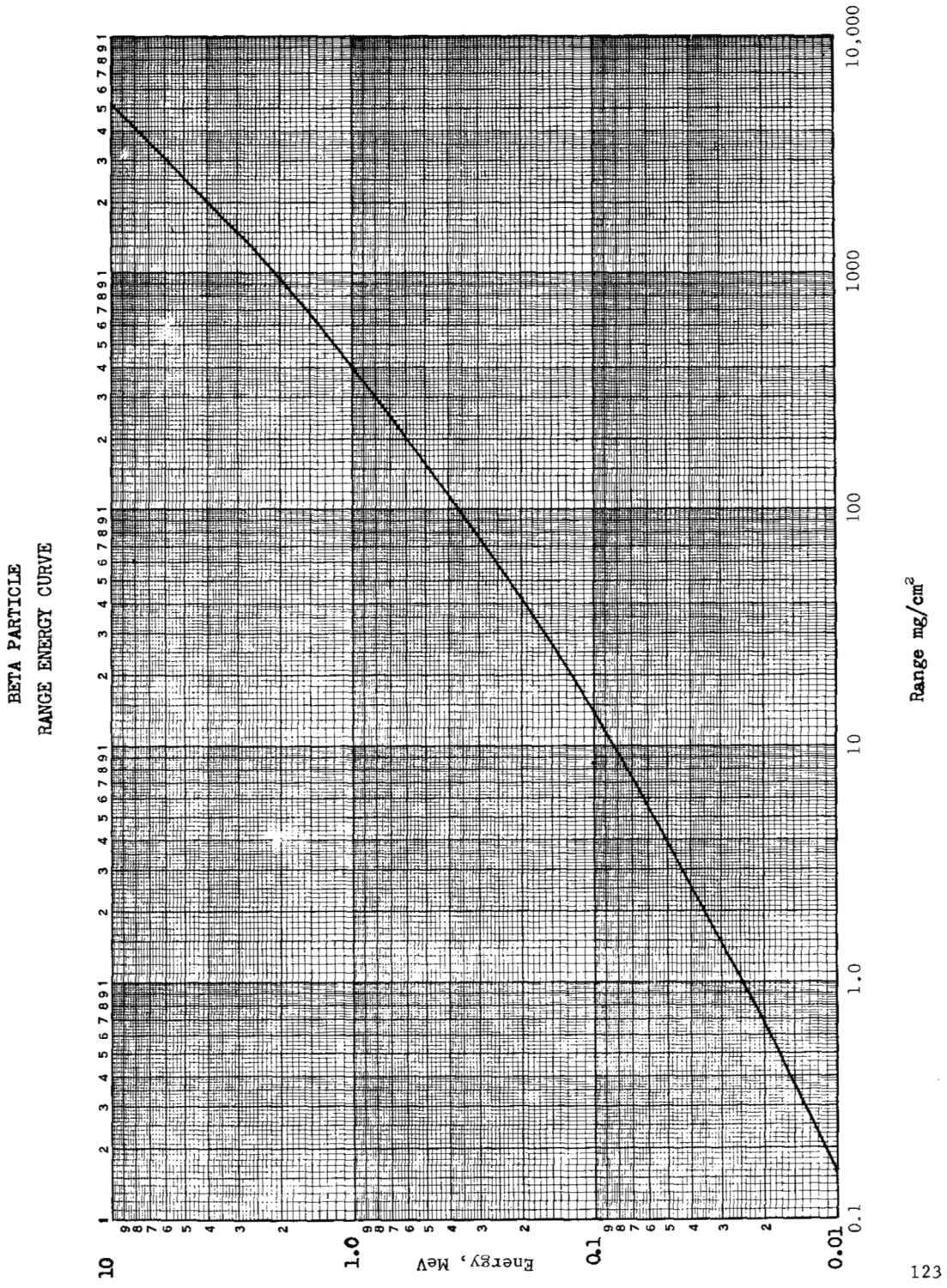
Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie	Inhalatie	
	f_1 = 5×10^{-4}	M	
$e(50)(w)$	2,0×10^{-7}	2,7×10^{-5}	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	5,0×10^6	3,7×10^4	Bq
$e(50)(b)$	2,0×10^{-7}	3,9×10^{-5}	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	5,0×10^6	2,6×10^4	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

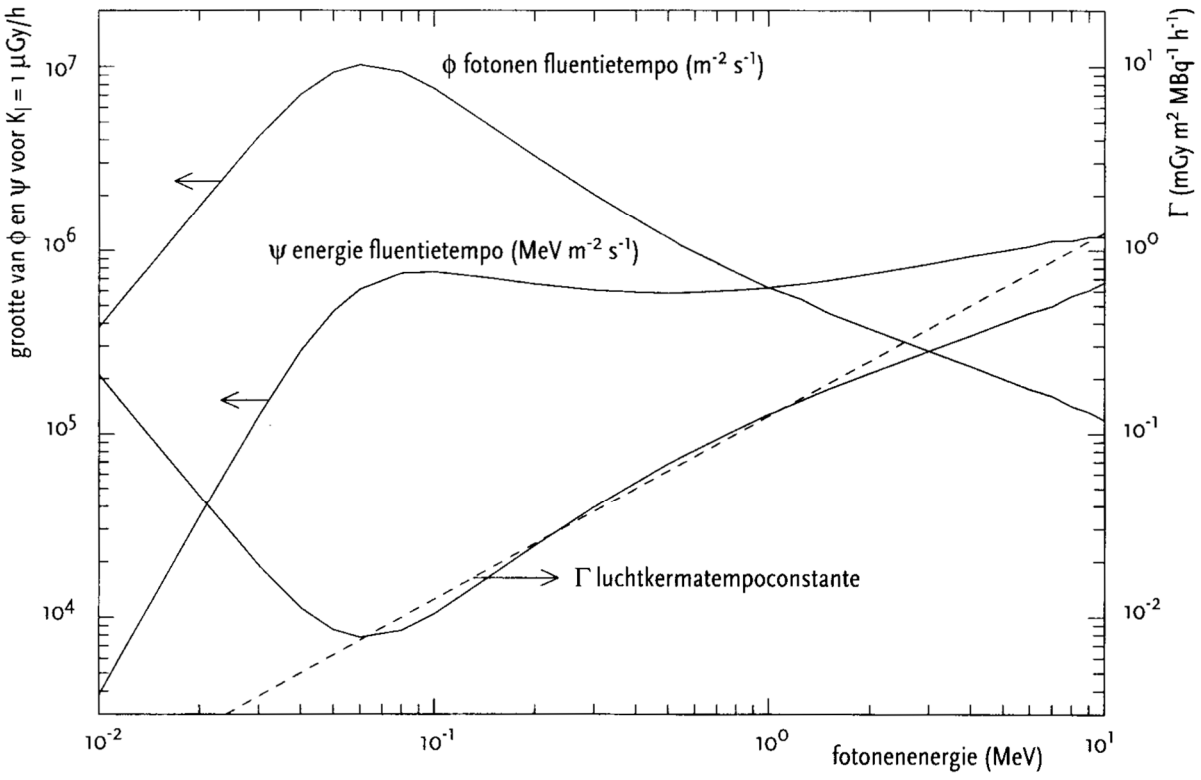
Tijd (d)	Urineconcentratie (Bq/d per Bq inname)	
1	3,0×10^{-5}	1,8×10^{-3}
2	4,6×10^{-6}	2,3×10^{-4}
3	2,2×10^{-6}	1,3×10^{-4}
5	9,5×10^{-7}	7,2×10^{-5}
7	6,6×10^{-7}	5,8×10^{-5}



Figuur 25 *Gereduceerde dracht van β-deeltjes als functie van de eindpuntsenergie*

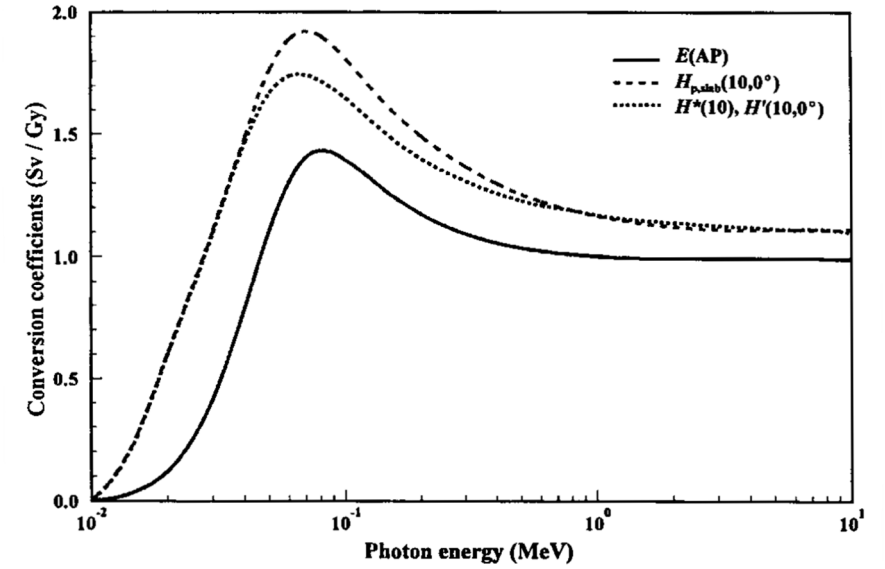
E_{foton} (MeV)	lucht		water		weefsel		bot	
	μ_{tr}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{tr}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{tr}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{tr}/ρ	μ_{en}/ρ
0,100	0,00227	0,00227	0,00248	0,00248	0,00244	0,00244	0,00439	0,00439
0,125	0,00238	0,00237	0,00262	0,00262	0,00259	0,00259	0,00358	0,00358
0,150	0,00247	0,00247	0,00275	0,00275	0,00272	0,00271	0,00316	0,00315
0,175	0,00257	0,00257	0,00286	0,00285	0,00282	0,00282	0,00307	0,00306
0,200	0,00266	0,00266	0,00295	0,00295	0,00292	0,00292	0,00301	0,00301
0,250	0,00277	0,00277	0,00308	0,00308	0,00305	0,00305	0,00304	0,00303
0,300	0,00287	0,00287	0,00319	0,00319	0,00316	0,00315	0,00307	0,00306

Figuur 26 Massieke energieoverdracht- en energieabsorptiecoëfficiënten μ_{tr}/ρ en μ_{en}/ρ (in $m^2 \cdot kg^{-1}$) voor verschillende materialen

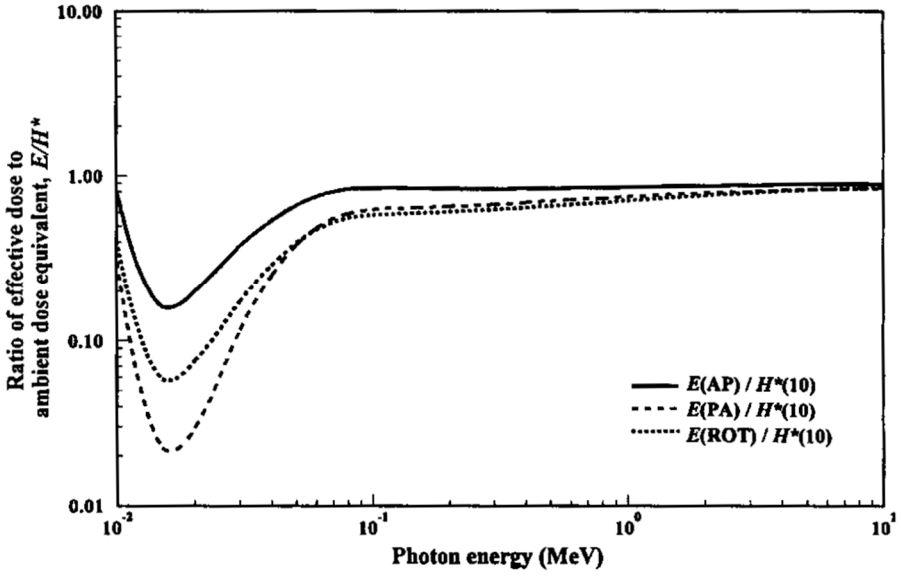


de onderbroken lijn geeft de benadering $\Gamma \approx E_{foton} / 8$ weer

Figuur 27 Fluentietempo en energiefluentietempo van fotonen overeenkomend met een kermatempo in lucht van 1 $\mu Gy \cdot h^{-1}$, en de kermatempoconstante voor een puntbron die per desintegratie 1 foton met energie E_γ uitzendt



Figuur 28 *Conversiecoëfficiënten voor luchtkerma K_a naar omgevingsdosisequivalent H*(10), effectieve dosis E(AP) in een fantoom van een volwassene in de anterior-posteriorgeometrie, en persoonsdosisequivalent $H_{p,slab}$(10) in een ICRU-slab (ICRP-74)*

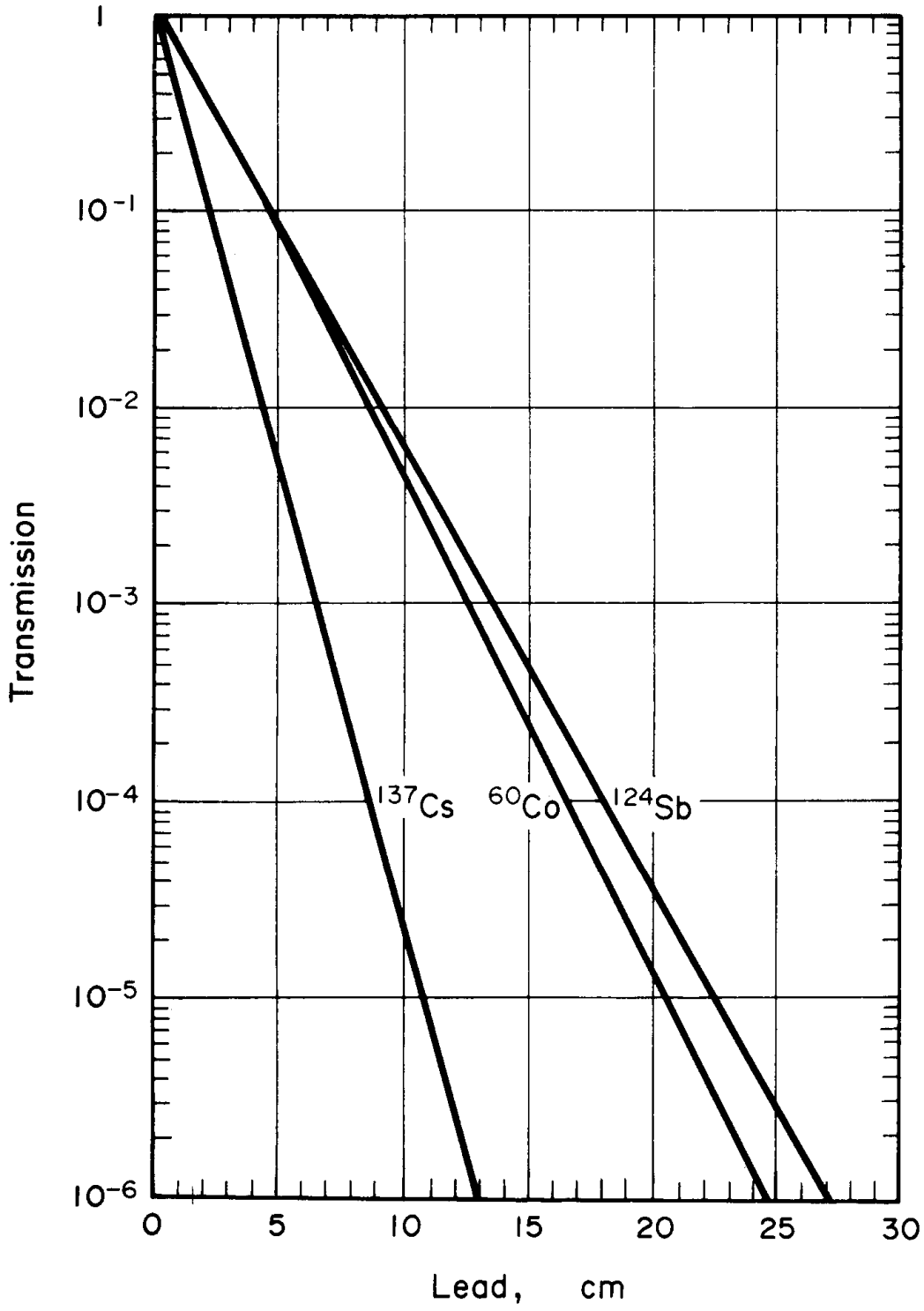


AP = anterior-posterior, PA = posterior-anterior, ROT = roterend

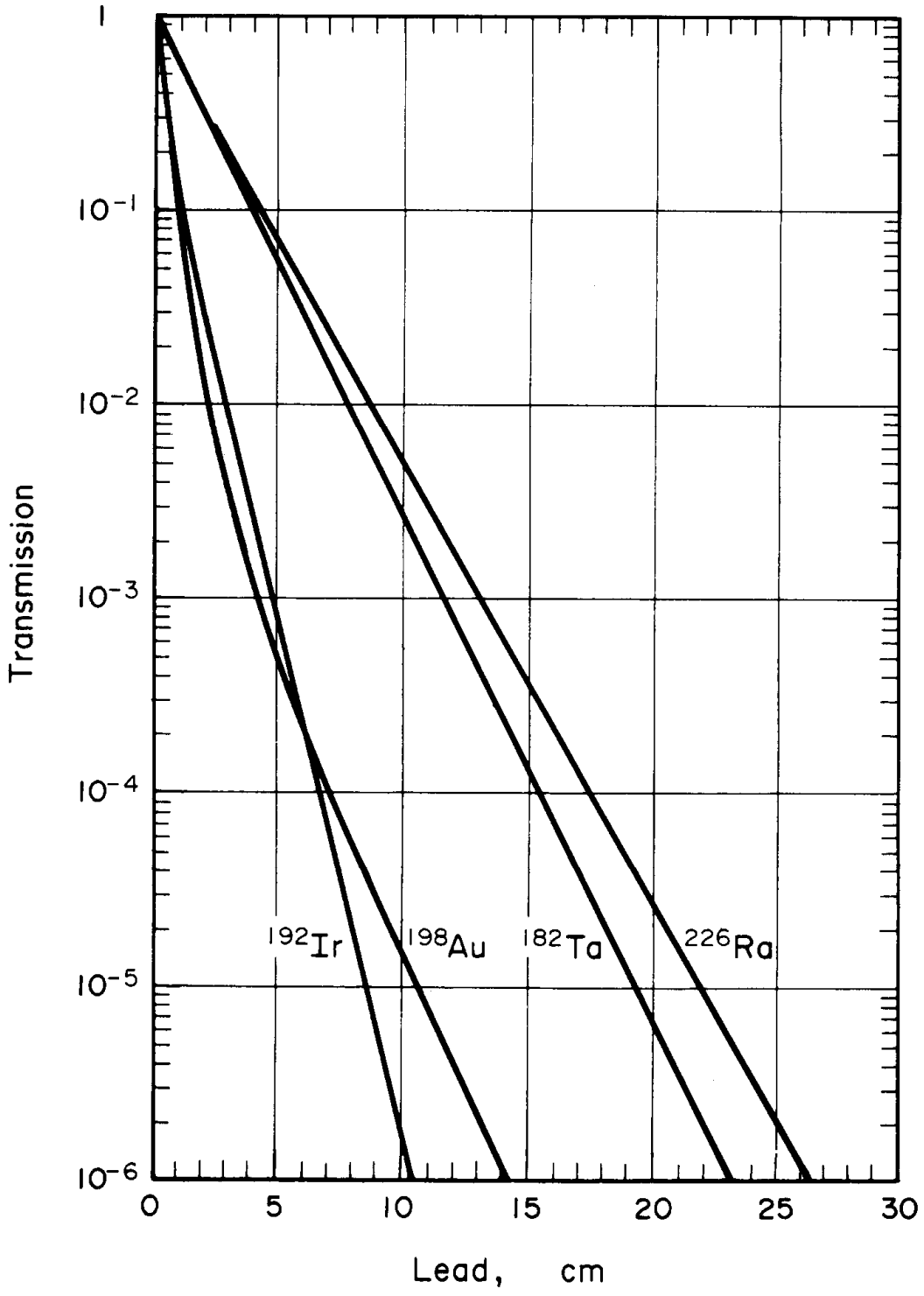
Figuur 29 *Verhouding van effectieve dosis en omgevingsdosisequivalent als functie van de fotonenergie bij verschillende bestralingsgeometrieën (ICRP-74)*

materiaal	E (MeV)	μd						
		1	2	4	7	10	15	20
water	0,25	3,09	7,14	23,0	72,9	166	456	982
	0,5	2,52	5,14	14,3	38,8	77,6	178	334
	1,0	2,13	3,71	7,68	16,2	27,1	50,4	82,2
	2,0	1,83	2,77	4,88	8,46	12,4	19,5	27,7
	3,0	1,69	2,42	3,91	6,23	8,63	12,8	17,0
	4,0	1,58	2,17	3,34	5,13	6,94	9,97	12,9
	6,0	1,46	1,91	2,76	3,99	5,18	7,09	8,85
	8,0	1,38	1,74	2,40	3,34	4,25	5,66	6,95
beton	0,5	2,18	3,66	7,72	16,5	29,1	58,1	98,3
	1,0	1,95	2,60	5,98	11,6	18,7	33,1	50,6
	2,0	1,75	2,52	4,38	7,65	11,4	18,2	25,7
	3,0							
	4,0							
	6,0							
	8,0							
ijzer	0,5	1,98	3,09	5,98	11,7	19,2	35,4	55,6
	1,0	1,87	2,89	5,39	10,2	16,2	28,3	42,7
	2,0	1,76	2,43	4,13	7,25	10,9	17,6	25,1
	3,0	1,55	2,15	3,51	5,85	8,51	13,5	19,1
	4,0	1,45	1,94	3,03	4,91	7,11	11,2	16,0
	6,0	1,34	1,72	2,58	4,14	6,02	9,89	14,7
	8,0	1,27	1,56	2,23	3,49	5,07	8,50	13,0
lood	0,5	1,24	1,42	1,69	2,00	2,27	2,65	2,73
	1,0	1,36	1,69	2,26	3,02	3,74	4,81	5,86
	2,0	1,39	1,76	2,51	3,66	4,84	6,87	9,00
	3,0	1,34	1,68	2,43	3,75	5,30	8,44	12,3
	4,0	1,27	1,56	2,25	3,61	5,44	9,80	16,3
	6,0	1,18	1,40	1,97	3,34	5,69	13,8	32,7
	8,0	1,14	1,30	1,74	2,89	5,07	14,1	44,6

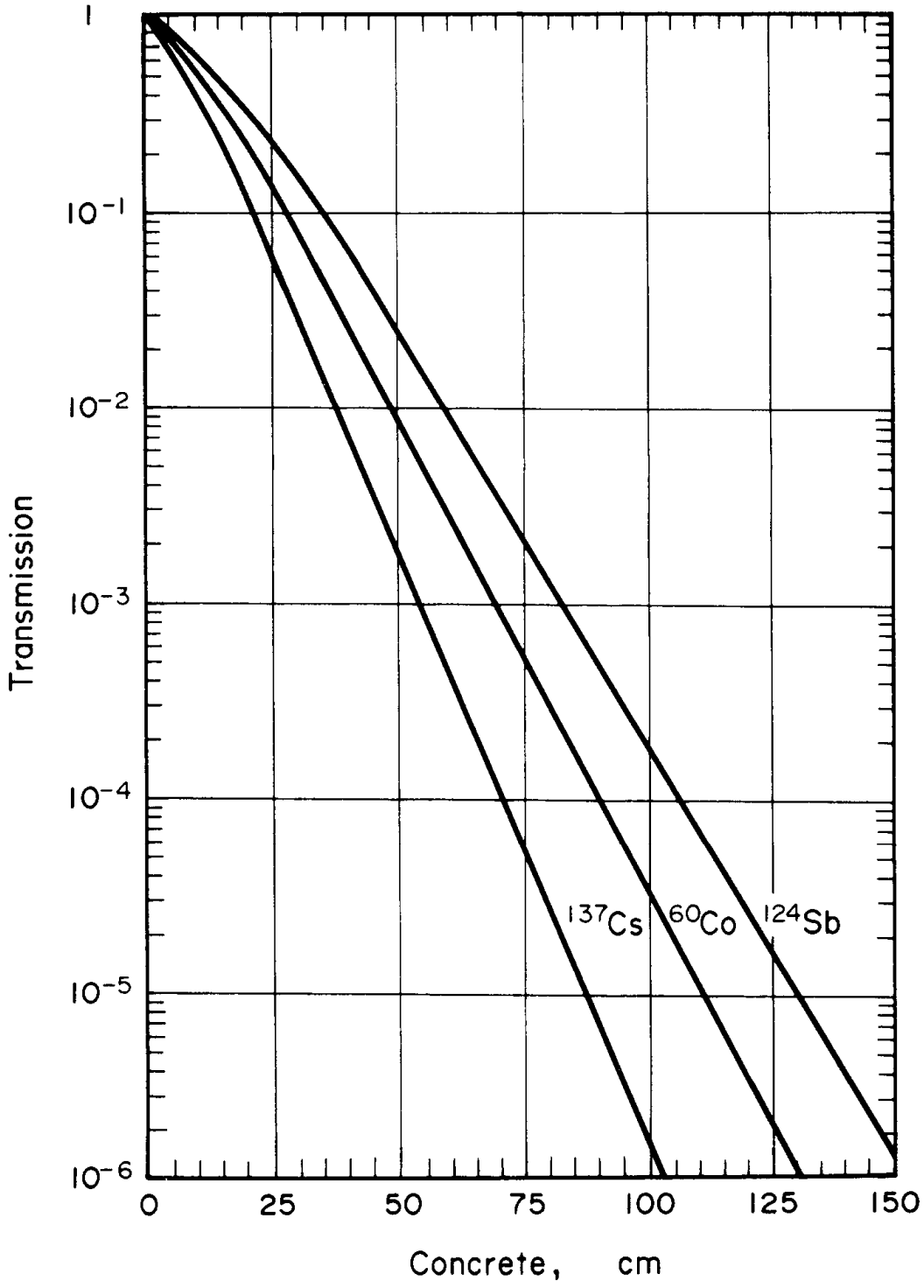
Figuur 30 *Dosisopbouwfactoren voor een isotrope puntbron en verschillende materialen als functie van de dikte van de afscherming en de energie van de fotonen*



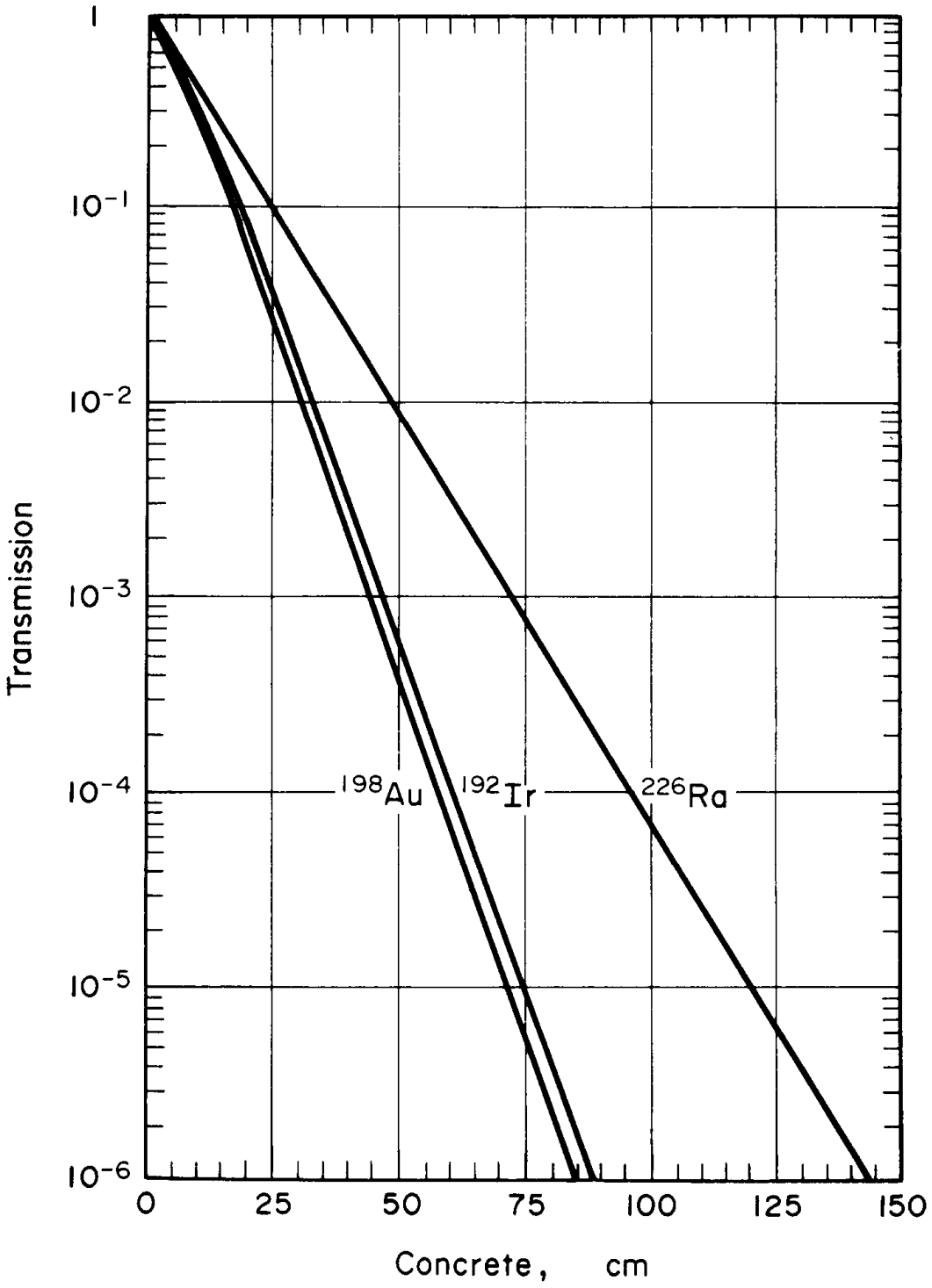
Figuur 31 Transmissie van brede bundels γ-straling door lood (ICRP-57)



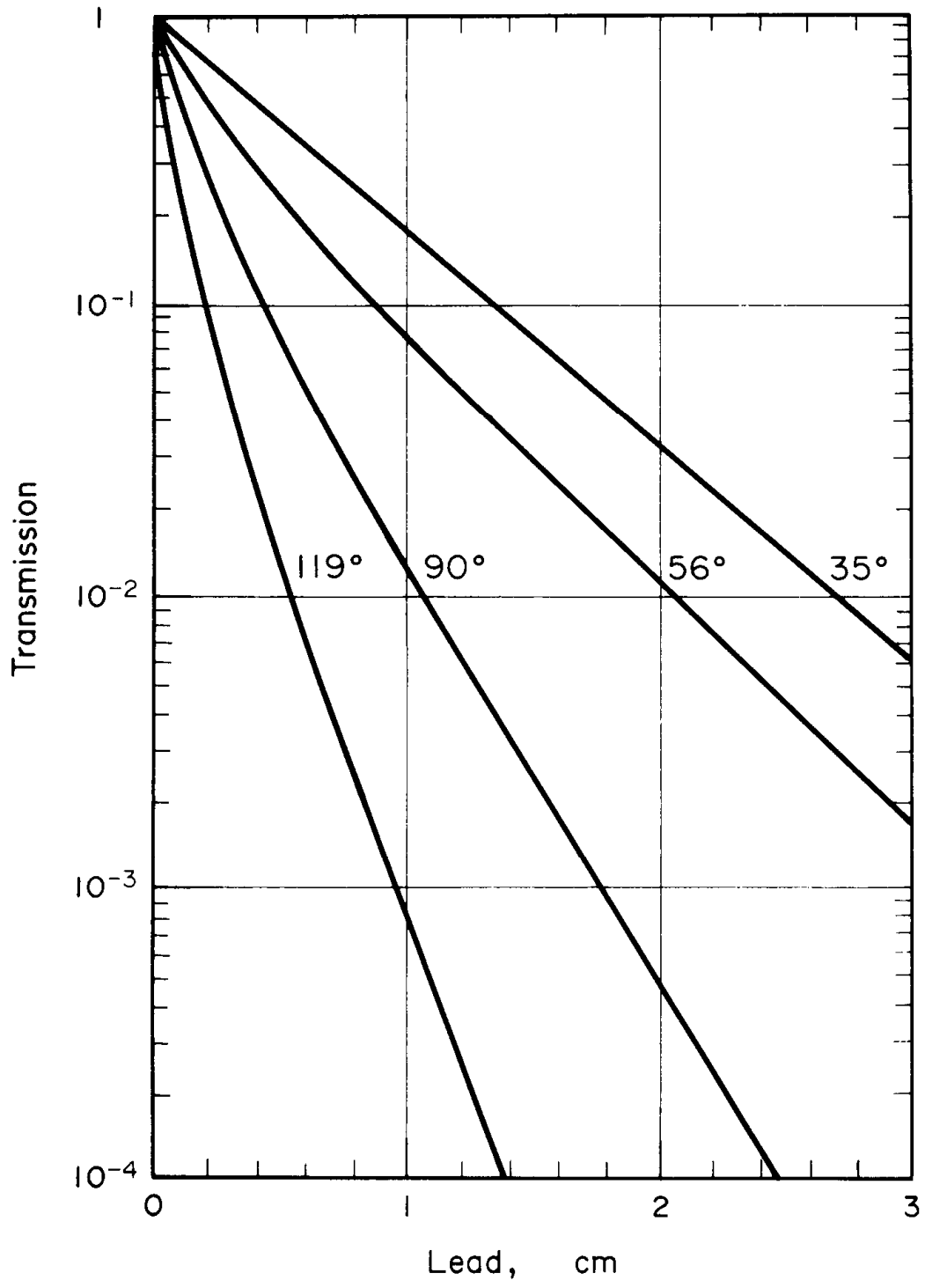
Figuur 32 Transmissie van brede bundels γ-straling door lood (ICRP-57)



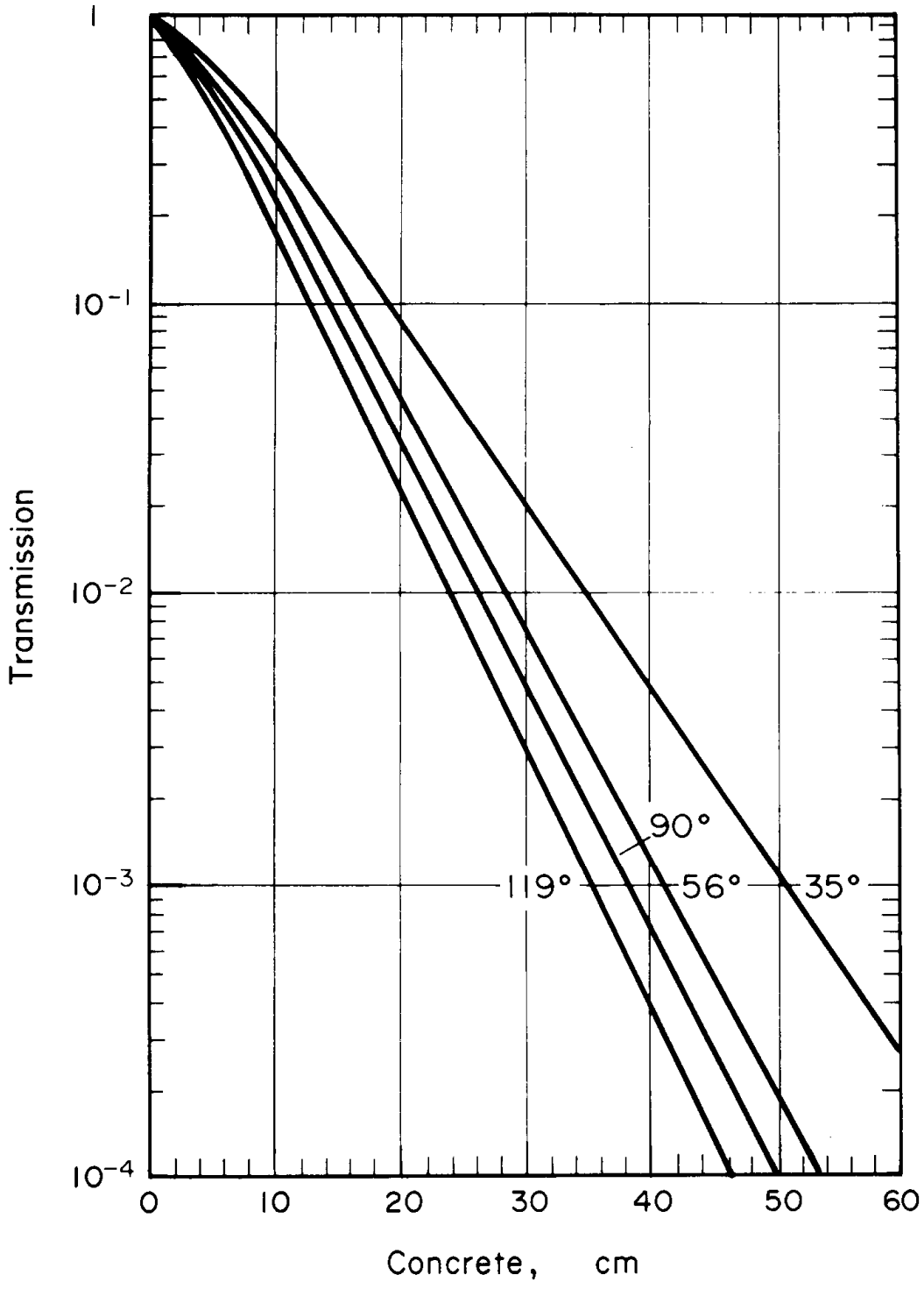
Figuur 33 Transmissie van brede bundels γ-straling door beton (ICRP-57)



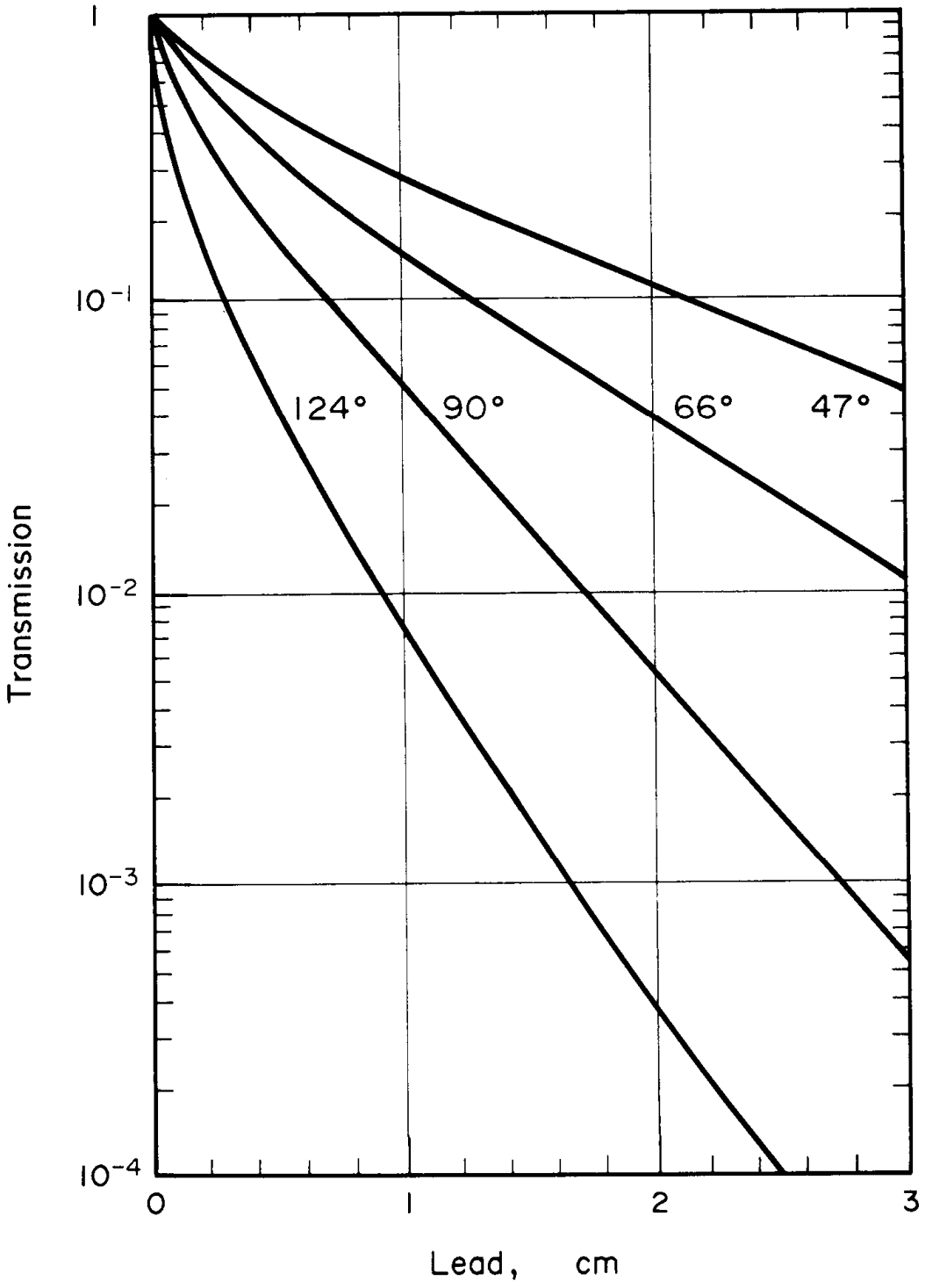
Figuur 34 Transmissie van brede bundels γ-straling door beton (ICRP-57)



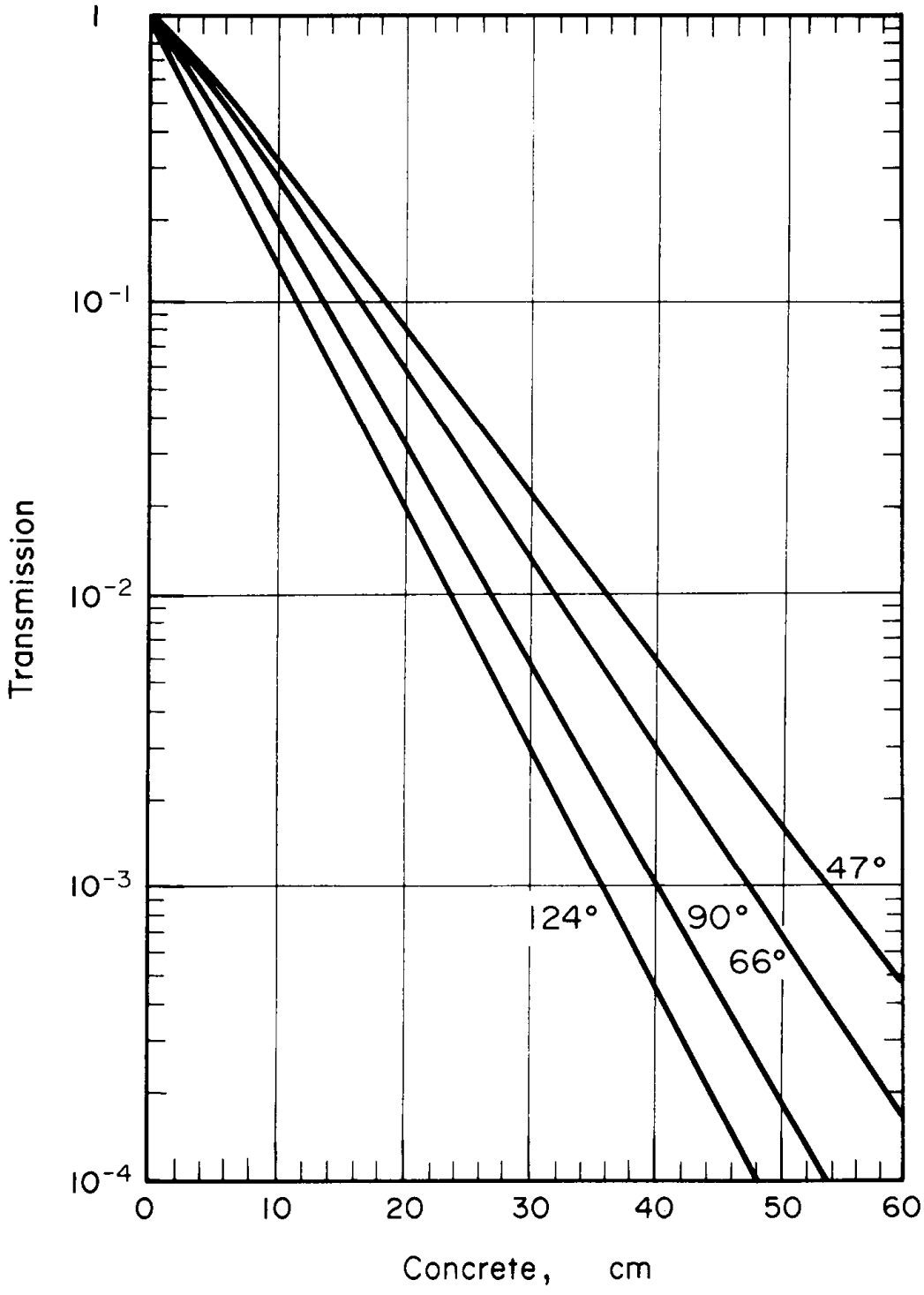
Figuur 35 *Transmissie van aan beton verstrooide γ-straling van ^{137}Cs door lood (ICRP-57)*



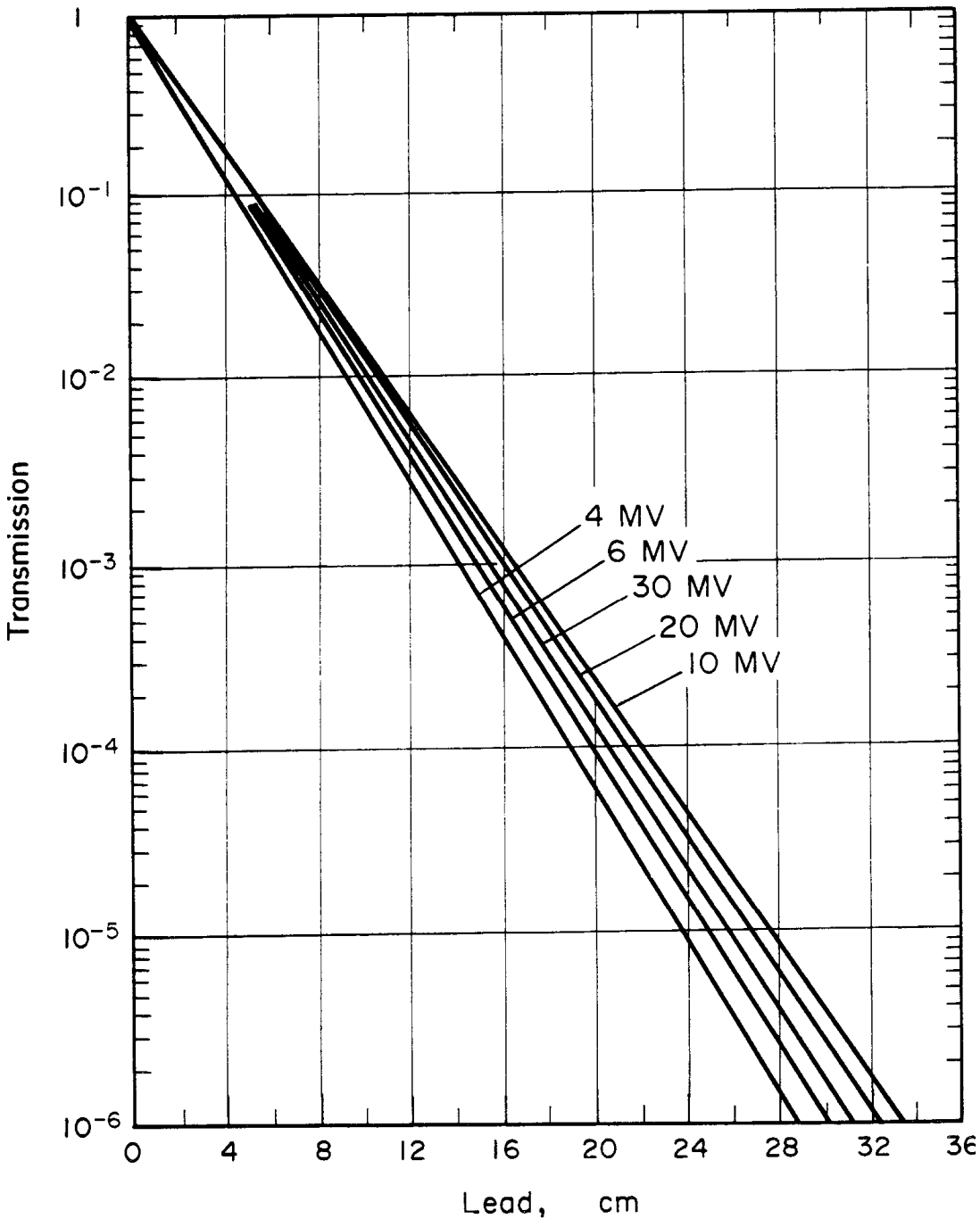
Figuur 36 *Transmissie van aan beton verstrooide γ-straling van ^{137}Cs door beton (ICRP-57)*



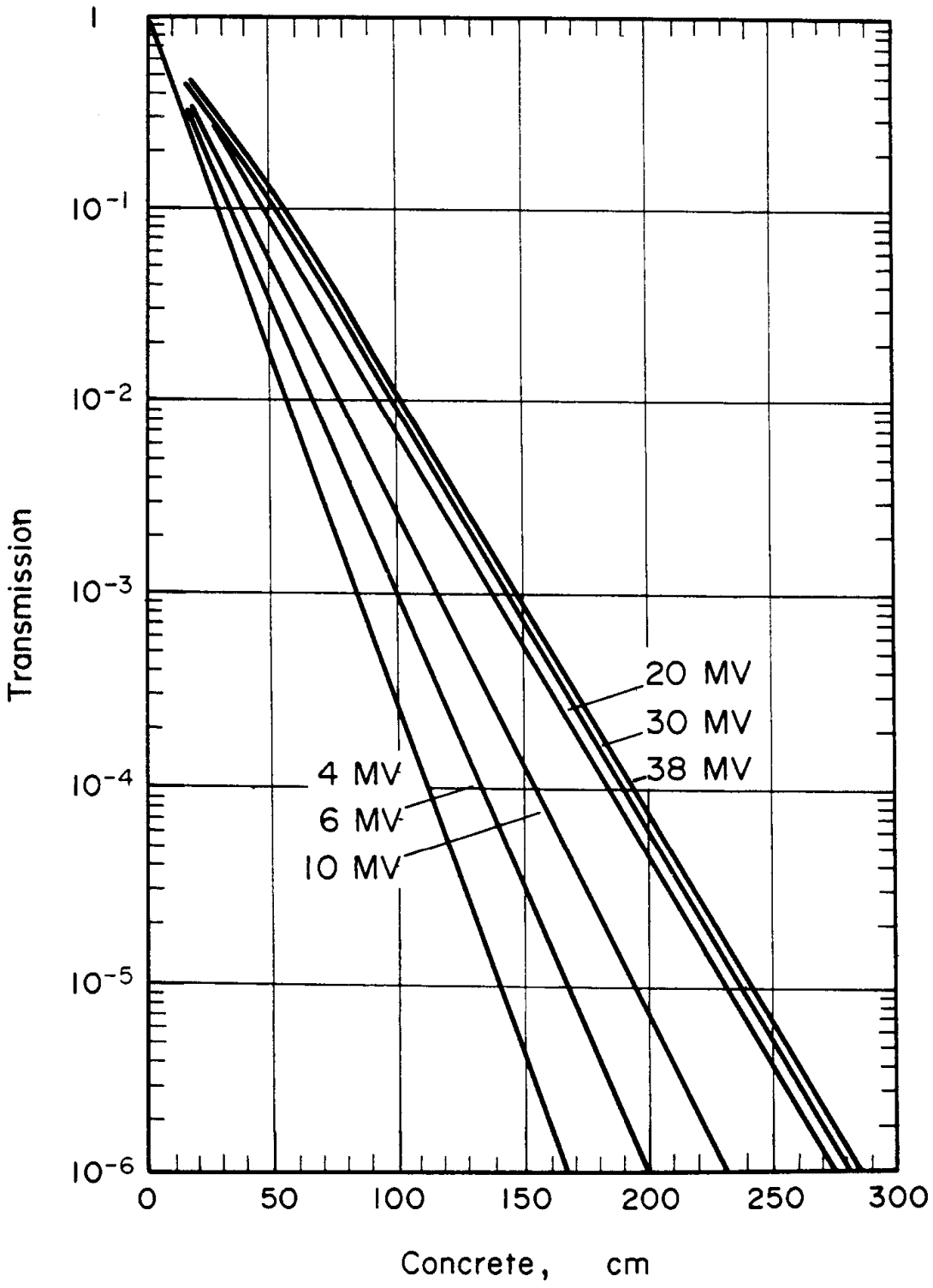
Figuur 37 *Transmissie van aan fantoom verstrooide γ-straling van ^{60}Co door lood (ICRP-57)*



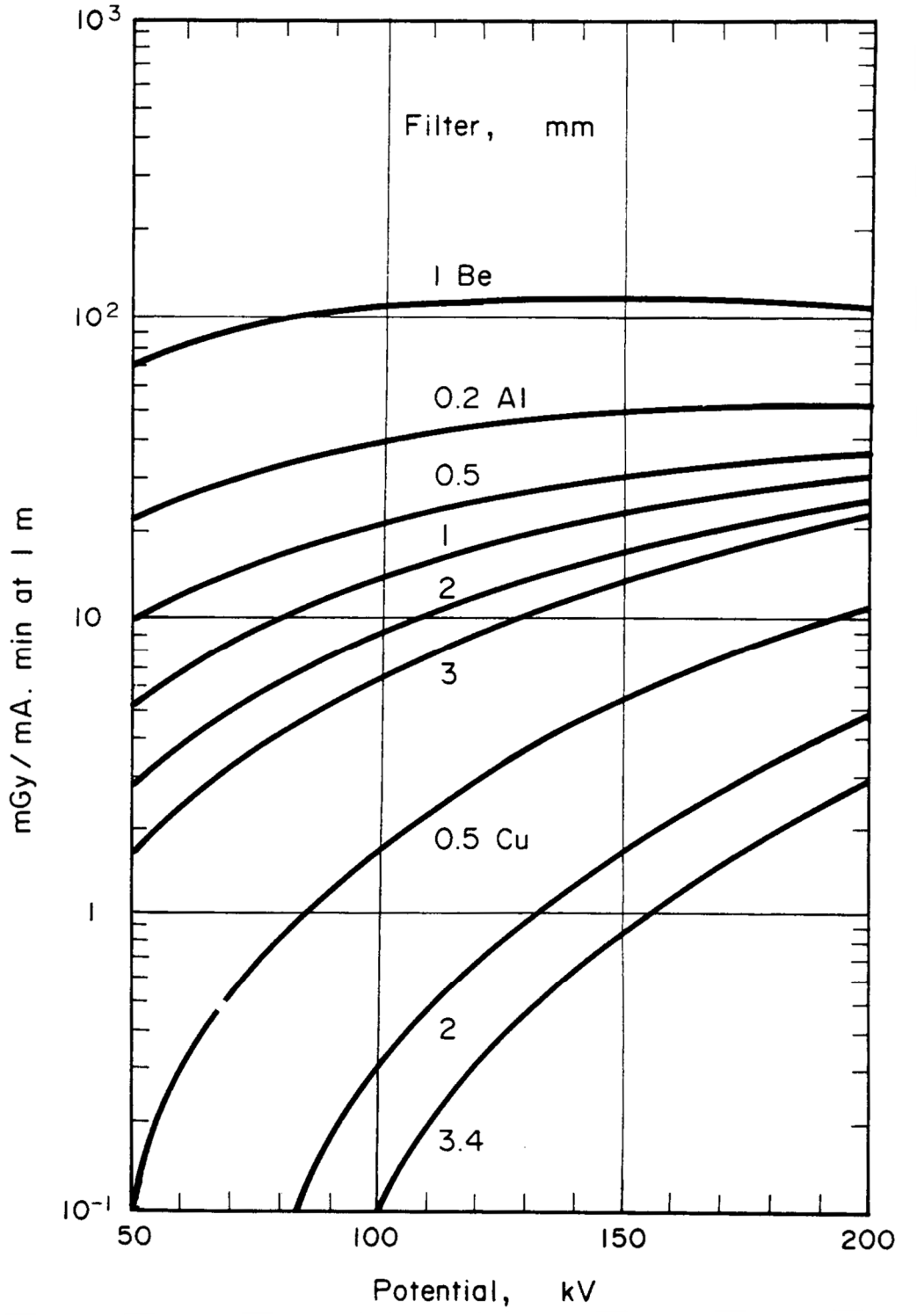
Figuur 38 *Transmissie van aan fantoom verstrooide γ-straling van ^{60}Co door beton (ICRP-57)*



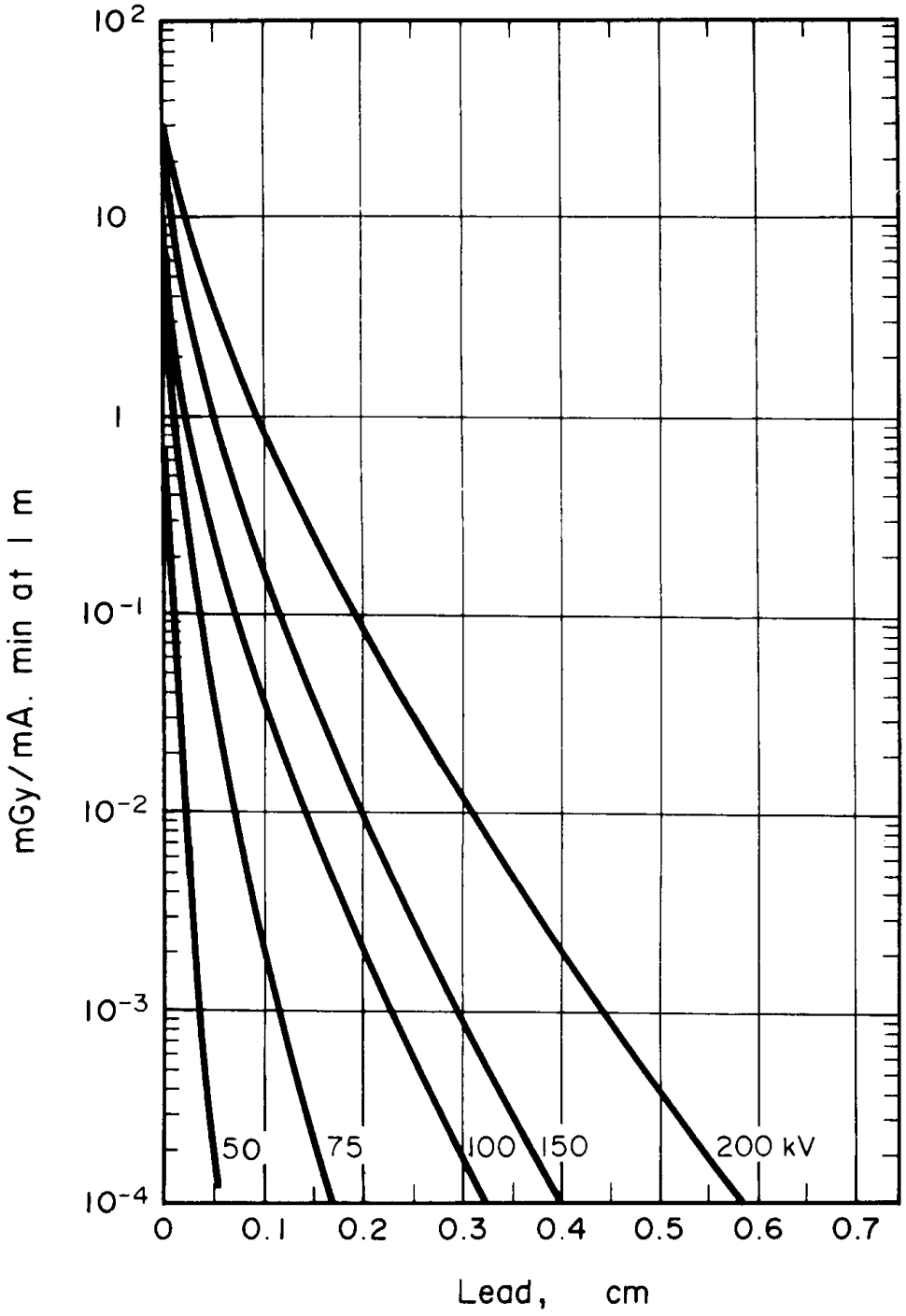
Figuur 39 *Transmissie van brede bundels röntgenstraling door lood (ICRP-33)*



Figuur 40 *Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton (ICRP-33)*



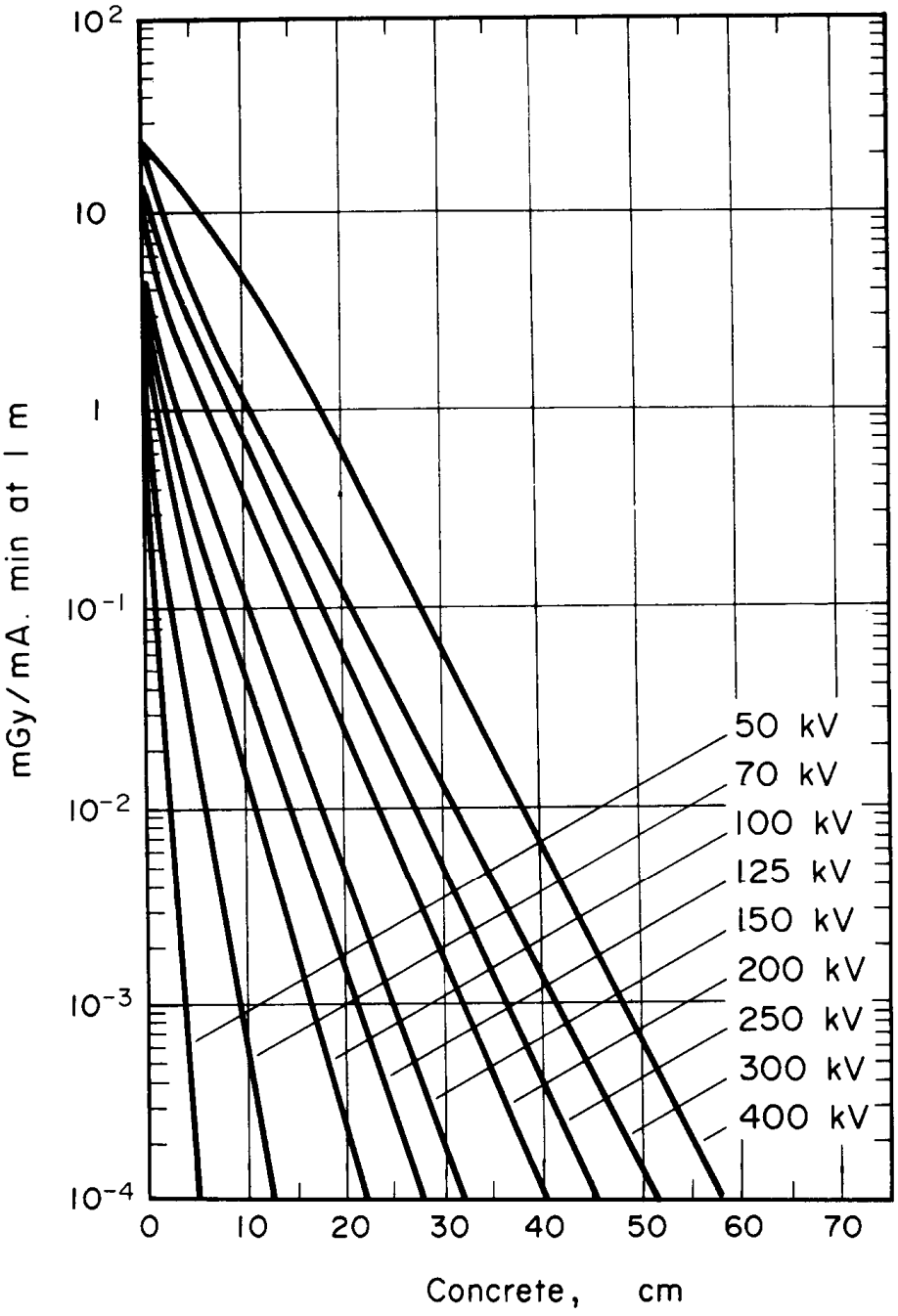
Figuur 41 Kermatempo voor verschillende filtraties (ICRP-33)



gelijkspanning, anode van wolfraam en filter van 2 mm aluminium

intensiteit bij 0 cm lood: 28,7 bij 200 kV, 18,3 bij 150 kV, 9,6 bij 100 kV, 6,1 bij 75 kV en 2,6 bij 50 kV

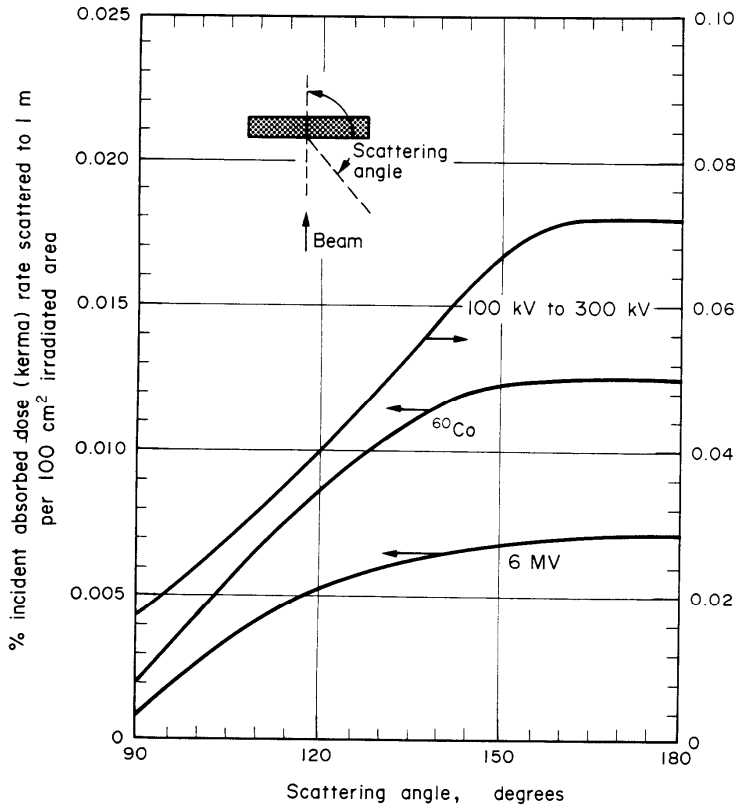
Figuur 42 *Kermatempo en transmissie van röntgenstraling door lood (ICRP-57)*



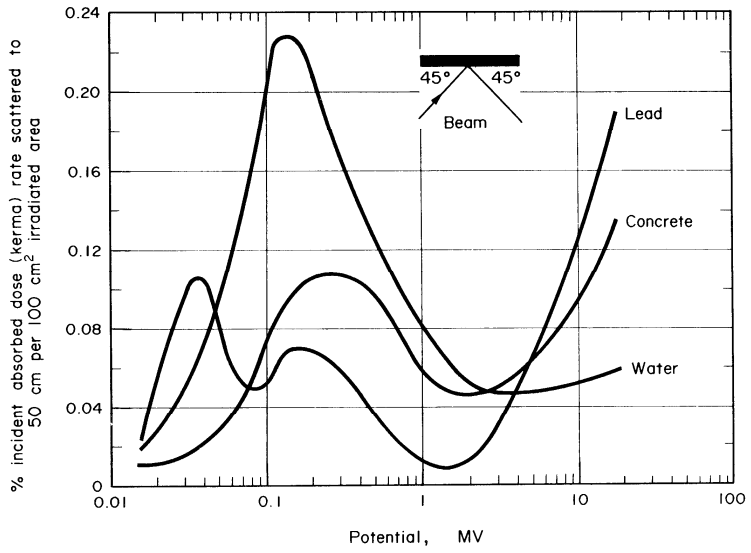
50-300 kV: halve-sinusspanning, anode van wolfraam en filter van 1 mm aluminium bij 50 kV, 1,5 mm aluminium bij 70 kV, 2 mm aluminium bij 100 kV en 3 mm aluminium bij 125-300 kV
400 kV: gelijkspanning, anode van goud en filter van 3 mm koper

intensiteit bij 0 cm beton: 23,5 bij 400 kV, 20,9 bij 300 kV, 13,9 bij 250 kV, 8,9 bij 200 kV, 5,2 bij 150 kV, 3,9 bij 125 kV, 2,8 bij 100 kV, 2,1 bij 70 kV en 1,7 bij 50 kV

Figuur 43 *Kermatempo en transmissie van röntgenstraling door beton (ICRP-57)*



Figuur 44 *Verstrooiing van röntgenstraling aan beton als functie van de verstrooihoek bij loodrechte inval (ICRP-33)*



Figuur 45 *Verstrooiing van röntgenstraling aan water, beton en lood als functie van de buisspanning (invalshoek = uitvalshoek = 45°) (ICRP-33)*

bronorgaan	*massa (g)*	*doelorgaan*	*massa (g)*
eierstokken	11	eierstokken	11
teelballen	35	teelballen	35
spierweefsel	28 000	spierweefsel	28 000
rood beenmerg	1500	rood beenmerg	1500
compact bot	4000	botoppervlak	120
sponsachtig bot	1000		
longen	1000	longen	1000
schildklier	20	schildklier	20
inhoud maag	250	wand maag	150
inhoud dunne darm	400	wand dunne darm	640
inhoud dikke darm (boven)	220	wand dikke darm (boven)	210
inhoud dikke darm (onder)	135	wand dikke darm (onder)	160
nieren	310	nieren	310
lever	1800	lever	1800
alvleesklier	100	alvleesklier	100
huid	2600	huid	2600
milt	180	milt	180
bijnieren	14	bijnieren	14
inhoud blaas	200	wand blaas	45
		zwezerik	20
		baarmoeder	80
		hersenen	1400
zacht weefsel	63 000		
lichaamswater	42 000		
totale lichaam	70 000		

Figuur 46 Massa's van bron- en doelorganen van de referentiemens (ICRP-23)

orgaan (T)	w_T
borstweefsel	0,12
dikke darm	0,12
longen	0,12
maag	0,12
rood beenmerg	0,12
gonaden	0,08
blaas	0,04
lever	0,04
schildklier	0,04
slokdarm	0,04
botoppervlak	0,01
hersenen	0,01
huid	0,01
speekselklieren	0.01
13 overige organen *	0,12

* alvleesklier, baarmoeder(hals) / prostaat, bijnieren, dunne darm, extrathoraciaal longweefsel, galblaas, hart, lymfeklieren, milt, mondslijmvlies, nieren, spierweefsel en zwezerik

Figuur 47 Orgaanweegfactoren w_T (ICRP-103)

doelorgaan	*fotonenergie (keV)*						
	50	100	200	500	1000	1500	2000
wand blaas	2,04E-7	6,16E-7	5,60E-7	1,21E-7	5,80E-7	8,48E-7	9,02E-7
maagwand	8,90E-6	7,07E-6	6,96E-6	6,50E-6	6,44E-6	6,00E-6	6,11E-6
nieren	1,95E-5	1,58E-5	1,36E-5	1,29E-5	1,18E-5	1,14E-5	1,10E-5
lever	1,52E-4	9,14E-5	8,82E-5	8,85E-5	8,07E-5	7,48E-5	6,86E-5
longen	1,45E-5	9,92E-6	8,84E-6	8,23E-6	7,90E-6	7,72E-6	6,96E-6
eierstokken	1,51E-6	1,63E-6	1,80E-6	6,53E-7	2,49E-6	3,44E-6	2,22E-6
alvleesklier	2,18E-5	1,77E-5	1,35E-5	1,66E-5	1,36E-5	1,21E-5	9,99E-6
botoppervlak	7,80E-6	4,93E-6	3,17E-6	2,53E-6	2,30E-6	2,26E-6	2,20E-6
rood beenmerg	9,33E-6	7,14E-6	4,64E-6	3,72E-6	3,21E-6	3,26E-6	3,17E-6
milt	2,93E-6	3,56E-6	3,34E-6	3,44E-6	3,81E-6	2,95E-6	3,14E-6
teelballen	3,42E-8	1,90E-7	3,05E-7	3,92E-7	8,76E-7	4,70E-7	4,79E-7
schildklier	8,81E-8	3,80E-7	8,23E-7	6,32E-7	6,81E-7	6,87E-7	6,90E-7
baarmoeder	9,07E-7	1,51E-6	1,40E-6	1,52E-6	1,28E-6	2,07E-6	1,81E-6
hele lichaam	9,48E-6	6,54E-6	5,94E-6	5,86E-6	5,49E-6	5,16E-6	4,86E-6

Figuur 48 Specifieke geabsorbeerde fracties SAF (in g^{-1}) voor bronorgaan lever (ICRP-23)

doelorgaan	*fotonenergie (keV)*						
	50	100	200	500	1000	1500	2000
wand blaas	2,28E-7	3,15E-7	6,27E-7	4,52E-7	1,25E-6	8,91E-7	9,65E-7
maagwand	5,86E-5	4,09E-5	3,36E-5	3,39E-5	2,93E-5	3,14E-5	2,65E-5
nieren	5,30E-5	3,61E-5	3,14E-5	2,93E-5	2,59E-5	2,55E-5	2,33E-5
lever	2,93E-6	3,78E-6	3,67E-6	3,69E-6	3,53E-6	3,45E-6	3,27E-6
longen	1,23E-5	8,97E-6	7,91E-6	7,56E-6	6,87E-6	6,21E-6	6,38E-6
eierstokken	1,19E-6	1,14E-6	2,05E-6	3,70E-7	1,70E-6	2,17E-6	3,46E-6
alvleesklier	1,23E-4	7,35E-5	6,58E-5	6,70E-5	5,80E-5	5,13E-5	4,94E-5
botoppervlak	8,30E-6	5,06E-6	3,25E-6	2,65E-6	2,48E-6	2,36E-6	2,18E-6
rood beenmerg	1,05E-5	7,47E-6	5,04E-6	3,90E-6	3,64E-6	3,35E-6	3,19E-6
milt	7,24E-4	4,21E-4	4,32E-4	4,49E-4	4,10E-4	3,77E-4	3,55E-4
teelballen	2,09E-8	1,42E-7	2,45E-7	3,30E-7	3,88E-7	4,14E-7	4,26E-7
schildklier	5,15E-8	2,70E-7	4,16E-7	5,10E-7	5,68E-7	5,83E-7	5,88E-7
baarmoeder	6,87E-7	1,61E-6	1,42E-6	1,61E-6	2,11E-6	6,25E-7	1,76E-6
hele lichaam	9,47E-6	6,52E-6	5,93E-6	5,82E-6	5,46E-6	5,16E-6	4,81E-6

Figuur 49 Specifieke geabsorbeerde fracties SAF (in g^{-1}) voor bronorgaan milt (ICRP-23)

AMAD (μm)	*ET_1*	*ET_2*	*$BB_{fast+seq}$*	*BB_{slow}*	*$bb_{fast+seq}$*	*bb_{slow}*	*AI*	*totaal*
0,0006	0,45	0,44	0,030	0,030	0,020	0,020	0,00029	0,99
0,001	0,40	0,40	0,039	0,039	0,048	0,048	0,0037	0,99
0,002	0,30	0,32	0,042	0,042	0,11	0,11	0,043	0,96
0,005	0,16	0,18	0,025	0,025	0,13	0,13	0,27	0,92
0,01	0,087	0,098	0,014	0,014	0,095	0,095	0,47	0,88
0,02	0,053	0,059	0,0081	0,0081	0,063	0,063	0,49	0,74
0,05	0,032	0,034	0,0047	0,0047	0,036	0,036	0,31	0,46
0,1	0,032	0,032	0,0034	0,0034	0,024	0,024	0,21	0,33
0,2	0,055	0,061	0,0032	0,0032	0,015	0,015	0,15	0,30
0,5	0,089	0,11	0,0040	0,0039	0,011	0,011	0,12	0,35
0,7	0,12	0,15	0,0051	0,0048	0,0094	0,0092	0,11	0,42
1	0,17	0,21	0,0066	0,0058	0,0084	0,0081	0,11	0,51
2	0,25	0,32	0,0099	0,0074	0,0080	0,0068	0,092	0,70
3	0,30	0,37	0,011	0,0073	0,0077	0,0060	0,077	0,78
5	0,34	0,40	0,012	0,0059	0,0066	0,0044	0,053	0,82
7	0,35	0,40	0,011	0,0046	0,0055	0,0032	0,038	0,81
10	0,35	0,38	0,0095	0,0031	0,0042	0,0021	0,024	0,77
15	0,34	0,36	0,0072	0,0018	0,0027	0,0011	0,012	0,71
20	0,32	0,33	0,0055	0,0011	0,00066	0,0018	0,0072	0,67

Figuur 50 Longdepositiefracties neusademer (ademtempo = 1,2 $m^3 \cdot h^{-1}$) (ICRP-66)

AMAD (μm)	ET_1	ET_2	$BB_{fast+seq}$	BB_{slow}	$bb_{fast+seq}$	bb_{slow}	AI	totaal
0,0006	0,20	0,58	0,060	0,060	0,040	0,040	0,00061	0,99
0,001	0,18	0,49	0,066	0,066	0,081	0,081	0,0062	0,98
0,002	0,14	0,35	0,058	0,058	0,14	0,14	0,058	0,95
0,005	0,075	0,18	0,031	0,031	0,15	0,15	0,30	0,91
0,01	0,042	0,099	0,016	0,016	0,10	0,10	0,50	0,87
0,02	0,026	0,060	0,0091	0,0091	0,065	0,065	0,50	0,73
0,05	0,015	0,034	0,0052	0,0052	0,037	0,037	0,32	0,45
0,1	0,012	0,024	0,0038	0,0038	0,024	0,024	0,21	0,30
0,2	0,015	0,025	0,0040	0,0039	0,016	0,016	0,15	0,23
0,5	0,024	0,037	0,0066	0,0059	0,013	0,012	0,14	0,24
0,7	0,033	0,055	0,011	0,0086	0,013	0,012	0,14	0,28
1	0,047	0,083	0,017	0,012	0,014	0,012	0,16	0,34
2	0,082	0,17	0,039	0,020	0,020	0,014	0,17	0,52
3	0,10	0,24	0,054	0,023	0,024	0,014	0,17	0,62
5	0,12	0,32	0,068	0,021	0,026	0,012	0,13	0,71
7	0,13	0,37	0,071	0,018	0,024	0,0099	0,11	0,73
10	0,14	0,41	0,066	0,013	0,019	0,0070	0,073	0,72
15	0,14	0,43	0,054	0,0083	0,014	0,0041	0,042	0,69
20	0,13	0,43	0,043	0,0053	0,0095	0,0025	0,026	0,65

Figuur 51 Longdepositiefracties mondademer (ademtempo = 1,2 $m^3 \cdot h^{-1}$) (ICRP-66)

RECENTE EXAMENS