STRALINGSHYGIËNE VRAAGSTUKKEN

voor toezichthoudend medewerkers stralingsbescherming

verspreidbare radioactieve stoffen
- niveau C

Frits Pleiter
Hielke Freerk Boersma

editie 2025

Deze vraagstukken dienen ter ondersteuning van de syllabus 'STRALINGSHYGIËNE voor toezichthoudend medewerkers stralingsbescherming - verspreidbare radioactieve stoffen - niveau C' van Frits Pleiter en Hielke Freerk Boersma (GARP, Groningen, 2025).

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 9 van de Appendix zijn overgenomen uit het Handboek Radionucliden (Nucleus, Schoorl, 2007) met vriendelijke toestemming van de auteur.

INHOUD

METEN AAN RADIOACTIVITEIT 1

1 Meten en statistiek 3
2 Minimaal detecteerbare activiteit 4
3 Vloeistofscintillatieteller 5
4 Bepaling telrendement 6
5 Besmetting ten gevolge van het reactorongeval in Tsjernobyl 7
6 Moeder-dochterevenwicht 8
7 Activiteit van een ^{22}Na-bron 9
8 Verzwakking van γ-straling door ijzer 10
9 Meting aan een ^{131}I-oplossing 11
10 Luchtbesmettingsmonitor 12
Uitwerkingen 14

BRONNEN, AFSCHERMING EN TRANSPORT 17

11 Lektest van een ^{60}Co-bron 19
12 Vermissing van een ^{133}Ba-bron 20
13 Verontreinigd $^{51}CrCl_3$ 22
14 Loodpot 23
15 Keuze van een transportcontainer 24
Uitwerkingen 25

RADIONUCLIDENLABORATORIUM 29

16 Radioimmunoassay (RIA) 31
17 Labeling met ^{35}S 32
18 Labeling van fosfaat met ^{32}P 33
19 Incident met ^{131}I 34
20 Molybdeenkoe 35
Uitwerkingen 36

INWENDIGE BESMETTING 39

21 Inwendige ^{3}H-besmetting 41
22 Urinemeting na besmetting met H^{36}Cl 42
23 Injectie met ^{67}Ga-citraat 43
24 Lozing van ^{41}Ar door een kerncentrale 44
25 Slijpschijf met natuurlijke radioactieve stoffen 45
Uitwerkingen 47

APPENDIX 51

Figuur 1 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{18}F 54
Figuur 2 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{32}P 55
Figuur 3 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{35}S 56
Figuur 4 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{42}K 57
Figuur 5 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{51}Cr 58
Figuur 6 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{67}Ga 59
Figuur 7 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{99m}Tc 60
Figuur 8 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{125}I 61
Figuur 9 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{131}I 62
Figuur 10 De maximale massieke dracht $\rho R_{\beta,max}$ 63
Figuur 11 Transmissie van brede bundels γ-straling door lood 64
Figuur 12 Categorie-indeling bij het vervoer van pakketten van type A 65
Figuur 13 Parameters volgens de Richtlijn Radionuclidenlaboratoria 66
Figuur 14 Longdepositiefracties voor neusademer 67

METEN AAN RADIOACTIVITEIT

2 STRALINGSHYGIËNE

1 Meten en statistiek

Voor het meten van een geringe hoeveelheid activiteit wordt gebruik gemaakt van een meetopstelling met een zeer lage achtergrond. Er worden met deze opstelling twee metingen verricht. Eerst wordt gemeten met vlak onder de detector een platte telbak waarin een hoeveelheid vloeistof is ingedampt. Hierbij worden 85 deeltjes gedetecteerd in 1000 seconden (meting A). Daarna wordt de meting herhaald met een schone telbak, waarbij 45 deeltjes worden gemeten in 1000 seconden (meting B).

Vraag 1

Bereken het bruto teltempo en de standaarddeviatie hiervan. Druk beide grootheden uit in telpulsen per seconde (tps) en geef het resultaat in de vorm $R_{bruto} \pm \sigma_{bruto}$.

Vraag 2

Bereken het nuleffect en de standaarddeviatie hiervan. Druk beide grootheden uit in tps en geef het resultaat in de vorm $R_{nul} \pm \sigma_{nul}$.

Vraag 3

Bereken het netto teltempo en de standaarddeviatie hiervan. Druk beide grootheden uit in tps en geef het resultaat in de vorm $R_{netto} \pm \sigma_{netto}$.

Vraag 4a

Bereken de relatieve fout in het netto teltempo.

Vraag 4b

Hoe lang dient men tenminste te tellen, wil men bereiken dat de relatieve fout 10% bedraagt met een betrouwbaarheid van 95% ? Hierbij blijven de teltijden van meting A en meting B aan elkaar gelijk.

Puntenwaardering 1: 3 2: 1 3: 5 4a: 1 4b: 6

2 Minimaal detecteerbare activiteit

De toezichthouder beschikt over een GM-telbuis met een cirkelvormig eindvenster met een middellijn van 10 mm. Het nuleffect van deze telbuis bedraagt 24 telpulsen per minuut. Een puntvormige radioactieve bron bevindt zich op de as van de GM-telbuis, op een afstand van 10 cm van het venster.

Gegevens
- De radioactieve bron zendt alleen β-deeltjes uit.
- Zelfabsorptie in de bron en absorptie in het venster van de telbuis mogen worden verwaarloosd.
- Het geometrische rendement ($f_{geometrie}$) is gedefinieerd als het aantal β-deeltjes dat het venster van de detector bereikt gedeeld door het aantal β-deeltjes dat in dezelfde tijd door de bron wordt uitgezonden.
- Het intrinsieke detectorrendement ($f_{detector}$) is gedefinieerd als het netto aantal telpulsen gedeeld door het aantal β-deeltjes dat in dezelfde tijd het telgas bereikt. Het intrinsieke detectorrendement van deze GM-telbuis voor de uitgezonden β-deeltjes is 100%.
- Het detectierendement (ε) is gedefinieerd als het netto aantal telpulsen per seconde (tps) gedeeld door de activiteit van de bron (uitgedrukt in Bq).
- De minimaal detecteerbare activiteit is gedefinieerd als de activiteit die tot een significante verhoging van het teltempo leidt. Voor dit vraagstuk wordt die verhoging gelijk gesteld aan een verdubbeling van de achtergrond: het bruto teltempo wordt dan dus tweemaal het nuleffect.

Vraag 1
Bereken het geometrische rendement $f_{geometrie}$ van de meetopstelling.

Vraag 2
Bereken het detectierendement ε van de meetopstelling.

Vraag 3
Bereken de minimaal detecteerbare activiteit.

Vervolgens wordt de GM-telbuis verplaatst tot vlak in de buurt van de puntvormige radioactieve bron.

Vraag 4
Bereken nogmaals de minimaal detecteerbare activiteit.

Puntenwaardering **1: 4** **2: 4** **3: 4** **4: 4**

3 Vloeistofscintillatieteller

In een radionuclidenlaboratorium wordt alleen gewerkt met de radionucliden ^{3}H, ^{14}C en ^{32}P. Deze nucliden zenden uitsluitend β-deeltjes uit met een maximale energie van respectievelijk 19 keV, 156 keV en 1710 keV. Voor het doen van controlemetingen wordt een vloeistofscintillatieteller met een vaste instelling gebruikt.

Gegevens

- Het detectierendement voor ^{3}H, ^{14}C en ^{32}P in de verschillende kanalen (zie tabel 1).
- Het nuleffect in telpulsen per minuut (tpm) in de verschillende kanalen, gemeten gedurende 1000 minuten (zie tabel 1).
- De minimaal detecteerbare activiteit is gedefinieerd als de activiteit die tot een significante verhoging van het teltempo leidt. In dit vraagstuk is het criterium dat het netto teltempo gelijk is aan tweemaal de standaarddeviatie van het nuleffect.

nuclide	*^{3}H-kanaal*	*^{14}C-kanaal*	*^{32}P-kanaal*
	telrendement (tps per Bq)		
^{3}H	0,20	0,00	0,00
^{14}C	0,12	0,54	0,00
^{32}P	0,015	0,11	0,80
	nuleffect (tpm)		
	13,5	9,7	18,9

Tabel 1. Specificaties van de vloeistofscintillatieteller.

Vraag 1

Bepaal voor het ^{32}P-kanaal het nuleffect in de vorm $R \pm \sigma$. Druk beide grootheden uit in telpulsen per seconde (tps).

Vraag 2

Bereken de minimaal detecteerbare ^{32}P-activiteit voor elk van de drie kanalen bij een meettijd van 10 minuten.

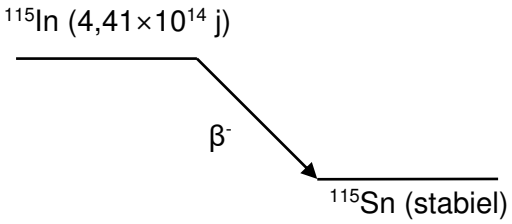
Vraag 3

Bereken voor het ^{32}P-kanaal de teltijd die minimaal nodig is om 0,1 Bq ^{32}P nog net te kunnen aantonen. Het criterium hierbij is weer dat het netto teltempo gelijk is aan tweemaal de standaarddeviatie van het nuleffect.

Puntenwaardering 1: 5 2: 6 3: 5

4 Bepaling telrendement

Een hoeveelheid van 100 mg indium metaal wordt opgelost in verdund zuur, overgebracht in een telpotje dat vervolgens wordt aangevuld met scintillatievloeistof.



Figuur 1. Het vervalschema van het radionuclide ^{115}In.

Gegevens
- Het vervalschema van het radionuclide ^{115}In (zie figuur 1).
- Het atoomgewicht van indium is 114,8 g/mol.
- Natuurlijk indium bestaat voor 95,7 atoom% uit het radioactieve nuclide ^{115}In.
- Het getal van Avogadro is N_{Avo} = 6,022×10^{23} atomen per mol.

Vraag 1
Bereken het aantal ^{115}In-atomen in 100 mg indium.

Vraag 2
Bereken de activiteit van 100 mg indium.

Vervolgens wordt het telpotje in de vloeistofscintillatieteller gebracht. In een meettijd van 8 uur worden 2116 telpulsen geteld. De achtergrond bedraagt 1440 telpulsen, eveneens gemeten in 8 uur.

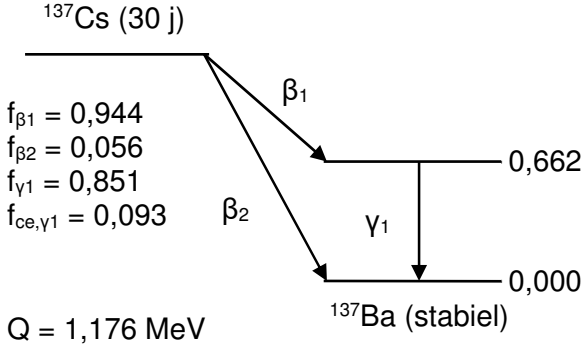
Vraag 3
Bereken het netto teltempo (R_{netto}) en de standaarddeviatie van het netto teltempo (σ_{netto}), beide uitgedrukt in telpulsen per seconde (tps).

Vraag 4
Bereken het telrendement (ε) en de standaarddeviatie van het telrendement (σ_ε), beide uitgedrukt in tps/Bq.

Puntenwaardering **1: 4** **2: 4** **3: 4** **4: 4**

5 Besmetting ten gevolge van het reactorongeval in Tsjernobyl

In juni 1986 wordt het filter in het ventilatiekanaal van een concertzaal verwisseld. Om de activiteit in het filter te bepalen, worden twee metingen verricht: (I) zodanig dat uitsluitend β-straling wordt gemeten, en (II) zodanig dat alleen γ-straling wordt gemeten. Het filter bevat ^{137}Cs dat afkomstig is van het reactorongeval in Tsjernobyl.



Figuur 1 Het vervalschema van het radionuclide ^{137}Cs. Energieën zijn gegeven in MeV.

Gegevens
- Het vervalschema van het radionuclide ^{137}Cs (zie figuur 1).
- Het effectieve oppervlak van het filter is 10 m².

Meting I wordt verricht met behulp van een besmettingsmonitor met een werkzaam oppervlak van 200 cm². De monitor wordt op zo kort mogelijke afstand midden boven het filter gehouden. Met filter worden 170 telpulsen per seconde (tps) gemeten en zonder filter 10 tps. Het detectierendement is 100% voor β-straling van ^{137}Cs. Het detectierendement voor γ-straling is verwaarloosbaar klein.

Vraag 1
Bereken de activiteit in het gehele filter uit het resultaat van de eerste meting. Verwaarloos hierbij eventuele absorptie van β-deeltjes in het filtermateriaal.

Voor meting II wordt een stukje van 25 cm² uit het filter geknipt. Met behulp van een NaI-kristal meet men 546 telpulsen per minuut (tpm) bij een nuleffect van 87 tpm. Het detectierendement van deze opstelling voor de γ-straling van ^{137}Cs is 0,15 telpulsen per uitgezonden γ-foton.

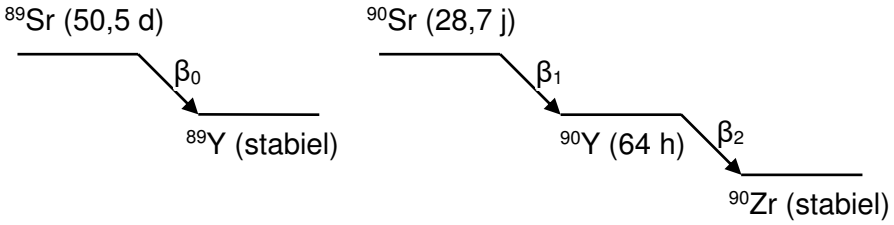
Vraag 2
Bereken de activiteit in het gehele filter uit het resultaat van de tweede meting.

Vraag 3
Bereken de procentuele absorptie van de β-straling in het filtermateriaal.

Puntenwaardering 1: 6 2: 6 3: 4

6 Moeder-dochterevenwicht (1987-2-4)

Op het filter waardoor lucht is gezogen tijdens de passage van de activiteitswolk ten gevolge van het Tsjernobyl-incident, worden onder meer de 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 van de scheiding is 02-09-86 om 10:00 uur. Het Sr-preparaat wordt onmiddellijk na de scheiding gemeten met behulp van een proportionele telbuis (meting I). Het netto teltempo bedraagt 1,77 telpulsen per seconde (tps). Precies een maand later, op 02-10-86, wordt het preparaat nogmaals gemeten (meting II). Het netto teltempo is dan 2,10 tps.



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

Gegevens
- De vereenvoudigde vervalschema's van ^{89}Sr, ^{90}Sr en ^{90}Y (zie figuur 1).
- Het telrendement van de meetopstelling voor β-deeltjes is 28%.
- Absorptie van β-straling mag worden verwaarloosd.

Vraag 1
Bereken de totale activiteit van ^{89}Sr, ^{90}Sr en ^{90}Y op het filter tijdens meting I.

Vraag 2
Bereken de totale activiteit van ^{89}Sr, ^{90}Sr en ^{90}Y op het filter tijdens meting II.

Vraag 3a
Beargumenteer dat tijdens meting I de activiteit van ^{90}Y verwaarloosbaar klein is.

Vraag 3b
Beargumenteer dat tijdens meting II de activiteiten van ^{90}Y en ^{90}Sr (bijna) gelijk zijn.

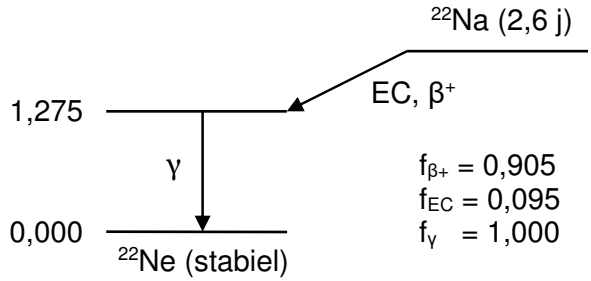
Vraag 3c
Bereken voor ^{89}Sr en ^{90}Sr de vervalcorrectie voor de tijd tussen meting I en II.

Vraag 4
Bereken de activiteit van ^{89}Sr en de activiteit van ^{90}Sr tijdens de monstername.

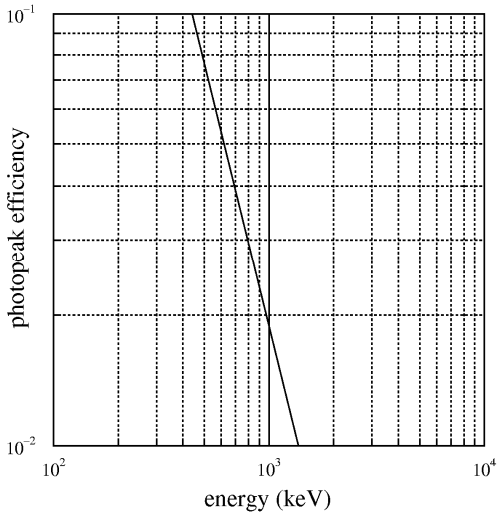
Puntenwaardering 1: 4 2: 1 3a: 2 3b: 2 3c: 2 4: 5

7 Activiteit van een ^{22}Na-bron

Een puntvormige bron met ^{22}Na is alzijdig omgeven met zo dik plastic, dat alle β^+-deeltjes in de omhulling worden gestopt. De ^{22}Na-bron wordt in de bronhouder van een NaI-scintillatiedetector geplaatst. In de fotopiek worden in 5 minuten 130 980 γ-fotonen gedetecteerd.



Figuur 1. Het vervalschema van het radionuclide ^{22}Na. Energieën zijn gegeven in MeV.



Figuur 2. Absoluut fotopiekrendement van de NaI-detector als functie van de γ-energie.

Gegevens

- Het vervalschema van ^{22}Na (zie figuur 1).
- Het absolute fotopiekrendement voor de gebruikte meetgeometrie, d.w.z. de kans dat een door de bron uitgezonden γ-foton aanleiding geeft tot een telpuls in de fotopiek (zie figuur 2).

Vraag 1

Bepaal het fotopiekrendement voor γ-fotonen in het verval van ^{22}Na.

Vraag 2

Bereken de activiteit van de bron.

Vraag 3

Schets het γ-spectrum zoals dat gemeten wordt met een NaI-scintillatiedetector.

Vraag 4

Geeft de radioactieve straling van ^{22}Na aanleiding tot meerdere fotopieken? Zo ja, geef dan de γ-energie en het teltempo (in telpulsen per minuut) voor elke fotopiek. Corrigeer, indien nodig, het bij vraag 3 geschetste γ-spectrum.

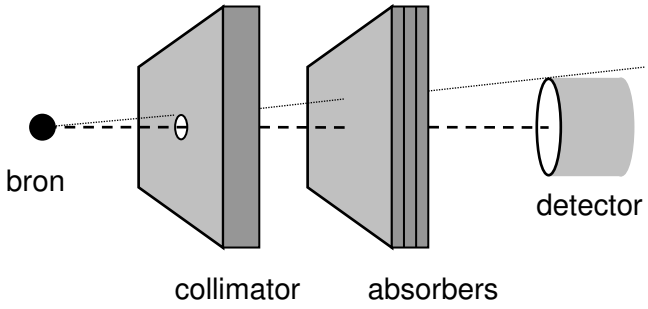
Puntenwaardering **1: 2** **2: 5** **3: 3** **4: 6**

8 Verzwakking van γ-straling door ijzer

Een bron van ^{60}Co wordt opgesteld op 20 cm afstand van een cilindervormige GM-telbuis, op de as van de telbuis. Er worden absorptiemetingen in brede bundelgeometrie uitgevoerd, waarbij platen ijzer tussen bron en telbuis worden opgesteld en wel loodrecht op genoemde as. De serie metingen wordt herhaald in een smalle bundelgeometrie, waarbij de γ-bundel wordt gecollimeerd met een dikke loden plaat met een cilindervormig gat dat zo is aangebracht dat de hele detector de bron kan "zien".

dikte (cm)	*brede bundel (tpm)*	*smalle bundel (tpm)*
0	9990	10 003
2	7343	4274
4	4506	1826
6	2605	780
8	1450	333
10	777	142

Tabel 1 Netto aantal telpulsen per minuut (tpm) als functie van de dikte van de absorber (in cm).



Figuur 1. Situatieschets van de meetopstelling.

Gegevens
- Situatieschets van de meetopstelling (zie figuur 1).
- Gemeten netto teltempo (in tpm) voor brede en smalle bundelgeometrie (zie tabel 1).
- De dichtheid van ijzer is $\rho = 7{,}8$ g/cm^3.

Vraag 1
Zet de gemeten waarden in een grafiek uit tegen de absorberdikte. Kies hierbij grafiekpapier en eenheden zo, dat de meetwaarden optimaal worden gepresenteerd.

Vraag 2a
Bepaal met behulp van de grafiek voor smalle bundelgeometrie de transmissie van 7 cm ijzer.

Vraag 2b
Bepaal met behulp van de grafiek voor brede bundelgeometrie de transmissie van 7 cm ijzer.

Vraag 2c
Bereken de buildup-factor bij een dikte van 7 cm ijzer.

Vraag 3
Bereken de massaverzwakkingscoëfficiënt μ/ρ van ijzer voor de γ-straling van ^{60}Co.

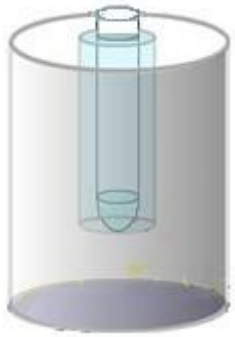
Puntenwaardering 1: 4 2a: 2 2b: 2 2c: 3 3: 5

9 Meting aan een ^{131}I-oplossing

Een vaste meetopstelling met een NaI-scintillatiedetector (detector I) wordt gekalibreerd met behulp van ^{241}Am, ^{113}Sn, ^{137}Cs en ^{60}Co. Alle ijkbronnen hebben een activiteit van 370 kBq. Daarna wordt een reageerbuisje met 5,0 ml waterige oplossing dat het radionuclide ^{131}I bevat op dezelfde plaats gezet als de ijkbronnen voorheen.

nuclide	E_γ *(keV)*	f_γ	N_γ *(tpm)*
^{241}Am	60	0,36	75 300
^{113}Sn	255	0,02	2790
	392	0,64	52 700
^{137}Cs	662	0,85	36 800
^{60}Co	1170	1,00	17 300
	1330	1,00	13 300
^{131}I	365	0,81	1072

Tabel 1. Gegevens van het radioactieve verval van de gebruikte radionucliden en netto aantal telpulsen (in tpm) gemeten met detector I.



Figuur 1. NaI-putkristal (detector II)

Gegevens

- Gegevens van het radioactieve verval van de gebruikte radionucliden (zie tabel 1).
- Met detector I gemeten netto aantal telpulsen per minuut (tpm) in de fotopiek (zie tabel 1).
- Het telrendement (ε) is gedefinieerd als het netto aantal telpulsen gedeeld door door het aantal γ-fotonen dat in dezelfde tijd door de bron wordt uitgezonden.

Vraag 1

Bereken het telrendement van detector I als functie van de γ-energie. Zet de resultaten uit op dubbel-logaritmisch grafiekpapier.

Vraag 2

Bereken de activiteitsconcentratie (in Bq/ml) van de ^{131}I-oplossing.

Tenslotte wordt het reageerbuisje met de ^{131}I-oplossing geplaatst in de holte van een NaI-putkristal (detector II; zie figuur 1). Het netto teltempo, gemeten in de fotopiek, bedraagt 65 800 tpm.

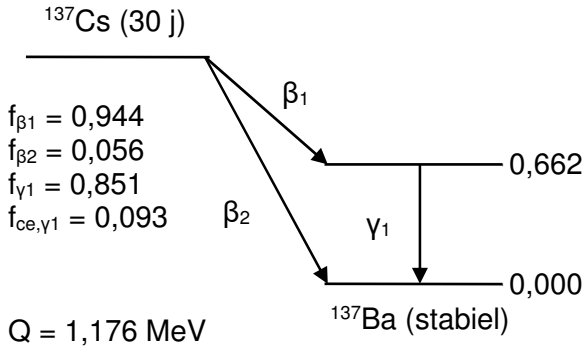
Vraag 3

Bereken het telrendement ε van het NaI-putkristal voor ^{131}I.

Puntenwaardering 1: 6 2: 5 3: 5

10 Luchtbesmettingsmonitor (1991-1-1)

Een monitor voor het meten van radioactiviteit in de buitenlucht bestaat uit een Ge-detector, een filterband en een pomp. De filterband schuift elke twee uur zover op dat er een schoon stuk filtermateriaal voor de aanzuigmond van de pomp verschijnt. Terwijl de lucht wordt aangezogen, wordt gelijktijdig de op het filter gedeponeerde radioactiviteit geregistreerd met behulp van de Ge-detector.



Figuur 1. Het vervalschema van het radionuclide ^{137}Cs. Energieën zijn gegeven in MeV.

Gegevens
- Het vervalschema van ^{137}Cs (zie figuur 1).
- Situatieschets van de meetopstelling (zie figuur 2).
- De pomp heeft een constant luchtdebiet van 9,5 m^3/uur.
- Het bandfilter heeft een vangstrendement van 100%.
- Het absolute fotopiekrendement van de Ge-detector in deze geometrie (zie figuur 3).

Vraag 1

Bereken de ^{137}Cs-activiteit op het filter na afloop van de bemonstering- en meetperiode, als in de buitenlucht een constante ^{137}Cs-concentratie van 10 Bq/m^3 aanwezig is.

Vraag 2

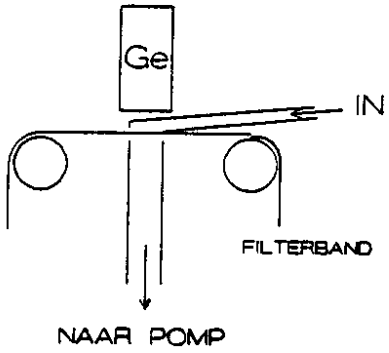
Bereken het netto aantal geregistreerde pulsen in de fotopiek van ^{137}Cs na afloop van de bemonstering- en meetperiode bij deze activiteitsconcentratie. Ga uit van de gemiddelde activiteit op het filter, dat is de activiteit die halverwege de bemonstering- en meetperiode verzameld is.

De minimaal detecteerbare ^{137}Cs-activiteit is gedefinieerd als de activiteit die tot een significante verhoging van het teltempo leidt. In dit vraagstuk is het criterium dat de netto inhoud van de fotopiek van ^{137}Cs tenminste 30 telpulsen bevat.

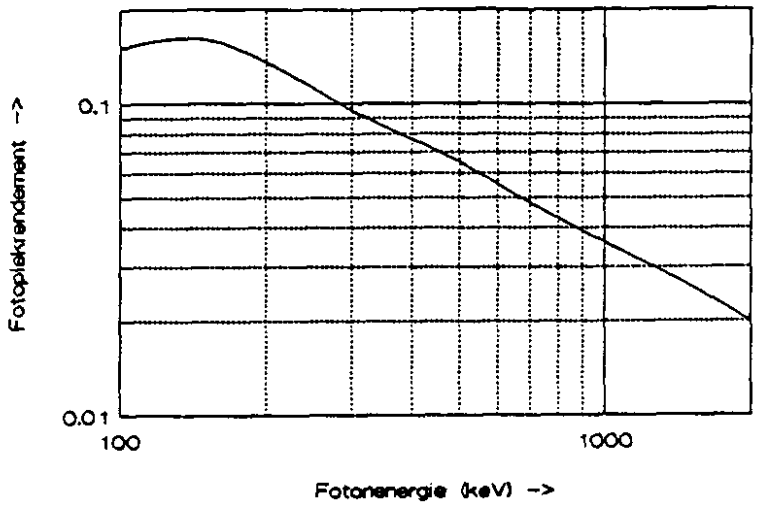
Vraag 3

Bereken de minimale ^{137}Cs-concentratie in de buitenlucht die met deze meetopstelling nog net kan worden aangetoond.

Puntenwaardering 1: 6 2: 6 3: 4



Figuur 2. Situatieschets van de meetopstelling bestaande uit pomp, filterband en Ge-detector.



Figuur 3. Absoluut fotopiekrendement van de Ge-detector.

Uitwerkingen

Vraagstuk 1

1 $R_{bruto} \pm \sigma_{bruto} = (N_{bruto} \pm \sqrt{N_{bruto}}) / t = (85 \pm \sqrt{85}) / 1000\ s = 0{,}085 \pm 0{,}009$ tps

2 $R_{nul} \pm \sigma_{nul} = (N_{nul} \pm \sqrt{N_{nul}}) / t = (45 \pm \sqrt{45}) / 1000\ s) = 0{,}045 \pm 0{,}007$ tps

3 $R_{netto} = R_{bruto} - R_{nul} = 0{,}085$ tps $- 0{,}045$ tps $= 0{,}040$ tps
$\sigma_{netto} = \sqrt{(\sigma_{bruto}^2 + \sigma_{nul}^2)}$
$= \sqrt{(N_{bruto} + N_{nul})} / t = \sqrt{(85 + 45)} / 1000\ s = \sqrt{130} / 1000\ s = 0{,}011$ tps

4a $\sigma_{netto} / R_{netto} = 0{,}011$ tps $/ 0{,}040$ tps $= 0{,}28 = 28\%$ bij een teltijd van 1000 s

4b een betrouwbaarheid van 95% correspondeert met 2σ-grens
dus $2 \times 28\% = 56\%$ bij een teltijd van 1000 s
dit moet 10% zijn $\rightarrow$ de teltijd moet dus $1000\ s \times (56\% / 10\%)^2 = 31\,360\ s = 8{,}7$ uur zijn

Vraagstuk 2

1 $f_{geometrie}$ = (oppervlak detectorvenster) / (oppervlak bol met straal van 10 cm)
$= [\pi \times (0{,}5\ cm)^2] / [4\pi \times (10\ cm)^2] = 6{,}25 \times 10^{-4}$

2 $\varepsilon = f_{emissie} \times f_{geometrie} \times f_{absorptie} \times f_{detector} = 1 \times 6{,}25 \times 10^{-4} \times 1 \times 1 = 6{,}25 \times 10^{-4}$ tps/Bq

3 $\varepsilon \times A_{min} = R_{nul}$
$A_{min} = R_{nul} / \varepsilon = (24$ tpm $/ 60$ s/min$) / 6{,}25 \times 10^{-4}$ tps/Bq $= 640$ Bq

4 $f_{geometrie} = 0{,}5$ (2π-geometrie)
$\varepsilon = 1 \times 0{,}5 \times 1 \times 1 = 0{,}5$ tps/Bq
$A_{min} = R_{nul} / \varepsilon = (24$ tpm $/ 60$ s/min$) / 0{,}5$ tps/Bq $= 0{,}8$ Bq

Vraagstuk 3

1 $N = R \times t$ $\quad \sigma_N = \sqrt{N}$ $\quad R = N / t$ $\quad \sigma_T = \sigma_N / t$
^{32}P-kanaal $\quad N = 18{,}9$ tpm $\times 1000$ min $= 18\,900$ $\quad \sigma_N = \sqrt{18\,900} = 137$
$t = 1000$ min $\times 60$ s/min $= 60\,000$ s
$R = 18\,900 / 60\,000$ s $= 0{,}315$ tps $\quad \sigma_R = 137 / 60\,000$ (s) $= 0{,}0023$ tps

2 $2\sigma = 2\sqrt{(18{,}9$ tpm $\times 10$ min$)} = 27{,}5$
$= A_{min} \times f_{emissie} \times f_{geometrie} \times f_{detector} \times t$
$= A_{min} \times 1 \times 1 \times f_{detector} \times (10$ min $\times 60$ s/min$) = 600$ s $\times f_{detector} \times A_{min}$
$A_{min} = 2\sigma / (600\ s \times f_{detector}) = 27{,}5 / (600\ s \times f_{detector}) = 0{,}046\ s^{-1} / f_{detector}$
^{3}H $\quad A_{min} = 0{,}046\ s^{-1} / 0{,}015 = 3{,}1$ Bq
^{14}C $\quad A_{min} = 0{,}046\ s^{-1} / 0{,}11 = 0{,}42$ Bq
^{32}P $\quad A_{min} = 0{,}046\ s^{-1} / 0{,}80 = 0{,}058$ Bq

3 ^{32}P-kanaal $\quad (0{,}058$ Bq $/ 0{,}1$ Bq$)^2 \times 10$ min $= 3{,}36$ min $= 202$ s

Vraagstuk 4

1 N_{indium} = (massa / atoomgewicht) $\times N_{Avo}$
$= (100{,}0 \times 10^{-3}$ g $/ 114{,}8$ g/mol$) \times 6{,}022 \times 10^{23}$ atomen/mol
$= 5{,}25 \times 10^{20}$ In-atomen
$N_{115In} = 95{,}7 \times 10^{-2} \times N_{indium} = 0{,}957 \times 5{,}25 \times 10^{20} = 5{,}02 \times 10^{20}$ ^{115}In-atomen

2 $A = \lambda N$
$\lambda = 0{,}693 / (4{,}41 \times 10^{14}$ j $\times 365$ d/j $\times 24$ uur/d $\times 3600$ s/uur$) = 4{,}98 \times 10^{-23}\ s^{-1}$
$A = 4{,}98 \times 10^{-23}\ (s^{-1}) \times 5{,}02 \times 10^{20} = 0{,}0250$ Bq

3 $R_{bruto} \pm \sigma_{bruto} = (2116 \pm \sqrt{2116}) / (8$ h $\times 3600$ s/uur$) = 0{,}0735 \pm 0{,}0016$ tps
$R_{nul} \pm \sigma_{nul} = (1440 \pm \sqrt{1440}) / (8$ h $\times 3600$ s/uur$) = 0{,}0500 \pm 0{,}0013$ tps
$R_{netto} = R_{bruto} - R_{nul} = 0{,}0735$ tps $- 0{,}0500$ tps $= 0{,}0235$ tps
$\sigma_{netto} = \sqrt{(\sigma_{bruto}^2 + \sigma_{nul}^2)} = \sqrt{(0{,}000\ 0026 + 0{,}000\ 0017)} = \sqrt{0{,}000\ 0043} = 0{,}0021$ tps

4 $\varepsilon\ A = R_{netto}$
$\varepsilon \pm \sigma_\varepsilon = (R_{netto} \pm \sigma_{netto}) / A = (0{,}0235$ tps $\pm 0{,}0021$ tps$) / 0{,}0250$ Bq $= 0{,}94 \pm 0{,}08$ tps/Bq

Vraagstuk 5

1 $N_\beta = A \times (f_{\beta 1} + f_{\beta 2}) \times f_{geometrie} \times f_{detector} \times t = A \times 1{,}0 \times 0{,}5 \times 1 \times 1\ s = 0{,}5\ s \times A$
$= N_{bruto} - N_{nul} = 170 - 10 = 160$ telpulsen
$A = 160 / 0{,}5\ (s) = 320$ Bq
bemonsterd oppervlak = oppervlak van besmettingsmonitor = 200 cm²
de totale activiteit = 320 Bq × (10 m² × 10^4 cm²/m² / 200 cm²)
= $1{,}6 \times 10^5$ Bq = 160 kBq

2 $N_\beta = A \times f_\gamma \times (f_{geometrie} \times f_{detector}) \times t = A \times 0{,}85 \times 0{,}15 \times 1\ min \times 60\ s/min = 7{,}7\ (s) \times A$
$= N_{bruto} - N_{nul} = 546 - 87 = 459$ telpulsen
$A = 459 / 7{,}7\ (s) = 60$ Bq
bemonsterd oppervlak = oppervlak uitgeknipt stuk filter = 25 cm²
de totale activiteit = 60 Bq × (10 m² × 10^4 cm²/m² / 25 cm²) = $2{,}4 \times 10^5$ Bq = 240 kBq

3 transmissie = (resultaat meting I) / (resultaat meting II) = 160 kBq / 240 kBq = 2/3
absorptie = 1 - transmissie = 1 - 2/3 = 1/3 = 33%

Vraagstuk 6

1 $N_I = A \times f_\beta \times (f_{geometrie} \times f_{detector}) \times t = A \times 1 \times 0{,}28 \times 1\ s = 0{,}28\ s \times A$
$= 1{,}77$ telpulsen
$A_I = N_I / 0{,}28\ s = 1{,}77 / 0{,}28\ s = 6{,}32$ Bq

2 $A_{II} = N_{II} / 0{,}28\ s = 2{,}10 / 0{,}28\ s = 7{,}50$ Bq

3a de dochter ^{90}Y groeit in met een halveringstijd van 64 uur
onmiddellijk na de scheiding is er nog nauwelijks ^{90}Y gevormd
→ $A_I = A_{89Sr,I} + A_{90Sr,I} + A_{90Y,I} = A_{89Sr,II} + A_{90Sr,I}$

3b meting II vond een maand na de scheiding plaats
inmiddels zijn er 30 d × 24 uur/d / 64 uur = 11 halveringstijden verlopen
moeder en dochter zijn met elkaar in evenwicht, zodat $A_{90Y,II} = A_{90Sr,II}$
→ $A_{II} = A_{89Sr,II} + A_{90Sr,II} + A_{90Y,II} = A_{89Sr,II} + 2\ A_{90Sr,II}$

3c tussen meting I en meting II is ^{89}Sr deels vervallen, terwijl het verval van ^{90}Sr verwaarloosbaar is
→ $A_{II} = e^{-0{,}693 \times 30/50{,}5}\ A_{89Sr,I} + 2\ A_{90Sr,I} = 0{,}66\ A_{89Sr,I} + 2\ A_{90Sr,I}$

4 we hebben 2 vergelijkingen met 2 onbekenden
vraag 3a $A_I = A_{89Sr,I} + A_{90Sr,I} = 6{,}32$ Bq | +2 |
vraag 3c $A_{II} = 0{,}66\ A_{89Sr,I} + 2\ A_{90Sr,I} = 7{,}50$ Bq | -1 |
$1{,}34\ A_{89Sr,I} = 2 \times 6{,}32$ Bq - 7,50 Bq = 5,14 Bq
$A_{89Sr,I} = 5{,}14$ Bq / 1,34 = 3,84 Bq
$A_{90Sr,I} = 6{,}32$ Bq - $A_{90Sr,I} = 6{,}32$ Bq - 3,84 Bq = 2,48 Bq

Vraagstuk 7

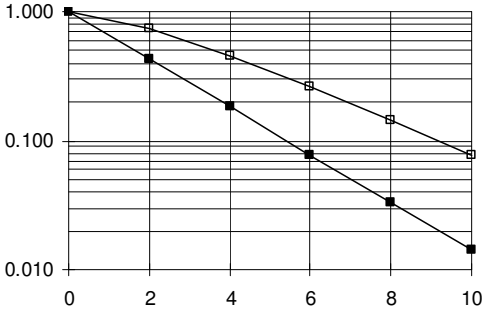
1 aflezen van figuur 1 bij 1275 keV → $\varepsilon_{1275} = 0{,}012$

2 $N_{1275} = A \times f_{1275} \times \varepsilon_{1275} \times t = A \times 1{,}0 \times 0{,}012 \times 5\ min \times 60\ s/min = 3{,}6\ s \times A$
$= 130\ 980$
$A = 130\ 980 / 3{,}6\ s = 3{,}6 \times 10^4$ Bq = 36 kBq

3 behalve γ-fotonen met een energie van 1275 keV worden er ook annihilatie-fotonen met een energie van $E_\pm = 511$ keV uitgezonden; het energiespectrum bestaat dus uit twee fotopieken, elk met een bijbehorende Compton-rug

4 aflezen figuur 1 bij 511 keV $\varepsilon_{511} = 0{,}07$
verder is $f_{511} = 2\ f_{\beta+} = 2 \times 0{,}905 = 1{,}81$
$t = 5\ min \times 60\ s/min = 300\ s$
$R_{511} = N_{511} / t = A \times f_{511} \times \varepsilon_{511} = 3{,}6 \times 10^4$ Bq × (2 × 0,905) × 0,07 = $4{,}6 \times 10^3$ tps
$R_{1275} = N_{1275} / t = 130\ 980 / 300\ s = 437$ tps = $0{,}44 \times 10^3$ tps

Vraagstuk 8



1 gebruik enkel-logaritmisch grafiekpapier

2a aflezen grafiek bij 7 cm
→ $T_{\text{brede bundel}} = 0{,}20$

2b aflezen grafiek bij 7 cm
→ $T_{\text{smalle bundel}} = 0{,}050$

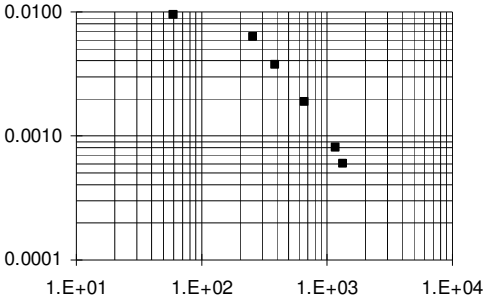
2c $B = T_{\text{brede bundel}} / T_{\text{smalle bundel}}$
$= 0{,}20 / 0{,}050 = 4{,}0$

3 aflezen grafiek bij 10 cm
→ $T_{\text{smalle bundel}} = 0{,}015$
$T(10\text{ cm}) = e^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = e^{-(10\times 7{,}87)(\mu/\rho)} = e^{-78{,}6(\mu/\rho)}$
$\mu/\rho = \ln(0{,}015) / (-78{,}7\text{ g/cm}^2) = 0{,}053\text{ cm}^2/\text{g}$

Vraagstuk 9

1 $N_\gamma = A \times f_\gamma \times \varepsilon \times t = 370\times10^3\text{ Bq} \times f_\gamma \times \varepsilon \times 60\text{ s}$
$= 2{,}22\times10^7\, f_\gamma \times \varepsilon$
$\varepsilon = N_\gamma / (2{,}22\times10^7\, f_\gamma)$

nuclide	E_γ *(keV)*	f_γ *(%)*	N_γ	ε
^{241}Am	60	36	75 300	$9{,}4\times10^{-3}$
^{113}Sn	255	2	2790	$6{,}3\times10^{-3}$
	392	64	52 700	$3{,}7\times10^{-3}$
^{137}Cs	662	85	36 800	$1{,}9\times10^{-3}$
^{60}Co	1170	100	17 300	$0{,}8\times10^{-3}$
	1330	100	13 300	$0{,}6\times10^{-3}$



2 aflezen grafiek bij $E_\gamma = 365$ keV → $\varepsilon_{365} = 0{,}004$
$N_{365} = A \times f_{365} \times \varepsilon_{365} \times t = A \times 0{,}81 \times 0{,}004 \times 60\text{ s} = 0{,}19\text{ s} \times A$
$= 1072$ telpulsen
$A_{365} = 1072 / 0{,}19\text{ s} = 5{,}6\times10^3\text{ Bq} = 5{,}6\text{ kBq}$
volume = 5 ml
activiteitsconcentratie is 5,6 kBq / 5 ml = 1,1 kBq/ml

3 $N_{365} = A \times f_{365} \times \varepsilon_{365} \times t = 5{,}6\times10^3\text{ Bq} \times 0{,}81 \times \varepsilon_{365} \times 60\text{ s} = 2{,}7\times10^5\, \varepsilon_{365}$
$= 65\,800$ telpulsen
$\varepsilon_{365} = 65\,800 / 2{,}7\times10^5 = 0{,}24$

Vraagstuk 10

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

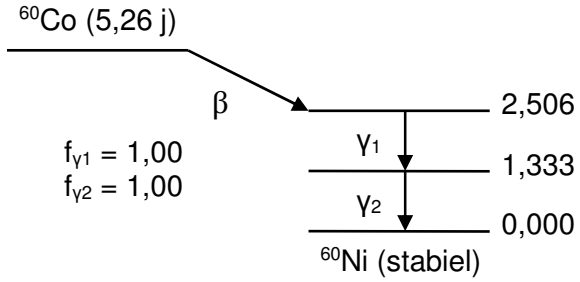
2 de activiteit bouwt lineair op gedurende de monstername (en dus gedurende de meting)
activiteit halverwege de monstername $\langle A\rangle = 190\text{ Bq} / 2 = 95\text{ Bq}$
aflezen figuur 1 $f_\gamma = 0{,}851$
aflezen van figuur 3 bij 662 keV $\varepsilon_\gamma = 0{,}05$
$N = \langle A\rangle \times f_\gamma \times \varepsilon_\gamma \times t = 95\text{ Bq} \times 0{,}851 \times 0{,}05 \times 2\text{ uur} \times 3600\text{ s/uur} = 2{,}9\times10^4$ telpulsen

3 10 Bq/m^3 geeft $2{,}9\times10^4$ telpulsen
30 telpulsen komen dus overeen met $10\text{ Bq/m}^3 \times (30 / 2{,}9\times10^4) = 0{,}010\text{ Bq/m}^3$

BRONNEN, AFSCHERMING EN TRANSPORT

11 Lektest van een ^{60}Co-bron

In de vergunning voor een ^{60}Co-bron wordt onder meer geëist dat de bron elk jaar een lektest ondergaat onder verantwoordelijkheid van een geregistreerd stralingsbeschermingsdeskundige. De test kan bijvoorbeeld worden gerealiseerd door middel van een veegproef, waarbij de bron met een stukje filtreerpapier wordt geveegd. Men beschikt voor dit doel over een NaI-detector en een vloeistofscintillatieteller.



Figuur 1. Het vervalschema van het radionuclide ^{60}Co. Energieën zijn gegeven in MeV.

Gegevens

- Het vervalschema van het radionuclide ^{60}Co (zie figuur 1).
- Het telrendement is gedefinieerd als het gemeten aantal telpulsen gedeeld door het aantal γ-fotonen dat in dezelfde tijd op de detector valt. Het telrendement van de NaI-detector voor γ-fotonen van ^{60}Co is 12%.
- De NaI-detector is ongevoelig voor de β^--deeltjes van ^{60}Co.
- De vloeistofscintillatieteller is ongevoelig voor de γ-fotonen van ^{60}Co.
- Volgens de ANVS-verordening Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming moet de bron als lek worden beschouwd als de afgeveegde activiteit groter is dan 185 Bq. Wordt niet de bron zelf maar de houder geveegd, dan is het criterium 18,5 Bq.

De deskundige veegt de bron en legt het papiertje eerst op de NaI-detector. Het resultaat van de meting is 917 telpulsen per minuut (tpm) bij een nuleffect van 485 tpm.

Vraag 1

Bereken de afgewreven activiteit uit de meting met de NaI-detector.

Vraag 2

Moet de betreffende bron als lek worden aangemerkt? Beargumenteer de conclusie.

Daarna wordt het papiertje in een telflesje met scintillatievloeistof gedaan en geteld in de vloeistofscintillatieteller. Het resultaat is 1645 tpm bij een nuleffect van 25 tpm.

Vraag 3

Bereken het telrendement ε van de vloeistofscintillatieteller voor ^{60}Co.

Puntenwaardering **1: 7** **2: 2** **3: 7**

12 Vermissing van een ^{133}Ba-bron (2001-2-3)

Men wil een vermiste ^{133}Ba-ijkbron met een activiteit van 0,40 MBq opsporen met behulp van een NaI-monitor. Het rendement van de NaI-monitor wordt eerst geijkt met een ^{137}Cs-ijkbron van 4,0 MBq die op een afstand van 50 cm voor de monitor wordt gehouden. Het teltempo is 285 telpulsen per seconde (tps), bij een nuleffect van 10 tps.

Gegevens

- Het relatieve detectierendement van de monitor (zie figuur 1).
- Energie E_γ en emissierendement f_γ van de γ-fotonen die worden uitgezonden tijdens het radioactieve verval van ^{133}Ba en ^{137}Cs (zie tabel 1).
- Volgens de Regeling Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming zijn de vrijstellingsgrenzen voor ^{133}Ba in matige hoeveelheden (< 1000 kg):
  1. vrijstellingsgrens voor activiteit is $A_v = 1\times10^6$ Bq
  2. vrijstellingsgrens voor activiteitsconcentratie is $C_v = 1\times10^2$ Bq/g

nuclide	E_γ *(keV)*	f_γ	*nuclide*	E_γ *(keV)*	f_γ
^{133}Ba	81	0,338	^{137}Cs	662	0,85
	276	0,071			
	303	0,184			
	356	0,621			
	384	0,089			

Tabel 1. Gegevens van het radioactieve verval van de radionucliden ^{133}Ba en ^{137}Cs.

Vraag 1

Bepaal het gewogen relatieve detectierendement $\sum (f_\gamma \times f_{\text{detector}}^{\text{rel}})$ voor de γ-straling van de radionucliden ^{133}Ba en ^{137}Cs.

Vraag 2

Bereken het te verwachten teltempo indien een ^{133}Ba-bron van 4,0 MBq zich op 50 cm van de van de monitor bevindt.

Vraag 3

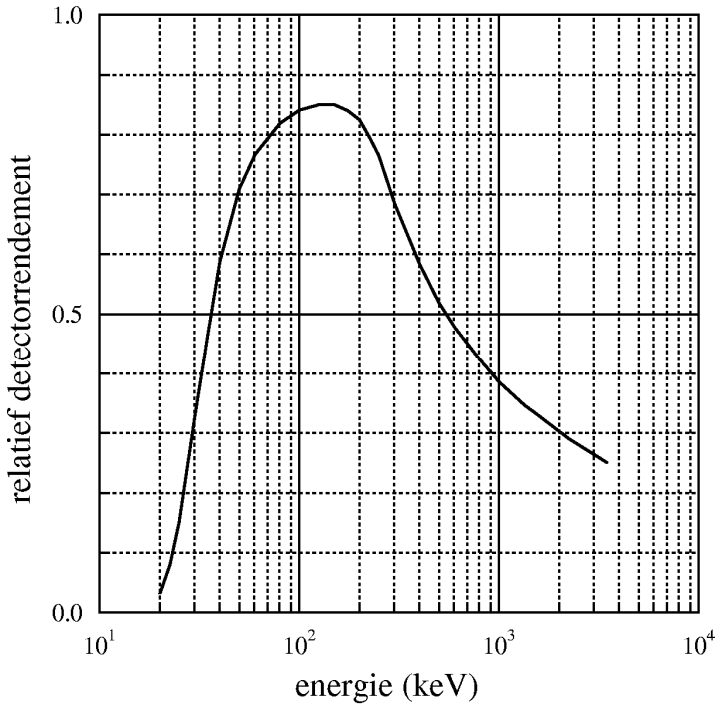
Bereken de minimale afstand waarop de vermiste ijkbron nog op significante wijze met de monitor kan worden aangetoond. Significant wil in dit verband zeggen dat de aanwijzing van de monitor tenminste tweemaal het nuleffect is.

Nadat de ijkbron is teruggevonden, wil men deze overdragen aan een bevriend bedrijf.

Vraag 4

Geef aan of een kernenergiewetvergunning vereist is voor het voorhanden hebben van deze ijkbron. Motiveer uw antwoord.

Puntenwaardering 1: 5 2: 4 3: 5 4: 2



Figuur 1. Relatief detectierendement $f_{detector}^{rel}$.

13 Verontreinigd $^{51}CrCl_3$

Voor labelingsexperimenten heeft men een potje met 100 gram chroomchloride besteld, dat gemerkt is met een vrijgestelde hoeveelheid ^{51}Cr-activiteit. Nadat hiermee in het C-laboratorium een preparaat is gemaakt, blijkt dit verontreinigd te zijn met ^{42}K en β-straling uit te zenden. De stralingsdeskundige beschikt over een GM-telbuis met eindvenster. Hij plaatst deze GM-telbuis op 10 cm van het preparaat en meet een netto teltempo van $3{,}5\times10^3$ telpulsen per minuut (tpm).

Gegevens
- Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{42}K (zie Appendix, figuur 4).
- Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{51}Cr (zie Appendix, figuur 5).
- De maximale massieve dracht van β-deeltjes (zie Appendix, figuur 10).
- Het effectieve oppervlak van het venster 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.
- Zelfabsorptie en absorptie in lucht mogen worden verwaarloosd.
- De soortelijke massa van perspex is $\rho = 1{,}19$ g/cm^3.
- Volgens het Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming zijn de vrijstellingsgrenzen voor ^{51}Cr in matige hoeveelheden (< 1000 kg):
  1. vrijstellingsgrens voor activiteit is $A_v = 1\times10^6$ Bq
  2. vrijstellingsgrens voor activiteitsconcentratie is $C_v = 1\times10^2$ Bq/g

Vraag 1
Bereken de geometriefactor voor deze meetopstelling.

Vraag 2
Bereken de ^{42}K-activiteit. Als u het antwoord op deze vraag schuldig blijft, ga dan bij de beantwoording van de volgende vraag uit van 100 kBq.

Vraag 3
Ga na of deze activiteit vrijgesteld is. Motiveer uw antwoord.

Vraag 4
Bereken de minimale dikte van een perspex scherm dat alle β-straling kan tegenhouden.

Puntenwaardering **1: 4** **2: 5** **3: 2** **4: 5**

14 Loodpot

In het midden van een cilindervormige loodpot bevindt zich een cilindervormige holte met een diameter van 4 cm. In het centrum van deze holte bevindt zich een ^{60}Co-ijkbron met een activiteit van 20 MBq. Op een afstand van 50 cm van de bron is het omgevingsdosisequivalenttempo 10 µSv/uur.

Gegevens
- De bronconstante van ^{60}Co is h = 0,36 µSv/uur per MBq/m^2.
- De bronconstante van ^{137}Cs is h = 0,093 µSv/uur per MBq/m^2.
- Transmissie van brede bundels γ-straling door lood (zie Appendix, figuur 11).

Vraag 1
Bereken de dikte van de wand van de loodpot. Rond het resultaat naar boven af op hele centimeters.

Er zal nog een ^{137}Cs-ijkbron worden toegevoegd. Beide bronnen bevinden zich in het midden van de loodpot. Ga bij de volgende vragen uit van de wanddikte die bij vraag 1 berekend is.

Vraag 2
Bereken de maximale activiteit van de ^{137}Cs-bron, als geëist wordt dat het omgevingsdosisequivalenttempo ten gevolge van beide bronnen samen maximaal 10 µSv/uur is op 1 meter afstand vanaf het oppervlak van de loodpot.

Vraag 3
Bereken voor dat geval het omgevingsdosisequivalenttempo op het oppervlak van de loodpot.

Vraag 4
Mag deze loodpot zonder meer als een pakket van type A worden vervoerd?

Puntenwaardering **1: 4** **2: 5** **3: 3** **4: 4**

15 Keuze van een transportcontainer

Vanuit een radionuclidenlaboratorium moet een ampul met 37 GBq ^{60}Co worden verzonden. Daartoe zijn verschillende cilindervormige loodcontainers beschikbaar, zoals bij onderstaande gegevens is vermeld.

Gegevens
- Alle loodcontainers hebben dezelfde uitwendige diameter van 40 cm.
- Alle loodcontainers hebben in het centrum een cilindervormige holte met een diameter van 2 cm; de radioactieve bron ligt in het midden van deze holte.
- De loodcontainers onderscheiden zich van elkaar door de hoeveelheid lood in de wand: de kleinste dikte is 3 cm lood en de volgende diktes zijn telkens 1 cm groter; de afschermende werking van het overige materiaal in de wand mag worden verwaarloosd.
- De bronconstante van ^{60}Co is $h = 3{,}6\times10^{-13}$ Sv/uur per Bq/m^2.
- Transmissie van brede bundels γ-straling door lood (zie Appendix, figuur 11).
- De eisen te stellen aan het omgevingsequivalenttempo tijdens het vervoer zijn:
  1. minder dan 2 mSv/h op het oppervlak van de container;
  2. minder dan 0,1 mSv/h op 1 meter afstand van het oppervlak van de container.

Vraag 1
Bereken de minimale looddikte om aan transporteis 1 te kunnen voldoen. Rond het resultaat af op hele centimeters.

Vraag 2
Bereken de minimale looddikte om aan transporteis 2 te kunnen voldoen. Rond het resultaat af op hele centimeters.

De toezichthouder die de verzending moet regelen kiest de lichtste container die aan beide transporteisen voldoet.

Aanvullende gegevens
- Het transport van de container duurt 4 uur.
- De afstand tussen chaufeur en het oppervlak van de container is 2 meter.
- Er bevindt zich verder geen afscherming tussen chauffeur en container.
- Het omgevingsdosisequivalent H* is een goede schatter van de effectieve dosis E.
- De chauffeur is niet ingedeeld als blootgesteld werknemer.

Vraag 3
Bereken de effectieve dosis die de chauffeur tijdens de rit oploopt.

Vraag 4
Hoeveel van dergelijke ritten mag de chauffeur per jaar rijden?

Puntenwaardering **1: 4** **2: 4** **3: 6** **4: 2**

Uitwerkingen

Vraagstuk 11

1 $N_\gamma = A \times (f_{\gamma 1} + f_{\gamma 2}) \times (f_{geometrie} \times f_{detector}) \times t = A \times (1{,}0 + 1{,}0) \times 12{\times}10^{-2} \times 60\ s = A \times 14{,}4\ s$
$= 917 - 485 = 432$ telpulsen
$A = 432 / 14{,}4\ s = 30$ Bq

2 het criterium is 185 Bq want de bron zelf is geveegd
de bron hoeft daarom niet als lek te worden beschouwd

3 $N_\beta = \varepsilon\ A\ t = \varepsilon \times 30\ Bq \times 60\ s = 1800 \times \varepsilon$
$= 1645 - 25 = 1620$ telpulsen
$\varepsilon = 1620 / 1800 = 0{,}90$

Vraagstuk 12

1

radionuclide	E_γ *(keV)*	f_γ	$f^{rel}_{detector}$ *(zie figuur 1)*	$f_\gamma \times f^{rel}_{detector}$	$\sum (f_\gamma \times f^{rel}_{detector})$
^{137}Cs	662	0,85	0,46	0,39	0,39
^{133}Ba	81	0,338	0,82	0,28	0,90
	276	0,071	0,73	0,05	
	303	0,184	0,68	0,13	
	356	0,621	0,63	0,39	
	384	0,089	0,60	0,05	

2 $R = A \times \sum (f_\gamma \times f_{detector})$ hierin hangt $f_\gamma \times f_{detector}$ af van het radionuclide
het teltempo R is dus evenredig met $\sum (f_\gamma \times f_{detector})$
R_{netto}(4,0 MBq ^{133}Ba) = (0,90 / 0,39) × R_{netto}(4,0 MBq ^{137}Cs)
= (0,90 / 0,39) × (285 tps - 10 tps) = 635 tps

3 R_{netto}(0,4 MBq ^{133}Ba) = (0,4 MBq / 4 MBq) × 635 tps = 64 tps op een afstand van 50 cm
het criterium is $R_{netto}(r) = R_{nul} = 10$ tps
$= (r / 50\ cm)^2 \times 64$ tps
$r = 50\ cm \times \sqrt{(64\ tps / 10\ tps)} = 50\ cm \times \sqrt{6{,}4} = 126$ cm

4 0,4 MBq $= 4{\times}10^5$ Bq $< 1{\times}10^6$ Bq $= A_v$
→ onder de vrijstellingsgrens
→ geen vergunning nodig als dit de enige activiteit is

Vraagstuk 13

1 $f_{geometrie}$ = (oppervlak detectorvenster) / (oppervlak bol met straal van 10 cm)
$= 1\ cm^2 / [4\pi \times (10\ cm)^2] = 8{,}0{\times}10^{-4}$

2 $\dot{N} = A \times f_{geometrie} \times f_{absorptie} \times f_{detector} = A \times 8{,}0{\times}10^{-4} \times 1 \times 1 = 8{,}0{\times}10^{-4} \times A$
$= 3{,}5{\times}10^3$ tpm $= 58$ tps
$A = 58\ tps / 8{,}0{\times}10^{-4} = 7{,}3{\times}10^4$ Bq

3 $A = 7{,}3{\times}10^4$ Bq $< 1{\times}10^6$ Bq $= A_v$
$C = 7{,}3{\times}10^4$ Bq / 100 g $= 7{,}3{\times}10^2$ Bq/g $> 1{\times}10^2$ Bq/g $= C_v$
→ een van beide waarden is onder de vrijstellingsgrens
→ dus geen vergunning nodig als dit de enige activiteit is

4 aflezen van Appendix, figuur 4
→ $E_{\beta,max} = 3521$ keV = 3,5 MeV
aflezen van Appendix, figuur 10 bij 3,5 MeV
→ $R_{\beta,max} \times \rho = 1{,}7{\times}10^3$ mg/cm² = 1,7 g/cm²
minimale dikte is 1,7 g/cm² / ρ = 1,7 g/cm² / 1,19 g/cm³ = 1,4 cm perspex

Vraagstuk 14

1 zonder afscherming op 50 cm $\dot{H}^*_{50cm} = h\ A / r^2$
$= 0{,}36\ \mu Sv/uur\ per\ MBq/m^2 \times 20\ MBq / (0{,}50\ m)^2$
$= 29\ \mu Sv/uur$
transmissie $T = 10\ \mu Sv/h / 29\ \mu Sv/h = 0{,}34$
aflezen van Appendix, figuur 11 voor ^{60}Co
→ 2,5 cm lood afgerond 3 cm

2. afstand tot bron $r = 100\ cm + 3\ cm + 4\ cm / 2 = 105\ m$
aflezen van Appendix, figuur 11 voor ^{60}Co en 3 cm
→ transmissie = $T(^{60}Co) = 2{,}3\times10^{-1}$
bijkdrage van ^{60}Co $\dot{H}^*(^{60}Co)_{105cm} = h\ A\ T / r^2$
$= 0{,}36\ \mu Sv/uur\ per\ MBq/m^2 \times 20\ MBq \times 2{,}3\times10^{-1} / (1{,}05\ m)^2$
$= 1{,}5\times10^{-3}\ \mu Sv/uur$
bijdrage van ^{137}Cs mag maximaal 10 µSv/uur - 1,5 µSv/uur = 8,5 µSv/uur zijn
aflezen van Appendix, figuur 11 voor ^{137}Cs en 3 cm
→ transmissie = $T = 4\times10^{-2}$
bijdrage van ^{137}Cs $\dot{H}^*(^{137}Cs)_{105cm} = h\ A\ T / r^2$
$= 0{,}093\ \mu Sv/uur\ per\ MBq/m^2 \times A \times 4\times10^{-2} / (1{,}05\ m)^2$
$= 4{,}1\times10^{-3}\ \mu Sv/h \times A$
$= 8{,}5\ \mu Sv/uur$
maximale ^{137}Cs-activiteit $A = 8{,}5\ \mu Sv/uur / 4{,}1\times10^{-3}\ \mu Sv/uur$
$= 2{,}1\times10^3\ MBq = 2{,}1\ GBq$

3 afstand tot bron $r = 3\ cm + 4\ cm / 2 = 5\ cm$
equivalent dosistempo $\dot{H}^*_{5cm} = \dot{H}^*_{105cm} \times (105\ cm / 5\ cm)^2$
$= 10\ (\mu Sv/uur) \times 441 = 4{,}4\times10^3\ \mu Sv/uur = 4{,}4\ mSv/uur$

4 aflezen van Appendix, figuur 12
op het oppervlak moet $\dot{H}^* < 2000\ \mu Sv/uur = 2{,}0\ mSv/uur$ zijn (etiket III-GEEL)
→ $\dot{H}^*_{5cm} = 4{,}4\ mSv/uur$ is te veel
→ loodpot moet in grotere verpakking worden vervoerd

Vraagstuk 15

1 $\dot{H}^* = h\ A / r^2$
afstand tot bron $r_1 = 40\ cm / 2 = 20\ cm = 0{,}2\ m$
zonder afscherming $\dot{H}^* = 3{,}6\times10^{-13}\ Sv/uur\ per\ Bq/m^2 \times 37\times10^9\ Bq / (0{,}2\ m)^2$
$= 0{,}33\ Sv/uur = 330\ mSv/uur$
vereiste transmissie $T_1 = 2\ mSv/uur / 330\ mSv/uur = 6\times10^{-3}$
aflezen van Appendix, figuur 11 voor ^{60}Co en 6×10^{-3}
→ 9,5 cm lood afgerond 10 cm

2 afstand tot bron $r_2 = r_1 + 1\ m = 0{,}2\ m + 1\ m = 1{,}2\ m$
zonder afscherming $\dot{H}^* = 3{,}6\times10^{-13}\ Sv/uur\ per\ Bq/m^2 \times 37\times10^9\ Bq / (1{,}2\ m)^2$
$= 9{,}3\times10^{-3}\ Sv/uur = 9{,}3\ mSv/uur$
transmissie $T_2 = 0{,}1\ mSv/uur / 9{,}3\ mSv/uur = 1{,}1\times10^{-2}$
aflezen van Appendix, figuur 11 voor ^{60}Co en $1{,}1\times10^{-2}$
→ 8,3 cm lood afgerond 9 cm

3 transporteis 1 is maatgevend → container met dikte van 10 cm lood
afstand tussen chauffeur en bron
$r_3 = r_1 + 2\ m = 0{,}2\ m + 2\ m = 2{,}2\ m$
zonder afscherming $\dot{H}^* = 3{,}6\times10^{-13}\ Sv/uur\ per\ Bq/m^2 \times 37\times10^9\ Bq / (2{,}2\ m)^2$
$= 2{,}8\times10^{-3}\ Sv/uur$
aflezen van Appendix, figuur 11 voor ^{60}Co en 10 cm
→ transmissie = $T_3 = 4{,}5\times10^{-3}$
rijtijd $t_3 = 4\ uur$
effectieve dosis per rit $E \approx \dot{H}^* T_3 t_3$
$= 2{,}8\times10^{-3}\ Sv/uur \times 4{,}5\times10^{-3} \times 4\ uur$
$= 5{,}0\times10^{-5}\ Sv = 0{,}05\ mSv$

4 jaarlimiet niet blootgesteld werknemer 1 mSv/j
maximaal aantal ritten 1 mSv/j / 0,05 mSv = 20 per jaar

RADIONUCLIDENLABORATORIUM

16 Radioimmunoassay (RIA)

In de zuurkast van het C-laboratorium wordt 4 uur per week een *radioimmunoassay* (RIA) met het radionuclide ^{125}I uitgevoerd.

Gegevens
- Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{125}I (zie Appendix, figuur 8).
- De p-, q- en r-parameters volgens de voormalige Richtlijn Radionuclidenlaboratoria (zie Appendix, figuur 13).
- De zuurkast voldoet aan de norm NEN-EN 14175.
- Activiteit per handeling is 100 kBq.

Vraag 1
Bereken de maximale activiteit waarmee per handeling mag worden gewerkt.

Vraag 2
Bereken de bijdrage van deze handelingen tot de belastingfactor B van het radionuclidenlaboratorium.

Vraag 3
Onder welke 2 voorwaarden mag iemand met het diploma VRS-C toezicht houden op deze handeling?

Bij de periodieke besmettingscontrole veegt de toezichthouder op 10 plekken een stuk oppervlak met een tissue, waarna de activiteiten van de tissues worden gemeten.

Aanvullende gegevens
- Het geveegde oppervlak is telkens 10 cm × 10 cm.
- Er wordt 3 keer een activiteit van 0,4 kBq gemeten.
- Er wordt 7 keer een activiteit van 1,2 kBq gemeten.

Vraag 4a
Bereken de oppervlaktebesmetting (in Bq/cm^2) voor de grootste gemeten activiteit.

Vraag 4b
Is deze oppervlaktebesmetting meer of minder dan de maximaal toelaatbare waarde? Motiveer het antwoord.

Vraag 4c
Welke van de 10 gemeten besmettingswaardes moeten in het kernenergiewetdossier worden opgenomen?

Puntenwaardering **1: 5** **2: 3** **3: 2** **4a: 2** **4b: 2** **4c: 2**

17 Labeling met ^{35}S

Op een tafel in het C-laboratorium wordt 4 uur per week een niet vluchtige vloeistof gelabeld met het radionuclide ^{35}S.

Gegevens
- Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{35}S (zie Appendix, figuur 3).
- De p-, q- en r-parameters volgens de voormalige Richtlijn Radionuclidenlaboratoria (zie Appendix, figuur 13).
- De betreffende verbinding behoort tot inhalatieklasse F.
- Activiteit per handeling is 1 MBq.

Vraag 1
Bereken de maximale activiteit waarmee per handeling mag worden gewerkt.

Vraag 2
Bereken de bijdrage van deze handelingen tot de belastingfactor B van het radionuclidenlaboratorium.

Doordat tijdens het werk de vloeistof opspat, raakt een gedeelte van het gezicht van de laborant besmet. De toezichthouder pakt snel een NaI-detector om te controleren of er ook daadwerkelijk sprake is van een besmetting.

Helaas blijkt 10 cm^2 van de gezichtshuid besmet te zijn met 5 kBq ^{35}S. Hij geeft de laborant opdracht om zijn gezicht te wassen, waarna nog 20% van de oorspronkelijke besmetting op de huid aanwezig blijkt te zijn.

Aanvullende gegevens
- Ga er vanuit dat de resterende besmetting 2 weken op het gezicht aanwezig blijft.
- De laborant is ingedeeld als blootgesteld B-werknemer.
- Volgens de vuistregel voor β-emitters geeft een huidbesmetting van 1 kBq/cm^2 aanleiding tot een equivalent huiddosistempo van 2 mSv/h.

Vraag 3a
Bereken de oppervlaktebesmetting (in Bq/cm^2) van de huid.

Vraag 3b
Bereken de equivalente huiddosis ten gevolge van deze oppervlaktebesmetting.

Vraag 3b
Ga na of dit meer of minder is dan de wettelijke jaarlimiet voor de huid. Motiveer het antwoord.

Puntenwaardering **1: 5** **2: 3** **3a: 3** **3b: 2** **3c: 3**

18 Labeling van fosfaat met ^{32}P

Op een tafel in het C-laboratorium wordt 8 uur per week een niet vluchtige fosfaatoplossing gelabeld met het radionuclide ^{32}P.

Gegevens
- Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{32}P (zie Appendix, figuur 2).
- De p-, q- en r-parameters volgens de voormalige Richtlijn Radionuclidenlaboratoria (zie Appendix, figuur 13).
- De betreffende verbinding behoort tot inhalatieklasse F.
- Activiteit per handeling is 6 MBq.

Vraag 1
Bereken de maximale activiteit waarmee per handeling mag worden gewerkt.

Vraag 2
Bereken de bijdrage van deze handelingen tot de belastingfactor B van het radionuclidenlaboratorium.

Bij de periodieke besmettingscontrole wordt een ^{32}P-besmetting gevonden. Het netto teltempo van de besmettingsmonitor is 30 telpulsen per seconde (tps).

Aanvullende gegevens
- Kalibratie van de besmettingsmonitor LB 122A volgens de fabrikant (zie tabel 1).
- Oppervlak van de besmettingsmonitor LB 122A is 218 cm^2.
- Oppervlak van de besmetting is 3 cm × 3 cm.

nuclide	*kalibratieconstante (Bq/cm² per tps)*
^{14}C	0,04
^{32}P	0,015
^{99m}Tc	0,15
^{125}I	0,27
^{131}I	0,02
^{137}Cs	0,02

Tabel 1. Kalibratieconstante in geval van een homogeen besmet oppervlak.

Vraag 3
Bereken de oppervlaktebesmetting (in Bq/cm^2).

Vraag 4
Ga na of dit meer of minder is dan de maximaal toelaatbare waarde? Motiveer het antwoord.

Puntenwaardering **1: 5** **2: 3** **3: 5** **4: 3**

19 Incident met ^{131}I

In de zuurkast van het C-laboratorium wordt gedurende 5 dagen per week een vluchtige jodiumverbinding gelabeld met het radionuclide ^{131}I. De volgende dag zegt de laborante tegen de toezichthouder dat zij daarbij mogelijk een hoeveelheid ^{131}I-activiteit heeft ingeademd. De toezichthouder besluit onmiddellijk om de activiteit in de schildklier te meten met behulp van een NaI-detector.

Gegevens
- Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{131}I (zie Appendix, figuur 9).
- De p-, q- en r-parameters volgens de voormalige Richtlijn Radionuclidenlaboratoria (zie Appendix, figuur 13).
- Depositiegegevens volgens het longmodel van ICRP-66 (zie Appendix, figuur 14).
- De zuurkast voldoet aan de norm NEN-EN 14175.
- Activiteit per handeling is 15 MBq.
- Gemeten activiteit in de schildklier is 4,2 kBq.
- De laborante is ingedeeld als blootgesteld A-werkneemster.

Vraag 1
Bereken de maximale activiteit waarmee per handeling mag worden gewerkt.

Vraag 2
Bereken de bijdrage van deze handelingen tot de belastingfactor B van het radionuclidenlaboratorium.

Vraag 3
Bereken de activiteit die de laborante heeft ingeademd.

Vraag 4a
Bereken de effectieve volgdosis ten gevolge van dit incident.

Vraag 4b
Ga na of de jaarlimiet voor de laborante is overschreden. Motiveer het antwoord.

Puntenwaardering **1: 5** **2: 3** **3: 4** **4a: 2** **4b: 2**

20 Molybdeenkoe

Op een tafel in het D-laboratorium van de afdeling Nucleaire Geneeskunde staat een molybdeenkoe. Vijf dagen per week wordt hieruit het radionuclide ^{99m}Tc geëlueerd. Deze handeling duurt 1 uur.

Gegevens
- Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{99m}Tc (zie Appendix, figuur 7).
- De p-, q- en r-parameters volgens de voormalige Richtlijn Radionuclidenlaboratoria (zie Appendix, figuur 13).
- Telkens wordt 600 MBq ^{99m}Tc-chloride geëlueerd.

Vraag 1
Bereken de maximale activiteit waarmee per handeling mag worden gewerkt.

Vraag 2
Bereken de bijdrage van deze handelingen tot de belastingfactor B van het radionuclidenlaboratorium.

Bij de periodieke besmettingscontrole veegt de toezichthouder op 10 plekken een stuk oppervlak met een tissue, waarna de activiteiten van de tissues worden gemeten.

Aanvullende gegevens
- Het geveegde oppervlak is telkens 10 cm × 10 cm.
- Er wordt 5 keer een activiteit van 0,1 kBq gemeten.
- Er wordt 5 keer een activiteit van 10 kBq gemeten.

Vraag 3a
Bereken de oppervlaktebesmetting (in Bq/cm^2) voor de kleinste gemeten activiteit.

Vraag 3b
Is deze oppervlaktebesmetting meer of minder de maximaal toelaatbare waarde? Motiveer het antwoord.

Vraag 3c
Welke van de 10 gemeten besmettingswaardes moeten in het kernenergiewetdossier worden opgenomen?

Vraag 4
Mag deze besmettingscontrole onder verantwoordelijkheid van een toezichthouder VRS-C worden uitgevoerd?

Puntenwaardering **1: 5** **2: 3** **3a: 2** **3b: 2** **3c: 2** **4: 2**

Uitwerkingen

Vraagstuk 16

1 RIA met jodium → p = -3
C-laboratorium → q = 2
zuurkast volgens NEN-norm → r = 2
inhalatieklasse F → $e(50)_{inhalatie} = 7{,}3\times10^{-9}$ Sv/Bq
$A_{max} = 0{,}02\times10^{p+q+r} / e(50)_{inhalatie} = 0{,}02\times10^{-3+2+2} / 7{,}3\times10^{-9}$ Sv/Bq $= 2{,}7\times10^{5}$ Bq

2 B = (4 uur / 40 uur) × (1×10^{5} Bq / $2{,}7\times10^{5}$ Bq) = 0,04

3 de twee voorwaarden zijn:
- een stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van coördinerend deskundige of hoger is aanwezig in de eigen organisatie
- de handeling moet plaats (mogen) vinden in een C-laboratorium

4a oppervlaktebesmetting = $1{,}2\times10^{3}$ Bq / (10 cm × 10 cm) = 12 Bq/cm²

4b grenswaarde voor β- en γ-emitters is 4 Bq/cm²
→ besmetting is boven de maximaal toelaatbare waarde

4c alle uitslagen moeten worden opgenomen in het KEW-dossier

Vraagstuk 17

1 labeling met niet vluchtige vloeistof → p = -2
C-laboratorium → q = 2
tafel → r = 0
inhalatieklasse F → $e(50)_{inhalatie} = 8{,}0\times10^{-11}$ Sv/Bq
$A_{max} = 0{,}02\times10^{p+q+r} / e(50)_{inhalatie} = 0{,}02\times10^{-2+2+0} / 8{,}0\times10^{-11}$ Sv/Bq $= 2{,}5\times10^{8}$ Bq

2 B = (4 uur / 40 uur) × (1×10^{6} Bq / $2{,}5\times10^{8}$ Bq) = 4×10^{-4}

3a oppervlaktebesmetting = 5 kBq / 10 cm² = 0,5 kBq/cm²

3b na wassen is besmetting 0,20 × 0,5 kBq/cm² = 0,1 kBq/cm²
blootstellingstijd = 2 wk × 7 d/wk × 24 uur/d = 336 uur
H_{huid} = 0,1 kBq/cm² × 2 mSv/uur × 336 uur = 67 mSv

3c jaarlimiet voor equivalente huiddosis van blootgesteld B-werknemer
0,3 × 500 mSv = 150 mSv → huiddosis is kleiner dan de jaarlimiet

Vraagstuk 18

1 labeling met niet vluchtige stof → p = -2
C-laboratorium → q = 2
tafel → r = 0
inhalatieklasse F → $e(50)_{inhalatie} = 1{,}4\times10^{-10}$ Sv/Bq
$A_{max} = 0{,}02\times10^{p+q+r} / e(50)_{inhalatie} = 0{,}02\times10^{-2+2+0} / 1{,}4\times10^{-10}$ Sv/Bq $= 1{,}4\times10^{8}$ Bq

2 B = (8 uur / 40 uur) × (6×10^{6} Bq / $1{,}4\times10^{8}$ Bq) = 9×10^{-3}

3 kalibratieconstante = 0,015 Bq/cm² per tps in geval van homogene besmet oppervlak
netto teltempo = 30 tps
oppervlak van besmettingsmonitor = 218 cm²
activiteit = 0,015 Bq/cm² per tps × 30 tps × 218 cm² = 98 Bq
oppervlak van besmetting = 3 cm × 3 cm = 9 cm²
oppervlaktebesmetting = 98 Bq × 9 cm² = 11 Bq/cm²

4 grenswaarde voor β- en γ-emitters is 4 Bq/cm²
→ besmetting is groter dan de maximaal toelaatbare waarde

Vraagstuk 19

1 labeling met vluchtig jodium → p = -3
C-laboratorium → q = 2
zuurkast volgens NEN-norm → r = 2
inhalatieklasse F → $e(50)_{inhalatie} = 1{,}1\times10^{-8}$ Sv/Bq
$A_{max} = 0{,}02\times10^{p+q+r} / e(50)_{inhalatie} = 0{,}02\times10^{-3+2+2} / 1{,}1\times10^{-8}$ Sv/Bq $= 1{,}8\times10^{7}$ Bq = 18 MBq

2 B = (5 d / 5 d) × (15 MBq / 18 MBq) = 0,8

3 aflezen van Appendix, figuur 14 voor AMAD = 5 μm
→ depositie is totaal - ET_1 = 0,82 - 0,34 = 0,48
aflezen Appendix, figuur 9
→ inhalatieklasse F en $f_1 = 1$ → $f_{TC} = 1$ (100% van depositie naar TC)
→ $f_{schildklier} = 0{,}3$ (30% van TC naar schildklier)
$A_{schildklier} = A_{inhalatie} \times \text{depositie} \times f_{TC} \times f_{schildklier}$
$= A_{inhalatie} \times 0{,}48 \times 1 \times 0{,}3 = 0{,}144\ A_{inhalatie}$
= 4,2 kBq
$A_{inhalatie} = A_{schildklier} / 0{,}144 = 4{,}2$ kBq / 0,144 = 29 kBq $= 2{,}9\times10^{4}$ Bq

4a $E(50) = A_{inhalatie} \times e(50)_{inhalatie} = 2{,}9\times10^{4}$ Bq $\times\ 1{,}1\times10^{-8}$ Sv/Bq $= 3{,}2\times10^{-4}$ Sv = 0,3 mSv

4b jaarlimiet voor effectieve dosis van A-werknemer is 20 mSv
→ jaarlimiet is niet overschreden

Vraagstuk 20

1 elutie Tc-generator → p = -1
D-laboratorium → q = 1
tafel → r = 0
chloride behoort tot inhalatieklasse M → $e(50)_{inhalatie} = 2{,}8\times10^{-11}$ Sv/Bq
$A_{max} = 0{,}02\times10^{p+q+r} / e(50)_{inhalatie} = 0{,}02\times10^{-1+1+0} / 2{,}8\times10^{-11}$ Sv/Bq $= 7{,}1\times10^{8}$ Bq = 710 MBq

2 B = (5 × 1 uur / 40 uur) × (600 MBq / 710 MBq) = 0,1

3a oppervlaktebesmetting = $0{,}1\times10^{3}$ Bq / (10 cm × 10 cm) = 1 Bq/cm²

3b grenswaarde voor β- en γ-emitters is 4 Bq/cm²
→ besmetting is onder de maximaal toelaatbare waarde

3c alle uitslagen moeten worden opgenomen in het KEW-dossier

4 ja

INWENDIGE BESMETTING

21 Inwendige ^{3}H-besmetting

Via urine-analyse wordt bij een blootgestelde werknemer een verhoogde tritiumconcentratie vastgesteld. Bij nader onderzoek blijkt deze een horloge te dragen waarvan de wijzerplaat met tritiumhoudende verf lichtgevend is gemaakt. Vervolgens wordt het horloge afgedaan (tijdstip t = 0) en worden de urinemetingen nog 63 dagen voortgezet.

tijdstip (d)	*concentratie (Bq/ml)*
0	0,067
7	0,044
14	0,029
21	0,020
28	0,011
63	0,001

Tabel 1. Gemeten tritiumconcentratie (in Bq/ml). Na de eerste meting werd het horloge afgedaan.

Gegevens

- $T_{½}(^{3}H)$ = 12,35 j.
- De gemeten tritiumconcentratie (zie tabel 1).
- De referentiemens bevat 42 l lichaamswater.
- De waterbalans van de referentiemens:
  1,4 l/d urine
  0,65 l/d zweet
  0,95 l/d overig vocht.
- De dosisconversiecoëfficiënt van getritieerd water is $e(50) = 1{,}8\times10^{-11}$ Sv/Bq.

Vraag 1

Zet de tritiumconcentratie uit tegen de tijd op enkel-logaritmisch grafiekpapier en bepaal de effectieve halveringstijd.

Vraag 2

Bereken de ^{3}H-activiteit die per jaar in het lichaam werd opgenomen gedurende de tijd dat het horloge werd gedragen.

Vraag 3

Bereken de effectieve jaardosis voor de verwijdering van het horloge.

Vraag 4

Bereken de effectieve volgdosis in het geval dat deze meting betrekking had op een eenmalige inname net voor de productie van het eerste urinemonster. Ga er vanuit dat tritium zich instantaan en homogeen over het lichaamswater verdeelt.

Puntenwaardering **1: 4** **2: 5** **3: 2** **4: 5**

22 Urinemeting na besmetting met $H^{36}Cl$

Na een incident waarbij $H^{36}Cl$ is geïnhaleerd, besluit de toezichthouder in overleg met de stralingsbeschermingsdeskundige tot urine-analyse bij de betrokken werknemer. Hij vraagt de werknemer om gedurende 24 uur zijn urine te verzamelen en neemt hiervan vervolgens een monster. Op dag 14 na het incident wordt deze procedure nog eens herhaald. Elk telmonster bevat 8 ml urine en de activiteit hierin wordt bepaald met behulp van een vloeistofscintillatieteller. Het gemeten netto teltempo is 11 520 telpulsen per minuut (tpm) respectievelijk 5130 tpm.

Gegevens
- $T_{½}(^{36}Cl) = 3{,}0\times10^{5}$ j.
- In dit vraagstuk wordt gesteld dat 48% van de ingeademde activiteit in de longen achterblijft.
- Chloor wordt binnen enkele uren opgenomen in het bloed.
- De retentieformule beschrijft de uitscheiding van een (radioactieve) stof uit het lichaam. In het geval van chloor kan deze functie geschreven worden als:
  $R(t) = e^{-0{,}693\times t/T_{½}}$
- HCl behoort tot oplosbaarheidstype F met $f_1 = 1$.
- De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie van ^{36}Cl is $e(50)_{inhalatie} = 4{,}9\times10^{-10}$ Sv/Bq.
- De urineproductie van de referentiemens bedraagt 1400 ml per dag.
- Het telrendement van de vloeistofscintillatieteller is 0,80 telpulsen per seconde per Bq (tps per Bq).

Vraag 1
Bereken de effectieve halveringstijd uitgaande van de twee meetresultaten.

Vraag 2a
Bereken met behulp van de gemeten tritiumconcentratie in de urine de hoeveelheid ^{36}Cl-activiteit die op de eerste dag is uitgescheiden.

Vraag 2b
Bereken met behulp van de retentiefunctie R(t) de fractie van de in het lichaam opgenomen activiteit die op de eerste dag wordt uitgescheiden.

Vraag 2c
Bereken de hoeveelheid activiteit die is ingeademd.

Vraag 3
Bereken de effectieve volgdosis.

Puntenwaardering **1: 3** **2a: 4** **2b: 3** **2c: 4** **3: 2**

23 Injectie met ^{67}Ga-citraat

Op de afdeling Nucleaire Geneeskunde worden patiënten ingespoten met ^{67}Ga-citraat om tumoren op te sporen. 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 γ-camera mogelijk te maken. De meting met de γ-camera vindt 72 uur na toediening plaats.

Gegevens
- Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{67}Ga (zie Appendix, figuur 6).
- Depositiegegevens volgens het longmodel van ICRP-66 (zie Appendix, figuur 14).

Vraag 1
Bereken de effectieve volgdosis die een patiënt bij een galliumonderzoek ontvangt.

Vraag 2
Waarom mogen na injectie de gegevens voor totale-lichaamstelling voor inhalatie-klasse F worden gebruikt?

Vraag 3a
Bepaal de fractie van de ingespoten activiteit die 72 uur na injectie in het lichaam aanwezig is.

Vraag 3b
Bereken de activiteit die op het tijdstip van de γ-scan nog in de patiënt aanwezig is.

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. De verpleegkundige wordt 24 uur na deze gebeurtenis in een totale-lichaamsteller gemeten. Het blijkt dat op het moment van de meting nog 8,5 kBq ^{67}Ga in het lichaam aanwezig is.

Vraag 4a
Bepaal de fractie van de geïnhaleerde activiteit die na 24 uur nog in het lichaam aanwezig is.

Vraag 4b
Bereken de effectieve volgdosis voor de verpleegkundige.

Puntenwaardering **1: 3** **2: 2** **3a: 2** **3b: 2** **4a: 2** **4b: 3**

24 Lozing van ^{41}Ar door een kerncentrale (1995-2-1)

In de ventilatieschacht van een kernreactor bevindt zich een edelgasmonitor die continu de activiteitsconcentratie van het radioactieve edelgas ^{41}Ar in de geloosde lucht meet. Dit radionuclide ontstaat door neutronactivatie van lucht, die ongeveer 1% argon bevat. In de vergunningsvoorwaarden van de reactor staat een maximaal toegelaten lozing van 17 TBq ^{41}Ar per kwartaal.

Gegevens
- Er wordt 1500 m^3 lucht per uur geloosd.
- De ijkfactor van de monitor is 1 telpuls per seconde (tps) bij een ^{41}Ar-concentratie van 4,2 kBq/m^3 in de geloosde lucht.
- Het nuleffect van de monitor is 5 tps.
- Voor de berekeningen over de beschouwde periode hoeft geen rekening te worden gehouden met radioactief verval.

Vraag 1

In een bepaald kwartaal zijn $8{,}4\times10^8$ telpulsen geregistreerd. Bereken de gemiddelde activiteitsconcentratie in de lucht.

Vraag 2

Bereken de ^{41}Ar-lozing in dat kwartaal. Is de lozing in overeenstemming met de vergunning?

Op een afstand van 1 km van de reactor staat een huis. Als de wind in de richting van dit huis staat, ontvangen de bewoners een effectieve dosis tengevolge van blootstelling aan het geloosde argon.

Aanvullende gegevens
- Bij het huis is de ^{41}Ar-concentratie een factor 10^6 kleiner dan in de ventilatieschacht.
- Bij verblijf van 1 uur in lucht met een ^{41}Ar-besmetting van 1 Bq/m^3 ontvangt men een effectieve dosis van $2{,}2\times10^{-10}$ Sv.
- Het omgevingsdosisequivalent H* is een goede schatter van de effectieve dosis E.
- De eventuele afschermende werking van het huis mag worden verwaarloosd.

Vraag 3

Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo waaraan de bewoners zijn blootgesteld als de wind in hun richting waait.

Vraag 4

Bereken de effectieve jaardosis die de bewoners maximaal kunnen ontvangen ten gevolge van de ^{41}Ar-lozing. Neem hierbij aan dat de lozing gelijk is aan de limiet die in de vergunning wordt gesteld, en dat de wind het hele jaar in de richting van het huis waait.

Puntenwaardering **1: 5** **2: 3** **3: 3** **4: 5**

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

Een slijpschijf, gebruikt voor het doorslijpen van metalen buizen, blijkt een vrij grote concentratie natuurlijke activiteit te bevatten. De gevonden radionucliden zijn ^{226}Ra + dochters en ^{232}Th + dochters. Alle radionucliden binnen eenzelfde reeks zijn met elkaar in evenwicht.

Gegevens

- Gemeten activiteitsconcentraties voor zover aantoonbaar (zie tabel 1).
- De massa van van een schijf is 390 g.
- Volgens het Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming zijn de vrijstellingsgrenzen voor ^{226}Ra + dochters in matige hoeveelheden (1000 kg):
  1. vrijstellingsgrens voor activiteit is $A_v = 1\times10^4$ Bq
  2. vrijstellingsgrens voor activiteitsconcentratie is $C_v = 1\times10^1$ Bq/g
- Volgens de Regeling Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming zijn de vrijstellingsgrenzen voor ^{232}Th + dochters in matige hoeveelheden (1000 kg):
  1. vrijstellingsgrens voor activiteit is $A_v = 1\times10^3$ Bq
  2. vrijstellingsgrens voor activiteitsconcentratie is $C_v = 1$ Bq/g

radionuclide ^{226}Ra-reeks	*activiteitsconcentratie (Bq/kg)*	*radionuclide ^{232}Th-reeks*	*activiteitsconcentratie (Bq/kg)*
^{226}Ra	127	^{232}Th	--
^{222}Rn	--	^{228}Rn	--
^{218}Po	--	^{228}Ac	153
^{214}Pb	--	^{228}Th	--
^{214}Bi	125	^{224}Ra	--
^{214}Po	--	^{220}Rn	--
^{210}Pb	--	^{216}Po	--
^{210}Bi	--	^{212}Pb	151
^{210}Po	--	^{212}Bi	--
^{206}Pb	stabiel	^{208}Tl + ^{212}Po	157
		^{208}Pb	stabiel

Tabel 1 Gemeten activiteitsconcentraties van de verschillende radionucliden, voor zover aantoonbaar.

Vraag 1

In beide reeksen komt als dochter het gasvormige element radon voor. Welke conclusie kan getrokken worden ten aanzien van het ontsnappen van dit gas uit het materiaal? Motiveer het antwoord.

Vraag 2

Bereken de totale activiteit en de activiteitsconcentratie van een slijpschijf.

Vraag 3

Geef aan of het aanhouden van een werkvoorraad van 10 slijpschijven is vrijgesteld van registratie respectievelijk vergunning. Motiveer het antwoord.

Bij de slijpwerkzaamheden ontstaat zeer fijn verdeeld stof. Neem aan dat een fractie van 10^{-6} van het verslepen materiaal wordt ingeademd.

Aanvullende gegevens

- De schijf wordt vervangen als 90% van het materiaal versleten is.
- De dosisconversiecoëfficiënten voor inhalatie zijn:
  1. voor ^{226}Ra + dochters is $e(50)_{inh} = 1{,}6\times10^{-5}$ Sv/Bq
  2. voor ^{232}Th + dochters is $e(50)_{inh} = 6{,}2\times10^{-5}$ Sv/Bq

Vraag 4

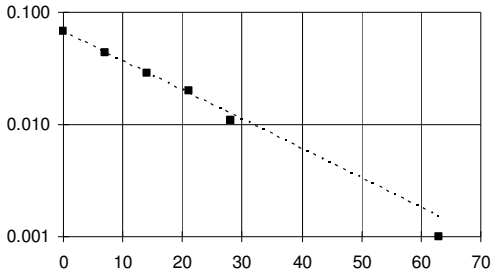
Bereken de effectieve volgdosis van een werknemer als hij een slijpschijf heeft versleten.

Puntenwaardering **1: 3** **2: 5** **3: 5** **4: 3**

Uitwerkingen

Vraagstuk 21

1 invullen gegevens in een spreadsheet
+ lineaire regressie levert $T_{½}^{eff}$ = 11,5±0,2 d



2 activiteitsconcentratie voor verwijdering
a = 0,067 Bq/ml
totale wateruitwisseling per jaar
V = (1,4 l/d + 0,65 l/d + 0,95 l/d) × 365 d/j
= 1,1×10³ l/j = 1,1×10⁶ ml/d
activiteitsuitscheiding = inname
A = a × V
= 0,067 Bq/ml × 1,1×10⁶ ml/d
= 7,4×10⁴ Bq/j

3 effectieve volgdosis per jaar E(50) = A × e(50)
= 7,4×10⁴ Bq/j × 1,8×10⁻¹¹ Sv/Bq
= 1,3×10⁻⁶ Sv/j = 1,3 µSv/j

4 bij eenmalige inname bevat het lichaam 42 l water met een activiteitsconcentratie van 0,067 Bq/ml
lichaamsactiviteit = inname A = 42 l × 10³ ml/l × 0,067 Bq/ml = 2,8×10³ Bq
effectieve volgdosis E(50) = A × e(50)
= 2,8×10³ Bq × 1,8×10⁻¹¹ Sv/Bq
= 5,0×10⁻⁸ Sv = 0,05 µSv

Vraagstuk 22

1 uitscheiding is evenredig met gemeten netto teltempo
verhouding teltempi $R(14) / R(0) = e^{-0,693 \times 14 / T½}$
= 11 520 tpm / 5130 tpm = 2,25
effectieve halveringstijd $T_{½, eff}$ = 0,693 × 14 d / ln(2,25)
= 0,693 × 14 d / 0,81 = 12 d

2a N_{netto} = activiteit × telrendement × teltijd
= A(t) × 0,80 tps/Bq × 60 s = 48 per Bq × A(t)
activiteit in 8 ml urine N_{netto} / 48 per Bq = 11 520 / 48 per Bq = 240 Bq
activiteit in 1,4 l urine 240 Bq × 1400 ml / 8 ml = 240 Bq × 175 = 4,2×10⁴ Bq

2b invullen retentiefunctie $R(0) = 1$, $R(1) = e^{-0,693 \times 1/12} = 0,944$
urinefractie R(0) - R(1) = 1 - 0,944 = 0,056

2c activiteit in lichaam urine-activiteit / urinefractie
= 4,2×10⁴ Bq / 0,056 = 7,5×10⁵ Bq
longdepositie 48% = 0,48
oplosbaarheidstype F en $f_1 = 1$ → 100% van gedeponeerde activiteit naar TC
activiteit in lichaam = $A_{inhalatie}$ × longdepositie
$A_{inhalatie}$ = activiteit in lichaam / longdepositie = 7,5×10⁵ Bq / 0,48 = 1,6×10⁶ Bq

3 effectieve volgdosis $E(50) = A_{inhalatie} \times e(50)_{inhhalatie}$ = 1,6×10⁶ Bq × 4,9×10⁻¹⁰ Sv/Bq
= 7,8×10⁻⁴ Sv = 0,8 mSv

Vraagstuk 23

1 aflezen van Appendix, figuur 6 bij 'Diversen' → $e(50)_{injectie}$ = 8,4×10⁻¹¹ Sv/Bq
ingespoten activiteit A(0) = 200 MBq = 2,0×10⁸ Bq
effectieve volgdosis $E(50) = A(0) \times e(50)_{injectie}$
= 2,0×10⁸ Bq × 8,4×10⁻¹¹ Sv/Bq
= 1,7×10⁻² Sv = 17 mSv

2 bij inhalatieklasse F gaat 100% van inhalatie naar TC
bij injectie gaat 100% naar TC
→ injectie komt overeen met inhalatieklasse F

3a aflezen van Appendix, figuur 6 bij 'Gegevens voor totale-lichaamstelling' en inhalatieklasse F
na 72 uur = 3 d $1{,}4\times10^{-1}$ Bq per Bq inname

3b activiteit na 72 uur $A(72) = A(0) \times 1{,}4\times10^{-1}$ Bq per Bq inname
$= 200$ MBq $\times$ 0,14 = 28 MBq

4a aflezen van Appendix, figuur 6
citraat hoort bij overige verbindingen → inhalatieklasse F
aflezen van Appendix, figuur 6 bij 'Gegevens voor totale-lichaamstelling' en inhalatieklasse F
na 24 uur = 1 d $4{,}3\times10^{-1}$ Bq per Bq inname

4b activiteit na 24 uur $A(24) = A_{inhalatie} \times 4{,}3\times10^{-1}$ Bq per Bq inname
$= 8{,}5$ kBq

inhalatie $A_{inhalatie} = 8{,}5$ kBq / 0,43 = 20 kBq
aflezen Appendix, figuur 6 bij inhalatieklasse F
$e(50)_{inhalatie} = 1{,}1\times10^{-10}$ Sv/Bq
effectieve volgdosis $E(50) = A_{inhalatie} \times e(50)_{inhalatie}$
$= 20\times10^{3}$ Bq $\times$ $1{,}1\times10^{-10}$ Sv/Bq
$= 2{,}2\times10^{-7}$ Sv = 0,2 µSv

Vraagstuk 24

1 t = 1 kwartaal = (365 d/j × 24 h/d) / 4 = 2190 h = $7{,}9\times10^{6}$ s
bruto teltempo $R_{bruto} = N_{bruto} / t = 8{,}4\times10^{8} / 7{,}9\times10^{6}$ s = 106 tps
achtergrond $R_{nul} = 5$ tps
netto teltempo $R_{netto} = 106$ tps - 5 tps = 101 tps
activiteitsconcentratie $a = R_{netto} \times$ ijkfactor
$= 101$ tps $\times$ 4,2 kBq/m³ per tps
$= 424$ kBq/m³ $= 4{,}2\times10^{5}$ Bq/m³

2 geloosde volume lucht $V = 2190$ h $\times$ 1500 m³/h $= 3{,}3\times10^{6}$ m³
geloosde activiteit $A = a \times V$
$= 4{,}2\times10^{5}$ Bq/m³ $\times$ $3{,}3\times10^{6}$ m³
$= 1{,}4\times10^{12}$ Bq = 1,4 TBq
→ dit is ruim binnen de vergunning

3 activiteitsconcentratie bij huis $10^{-6} \times a = 10^{-6} \times 4{,}2\times10^{5}$ Bq/m³ = 0,42 Bq/m³
omgevingsdosisequivalenttempo $\dot{H}^* \approx \dot{E} = a \times e$
$= 0{,}42$ Bq/m³ $\times$ $2{,}2\times10^{-10}$ Sv/uur per Bq/m³
$= 9{,}2\times10^{-11}$ Sv/uur

4 actuele kwartaallozing $A = 1{,}4$ TBq
maximale kwartaallozing $A_{max} = 17$ TBq
maximale omgevingsdosisequivalenttempo $\dot{H}^*_{max} = \dot{H}^* \times (A_{max} / A)$
$= 9{,}2\times10^{-11}$ Sv/h $\times$ (17 TBq / 1,4 TBq)
$= 1{,}1\times10^{-9}$ Sv/h
maximale blootstellingstijd $t_{max} = 365$ d/j $\times$ 24 uur/d $= 8{,}8\times10^{3}$ uur
maximale effectieve jaardosis $E_{max} \approx H^*_{max} \times t_{max}$
$= 1{,}1\times10^{-9}$ Sv/uur $\times$ $8{,}8\times10^{3}$ uur
$= 9{,}7\times10^{-6}$ Sv = 10 µSv

Vraagstuk 25

1 binnen een reeks zijn de gemeten activiteitsconcentraties van radionucliden voor en na het edelgas radon niet significant verschillend, zodat mag worden geconcludeerd dat er geen gas uit het materiaal ontsnapt

2 ^{226}Ra-reeks

9 nucliden met een gemiddelde activiteitsconcentratie van 126 Bq/kg = 0,126 Bq/g

activiteitsconcentratie $a_{Ra+} = 9 \times 0{,}126$ Bq/g = 1,13 Bq/g

activiteit per schijf $A_{Ra+} = a_{Ra+} \times m_{schijf} = 1{,}13$ Bq/g × 390 g
= 440 Bq = 0,44 kBq

^{232}Th-reeks

10 nucliden met een gemiddelde activiteitsconcentratie van 154 Bq/kg = 0,154 Bq/g

activiteitsconcentratie $a_{Th+} = 10 \times 0{,}154$ Bq/g = 1,54 Bq/g

activiteit per schijf $A_{Th+} = a_{Th+} \times m_{schijf} = 1{,}54$ Bq/g × 390 g
= 600 Bq = 0,60 kBq

totale actviteitsconcentratie $a_{Ra+} + a_{Th+} = 1{,}13$ Bq/g + 1,54 Bq/g = 2,67 Bq/g

totale activiteit per schijf $A_{Ra+} + A_{Th+} = 0{,}44$ kBq + 0,60 kBq = 1,04 kBq

3 ^{226}Ra-reeks

activiteitsconcentratie = 1,13 Bq/g

activiteit = 10 schijven × 0,44 kBq per schijf = 4,4 kBq

^{232}Th-reeks

activiteitsconcentratie = 1,54 Bq/g

activiteit = 10 schijven × 0,60 kBq per schijf =6,0 (kBq

gewogen som

activiteitsconcentratie =
(1,13 Bq/g / 10 Bq/g) + (1,54 Bq/g / 1 Bq/g) = 2,67 > 1

activiteit =
(4,4 kBq / 10 kBq) + (6,0 kBq / 1 kBq) = 6,44 > 1

beide grenswaarden worden overschreden

→ werkvoorraad is niet vrijgesteld van melding/vergunning

4 ^{226}Ra-reeks

geïnhaleerde activiteit $10^{-6} \times 0{,}90 \times A_{Ra+} = 0{,}9\times10^{-6} \times 440$ Bq = $4{,}0\times10^{-4}$ Bq

effectieve volgdosis $E(50)_{Ra+} = 4{,}0\times10^{-4}$ Bq × $1{,}6\times10^{-5}$ Sv/Bq
= $6{,}4\times10^{-9}$ Sv = 6,4 nSv

^{232}Th-reeks

geïnhaleerde activiteit $10^{-6} \times 0{,}90 \times A_{Th+} = 0{,}9\times10^{-6} \times 600$ Bq = $5{,}4\times10^{-4}$ Bq

effectieve volgdosis $E(50)_{Th+} = 5{,}4\times10^{-4}$ Bq × $6{,}2\times10^{-5}$ Sv/Bq
= $33{,}5\times10^{-9}$ Sv = 33,5 nSv

totale effectieve volgdosis $E(50)_{Ra+} + E(50)_{Th+} = 6{,}4$ nSv + 33,5 nSv
= 40 nSv

APPENDIX

Eenheden, constanten en voorvoegsels

Basiseenheden

grootheid	*symbool*	*eenheid*	*afkorting*
lengte	l	meter	m
massa	m	kilogram	kg
tijd	t	seconde	s
temperatuur	T	kelvin	K
stroomsterkte	I	ampère	A
lichtsterkte	l	candela	cd
hoeveelheid stof	mol	mol	

Afgeleide eenheden

grootheid	*symbool*	*eenheid*	*afkorting*	*dimensie*
kracht	F	newton	N	kg m s^{-2}
energie	E	joule	J	kg m^2 s^{-2}
vermogen	P	watt	W	J s^{-1}
lading	Q	coulomb	C	A s
spanning	V	volt	V	J C^{-1}
weerstand	R	ohm	Ω	V A^{-1}
capaciteit	C	farad	F	C V^{-1}
frequentie [1]	f of ν	hertz	Hz	s^{-1}
activiteit [1]	A	becquerel	Bq	s^{-1}

Fysische constanten

lichtsnelheid	$2{,}9979\times10^{8}$ m s^{-1}
constante van Planck	$6{,}6262\times10^{-34}$ J s
getal van Avogadro	$6{,}0220\times10^{26}$ mol^{-1}
elementaire lading	$1{,}6022\times10^{-19}$ C
1 joule	$6{,}2422\times10^{18}$ eV
1 ame	931,50 MeV = $1{,}6606\times10^{-27}$ kg

Voorvoegsels [2]

voorvoegsel	*factor*	*symbool*	*voorvoegsel*	*factor*	*symbool*
kilo	10^{3}	k	milli	10^{-3}	m
mega	10^{6}	M	micro	10^{-6}	μ
giga	10^{9}	G	nano	10^{-9}	n
tera	10^{12}	T	pico	10^{-12}	p
peta	10^{15}	P	femto	10^{-15}	f
exa	10^{18}	E	atto	10^{-18}	a

---

1 Er zijn twee verschillende eenheden die beide de dimensie s^{-1} hebben: de ene is periodiek (Hz) en de andere is stochastisch en onderhevig aan statistische fluctuaties (Bq).

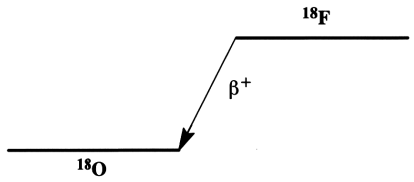
2 Let op het gebruik van hoofdletters en kleine letters.

^{18}F Z = 9 N = 9 ^{18}F

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 109,70 min = 6,582×10^3 s λ = 1,05×10^{-4} s^{-1}

Vervalschema



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s)$^{-1}$	E (keV)
β^+	1,000	250 | 634
$\gamma^{\pm}$	2,000	511

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	k = 0,135 µGy/h per MBq/m^2
Omgevingsdosisequivalenttempo	h = 0,166 µSv/h per MBq/m^2

Diversen

Specifieke activiteit	A_{sp} = 3,52×10^{18} Bq/g
Vrijstellingsgrenzen	C_v = 10^1 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^{-11} Sv/Bq
Vervoer	A_1 = 1 TBq
	A_2 = 0,6 TBq

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{18}F is een cyclotronproduct. Het nuclide wordt toegepast in de nucleaire geneeskunde voor het maken van afbeeldingen met behulp van positronen-emissie-tomografie (PET).

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat fluor na opname in het bloed volledig in het bot wordt opgenomen.
Gezien de korte fysische halveringstijd van ^{18}F (110 minuten) is de biologische halveringstijd van geen belang.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		
Alle verbindingen	f_1 = 1	
Inhalatie		
Afhankelijk	f_1 = 1	Klasse S
van	f_1 = 1	Klasse M
bindingskation	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 M	Inhalatie S	
e(50)(w)	4,9×10^{-11}	5,4×10^{-11}	8,9×10^{-11}	9,3×10^{-11}	Sv/Bq
A_{Re}(w)	2,0×10^{10}	1,9×10^{10}	1,1×10^{10}	1,1×10^{10}	Bq
e(50)(b)	4,9×10^{-11}	3,0×10^{-11}	5,7×10^{-11}	6,0×10^{-11}	Sv/Bq
A_{Re}(b)	2,0×10^{10}	3,3×10^{10}	1,8×10^{10}	1,7×10^{10}	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)			
0,25	1,0×10^{-1}	7,7×10^{-2}	7,7×10^{-2}	7.7×10^{-2}
1	1,1×10^{-4}	6,8×10^{-5}	6,8×10^{-5}	6.8×10^{-5}

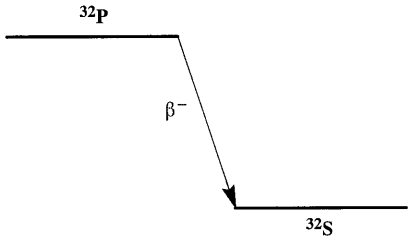
Figuur 1 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{18}F

^{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

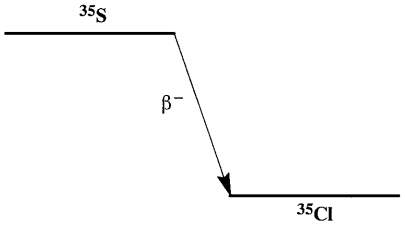
Tijd (d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)		
1	8,5×10^{-2}	4,9×10^{-2}	3,6×10^{-2}
2	5,2×10^{-2}	2,8×10^{-2}	2,3×10^{-2}
3	3,1×10^{-2}	1,7×10^{-2}	1,4×10^{-2}
5	1,6×10^{-2}	8,9×10^{-3}	7,2×10^{-3}
7	1,0×10^{-2}	5,6×10^{-3}	4,5×10^{-3}

^{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}

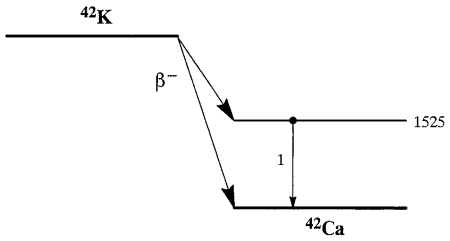
Figuur 3 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{35}S

^{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

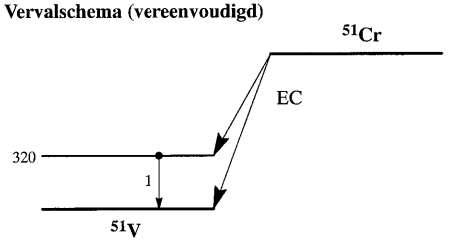
Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)	
0,25	$7{,}1\times10^{-1}$	$5{,}3\times10^{-1}$
1	$2{,}6\times10^{-1}$	$1{,}6\times10^{-1}$
2	$6{,}5\times10^{-2}$	$3{,}5\times10^{-2}$
3	$1{,}6\times10^{-2}$	$8{,}4\times10^{-3}$
5	$1{,}1\times10^{-3}$	$5{,}3\times10^{-4}$
7	$6{,}9\times10^{-5}$	$3{,}4\times10^{-5}$

^{51}Cr Z = 24 N = 27 ^{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}

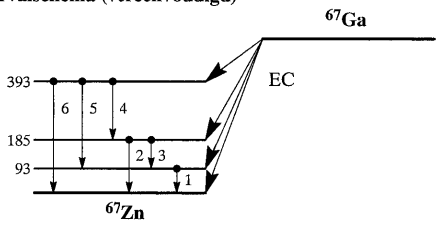
Figuur 5 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{51}Cr

^{67}Ga Z = 31 N = 36 ^{67}Ga

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2}$ = 78,23 h = $2{,}82\times10^{5}$ s $\lambda = 2{,}46\times10^{-6}$ 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} = $2{,}21\times10^{16}$ 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	$e(50)$ = $8{,}4\times10^{-11}$ 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	
$e(50)(w)$	$1{,}9\times10^{-10}$	$1{,}1\times10^{-10}$	$2{,}8\times10^{-10}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$5{,}3\times10^{9}$	$9{,}1\times10^{9}$	$3{,}6\times10^{9}$	Bq
$e(50)(b)$	$1{,}9\times10^{-10}$	$6{,}8\times10^{-11}$	$2{,}3\times10^{-10}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$5{,}3\times10^{9}$	$1{,}5\times10^{10}$	$4{,}3\times10^{9}$	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

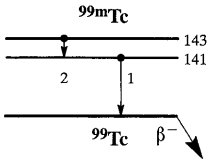
Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)		
0,25	$9{,}4\times10^{-1}$	$7{,}0\times10^{-1}$	$7{,}0\times10^{-1}$
1	$5{,}8\times10^{-1}$	$4{,}3\times10^{-1}$	$4{,}0\times10^{-1}$
2	$2{,}1\times10^{-1}$	$2{,}3\times10^{-1}$	$1{,}7\times10^{-1}$
3	$7{,}0\times10^{-2}$	$1{,}4\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-2}$
5	$6{,}7\times10^{-3}$	$6{,}9\times10^{-2}$	$2{,}9\times10^{-2}$
7	$7{,}2\times10^{-4}$	$4{,}2\times10^{-2}$	$1{,}7\times10^{-2}$

^{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}

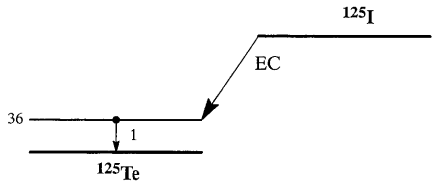
Figuur 7 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{99m}Tc

^{125}I Z = 53 N = 72 ^{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)

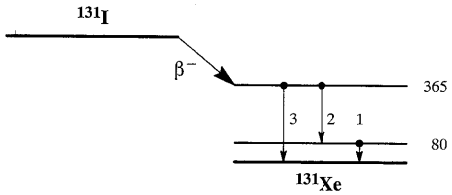
Tijd (d)	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)			
	f_1 = 1	F	I_2	CH_3I
0,25	6,1×10^{-2}	5,3×10^{-2}	1,1×10^{-1}	1,1×10^{-1}
1	2,6×10^{-1}	1,3×10^{-1}	2,4×10^{-1}	1,9×10^{-1}
2	2,9×10^{-1}	1,4×10^{-1}	2,6×10^{-1}	2,0×10^{-1}
3	2,8×10^{-1}	1,4×10^{-1}	2,6×10^{-1}	2,0×10^{-1}
5	2,7×10^{-1}	1,3×10^{-1}	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

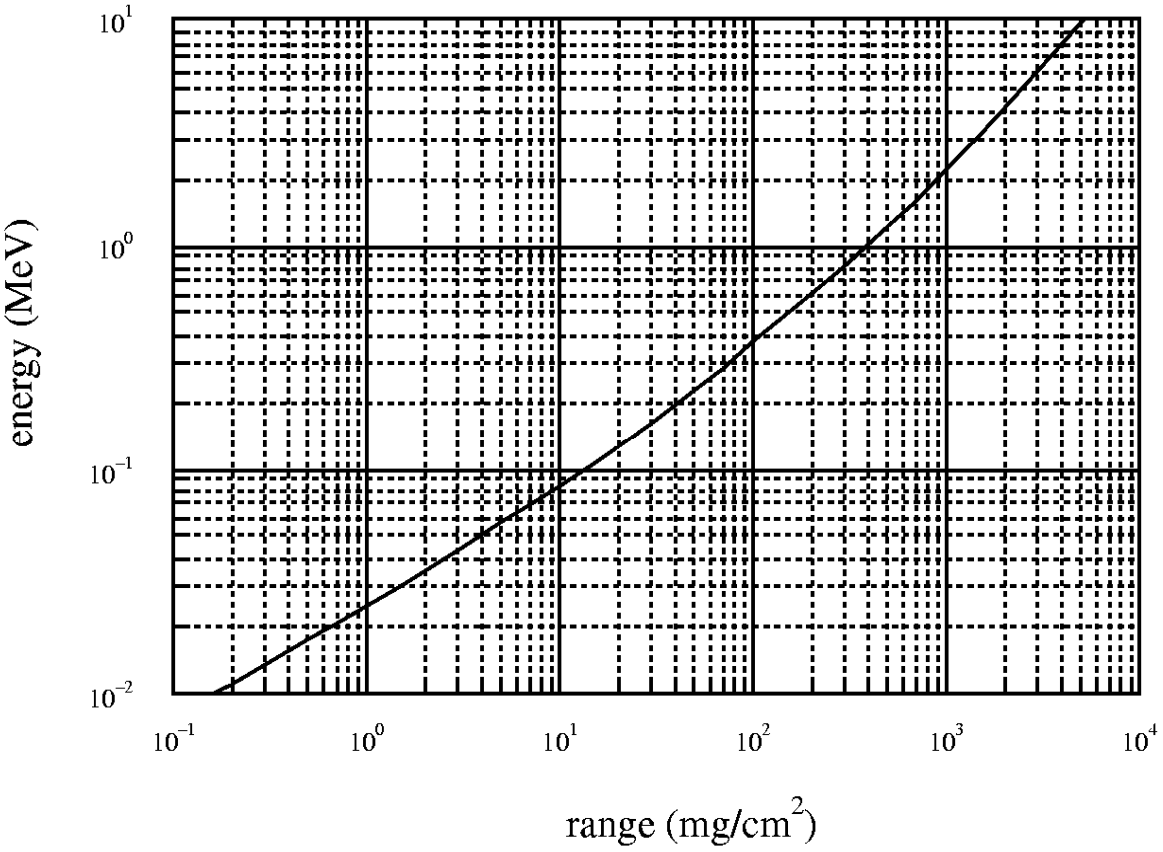
Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	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

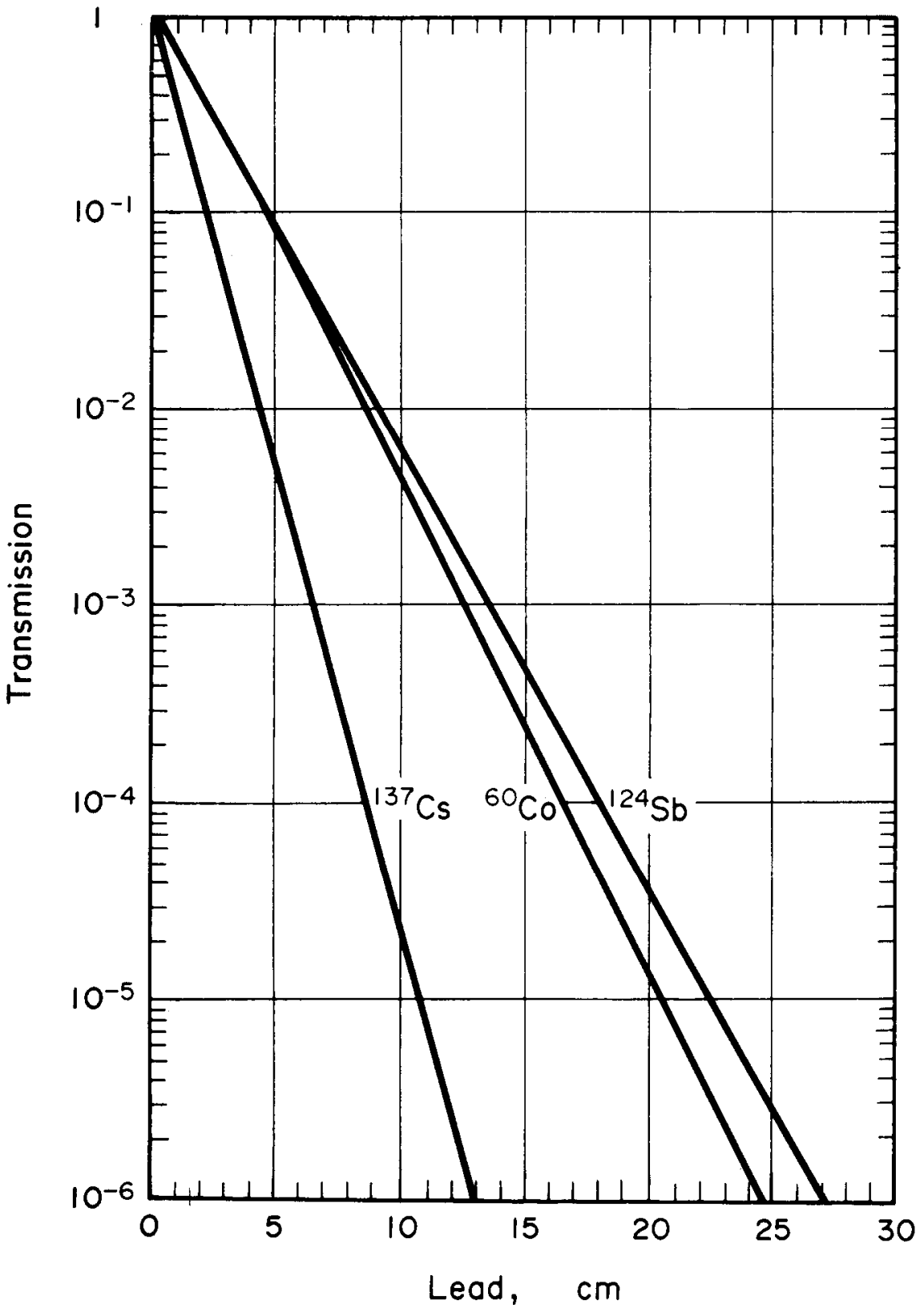
Gegevens voor schildkliertelling (na eenmalige inname)

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 9 Stralingshygiënische gegevens van het radionuclide ^{131}I



Figuur 10 *De maximale massieke dracht $\rho R_{\beta,max}$ (in mg/cm²) als functie van de maximale β-energie $E_{\beta,max}$ (in MeV)*



Figuur 11 Transmissie van brede bundels γ-straling door lood (ICRP-57)

categorie	*$\dot{H}$* op het oppervlak (µSv/uur)*	*$\dot{H}$* op 1 m van het oppervlak (µSv/uur)*	*transportindex*
I-WIT	$\dot{H} < 5$		0
II-GEEL	$5 < \dot{H} < 500$	$\dot{H} < 10$	$0 < TI < 1$
III-GEEL	$500 < \dot{H} < 2000$	$10 < \dot{H} < 100$	$1 < TI < 10$

Figuur 12 Categorie-indeling bij het vervoer van pakketten van type A

p	*bewerking*
-4	werken met gas / poeder in open systeem verhitten van vloeistof tegen kookpunt sterk spattende bewerking
-3	werken met vluchtig nuclide (^{3}H in dampvorm, jodium) werken met poeder in gesloten systeem koken in gesloten systeem schudden, vortexen, centrifugeren opslag van edelgas in gesloten systeem
-2	eenvoudige chemische bewerking (RIA) labeling met niet vluchtig nuclide
-1	kortdurend zeer eenvoudig nat werk: pipetteren van niet vluchtig nuclide bewerking in gesloten systeem: elutie technetiumgenerator optrekken van spuit labeling in gesloten systeem meten aan gesloten ampul opslag van radioactief afval in werkruimte

q	*ruimte*
0	werkruimte buiten laboratoriumbeheer
1	D-laboratorium
2	C-laboratorium
3	B-laboratorium

r	*werkplek*
0	tafel zonder lokale afzuiging
1	tafel met lokale afzuiging zuurkast niet volgens norm NEN-EN 14175
2	zuurkast volgens norm NEN-EN 14175 laminaire air-flow isolator (klasse 2)
3	gesloten laminaire air-flow isolator (klasse 3) handschoenenkast

Figuur 13 Parameters volgens de Richtlijn Radionuclidenlaboratoria

AMAD (µm)	*ET_1*	*ET_2*	*BB*	*bb*	*AI*	*totaal*
1	0,17	0,21	0,01	0,02	0,11	0,51
2	0,25	0,32	0,02	0,01	0,09	0,70
3	0,30	0,37	0,02	0,01	0,08	0,78
5	0,34	0,40	0,02	0,01	0,05	0,82
7	0,35	0,40	0,01	0,01	0,04	0,81
10	0,35	0,38	0,01	0,00	0,02	0,77

Figuur 14 Longdepositiefracties voor neusademer (1,2 m^3/uur) (ICRP-66)