

Cursus Coördinerend Stralingsbeschermingsdeskundige

Vraagstukkenboek

dr. F. Pleiter en dr. H.F. Boersma

12 januari 2020



/ rijksuniversiteit / arbo, milieu en / garp
groningen / duurzaamheid /

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

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

INHOUD

METINGEN AAN RADIOACTIVITEIT.....	7
1. ^{14}C -datering.....	9
2. Activiteit van strontium-isotopen.....	10
3. Gelijktijdig meten van α - en β -activiteit.....	11
4. Oppervlaktebesmetting met ^{45}Ca en ^{46}Sc	12
5. Meting van ^{13}N met een gamma-camera.....	13
6. Detectie van een laboratoriumbesmetting.....	14
7. Meting van foliediktes met een β -bron.....	16
8. Detectielimiet.....	18
9. Vulhoogtemeting.....	19
10. Afvalmonitor.....	21
11. Geactiveerd gereedschap.....	23
12. Detectie van ^{55}Fe	25
13. Bepaling van de massieke verzwakkingscoëfficiënt.....	26
14. Meting aan ^{125}I	27
15. Vloeibaar afval.....	28
16. Lekkende ^{131}I -bron.....	30
17. Kwik in een kolencentrale.....	31
18. Luchtbesmettingsmonitor.....	33
19. ^{88}Kr -activiteit in aërosolen.....	34
20. Slijpschijf met natuurlijke radioactieve stoffen.....	35
Uitwerkingen.....	36
EXTERNE DOSIMETRIE EN AFSCHERMING.....	47
21. Fluëntietempo en fotonentelling.....	49
22. Verontreinigd $^{51}\text{CrCl}_3$	50
23. Reefer Rio.....	51
24. TLD-persoonsdosimeter.....	52
25. ^{32}P -dosimetrie.....	54
26. Incident met een gammagrafiebron.....	55
27. Afscherming van een ^{24}Na -bron.....	56
28. Afscherming van geactiveerd materiaal.....	57
29. Afscherming van moeder en dochter.....	58
30. Container voor opslag van ^{60}Co	60
31. Afscherming van een ionenwisselaar.....	62
32. Afscherming van een ^{137}Cs -bron.....	64
33. Afscherming van een ^{60}Co -bron.....	65
34. Afscherming van ^{60}Co -activiteit.....	66
35. Afscherming van een ^{60}Co -bestralingsinrichting.....	67
36. Afscherming van een betatron.....	69
37. Dosis bij radiodiagnostisch onderzoek.....	72
38. Dosimetrie van röntgenstraling.....	74
39. Afscherming van een röntgentoestel.....	75
40. Afscherming van een neutronengenerator.....	78
Uitwerkingen.....	81
INWENDIGE BESMETTING.....	93
Formules gebruikt bij de dosimetrie van inwendige besmetting.....	95
41. Equivalente orgaandosis ten gevolge van ^{198}Au in de lever.....	96
42. ^{87}Rb in voedsel.....	98
43. Berekening van $e(50)$ van ^{35}S voor een volwassene.....	99
44. Berekening van $e(50)$ van ^{35}S voor een baby.....	100

45.	Berekening van $e(50)$ van ^3H voor een volwassene.....	101
46.	Berekening van $e(50)$ van ^3H voor een kind.....	102
47.	Inhalatie van getritieerd waterdamp.....	103
48.	Inwendige besmetting met ^3H	104
49.	Tritiumoxide in de lucht.....	105
50.	Inwendige besmetting met ^{32}P	106
51.	Urinemetingen na een besmetting met H^{36}Cl	107
52.	Ongeval met ^{51}Cr -poeder.....	108
53.	Injectie met ^{67}Ga -citraat.....	109
54.	Toediening van $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -fosfonaat.....	110
55.	Ingestie van ^{137}Cs	111
56.	Inwendige besmetting met $^{195\text{m}}\text{Pt}$	112
57.	Incident met een ^{241}Am -bron.....	113
58.	Bepaling van ^{241}Am in de urine.....	114
59.	Lekkende cilinder met ^{85}Kr	115
60.	^{85}Kr -concentratie in de buitenlucht.....	116
	Uitwerkingen.....	117
APPENDIX.....		127
Figuur 1.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^3H	129
Figuur 2.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{24}Na	130
Figuur 3.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{32}P	131
Figuur 4.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{35}S	132
Figuur 5.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{36}Cl	133
Figuur 6.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{42}K	134
Figuur 7.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{45}Ca	135
Figuur 8.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{46}Sc	136
Figuur 9.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{51}Cr	137
Figuur 10.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{55}Fe	138
Figuur 11.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{60}Co	139
Figuur 12.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{67}Ga	140
Figuur 13.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{85}Kr	141
Figuur 14.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{87}Rb	142
Figuur 15.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{89}Sr	143
Figuur 16.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{90}Sr	144
Figuur 17.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{90}Y	145
Figuur 18.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide $^{99\text{m}}\text{Tc}$	146
Figuur 19.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{125}I	147
Figuur 20.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{131}I	148
Figuur 21.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{137}Cs	149
Figuur 22.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{170}Tm	150
Figuur 23.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{203}Hg	151
Figuur 24.	Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{241}Am	152
Figuur 25.	Gereduceerde dracht van β -deeltjes.....	153
Figuur 26.	Massieke energieoverdracht- en energieabsorptiecoëfficiënten.....	154
Figuur 27.	Fluentietempo en energiefluentietempo van fotonen.....	154
Figuur 28.	Conversiecoëfficiënten voor luchtkerma K_a naar omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$, effectieve dosis $E(\text{AP})$ in een fantoom van een volwassene in de anterior-posteriorgeometrie, en persoonsdosisequivalent $H_{\text{p,slab}}(10)$ in een ICRU-slab.....	155
Figuur 29.	Verhouding van effectieve dosis en omgevingsdosisequivalent.....	155
Figuur 30.	Dosisopbouwfactoren voor een isotrope puntbron.....	156
Figuur 31.	Transmissie van brede bundels γ -straling door lood.....	157
Figuur 32.	Transmissie van brede bundels γ -straling door lood.....	158
Figuur 33.	Transmissie van brede bundels γ -straling door beton.....	159
Figuur 34.	Transmissie van brede bundels γ -straling door beton.....	160
Figuur 35.	Transmissie van aan beton verstrooide γ -straling van ^{137}Cs door lood.....	161
Figuur 36.	Transmissie van aan beton verstrooide γ -straling van ^{137}Cs door beton..	162

Figuur 37. Transmissie van aan een fantoom verstrooide γ -straling van ^{60}Co door lood	163
Figuur 38. Transmissie van aan een fantoom verstrooide γ -straling van ^{60}Co door beton	164
Figuur 39. Transmissie van brede bundels röntgenstraling door lood	165
Figuur 40. Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton.....	166
Figuur 41. Kermatempo voor verschillende filtraties	167
Figuur 42. Kermatempo en transmissie van röntgenstraling door lood.....	168
Figuur 43. Kermatempo en transmissie van röntgenstraling door beton.....	169
Figuur 44. Verstrooiing van röntgenstraling aan beton	170
Figuur 45. Verstrooiing van röntgenstraling aan water, beton en lood	170
Figuur 47. Orgaanweegfactoren w_T	171
Figuur 48. Specifieke geabsorbeerde fracties SAF (in g^{-1}) voor bronorgaan lever	172
Figuur 49. Specifieke geabsorbeerde fracties SAF (in g^{-1}) voor bronorgaan milt	172
Figuur 50. Longdepositiefracties voor neusademmer	173
Figuur 51. Longdepositiefracties voor mondademer	173
RECENTE EXAMENS	175

METINGEN AAN RADIOACTIVITEIT

1. ^{14}C -datering

(1996-1-2)

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

De activiteitsbepaling vindt plaats met behulp van een proportionele telbuis. De telbuis wordt gevuld met CO_2 -gas dat ontstaat bij de verbranding van het te onderzoeken materiaal. Het telrendement van de gebruikte telbuis bedraagt 0,95 telpulsen per seconde (tps) per Bq ^{14}C . Het achtergrondteltempo bepaalt men met behulp van steenkool, dat vanwege de hoge ouderdom van de steenkoollagen geen ^{14}C meer bevat. Uit een achtergrondtelling van 32 uur volgt een achtergrondteltempo van gemiddeld 0,00300 tps.

Gegeven:

- het atoomgewicht van C is $12,0 \text{ g mol}^{-1}$
- het volume van 1 mol gas bedraagt 22,4 l onder standaardcondities
- $T_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5730 \text{ j}$
- eenzijdige overschrijdingskans $P(k)$ voor een normaalverdeling (zie tabel 1)

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

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

Vragen:

1. Bepaal de massieke activiteit van ^{14}C (in Bq per kg elementair koolstof) voor een stuk hout uit het jaar nul.
2. In een boomstam, gevonden in een prehistorisch graf, meet men een massieke ^{14}C -activiteit van 135 Bq kg^{-1} elementair koolstof. Hoe oud is deze boomstam?
3. In de gebruikte telbuis wordt $100 \text{ cm}^3 \text{ CO}_2$ -gas gebracht, dat verkregen is door verbranding van een monster uit een houten voorwerp. In 32 uur worden 513 telpulsen verzameld. Bepaal de massieke activiteit van ^{14}C (in Bq per kg elementair koolstof).
4. Bereken de ouderdom van het voorwerp uit vraag 3.
5. Hoe oud is het voorwerp uit vraag 3 maximaal bij een betrouwbaarheidsinterval van 95%, rekening houdende met de standaarddeviatie in de massieke activiteit?

2. Activiteit van strontium-isotopen

(1988-1-4)

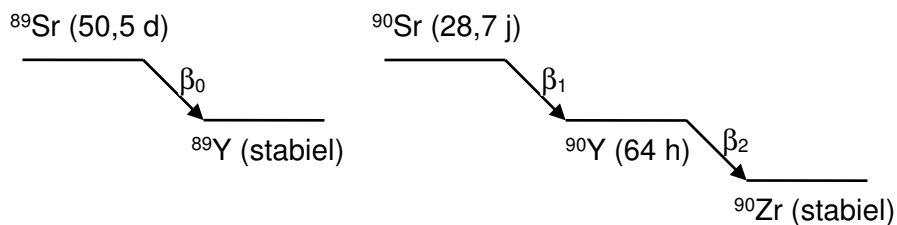
Op een filter waardoor ten tijde van de passage van de activiteitswolk ten gevolge van het Tsjernobyl-incident lucht is gezogen, worden naast de radionucliden die via γ -spectrometrie zijn aan te tonen (^{131}I , ^{137}Cs , ^{103}Ru , enzovoorts) ook de strontium-isotopen ^{89}Sr en ^{90}Sr verwacht.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

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

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

Gegeven:

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



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

Vragen:

1. Bereken de activiteiten van ^{89}Sr en ^{90}Sr op het filter op het tijdstip van de monstername, uitgaande van de resultaten van de twee metingen.
2. Bereken de activiteitsconcentratie (in Bq m^{-3}) van beide isotopen in de lucht op het tijdstip van de monstername.

3. Gelijktijdig meten van α - en β -activiteit

(1987-2-4)

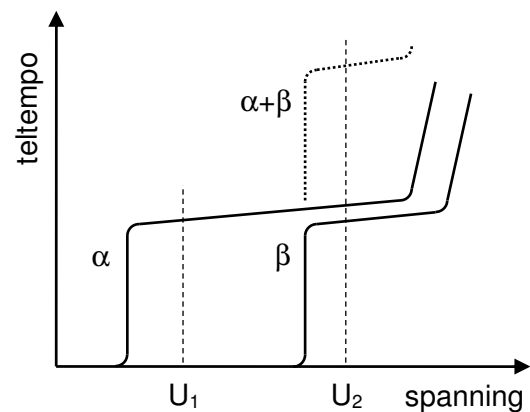
Bij een proportionele telbuis vertoont de relatie tussen teltempo en buisspanning zowel voor α - als voor β -activiteit een plateau. Deze plateau's vertonen enige overlap, zoals aangegeven in figuur 1, waardoor in hetzelfde monster zowel de α - als de β -activiteit kan worden bepaald. Dit gebeurt door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

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

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

Gegeven:

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



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

Tabel 1. Ijkgegevens van de proportionele telbuis.

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

Vragen:

1. Bereken de α - en β -activiteit (in Bq) met de bijbehorende standaarddeviaties voor het eerste monster.
2. Wat is voor het tweede monster de minimaal aantoonbare β -activiteit (in Bq) bij een teltijd van 40 min bij hoogspanning U_2 ?

4. Oppervlaktebesmetting met ^{45}Ca en ^{46}Sc

(1995-2-3)

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het voor dode tijd gecorrigeerde β -teltempo van het veegmonster.
2. Bereken de totale β -activiteit van het veegmonster (in Bq).
3. Bereken de ^{46}Sc -activiteit (in Bq).
4. Hoe groot waren de oppervlaktebesmettingen (in Bq cm^{-2}) van ^{45}Ca en ^{46}Sc afzonderlijk?
5. Was de besmetting toelaatbaar volgens de (inmiddels oude) Richtlijn Radionuclidenlaboratoria?

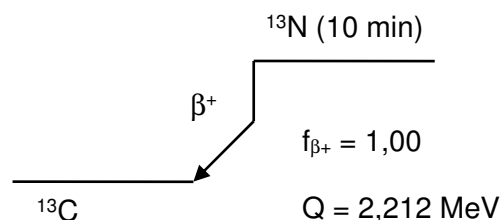
5. Meting van ^{13}N met een gamma-camera

(1981-1-3)

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

Gegeven:

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



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

Vragen:

1. Bepaal het fotopiek-rendement van het NaI-kristal voor een γ -energie van 0,511 MeV.
2. Hoeveel ^{13}N -activiteit moet minimaal worden toegediend om een bruikbare opname te verkrijgen?

6. Detectie van een laboratoriumbesmetting

(1981-2-2)

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

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

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

nuclide	^{22}Na	^{55}Fe	^{81}Kr	^{125}I
$T_{1/2}$	2,602 j	2,7 j	$2,3 \times 10^5$ j	59,39 d
verval	β^+	EC	EC	EC
straling	γ γ_{\pm}	X_K	X_K	X_K γ
energie	1275 511	6	12	27 35
f_{emissie}	1,00 1,81	0,28	0,53	1,39 0,07

Gegeven:

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

$$f_{\text{geo}} = 0,5 \times [1 - \cos(\alpha)]$$

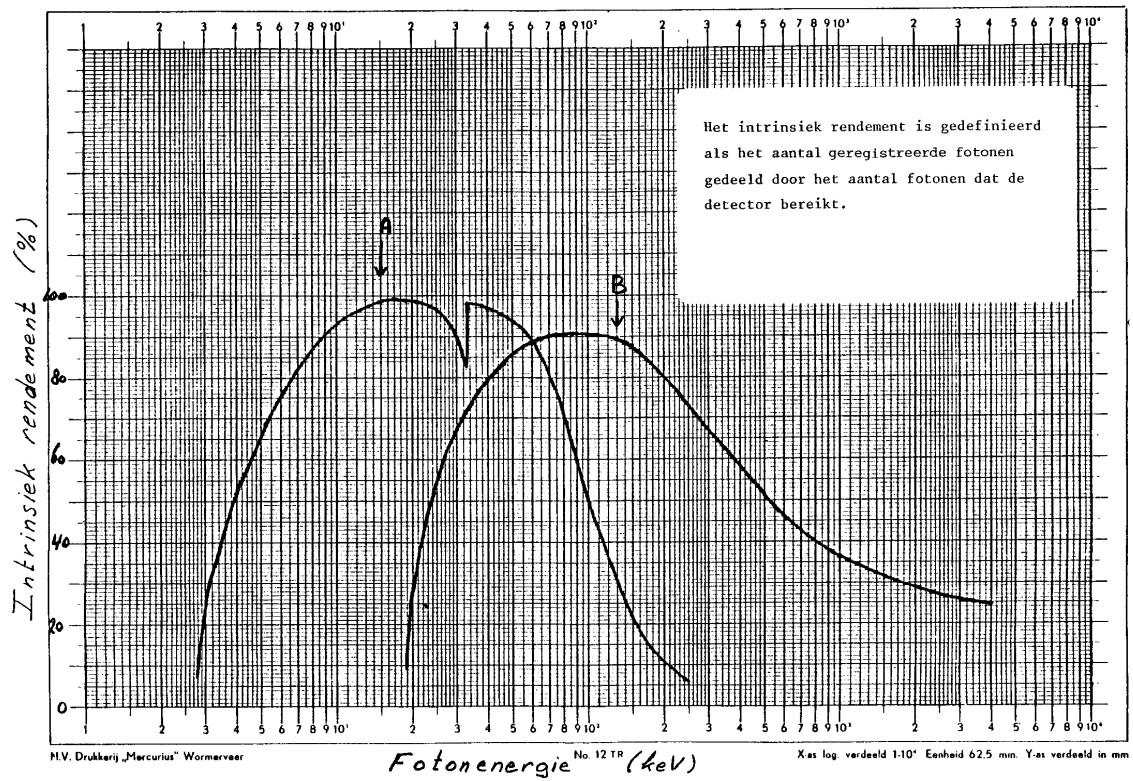
$$\cos(\alpha) = \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}}$$

h = afstand van de bron tot het voorvlak van de detector

r = straal van het cirkelvormige voorvlak

Vragen:

1. Bepaal met behulp van de gegevens in tabel 1 en figuur 1 uit welk nuclide de besmetting bestaat, ervan uitgaande dat de besmetting uit slechts één van de vier in de tabel genoemde nucliden bestaat. Beredeneer uw antwoord.
2. Bereken uit één van de meetresultaten de activiteit van de besmetting. Deze mag als puntbron worden beschouwd. Er hoeft geen rekening te worden gehouden met de verzwakking in lucht.



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

7. Meting van foliediktes met een β -bron

(2000-1-1)

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

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

Gegeven:

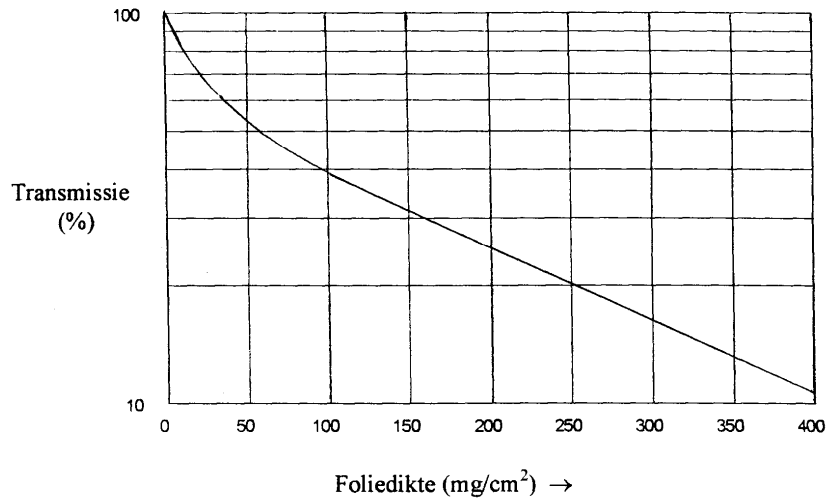
- het vervalschema van ^{90}Sr (zie Appendix, figuur 16)
- het vervalschema van ^{90}Y (zie Appendix, figuur 17)
- de transmissie van β -deeltjes van $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ door kunststof (zie figuur 1)
- het geabsorbeerde dosistempo in lucht voor een puntvormige β -bron (zie figuur 2)

Vragen:

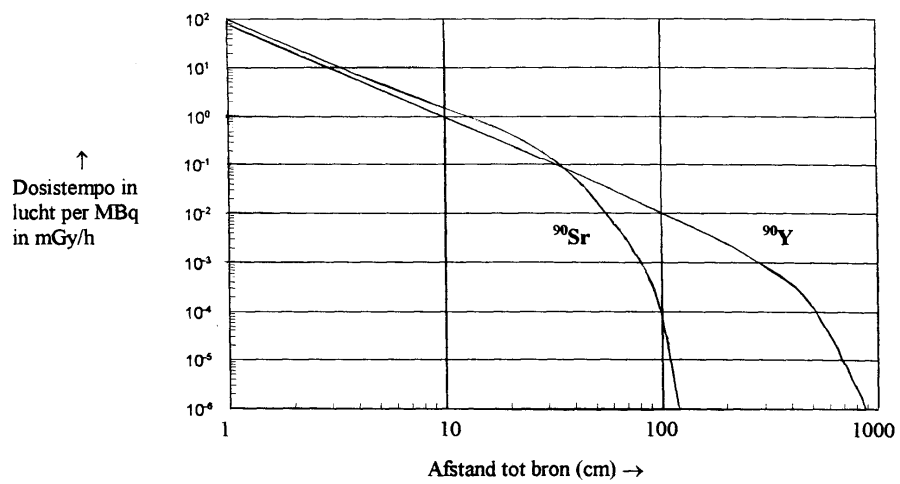
1. Bepaal het totale rendement van de gebruikte meetopstelling zonder folie.
2. Bereken de dikte (in mg cm^{-2}) van het gemeten folie.
3. Hoe lang moet een telling bij een foliedikte van 200 mg cm^{-2} tenminste duren opdat de relatieve standaarddeviatie van het eindresultaat gelijk is aan 2,5% ?

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

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



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



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

8. Detectielimiet

(1998-1-4)

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

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

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

Gegeven:

- $T_{1/2}(^{210}\text{Po}) = 138 \text{ d}$
- het emissierendement is $f_{\alpha} = 1$
- de bijdrage van γ -straling tot het teltempo mag worden verwaarloosd
- de minimaal detecteerbare activiteit A_{\min} kan worden berekend met de formule:

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

k = gewenste betrouwbaarheidsinterval (= aantal standaarddeviaties)

ε = telrendement

T_{nul} = teltempo ten gevolge van de achtergrondstraling

t_{bruto} = meettijd van het monster.

t_{nul} = meettijd van de achtergrondstraling

Vragen:

1. Bereken de activiteit ten tijde van de monstername.
2. Bereken de standaarddeviatie van deze activiteit.
3. Bereken de minimaal te detecteren activiteit A_{\min} ten tijde van de monstername. Ga uit van een betrouwbaarheidsinterval van 95% (dit is twee keer de standaarddeviatie, dus $k = 2$).
4. Is de bij vraag 3 berekende minimaal detecteerbare activiteit laag genoeg om het eventueel overschrijden van de genoemde lozingsnorm vast te stellen?

9. Vulhoogtemeting

(2000-2-3)

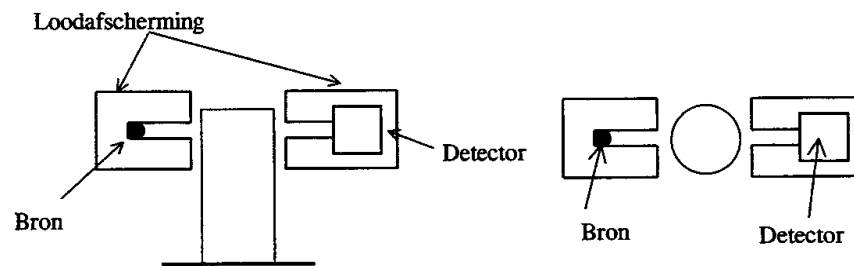
In een bierbrouwerij moet worden vastgesteld of blikjes bier op de lopende band voldoende gevuld zijn. Dit gebeurt met behulp van een radioactieve ^{85}Kr -bron die γ -straling uitzendt. De bronsterkte bedraagt 10 GBq. De straling wordt gedetecteerd met behulp van een NaI(Tl)-kristal dat γ -straling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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het door de detector geregistreerde teltempo met een leeg blikje.
2. Bereken het door de detector geregistreerde teltempo met een vol blikje in het midden tussen bron en detector.
3. De integratietijd van de detector is ingesteld op 20 ms, dat wil zeggen dat het teltempo over een periode van 20 ms gemiddeld wordt. Hoe groot is de standaarddeviatie in het teltempo bij een vol blikje bier?
4. De selectiedrempel voor discriminatie tussen volle en lege blikjes is ingesteld op precies het gemiddelde van de teltempi voor een vol en een leeg blik. Bereken de kans dat een vol blikje als leeg wordt aangemerkt (= vals leeg) ten gevolge van statistische fluctuaties in het teltempo bij een vol blik.
5. De directie van de brouwerij vindt het aantal vals lege blikken, zoals berekend bij vraag 4, te groot. Geef tenminste twee manieren om dit aantal terug te dringen; geef voor elk van beide manieren tevens een nadeel aan.



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

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

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

10. Afvalmonitor

(1994-1-1)

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

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

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

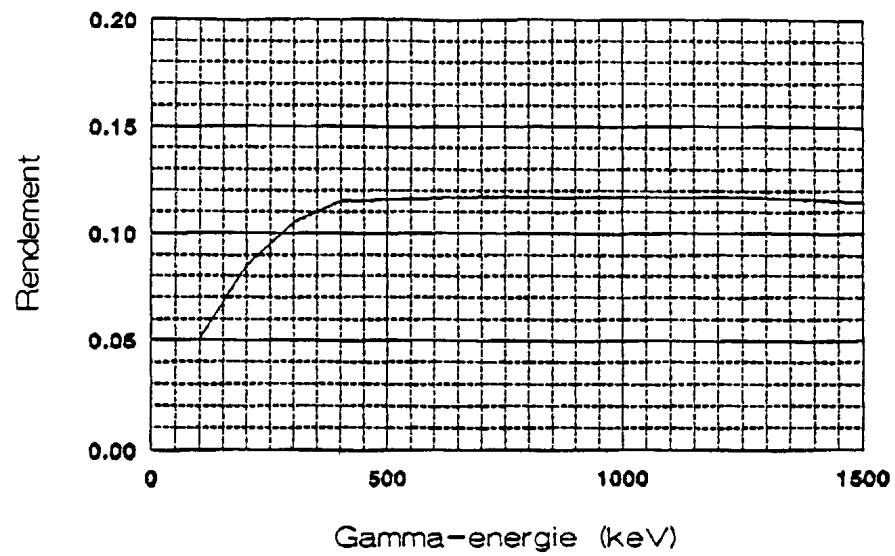
Nadat een afvalzak in de kast is geplaatst, wordt een meting van 10 seconden gestart op het moment dat de deur is gesloten. In de computer worden gemeten teltempo en massa omgerekend naar massieke activiteit, en het resultaat verschijnt vervolgens op het beeldscherm.

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de ijkfactor (in tps per Bq) voor het nuclide ^{131}I .
2. Bereken het bruto-teltempo (in tps) voor een afvalzak van 20 kg met een gemiddelde activiteitsconcentratie van 1 Bq g^{-1} .
3. Hoe groot is het aantal geregistreerde telpulsen in de meettijd van 10 seconden voor een zak van 20 kg die geen toegevoegde activiteit bevat?
4. Hoe groot is de standaarddeviatie van dit aantal?
5. Bepaal de minimaal detecteerbare ^{131}I -activiteit (in Bq).
6. Bepaal tenslotte de minimaal detecteerbare massieke ^{131}I -activiteit (in Bq g^{-1}) bij een zakmassa van 20 kg. Voldoet het instrument aan het gestelde doel?



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

11. Geactiveerd gereedschap

(1994-2-2)

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

<i>tijdstip</i>	<i>teltempo (tps)</i>
12:00	$7,09 \times 10^5$
12:15	$3,20 \times 10^5$
12:30	$1,71 \times 10^5$
13:00	$8,77 \times 10^4$
15:00	$4,45 \times 10^4$
17:00	$2,60 \times 10^4$
20:00	$1,16 \times 10^4$

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

Gegeven:

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

$$A = N\sigma_{\text{th}}\phi (1 - e^{-\lambda t})$$

σ_{th} = werkzame doorsnede per atoom voor de vangstreactie

ϕ = fluentietempo van de thermische neutronen

λ = vervalconstante van het activeringsproduct

t = bestralingstijd

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

$$N^* = N\sigma\phi t$$

Vragen:

1. Zet de netto-teltempi uit op enkel-logaritmisch papier. Bepaal uit de grafiek de halveringstijden van de beide dominant aanwezige nucliden.
2. Bereken de activiteit van het gevormde ^{56}Mn en $^{60\text{m}}\text{Co}$ direct na de bestraling.
3. Na verloop van tijd ontstaat het nuclide ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,27 \text{ j}$) door verval van $^{60\text{m}}\text{Co}$. Bereken de ^{60}Co -activiteit 24 uur na bestraling.
4. Naast het ^{60}Co dat ontstaat als gevolg van radioactief verval van $^{60\text{m}}\text{Co}$, zal ook ^{60}Co aanwezig zijn dat rechtstreeks is ontstaan door neutronvangst in ^{59}Co . Voor deze reactieweg bedraagt de werkzame doorsnede $18 \times 10^{-28} \text{ m}^2$, zodat de totale doorsnede niet $20 \times 10^{-28} \text{ m}^2$ bedraagt, maar $38 \times 10^{-28} \text{ m}^2$. Bereken met dit gegeven de ^{60}Co -activiteit 24 uur na bestraling.
5. Als de bijdragen van andere langlevende activeringsproducten verwaarloosbaar zijn, bepaalt ^{60}Co op den duur de massieke activiteit. Na hoeveel tijd is de massieke activiteit van het stuk gereedschap kleiner dan de wettelijke vrijgavegrens van 10 Bq g^{-1} ?

12. Detectie van ^{55}Fe

(1993-1-1)

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

Om de mate van activering van ijzer- en staaloppervlakken te kunnen meten, moet er gebruik worden gemaakt van een speciale detector die in staat is dergelijke laagenergetische fotonen waar te nemen. Men heeft de beschikking over een uiterst dun NaI(Tl)-kristal met een dikte van 0,1 mm, een oppervlak van 20 cm² en een entreefolie van beryllium met een dikte van 0,1 mm.

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de transmissie van het berylliumfolie.
2. Geef aan welke fractie van het aantal fotonen dat het kristal bereikt, geen interactie met het kristal zal geven.
3. Bereken de ijkfactor voor het meten van ^{55}Fe -bevattende oppervlakken met deze monitor in telpulsen per seconde (tps) per Bq cm⁻².
4. Om de respons van de detector vast te stellen wordt een gecalibreerde en voldoende grote plaatvormige bron aangeschaft met een ^{55}Fe -activiteit van 2000 Bq cm⁻². Ga ervan uit dat het ^{55}Fe zich in een zeer dunne laag op het oppervlak van de plaat bevindt. Als men de detector tegen deze plaat houdt, bedraagt het teltempo 5000 tps. Bereken hieruit de ijkfactor (in tps per Bq cm⁻²).

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

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

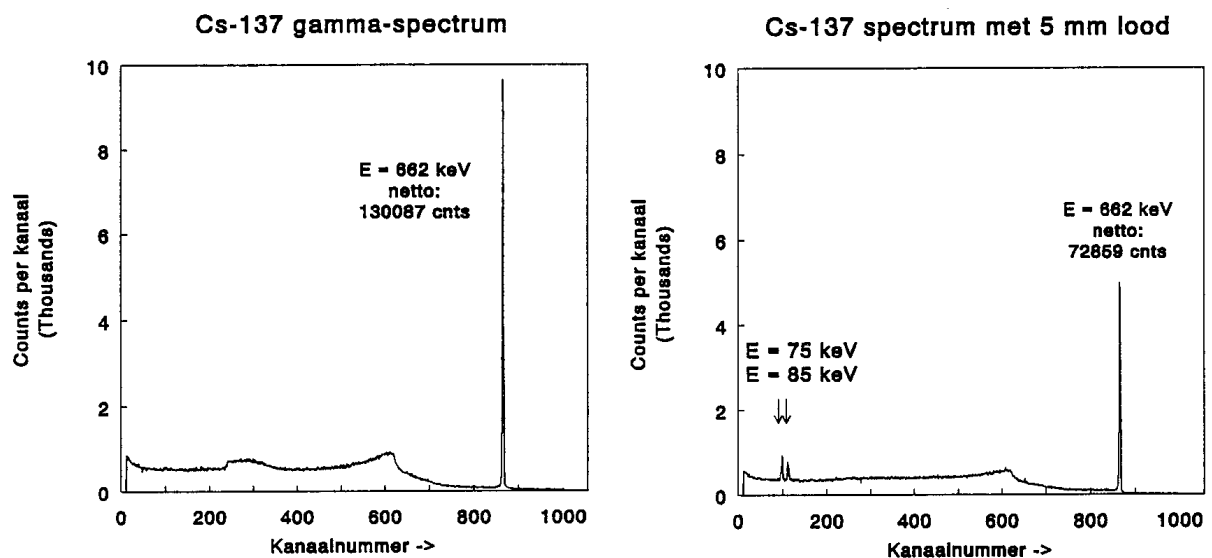
In figuur 1 (rechts) staat hetzelfde spectrum, nu echter opgenomen met een plaatje lood met een dikte van 5,0 mm tussen bron en detector.

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het fotopiekrendement voor de detectie van γ -straling met een energie van 662 keV in de gegeven geometrie zonder lood.
2. Bereken de verzwakkingscoëfficiënt μ/ρ van lood voor 662 keV γ -straling. Waarom behoort hierbij geen rekening te worden gehouden met de dosisopbouwfactor?
3. Geef een verklaring voor het ontstaan van beide fotopiekes bij 75 keV en 85 keV.



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

14. Meting aan ^{125}I

(1999-1-4)

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

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

Tabel 1. Energie E en emissiewaarschijnlijkheid f_{emissie} van fotonen en elektronen.

soort emissie	E (keV)	f_{emissie}
γ -fotonen	35,5	0,067
röntgenfotonen	3,8-4,1	0,120
	31,0	0,255
	27,3	1,140
conversie-elektronen	3,7	0,803
	30-35	0,130
Auger-elektronen	3,1-4,4	1,600
	22-30	0,192

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het detectierendement voor fotonen met een energie van 30 keV. De gemiddelde weglengte van de fotonen in het telflesje bedraagt 3 mm.
2. Bereken de bijdrage van de conversie- en Auger-elektronen aan het teltempo bij een activiteit van 1 Bq.
3. Bereken de bijdrage van de röntgen- en γ -fotonen aan het teltempo bij een activiteit van 1 Bq. Stel hierbij de energie van fotonen met $20 \text{ keV} < E < 40 \text{ keV}$ op 30 keV.
4. Bereken de ^{125}I -activiteit in het monster.

15. Vloeibaar afval

(1990-2-3)

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Welke is de door de deskundige te berekenen juiste datum voor lozing van dit afval?
2. Bereken het telrendement voor ^{14}C in de kanalen A en B.
3. Bereken het telrendement voor ^3H in de kanalen A en B.
4. Bereken de concentratie van ^{14}C en/of ^3H in het afvalwater (in Bq ml^{-1}).
5. Kon de bij vraag 4 berekende concentratie van ^3H en/of ^{14}C in het afvalwater reeds op 1 februari 1990 worden vastgesteld? Beredeneer uw antwoord.

Tabel 1. *Vervaleigenschappen van de gebruikte radionuliden.*

<i>nuclide</i>	$T_{1/2}$	$E_{\beta,max}$ (keV)
^3H	12,35 j	18,6
^{14}C	5730 j	156
^{32}P	14,29 d	1710

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

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

16. Lekkende ^{131}I -bron

(1991-2-1)

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de activiteit die maximaal uit de opstelling lekt (in Bq h^{-1}). Neem bij de berekening aan dat het lek constant is.
2. Geef een formule die de gemiddelde activiteitsconcentratie in de ruimte beschrijft als functie van de tijd vanaf het moment dat de ventilatie wordt uitgeschakeld. Neem hierbij aan dat het lek maximaal is (zie vraag 1) en dat de gemiddelde concentratie bij aanvang van de werkzaamheden 20 mBq m^{-3} bedraagt.
3. Maak een schatting van de maximale activiteit die de monteur heeft ingeademd. Neem hierbij aan dat de activiteitsconcentratie plaatselijk het tienvoudige kan bedragen van de gemiddelde activiteitsconcentratie zoals berekend met de formule verkregen bij vraag 2.

17. Kwik in een kolencentrale

(2000-1-2)

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

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

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

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

Tabel 1. Het productietempo van de afvalstoffen.

<i>afvalstroom</i>	<i>productietempo</i>
lucht	$2,0 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
bodem-as	$3,3 \times 10^3 \text{ kg h}^{-1}$
vlieg-as	$24,2 \times 10^3 \text{ kg h}^{-1}$

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de ^{203}Hg -activiteit die geproduceerd moet worden ten einde op het moment van injectie in de centrale 300 MBq ter beschikking te hebben.
2. Bereken het aantal atomen ^{202}Hg in 1 gram kwik.
3. Bereken het aantal atomen ^{203}Hg dat per seconde wordt gevormd in 1 gram kwik.
4. Bereken de ^{203}Hg -activiteit die per seconde wordt aangemaakt in 1 gram kwik.

5. Hoe lang moet 1 gram kwik worden bestraald om 300 MBq te produceren?
6. Bereken de lozing in lucht. Voldoet deze aan de vergunningseis?
7. Bereken de massieke activiteit in bodem- en vlieg-as. Voldoet deze aan de vergunningseis?
8. Tijdens de injectie in de toevoer van de centrale wordt een gebied rond het injectiepunt afgezet zodat buiten deze afzetting $H^* < 1 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Bereken de afstand tot de ^{203}Hg -bron die deze afzetting minimaal moet hebben.

18. Luchtbesmettingsmonitor

(1991-1-1)

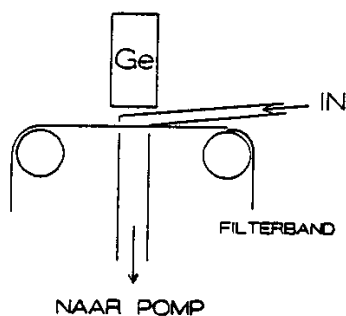
Om γ -stralende radioactieve aërosolen in de buitenlucht te detecteren worden bandfilter-aërosolmonitoren gebruikt. Deze zijn voorzien van een filterband die om de twee uur zo ver opschuift dat er een schoon stuk filtermateriaal voor de aanzuigmond van de pomp verschijnt. Terwijl de lucht wordt aangezogen,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

Gegeven:

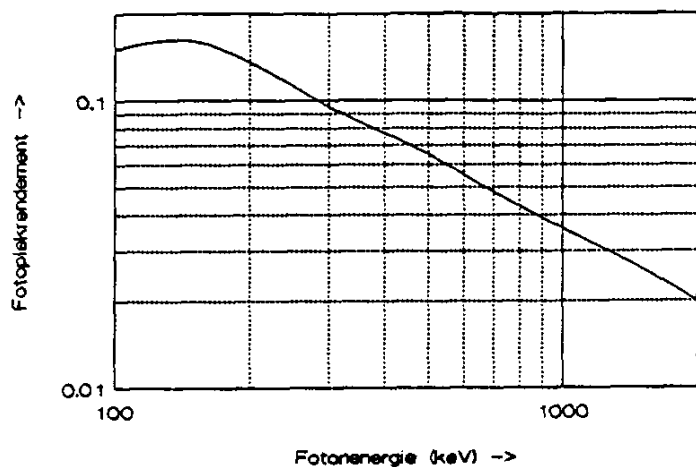
- een situatieschets van de opstelling (zie figuur 1)
- het vervalschema van ^{137}Cs (zie Appendix, figuur 21)
- de pomp zorgt voor een constant luchtdebiet van $9,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
- het filter heeft een vangstrendement van 100%
- het fotopiekrendement van de germaniumdetector in de gebruikte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

Vragen:

1. Bereken de ^{137}Cs -activiteit op het filter na afloop van de bemonstering- en meetperiode van 2 uur als in de buitenlucht gedurende deze periode een constante activiteitsconcentratie van 10 Bq m^{-3} ^{137}Cs aanwezig is.
2. Bereken het netto-aantal geregistreerde pulsen in de fotopiek van ^{137}Cs na afloop van de bemonsterings- en meetperiode bij de aangegeven activiteitsconcentratie.
3. Bereken de luchtactiviteitsconcentratie van ^{137}Cs die met deze opstelling nog net kan worden aangetoond.



Figuur 1. Meetopstelling met Ge-detector.



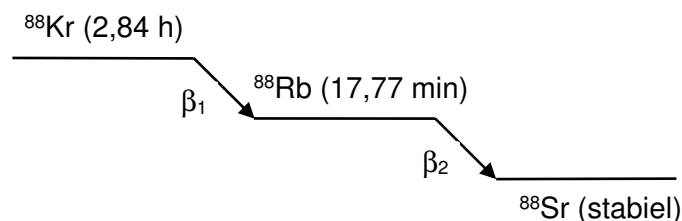
Figuur 2. Fotopiekrendement van bandfilter en Ge-detector.

19. ⁸⁸Kr-activiteit in aërosolen

(1996-1-4)

In een afgesloten, niet geventileerde ruimte met een inhoud van 1000 m³ bij een kerncentrale ontsnapt het radioactieve edelgas ⁸⁸Kr uit een lekkende ventilatieleiding. Men wil de activiteitsconcentratie van het ⁸⁸Kr in de ruimte bepalen door meting van de activiteitsconcentratie van ⁸⁸Rb dat als vervalproduct uit ⁸⁸Kr ontstaat.

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



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

Gegeven:

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

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

Vragen:

1. Bereken de ⁸⁸Rb-activiteit op het filter bij het begin van de telling.
2. Bereken de ⁸⁸Rb-activiteit op het filter aan het eind van de bemonsteringsperiode.
3. Bereken de ⁸⁸Rb-concentratie in de bemonsterde lucht.
4. Maak een schatting van de ⁸⁸Kr-concentratie in de ruimte.

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

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

Gegeven:

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

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

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

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

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

Vragen:

1. Welke conclusie kunt u trekken met betrekking tot het radiologisch evenwicht tussen de gemeten radionucliden uit de twee afzonderlijke reeksen? Neem in aanmerking dat in beide reeksen een nuclide van het gasvormige element radon voorkomt.
2. Maak een schatting van de totale massieke activiteit per (sub)reeks (in Bq kg^{-1}). Dit is de activiteit van alle radionucliden van de (sub)reeks tezamen.
3. Is een voorraad van 100 slijpschijven vergunningplichtig?

Uitwerkingen

Vraagstuk 1

- $220 \text{ Bq kg}^{-1} \times e^{-0,693 \times 2013/5730} = 220 \text{ Bq kg}^{-1} \times 0,784 = 172 \text{ Bq kg}^{-1}$
- $220 \text{ Bq kg}^{-1} \times e^{-0,693 t/5730} = 135 \text{ Bq kg}^{-1}$
 $t = (5730 \text{ j} / 0,693) \times \ln(220 \text{ Bq kg}^{-1} / 135 \text{ Bq kg}^{-1}) = (5730 \text{ j} / 0,693) \times 0,488 = 4035 \text{ j}$
- $T_{\text{netto}} = T_{\text{bruto}} - T_{\text{nul}}$
 $= 513 / (32 \text{ h} \times 3600 \text{ s h}^{-1}) - 0,003 \text{ 00 tps}$
 $= 0,004 \text{ 45 tps} - 0,003 \text{ 00 tps} = 0,001 \text{ 45 tps}$
 $\sigma_{T_{\text{netto}}} = \sqrt{(T_{\text{bruto}}/t_{\text{bruto}} + T_{\text{nul}}/t_{\text{nul}})}$
 $t_{\text{bruto}} = t_{\text{nul}} = 32 \text{ h} \times 3600 \text{ s h}^{-1} = 115 \text{ 200 s}$
 $\sigma_{T_{\text{netto}}} = \sqrt{[(0,004 \text{ 45 tps} + 0,003 \text{ 00 tps}) / 115 \text{ 200 s}] = 0,000 \text{ 25 tps}$
 activiteit $A = (0,001 \text{ 45} \pm 0,000 \text{ 25}) \text{ tps} / 0,95 = (1,53 \pm 0,26) \times 10^{-3} \text{ Bq}$
 volume CO₂-gas $100 \text{ cm}^3 \times 10^{-3} \text{ l cm}^{-3} = 0,10 \text{ l}$
 dit komt overeen met $0,10 \text{ l} / 22,4 \text{ l mol}^{-1} = 4,46 \times 10^{-3} \text{ mol}$
 massa koolstof $M = 4,46 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 12,0 \text{ g mol}^{-1} \times 10^{-3} \text{ kg g}^{-1} = 5,35 \times 10^{-5} \text{ kg}$
 massieke activiteit $A / M = (1,53 \pm 0,26) \times 10^{-3} \text{ Bq} / 5,35 \times 10^{-5} \text{ kg} = 28,6 \pm 4,9 \text{ Bq kg}^{-1}$
- $220 \text{ Bq kg}^{-1} \times e^{-0,693 t/5730} = 28,6 \text{ Bq kg}^{-1}$
 $t = (5730 \text{ j} / 0,693) \times \ln(220 \text{ Bq kg}^{-1} / 28,6 \text{ Bq kg}^{-1}) = (5730 \text{ j} / 0,693) \times 2,04 = 16 \text{ 870 j}$
- 95% komt overeen met een eenzijdige overschrijdingskans $P(k) = 0,05$
 aflezen tabel 1 $\rightarrow k = 1,65$
 $A > 28,6 \text{ Bq kg}^{-1} - 1,65 \times 4,9 \text{ Bq kg}^{-1} = 20,5 \text{ Bq kg}^{-1}$
 $t < (5730 \text{ j} / 0,693) \times \ln(220 \text{ Bq kg}^{-1} / 20,5 \text{ Bq kg}^{-1}) = (5730 \text{ j} / 0,693) \times 2,37 = 19 \text{ 596 j}$

Vraagstuk 2

- meting 1 op $t = 0$:

volgens de gegevens is er alleen ⁸⁹Sr en ⁹⁰Sr

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

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

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

meting 2 op $t = 30 \text{ d}$:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

sinds 02-05-86 zijn 123 dagen verstreken:

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

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

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

Vraagstuk 31. α -kanaal:

$$\begin{aligned} \text{meetijd} &= 40 \text{ min} \times 60 \text{ s min}^{-1} = 2400 \text{ s} \\ T_{\alpha}(U_1) &= T_{\text{bruto}}(U_1) - T_{\text{nul}}(U_1) \\ &= (400 / 40 \text{ min}) - 0,2 \text{ tpm} = 10,0 \text{ tpm} - 0,2 \text{ tpm} = 9,8 \text{ tpm} = 0,163 \text{ tps} \\ \sigma_{\alpha} &= \sqrt{[T_{\text{bruto}}(U_1) / t_{\text{bruto}}(U_1) + T_{\text{nul}}(U_1) / t_{\text{nul}}(U_1)]} \\ &= \sqrt{[(10,0 \text{ tpm} / 40 \text{ min}) + (0,2 \text{ tpm} / 40 \text{ min})]} = 0,505 \text{ tpm} = 0,008 \text{ tps} \\ \text{telrendement} &\quad \varepsilon_{\alpha}(U_1) = 0,25 \text{ tps Bq}^{-1} \\ \alpha\text{-activiteit} &\quad A_{\alpha} = T_{\alpha}(U_1) / \varepsilon_{\alpha}(U_1) = (0,163 \pm 0,008) \text{ tps} / 0,25 \text{ tps Bq}^{-1} \\ &\quad = 0,65 \pm 0,03 \text{ Bq} \end{aligned}$$

 β -kanaal:

$$\begin{aligned} \text{bijdrage } A_{\alpha} \text{ is evenredig met telrendement} \\ T_{\alpha}(U_2) &= 9,8 \text{ tpm} \times (0,30 / 0,25) = 11,8 \text{ tpm} \\ T_{\beta}(U_2) &= T_{\text{bruto}}(U_2) - T_{\text{nul}}(U_2) - T_{\alpha}(U_2) \\ &= (700 / 40 \text{ min}) - 1,0 \text{ tpm} - 11,8 \text{ tpm} \\ &= 17,5 \text{ tpm} - 1,0 \text{ tpm} - 11,8 \text{ tpm} = 4,7 \text{ tpm} = 0,078 \text{ tps} \\ \sigma_{\beta} &= \sqrt{[(17,5 \text{ tpm} / 40 \text{ min}) + (1,0 \text{ tpm} / 40 \text{ min}) + (11,8 \text{ tpm} / 40 \text{ min})]} \\ &= 0,87 \text{ tpm} = 0,015 \text{ tps} \\ \text{telrendement} &\quad \varepsilon_{\beta}(U_2) = 0,40 \text{ tps Bq}^{-1} \\ \beta\text{-activiteit} &\quad A_{\beta} = T_{\beta}(U_2) / \varepsilon_{\beta}(U_2) = (0,078 \pm 0,015) \text{ tps} / 0,40 \text{ tps Bq}^{-1} \\ &\quad = 0,20 \pm 0,04 \text{ Bq} \end{aligned}$$

2. netto-teltempo in α -kanaal:

$$T_{\alpha}(U_1) = (500 / 40 \text{ min}) - 0,2 \text{ tpm} = 12,5 \text{ tpm} - 0,2 \text{ tpm} = 12,3 \text{ tpm}$$

bijdrage α -activiteit tot β -kanaal:

$$T_{\alpha}(U_2) = 12,3 \text{ tpm} \times (0,30 / 0,25) = 14,8 \text{ tpm}$$

teltempo bij U_2 zonder β -activiteit:

$$T_{\text{bruto}, \beta=0}(U_2) = T_{\alpha}(U_2) + T_{\text{nul}}(U_2) = 14,8 \text{ tpm} + 1,0 \text{ tpm} = 15,8 \text{ tpm}$$

$$\sigma_{\text{bruto}, \beta=0}(U_2) = \sqrt{[(14,8 \text{ tpm} / 40 \text{ min}) + (1,0 \text{ tpm} / 40 \text{ min})]}$$

$$= 0,63 \text{ tpm} = 0,011 \text{ tps}$$

minimaal aantoonbare verhoging van het teltempo bij U_2 ten gevolge van β -straling:

$$T_{\text{min}, \beta} = 2\sigma_{\text{bruto}, \beta=0}(U_2) = 2 \times 0,011 \text{ tps} = 0,022 \text{ tps}$$

minimaal detecteerbare β -activiteit:

$$\text{telrendement} \quad \varepsilon_{\beta}(U_2) = 0,40 \text{ tps Bq}^{-1}$$

$$\text{minimale activiteit} \quad A_{\text{min}, \beta} = T_{\text{min}, \beta} / \varepsilon_{\beta}(U_2) = 0,022 \text{ tps} / 0,40 \text{ tps Bq}^{-1} = 0,055 \text{ Bq}$$

Vraagstuk 4

1. de formule luidt

$$T_{\text{werkelijk}} = T_{\text{gemeten}} / (1 - \tau \times T_{\text{gemeten}})$$

$$T_{\text{gemeten}} = 50\,000 \text{ tpm} = 833 \text{ tps}$$

dode tijd

$$\tau = 200 \mu\text{s} = 200 \times 10^{-6} \text{ s}$$

dus

$$T_{\text{werkelijk}} = 50\,000 \text{ tpm} / (1 - 200 \times 10^{-6} \text{ s} \times 833 \text{ tps})$$

$$= 50\,000 \text{ tpm} / (1 - 0,17) = 60\,000 \text{ tpm}$$

2. $E_{\beta, \text{max}}(^{45}\text{Ca}) = 256 \text{ keV}$ $f_{\beta} = 1,0$

$$E_{\beta, \text{max}}(^{46}\text{Sc}) = 357 \text{ keV} \quad f_{\beta} = 1,0$$

omdat beide nucliden β -straling uitzenden tussen 200 en 400 keV is $f_{\text{det}} = 40\%$

$$A(^{45}\text{Ca}) + A(^{46}\text{Sc}) = T_{\text{werkelijk}} / (f_{\beta} \times f_{\text{det}}) = 1,0 \times 10^3 \text{ tps} / (1,0 \times 40 \times 10^{-2}) = 2,5 \times 10^3 \text{ Bq}$$

3. ^{46}Sc zendt γ -straling uit met $E_\gamma = 1,121$ MeV en emissierendement $f_\gamma = 1,0$
 rendement γ -spectrometer is $f_{\text{det}} = 8\%$
 teltempo is 1000 tpm = 16,7 tps
 $A(^{46}\text{Sc}) = T / (f_\gamma \times f_{\text{det}}) = 16,7 \text{ tps} / (1,0 \times 8 \times 10^{-2}) = 2,1 \times 10^2 \text{ Bq op } 100 \text{ cm}^2$
4. $A(^{45}\text{Ca}) = 2,5 \times 10^3 \text{ Bq} - 2,1 \times 10^2 \text{ Bq} = 2,3 \times 10^3 \text{ Bq op } 100 \text{ cm}^2$
 rekening houdende met de veefficiëntie van 50%, worden de oppervlaktesbesmettingen:
 $^{45}\text{Ca} \quad 2 \times 2,3 \times 10^3 \text{ Bq} / 100 \text{ cm}^2 = 46 \text{ Bq cm}^{-2}$
 $^{46}\text{Sc} \quad 2 \times 2,1 \times 10^2 \text{ Bq} / 100 \text{ cm}^2 = 4,2 \text{ Bq cm}^{-2}$
5. volgens de (inmiddels oude) Richtlijn Radionuclidenlaboratoria is de maximaal toelaatbare afwrijfbare β - en γ -activiteit 4 Bq cm^{-2}
 in totaal afgewreven is $2,5 \times 10^3 \text{ Bq per } 100 \text{ cm}^2 = 25 \text{ Bq cm}^{-2}$
 de besmetting was niet toelaatbaar

Vraagstuk 5

1. massieke dikte NaI-kristal $d \times \rho = 10 \text{ mm} \times 10^{-1} \text{ cm mm}^{-1} \times 3,67 \text{ g cm}^{-3}$
 $= 3,67 \text{ g cm}^{-2}$
 transmissie $e^{-(\mu/\rho)(d \times \rho)} = e^{-0,093 \times 3,67} = 0,71$
 totale rendement = 1 - transmissie = 1 - 0,71 = 0,29
 fotopiekrendement = 0,30 \times (totale rendement) = 0,30 \times 0,29 = 0,087
2. aantal fotonen per cm^2 en per seconde $\phi = A \times f_{\text{lever}} \times f_{\text{verval}} \times f_{\text{em}} \times f_{\text{geom}} \times f_{\text{abs}}$
 10% gaat naar lever $f_{\text{lever}} = 0,1$
 verval in 5 min $f_{\text{verval}} = e^{-0,693 \times 5/10} = 0,707$
 2 annihilatiefotonen per β^+ -deeltje $f_{\text{em}} = 2 \times 1,0 = 2,0$
 geometriefactor voor 1 cm^2 en 20 cm afstand $f_{\text{geom}} = 1 \text{ cm}^2 / [4\pi \times (20 \text{ cm})^2] = 1,99 \times 10^{-4}$
 transmissie door 8 cm weefsel $f_{\text{abs}} = e^{-0,095 \times (8 \times 1,00)} = 0,47$
 $\phi = A \times 0,1 \times 0,707 \times 2,0 \times 1,99 \times 10^{-4} \times 0,47 = 1,32 \times 10^{-5} \text{ A} > 1000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 $A > 1000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} / 1,32 \times 10^{-5} = 76 \times 10^6 \text{ Bq} = 76 \text{ MBq}$

Vraagstuk 6

1. het is geen ^{22}Na , want meetkop A kan geen fotonen van 511 keV en 1275 keV detecteren
 het is geen ^{55}Fe , want meetkop B kan geen fotonen van 6 keV detecteren
 het is geen ^{81}Kr , want dat is gasvormig en meetkop B kan geen fotonen van 12 keV detecteren
 $N_A / N_B = 10 \text{ 862 tpm} / 5440 \text{ tpm} = 2,0$
 $\text{oppervlak}_A / \text{oppervlak}_B = 4,5 \text{ cm}^2 / 3,1 \text{ cm}^2 = 1,45$
 $\rightarrow \text{efficiëntie}_A / \text{efficiëntie}_B = 2,0 / 1,45 = 1,4$
 volgens efficiëntiecurve is $E_\gamma \approx 25 \text{ keV}$, dus het moet ^{125}I zijn; controle:
 $f_{\text{geom}} = 0,5 \times (1 - \cos \alpha)$
 afstand bron-detector is 30 mm = 3,0 cm
 meetkop A $r = \sqrt{(4,5 \text{ cm}^2 / \pi)} = 1,2 \text{ cm}$
 $\tan(\alpha) = 1,2 \text{ cm} / 3,0 \text{ cm} = 0,40$
 $\alpha = 22^\circ$
 $f_{\text{geom}}^A = 0,036$
 meetkop B $r = \sqrt{(3,1 \text{ cm}^2 / \pi)} = 1,0 \text{ cm}$
 $\tan(\alpha) = 1,0 \text{ cm} / 3,0 \text{ cm} = 0,33$
 $\alpha = 18^\circ$
 $f_{\text{geom}}^B = 0,024$
 $\sum (f_\gamma \times f_{\text{det}}^A) = (1,39 \times 0,95) + (0,07 \times 0,98) = 1,39$
 $\sum (f_\gamma \times f_{\text{det}}^B) = (1,39 \times 0,65) + (0,07 \times 0,73) = 0,95$
 $N_A / N_B = [f_{\text{geom}}^A \times \sum (f_\gamma \times f_{\text{det}}^A)] / [f_{\text{geom}}^B \times \sum (f_\gamma \times f_{\text{det}}^B)]$
 $= (0,036 \times 1,39) / (0,024 \times 0,95) = 2,2 \quad \rightarrow \text{het klopt dus}$

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

Vraagstuk 7

1. $N = A \times f_{\beta} \times (f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}}) \times f_{\text{abs}} \times t$
 sinds aankoop zijn er 5,33 j verlopen en is er inmiddels evenwicht tussen moeder en dochter
 dus $A(^{90}\text{Sr}) = A(^{90}\text{Y}) = 185 \times 10^3 \times e^{-0,693 \times 5,33 / 28,7} = 185 \times 10^3 \times 0,879 = 1,63 \times 10^5 \text{ Bq}$
 zowel ^{90}Sr als ^{90}Y zenden een β -deeltje uit, dus $f_{\beta}(^{90}\text{Sr}) = f_{\beta}(^{90}\text{Y}) = 1$
 er is geen folie, dus geen absorptie, dus $f_{\text{abs}} = 1$
 er zijn $N = 4899$ telpulsen gemeten in een meettijd $t = 10 \text{ s}$
 dus $(f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}}) = N / [\{A(^{90}\text{Sr}) \times f_{\beta}(^{90}\text{Sr}) + A(^{90}\text{Y}) \times f_{\beta}(^{90}\text{Y})\} \times f_{\text{abs}} \times t]$
 $= 4899 / [\{1,63 \times 10^5 \text{ Bq} \times 1 + 1,63 \times 10^5 \text{ Bq} \times 1\} \times 1 \times 10 \text{ s}]$
 $= 4899 / (1,63 \times 10^5 \text{ Bq} \times 2 \times 1 \times 10 \text{ s}) = 1,5 \times 10^{-3}$
2. gemeten transmissie $1952 \text{ telpulsen} / 4899 \text{ telpulsen} = 0,40$
 aflezen figuur 1 95 mg cm^{-2}
3. transmissie bij 200 mg cm^{-2} $0,25$
 teltempo $0,25 \times 4899 \text{ telpulsen} / 10 \text{ s} = 122 \text{ tps}$
 nodig voor $\sigma_{\text{rel}} = 2,5\%$ $1 / (2,5 \times 10^{-2})^2 = 1600 \text{ telpulsen}$
 teltijd $1600 \text{ telpulsen} / 122 \text{ tps} = 13,1 \text{ s}$
4. $A(^{90}\text{Sr}) = A(^{90}\text{Y}) = 185 \text{ MBq}$
 volgens figuur 2 $D(^{90}\text{Sr}) = 185 \text{ MBq} \times 1,0 \times 10^{-4} \text{ mGy h}^{-1} \text{ per MBq} = 0,02 \text{ mGy h}^{-1}$
 $D(^{90}\text{Y}) = 185 \text{ MBq} \times 1,0 \times 10^{-2} \text{ mGy h}^{-1} \text{ per MBq} = 1,85 \text{ mGy h}^{-1}$
 totaal $D(^{90}\text{Sr}) + D(^{90}\text{Y}) = 1,87 \text{ mGy h}^{-1}$

Vraagstuk 8

1. $t_{\text{bruto}} = 30 \text{ min} \times 60 \text{ s min}^{-1} = 1800 \text{ s}$
 $t_{\text{nul}} = 8 \text{ h} \times 3600 \text{ s h}^{-1} = 28\,800 \text{ s}$
 $T_{\text{netto}} = T_{\text{bruto}} - T_{\text{nul}} = N_{\text{bruto}} / t_{\text{bruto}} - N_{\text{nul}} / t_{\text{nul}}$
 $= (240 / 1800 \text{ s}) - (3361 / 28\,800 \text{ s}) = 0,133 \text{ tps} - 0,117 \text{ tps} = 0,016 \text{ tps}$
 $T_{\text{netto}} = A \times f_{\alpha} \times (f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}} \times f_{\text{abs}})$
 $= A \times 1 \times 20 \times 10^{-2} = 0,20 A$
 $A = 0,016 \text{ tps} / 0,20 = 0,080 \text{ Bq}$ op moment van meting, dit is 30 d na monstername
 $A(0) = 0,080 \text{ (Bq)} \times e^{0,693 \times 30 / 138} = 0,080 \text{ (Bq)} \times 1,16 = 0,093 \text{ Bq}$
2. $\sigma_{T_{\text{netto}}} = \sqrt{(T_{\text{bruto}} / t_{\text{bruto}} + T_{\text{nul}} / t_{\text{nul}})}$
 $= \sqrt{[(0,133 \text{ tps} / 1800 \text{ s}) + (0,117 \text{ tps} / 28\,800 \text{ s})]} = 0,0088 \text{ tps}$
 $\sigma_A = \sigma_{T_{\text{netto}}} / 0,20 = 0,0088 \text{ tps} / 0,20 = 0,044 \text{ Bq}$
 $\sigma_{A(0)} = 0,044 \text{ Bq} \times 1,16 = 0,051 \text{ Bq}$
3. invullen formule:
 $A_{\text{min}} = (2 / 20 \times 10^{-2}) \times \sqrt{[0,117 \text{ tps} \times (1 / 1800 \text{ s} + 1 / 28\,800 \text{ s})]} = 0,083 \text{ Bq}$
 $A_{\text{min}}(0) = 0,083 \text{ Bq} \times 1,16 = 0,096 \text{ Bq}$
4. per monstername wordt 20 m^3 lucht bemonsterd
 minimale luchtactiviteit is dus:
 $0,096 \text{ Bq} / 20 \text{ m}^3 = 0,0048 \text{ Bq m}^{-3} = 4,8 \text{ mBq m}^{-3} \ll 50 \text{ mBq m}^{-3}$
 (zeer) ruim binnen de vergunning

Vraagstuk 9

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

2. $f_{\text{abs}} = e^{-(\mu/\rho)(d \times \rho)} = e^{-0,0097 \times (0,048 \times 1008)} = 0,625$
 $T_1 = T_0 \times f_{\text{abs}} = 6,9 \times 10^3 \text{ tps} \times 0,625 = 4,3 \times 10^3 \text{ tps}$
3. in $t = 20 \text{ ms}$ worden $N = 20 \times 10^{-3} \text{ s} \times 4,3 \times 10^3 \text{ tps} = 86$ telpulsen geteld
 met standaarddeviatie $\sigma_N = \sqrt{N} = \sqrt{86} = 9,3$ telpulsen
 $\sigma_{T_1} = \sigma_N / t = 9,3 / 20 \times 10^{-3} \text{ s} = 465 \text{ tps}$
4. drempel ligt bij $(T_0 + T_1) / 2 = (6,9 \times 10^3 \text{ tps} + 4,3 \times 10^3 \text{ tps}) / 2 = 5,6 \times 10^3 \text{ tps}$
 verschil met telsnelheid voor een vol blikje is $5,6 \times 10^3 \text{ tps} - 4,3 \times 10^3 \text{ tps} = 1,3 \times 10^3 \text{ tps}$
 dit komt overeen met $k = 1,3 \times 10^3 \text{ tps} / 465 \text{ tps} = 2,8$ standaarddeviaties
 aflezen tabel 1 bij $k = 2,8$
 → eenzijdige overschrijdingskans is $P(2,8) = 0,003$
5. - bronsterkte vergroten → stralingshygiënische nadelen
 - drempel hoger leggen → meer vals volle blikjes
 - telefficiëntie vergroten → kost (misschien) meer geld
 - integratietijd vergroten → productietempo daalt

Vraagstuk 10

1. aflezen figuur 1 en Appendix, figuur 20	E_γ (keV)	f_γ (Bq s) ⁻¹	$f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}} \times f_{\text{abs}}$
	365	0,812	0,11
	284	0,061	0,10
	80	0,026	0,05

$$\text{ijkfactor} = \sum (f_\gamma \times f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}} \times f_{\text{abs}})$$

$$= 1 \times (0,812 \times 0,11 + 0,061 \times 0,10 + 0,026 \times 0,05) = 0,096 \text{ tps per Bq}$$

2. $A = 20 \text{ kg} \times 1 \text{ Bq g}^{-1} \times 10^3 \text{ g kg}^{-1} = 2,0 \times 10^4 \text{ Bq}$
 $T_{\text{netto}} = 2,0 \times 10^4 \text{ Bq} \times 0,096 \text{ tps per Bq} = 1,9 \times 10^3 \text{ tps}$
 $T_{\text{bruto}} = T_{\text{netto}} + T_{\text{nul}} = 1,9 \times 10^3 \text{ tps} + 1398 \text{ tps} = 3,3 \times 10^3 \text{ tps}$
3. alleen nuleffect in $t = 10 \text{ s}$ worden er $10 \text{ s} \times 1398 \text{ tps} = 1,4 \times 10^4$ pulsen geteld
4. standaarddeviatie $\sigma_{\text{nul}} = \sqrt{1,4 \times 10^4} = 118$ pulsen
5. minimaal te detecteren activiteit correspondeert met $3\sigma_{\text{nul}}$
 $A_{\text{min}} \times \text{ijkfactor} = 3\sigma_{\text{nul}} / t = 3 \times 118 / 10 \text{ s} = 35 \text{ tps}$
 $A_{\text{min}} = 35 \text{ tps} / \text{ijkfactor} = 35 \text{ tps} / 0,096 \text{ tps per Bq} = 365 \text{ Bq}$
6. minimale massieke activiteit $365 \text{ Bq} / 20 \text{ kg} = 18 \text{ Bq kg}^{-1} = 0,018 \text{ Bq g}^{-1}$
 (zeer) ruim onder de vrijgavegrens van 100 Bq g^{-1}

Vraagstuk 11

1. de grafiek bestaat uit 2 bijna rechte delen
 trek een rechte door laatste 3 punten
 dit geeft:

$$\lambda(^{54}\text{Mn}) = 0,27 \text{ h}^{-1}$$

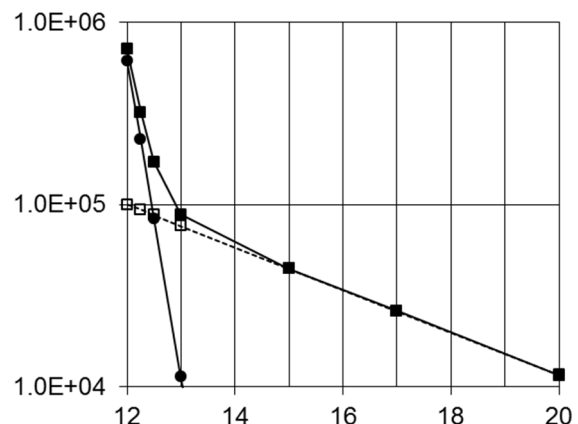
$$T_{1/2}(^{54}\text{Mn}) = 0,693 / 0,27 \text{ h}^{-1} = 2,6 \text{ h}$$

extrapoleer de rechte naar $t = 0$

trek deze bijdrage af van de experimentele waarden en trek een rechte door gecorrigeerde grafiek; dit geeft:

$$\lambda(^{60\text{m}}\text{Co}) = 3,9 \text{ h}^{-1}$$

$$T_{1/2}(^{60\text{m}}\text{Co}) = 0,693 / 3,9 \text{ h}^{-1} = 0,18 \text{ h}$$



2. activiteit in
- $t = 0,1$
- h (want
- λ
- in
- h^{-1}
-)

$$A = N \times \sigma \times \varphi \times (1 - e^{-\lambda \times 0,1})$$

$$N(^{55}\text{Mn}) = (m_{\text{Mn}} / M_{\text{Mn}}) \times N_A$$

$$= (1,1 \times 10^{-3} \text{ g} / 54,9 \text{ g mol}^{-1}) \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 1,21 \times 10^{19}$$

$$A(^{56}\text{Mn}) = 1,21 \times 10^{19} \times 13,3 \times 10^{-28} \text{ m}^2 \times 1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times (1 - e^{-0,27 \times 0,1})$$

$$= 4,28 \times 10^6 \text{ Bq} = 4,28 \text{ MBq}$$

$$N(^{59}\text{Co}) = (m_{\text{Co}} / M_{\text{Co}}) \times N_A$$

$$= (210 \times 10^{-3} \text{ g} / 58,9 \text{ g mol}^{-1}) \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 2,15 \times 10^{21}$$

$$A(^{60\text{m}}\text{Co}) = 2,15 \times 10^{21} \times 20 \times 10^{-28} \text{ m}^2 \times 1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times (1 - e^{-3,9 \times 0,1})$$

$$= 1,39 \times 10^{10} \text{ Bq} = 13,9 \text{ GBq}$$

3. aantal gevormde
- $^{60\text{m}}\text{Co}$
- kernen in
- $t = 0,1$
- h = 360 s (in seconden, want
- φ
- in
- s^{-1}
-):

$$N(^{60\text{m}}\text{Co}) = N(^{59}\text{Co}) \times \sigma \times \varphi \times t$$

$$= 2,15 \times 10^{21} \times 20 \times 10^{-28} \text{ m}^2 \times 1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 360 \text{ s} = 1,55 \times 10^{13}$$

deze vervallen allemaal naar ^{60}Co :

$$N(^{60}\text{Co}) = N(^{60\text{m}}\text{Co}) = 1,55 \times 10^{13}$$

$$\lambda(^{60}\text{Co}) = 0,693 / (5,27 \text{ j} \times 365 \text{ d j}^{-1} \times 24 \text{ h d}^{-1} \times 3600 \text{ s h}^{-1}) = 4,17 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

$$A(^{60}\text{Co}) = \lambda(^{60}\text{Co}) \times N(^{60}\text{Co})$$

$$= 4,17 \times 10^{-9} (\text{s}^{-1}) \times 1,55 \times 10^{13} = 6,46 \times 10^4 \text{ Bq}$$

4. totale werkzame doorsnede voor de reactie
- $^{59}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Co}$
- is:

$$\sigma_{\text{tot}} = 20 \times 10^{-28} \text{ m}^2 + 18 \times 10^{-28} \text{ m}^2 = 38 \times 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$A(^{60}\text{Co})_{\text{totaal}} = (38 \times 10^{-28} \text{ m}^2 / 20 \times 10^{-28} \text{ m}^2) \times 6,46 \times 10^4 \text{ Bq} = 1,23 \times 10^5 \text{ Bq}$$

5. massieke activiteit =
- $1,23 \times 10^5 \text{ Bq} / 510 \text{ g} = 241 \text{ Bq g}^{-1}$

vrijgavegrens is 10 Bq g^{-1} , dus:

$$241 \text{ Bq g}^{-1} \times e^{-0,696 t / 5,272} = 10 \text{ Bq g}^{-1}$$

$$t = (5,272 \text{ j} / 0,693) \times \ln(241 \text{ Bq g}^{-1} / 10 \text{ Bq g}^{-1}) = (5,272 \text{ j} / 0,693) \times 3,18 = 24 \text{ j}$$

Vraagstuk 12

1. Be-folie

$$\mu \times d = (\mu/\rho) \times (d \times \rho)$$

$$= 2,07 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times (0,10 \times 10^{-1} \text{ cm} \times 1,85 \text{ g cm}^{-3}) = 0,038$$

transmissie Be

$$e^{-\mu d} = e^{-0,038} = 0,96$$

2. NaI-kristal

$$\mu \times d = (\mu/\rho) \times (d \times \rho)$$

$$= 450 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times (0,10 \times 10^{-1} \text{ cm} \times 3,67 \text{ g cm}^{-3}) = 16,5$$

transmissie NaI

$$e^{-\mu d} = e^{-16,5} = 7 \times 10^{-8}$$

detectorrendement

$$f_{\text{det}} = 1 - \text{transmissie} = 1 - 7 \times 10^{-8} \approx 1$$

3. ijfactor is per
- Bq cm^{-2}
- , oppervlak detector is
- 20 cm^2

$$\text{dus } A = (1 \text{ Bq cm}^{-2} \times 20 \text{ cm}^2) \text{ per Bq cm}^{-2} = (20 \text{ Bq}) \text{ per Bq cm}^{-2}$$

2π -geometrie, dus $f_{\text{geom}} = 0,5$

$$T_{\text{netto}} = A \times f_{\text{röntgen}} \times f_{\text{geom}} \times f_{\text{abs}} \times f_{\text{det}}$$

$$= 20 \text{ Bq per Bq cm}^{-2} \times 0,25 \times 0,50 \times 0,96 \times 1 = 2,4 \text{ tps per Bq cm}^{-2}$$

4. gemeten teltempo

$$N = 5000 \text{ tps}$$

activiteit

$$A = 2000 \text{ Bq cm}^{-2}$$

$$\text{experimentele ijfactor } N / A = 5000 \text{ tps} / 2000 \text{ Bq cm}^{-2} = 2,5 \text{ tps per Bq cm}^{-2}$$

Vraagstuk 13

- 1.
- $N = A \times f_V \times (f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}}) \times f_{\text{abs}}$

$$= 412 \times 10^3 \text{ Bq} \times (0,946 \times 0,898) \times (f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}}) \times 1 = 3,5 \times 10^5 \times (f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}}) \text{ tps}$$

$$f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}} = N (\text{in tps}) / 3,5 \times 10^5$$

gemeten voor 0 cm lood

$$\text{CNTS}(0) = 130\ 089 \text{ cpm} = 2,17 \times 10^3 \text{ tps}$$

$$\varepsilon = f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}} = 2,17 \times 10^3 \text{ tps} / 3,5 \times 10^5 \text{ tps} = 6,2 \times 10^{-3}$$

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

Vraagstuk 14

1. voor de combinatie telvloeistof/telflesje is
 $\mu \times d = (\mu/\rho) \times (d \times \rho) = 3\ \text{cm}^2\ \text{g}^{-1} \times (3 \times 10^{-1}\ \text{cm} \times 1\ \text{g cm}^{-3}) = 0,9$
 transmissie van fotonen met een energie van 30 keV is dus $e^{-\mu d} = e^{-0,9} = 0,41$
 interactiekans = $1 - \text{transmissie} = 1 - 0,41 = 0,59$
 er is een 80% kans dat de interactie door de fotomultiplicatorbuis wordt "gezien"
 $f_{\text{det, fotonen}} = 0,59 \times 80 \times 10^{-2} = 0,47$
2. bij elektronen is er 100% interactiekans
 $f_{\text{det, elektronen}} = 1 \times 80 \times 10^{-2} = 0,80$
 $f_{\text{elektronen} > 10\ \text{keV}} = 0,130 + 0,192 = 0,322$
 $\epsilon_{\text{elektronen}} = f_{\text{elektronen} > 10\ \text{keV}} \times f_{\text{det, elektronen}} = 0,322 \times 0,80 = 0,26\ \text{tps Bq}^{-1}$
3. $f_{\text{fotonen} > 10\ \text{keV}} = 0,067 + 0,255 + 1,140 = 1,462$
 $f_{\text{fotonen}} = f_{\text{fotonen} > 10\ \text{keV}} \times f_{\text{det, fotonen}} = 1,462 \times 0,47 = 0,69\ \text{tps Bq}^{-1}$
4. detectierendement $\epsilon = \epsilon_{\text{elektronen}} + \epsilon_{\text{fotonen}}$
 $= 0,26\ \text{tps Bq}^{-1} + 0,69\ \text{tps Bq}^{-1} = 0,95\ \text{tps Bq}^{-1}$
 gemeten $N = 100\ \text{tpm} = 1,67\ \text{tps}$
 activiteit $A = N / \epsilon = 1,67\ \text{tps} / 0,95\ \text{tps Bq}^{-1} = 1,76\ \text{Bq}$

Vraagstuk 15

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

merk op: vrijavegrens voor ^{32}P in vast materiaal volgens het huidige Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming is $1000\ \text{Bq ml}^{-1}$; daarnaast geldt een lozingslimiet van $100\ \text{Re}_{\text{ing}}$ op voorwaarde dat het op het riool mag worden geloosd

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

3. efficiëntiebepaling met 160 Bq ^3H in monster #3; dit wordt monster #5

$$\delta T_A = 4187 \text{ tpm} - 1002 \text{ tpm} = 3185 \text{ tpm}$$

$$\varepsilon_{A,3\text{H}} = 3185 \text{ tpm} / (160 \text{ Bq} \times 60 \text{ s min}^{-1}) = 0,33$$

$$\delta T_B = 1417 \text{ tpm} - 1423 \text{ tpm} \approx 0$$

$$\varepsilon_{B,3\text{H}} = 0 / (160 \text{ Bq} \times 60 \text{ s min}^{-1}) \approx 0$$

$$\text{nauwkeuriger: } \delta T_B < \sigma_{\delta T_B} = \sqrt{(T_B / t_B)}$$

$$= \sqrt{[(1417 \text{ tpm} / 10 \text{ min}) + (1423 \text{ tpm} / 10 \text{ tpm})]} = 17 \text{ tpm}$$

$$\varepsilon_{B,3\text{H}} < 17 \text{ tpm} / (160 \text{ Bq} \times 60 \text{ s min}^{-1}) = 0,002$$

4. gemiddelden van monsters #2, #3 en #4 zijn $T_A = 1023 \text{ tpm}$ respectievelijk $T_B = 1414 \text{ tpm}$
kanaal B bevat alleen een bijdrage van ^{14}C

kanaal A bevat (mogelijk) bijdragen van ^3H en ^{14}C

restactiviteit ^{32}P op 25 oktober 1990 is $0,25 \text{ Bq ml}^{-1} \times 2 \text{ ml} = 0,5 \text{ Bq}$, dus:

$$\text{bijdrage tot kanaal A} \quad \text{activiteit} \times \varepsilon_{A,32\text{P}} \times \text{tijd} = 0,5 \text{ Bq} \times 0,05 \times 60 \text{ s min}^{-1} = 1,5 \text{ tpm}$$

$$\text{bijdrage tot kanaal B} \quad \text{activiteit} \times \varepsilon_{B,32\text{P}} \times \text{tijd} = 0,5 \text{ Bq} \times 0,26 \times 60 \text{ s min}^{-1} = 7,8 \text{ tpm}$$

verontreiniging ^{14}C :

$$\text{bijdrage } ^{14}\text{C} \text{ tot kanaal B} \quad T_{\text{netto}} / (\varepsilon_{B,14\text{C}} \times \text{tijd}) =$$

$$(1414 \text{ tpm} - 7,8 \text{ tpm}) / (0,49 \times 60 \text{ s min}^{-1}) = 48 \text{ Bq}$$

concentratie ^{14}C

$$48 \text{ Bq} / 2 \text{ ml} = 24 \text{ Bq ml}^{-1}$$

merk op: de vrijgavegrens voor ^{14}C in vast materiaal volgens het huidige Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming is 1 Bq ml^{-1}

verontreiniging ^3H :

$$\text{bijdrage } ^{14}\text{C} \text{ in kanaal A} \quad \text{activiteit} \times \varepsilon_{A,14\text{C}} \times \text{tijd} = 48 \text{ Bq} \times 0,36 \times 60 \text{ s min}^{-1} \\ = 1037 \text{ tpm}$$

$$\text{bijdrage } ^3\text{H} \text{ in kanaal A} \quad T_{\text{netto}} / (\varepsilon_{A,3\text{H}} \times \text{tijd}) =$$

$$(1023 \text{ tpm} - 1,5 \text{ tpm} - 1037 \text{ tpm}) / (0,33 \times 60 \text{ s min}^{-1}) \approx 0$$

nauwkeuriger:

$$\sigma_{T_{\text{netto}}} = \sqrt{[(1023 \text{ tpm} / 10 \text{ min}) + (1,5 \text{ tpm} / 10 \text{ min}) + (1037 \text{ tpm} / 10 \text{ min})]} = 14 \text{ tpm}$$

$$T_{\text{netto}} < \sigma_{T_{\text{netto}}} / (\varepsilon_{A,3\text{H}} \times \text{tijd}) = 14 \text{ tpm} / (0,33 \times 60 \text{ s min}^{-1}) = 0,7 \text{ Bq}$$

$$\text{concentratie } ^3\text{H} < 0,7 \text{ Bq} / 2 \text{ ml} = 0,35 \text{ Bq ml}^{-1}$$

merk op: de vrijgavegrens voor ^3H in vast materiaal volgens het huidige Besluit Basisveiligheidsnormen Stralingsbescherming is 100 Bq ml^{-1}

5. de standaarddeviatie van het teltempo in kanaal B op 1 februari 1990 is:

$$\sigma = \sqrt{(T / t)} = \sqrt{(3,0 \times 10^6 \text{ tpm} / 1 \text{ min})} = 1732 \text{ tpm}$$

bijdrage van ^{14}C tot teltempo in kanaal B is $1414 \text{ tpm} - 7,8 \text{ tpm} = 1406 \text{ tpm} < \sigma$ (zie vraag 4)

het was dus onmogelijk geweest om de aanwezigheid van ^{14}C in het afvalwater vast te stellen

Vraagstuk 16

1. debiet

$$D = 10 \text{ h}^{-1} \times V_{\text{lab}}$$

$$= 10 \text{ h}^{-1} \times 50 \text{ m}^3 = 500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

maximale activiteitsconcentratie

$$a_{\text{max}} = 250 \text{ mBq m}^{-3} = 0,25 \text{ Bq m}^{-3}$$

maximaal afgevoerde activiteit

$$dA/dt = a_{\text{max}} \times D$$

$$= 0,25 \text{ Bq m}^{-3} \times 500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 125 \text{ Bq h}^{-1}$$

het maximale lek is dus 125 Bq h^{-1}

2. beginconcentratie

$$20 \text{ mBq m}^{-3} = 0,02 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$$

bij maximaal lek komt er per uur bij

$$125 \text{ Bq h}^{-1} / 50 \text{ m}^3 = 2,5 \text{ Bq m}^{-3}$$

de gevraagde formule

$$a(t) = 0,02 + (2,5 \times t)$$

met $a(t)$ in Bq m^{-3} en t in h

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

Vraagstuk 17

- vervalcorrectie $e^{-0,693 \times 30 / 46,61} = 0,64$
 benodigde productie $300 \text{ MBq} / 0,64 = 469 \text{ MBq}$
- $N(^{202}\text{Hg}) = (\text{massa} / \text{atoomgewicht}) \times \text{abundantie}(^{202}\text{Hg}) \times \text{getal van Avogadro}$
 $= (1 \text{ g} / 200,59 \text{ g mol}^{-1}) \times 29,86 \times 10^{-2} \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 9,0 \times 10^{20} \text{ per gram}$
- $dN(^{203}\text{Hg})/dt = N(^{202}\text{Hg}) \times \varphi_{\text{th}} \times \sigma_{\text{th}}$
 productietempo $dN(^{203}\text{Hg})/dt = 9,0 \times 10^{20} \text{ per gram} \times 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 5 \times 10^{-28} \text{ m}^2$
 $= 4,5 \times 10^{11} \text{ s}^{-1} \text{ per gram}$
- $\lambda(^{203}\text{Hg}) = 0,693 / (46,61 \text{ d} \times 24 \text{ h d}^{-1} \times 3600 \text{ s h}^{-1}) = 1,72 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
 activiteit $= \lambda(^{203}\text{Hg}) \times N(^{203}\text{Hg})$
 $= 1,72 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \times 4,5 \times 10^{11} \text{ per gram} = 7,74 \times 10^4 \text{ Bq s}^{-1} \text{ per gram}$
- bestralingstijd volgt uit: $7,74 \times 10^4 \text{ Bq s}^{-1} \text{ per gram} \times t = 300 \times 10^6 \text{ Bq per gram}$
 $t = 300 \times 10^6 \text{ Bq per gram} / 7,74 \times 10^4 \text{ Bq s}^{-1} \text{ per gram}$
 $= 3876 \text{ s} = 1,08 \text{ h}$
- 25% wordt via lucht afgevoerd, dus $25 \times 10^{-2} \times 300 \times 10^6 \text{ Bq} = 7,5 \times 10^7 \text{ Bq}$
 kwikdamp behoort tot klasse SR-1 met een $\text{Re}_{\text{inh}}(^{203}\text{Hg}) = 1,4 \times 10^8 \text{ Bq}$
 lozing bedraagt dus $7,5 \times 10^7 \text{ Bq} / 1,4 \times 10^8 \text{ Bq} = 0,54 \text{ Re}_{\text{inh}}$
 dit is binnen de vergunning
- 1% komt in de bodem-as, dus $1 \times 10^{-2} \times 300 \times 10^6 \text{ Bq} = 3,0 \times 10^6 \text{ Bq}$
 activiteit komt binnen een uur in de as terecht
 productie bodem-as is $3,3 \times 10^3 \text{ kg h}^{-1} \times 1 \text{ h} = 3,3 \times 10^3 \text{ kg}$
 maximale activiteitsconcentratie $= 3,0 \times 10^6 \text{ Bq} / 3,3 \times 10^3 \text{ kg} = 0,9 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1} = 0,9 \text{ Bq g}^{-1}$
 dit is ruim binnen de vergunning
 40% komt in de vlieg-as, dus $40 \times 10^{-2} \times 300 \times 10^6 \text{ Bq} = 1,2 \times 10^8 \text{ Bq}$
 productie bodem-as is $24,2 \times 10^3 \text{ kg h}^{-1} \times 1 \text{ h} = 2,42 \times 10^4 \text{ kg}$
 maximale activiteitsconcentratie $= 1,2 \times 10^8 \text{ Bq} / 2,42 \times 10^4 \text{ kg} = 5,0 \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1} = 5,0 \text{ Bq g}^{-1}$
 beide concentraties zijn ruim binnen de vergunning
- $H^*(10) = h A / r^2 = 0,040 \mu\text{Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 300 \text{ MBq} / r^2 = 12 \mu\text{Sv m}^2 \text{ h}^{-1} / r^2 < 1 \mu\text{Sv h}^{-1}$
 dus $r > \sqrt{12} = 3,5 \text{ m}$

Vraagstuk 18

- vanwege de lange halveringstijd van ^{137}Cs speelt radioactief verval geen rol
 activiteit $A = \text{concentratie} \times \text{debiet} \times \text{vangstrendement} \times \text{tijd}$
 $= 10 \text{ Bq m}^{-3} \times 9,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \times 1 \times 2 \text{ h} = 190 \text{ Bq}$
- de activiteit bouwt lineair op gedurende de monstername (en dus gedurende de meting)
 we mogen dus de gemiddelde activiteit nemen $\langle A \rangle = (0 + 190) \text{ Bq} / 2 = 95 \text{ Bq}$
 volgens de gegevens is het emissierendement $f_{\gamma} = 0,947 \times 0,898 = 0,85$
 aflezen fotopiekrendement uit figuur 2 $\varepsilon = 0,05$
 $N = \langle A \rangle \times f_{\gamma} \times \varepsilon \times t = 95 \text{ Bq} \times 0,85 \times 0,05 \times (2 \text{ h} \times 3600 \text{ s h}^{-1}) = 2,9 \times 10^4 \text{ telpulsen}$
- 10 Bq m^{-3} geeft $2,9 \times 10^4$ telpulsen
 30 telpulsen komen overeen met $(30 / 2,9 \times 10^4) \times 10 \text{ Bq m}^{-3} = 0,010 \text{ Bq m}^{-3} = 10 \text{ mBq m}^{-3}$

Vraagstuk 19

- $T_{1/2}({}^{88}\text{Rb}) = 17,77 \text{ min}$
 $\lambda = 0,693 / T_{1/2}({}^{88}\text{Rb}) = 0,693 / 17,77 \text{ min} = 0,0390 \text{ min}^{-1} = 6,50 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
 $N = f_{\beta} \times f_{\text{det}} \times \int_0^{30} A(0) e^{-\lambda t} dt$
 $= 1 \times 10 \times 10^{-2} \times A(0) \times (1 - e^{-0,0390 \times 30}) / 6,50 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
 $= 1 \times 10 \times 10^{-2} \times A(0) \times 0,69 / 6,50 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} = 106 A(0)$
 $= 150 \text{ 000}$

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

- | | |
|--|---|
| activiteit bij begin meting | $A(0) = 150 \text{ 000} / 106 = 1,4 \times 10^3 \text{ Bq}$ |
| 2. vervalcorrectie | $e^{0,0390 \times 10} = 1,48$ |
| activiteit bij eind monsternamen | $A(-10) = 1,48 \times 1,4 \times 10^3 \text{ Bq} = 2,1 \times 10^3 \text{ Bq}$ |
| 3. stel ${}^{88}\text{Rb}$ -concentratie | $a_{\text{Rb}} \text{ Bq m}^{-3}$ |
| debiet | $D = 30 \text{ l min}^{-1} \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ l}^{-1} = 3,0 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ |
| tijdens monsternamen vervalt de activiteit | |
| | $A(-10) = D \times \int_0^{30} a_{\text{Rb}} e^{-\lambda t} dt = 3,0 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \times a_{\text{Rb}} \times (1 - e^{-0,0390 \times 30}) / 0,0390 \text{ min}^{-1}$ |
| | $= 3,0 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \times a_{\text{Rb}} \text{ Bq m}^{-3} \times 0,69 / 0,0390 \text{ min}^{-1} = 0,53 \text{ m}^3 \times a_{\text{Rb}}$ |
| | dus ${}^{88}\text{Rb}$ -concentratie is $a_{\text{Rb}} = A(-10) / 0,53 \text{ m}^3 = 2,1 \times 10^3 \text{ Bq} / 0,53 \text{ m}^3 = 4,0 \times 10^3 \text{ Bq m}^{-3}$ |
| 4. omdat $T_{1/2}({}^{88}\text{Rb}) \ll T_{1/2}({}^{88}\text{Kr}) \ll 1 \text{ week}$, is er inmiddels evenwicht tussen moeder en dochter | |
| dus $a_{\text{Kr}} = a_{\text{Rb}} = 4,0 \times 10^3 \text{ Bq m}^{-3}$ | |

Vraagstuk 20

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

EXTERNE DOSIMETRIE EN AFSCHERMING

21. Fluentietempo en fotonentelling

(1984-1-4)

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bepaal voor elk van de genoemde energieën het kermatempo in lucht ten gevolge van 1 foton per cm^2 per seconde.
2. Bereken het aantal telpulsen per seconde als het kermatempo in lucht $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$ bedraagt.
3. Bereken het omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ per tijdseenheid in dit stralingsveld (in $\mu\text{Sv h}^{-1}$).

22. Verontreinigd $^{51}\text{CrCl}_3$

(1987-1-2)

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Toon aan dat de β -deeltjes de lucht in het ionisatievat niet kunnen bereiken.
2. Bereken het dosistempo in lucht ten gevolge van de γ -straling op 50 cm afstand van het preparaat.
3. Bereken de ^{42}K -activiteit ten tijde van de metingen.
4. Bereken de ^{51}Cr -activiteit ten tijde van de metingen.
5. Bereken globaal het dosistempo in weefsel ten gevolge van de β -straling op 50 cm afstand van het preparaat.
6. Welke maatregel moet worden genomen ter bescherming tegen de β -straling?

23. Reefer Rio

(1988-2-4)

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

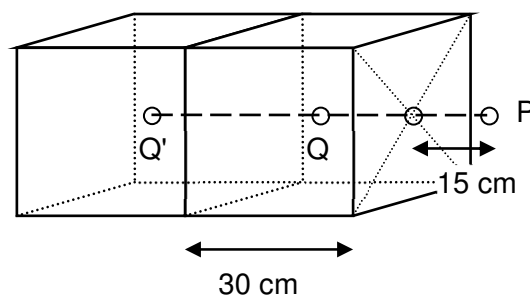
Gegeven:

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

Vragen:

1. Maak een schatting van het kermatempo in lucht ten gevolge van de fotonen op 15 cm afstand van een doos (punt P in figuur 1). Ga er bij deze schatting vanuit dat alle activiteit zich in het centrum Q van de doos bevindt.
2. Bereken de bijdrage tot het kermatempo in lucht in punt P van de doos die direct achter de eerste doos is geplaatst. Ga er bij deze schatting vanuit dat alle activiteit zich in het centrum Q' van de tweede doos bevindt.
3. Maak een schatting van het kermatempo in weefsel ten gevolge van de fotonen in de directe nabijheid van de wand van enkele duizenden gestapelde dozen, waarbij wordt aangenomen dat de activiteit homogeen over het vlees is verdeeld.

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



Figuur 1. Situatieschets van de kubusvormige dozen.

24. TLD-persoonsdosismeter

(1988-1-1)

Een bepaalde persoonsdosismeter is opgebouwd uit twee verschillende thermoluminescentiedetectoren (TLD's), te weten lithiumboraat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) en calciumsulfaat (CaSO_4). Deze thermoluminescentiedetectoren zijn met behulp van een ionisatiekamer geijkt voor vele fotonenergieën tussen 10 keV en 2 MeV. De personen P en Q dragen beide een dergelijke persoonsdosismeter. Op een zekere dag worden de volgende uitslagen geregistreerd in schaaldelen (sd):

<i>persoon</i>	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	CaSO_4
P	85	85
Q	35	315

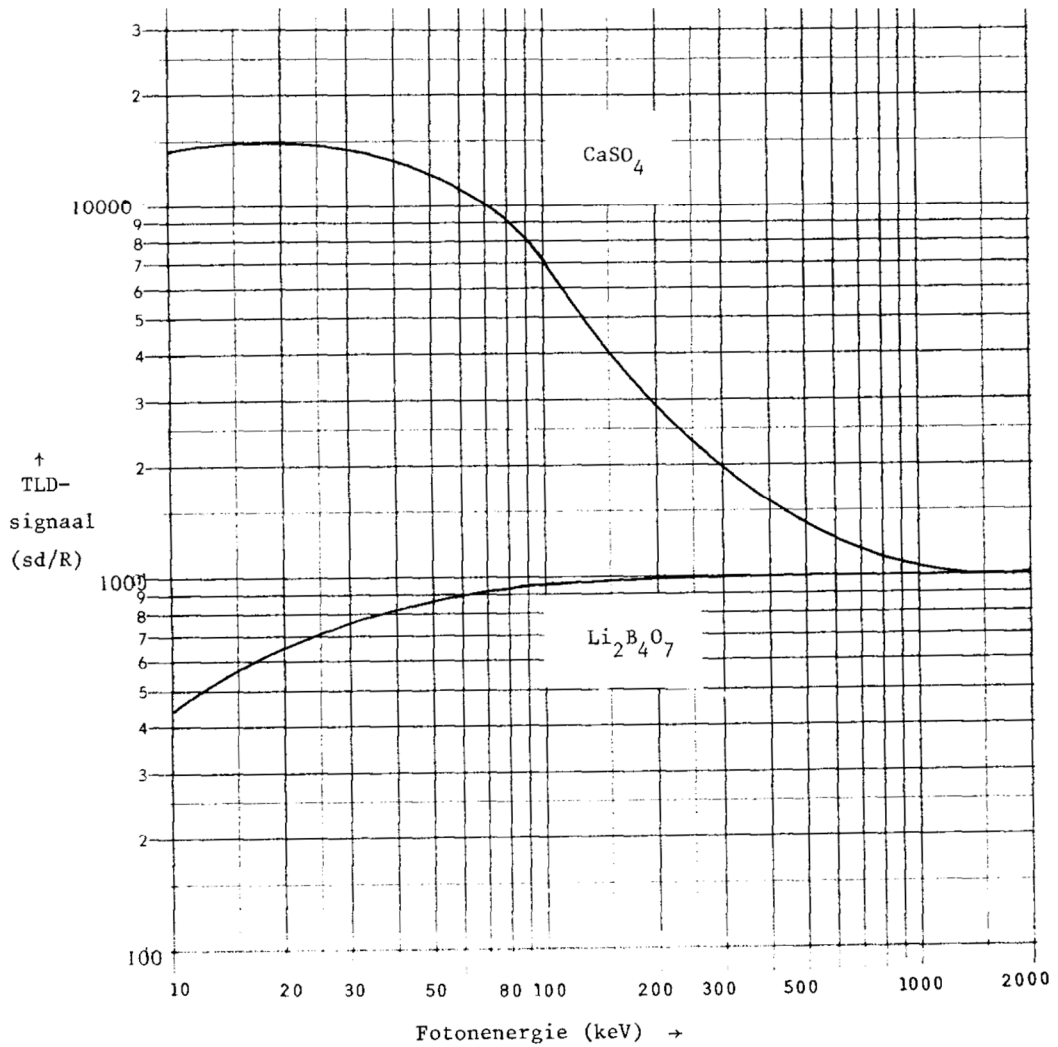
Gegeven:

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

Vragen:

1. Hoe groot is het TLD-signaal, uitgedrukt in schaaldelen, van de beide TLD's bij een kerma in lucht van 1 mGy ten gevolge van fotonen met een energie van 60 keV?
2. Hoe groot is het persoonsdosisequivalent $H_p(10)$ bij blootstelling aan een kerma in lucht van 1 mGy ten gevolge van fotonen met een energie van 60 keV?
3. Welk persoonsdosisequivalent hebben de personen P en Q opgelopen? Neem hierbij aan dat elke persoon is blootgesteld aan mono-energetische fotonen.

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



Figuur 1. Relatief TLD-sigitaal, genormeerd op 1000 sd/R bij 1500 keV, als functie van de fotonenergie, voor de TLD-materialen $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ en CaSO_4 .

25. ^{32}P -dosimetrie

(1998-2-2)

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

x (cm) gemeten dosistempo en waarde volgens de kwadratenwet (in $\mu\text{Gy min}^{-1}$)

0,29 *	1 444		
10	4,67	4,67	
20	1,25	---	
30	0,58	---	
40	0,25	---	
50	0,17	---	* gemeten op het oppervlak
60	0,13	---	in de punt van het buisje

Gegeven:

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

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

D_{huid} = huiddosis (in Gy)

Φ = fluentie van de β -deeltjes (in cm^{-2})

S_{col}/ρ = massieke energieverliesdoorsnede voor botsingen (in MeV per g cm^{-2})

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

Vragen:

1. Bepaal de dracht in lucht en in water van de door ^{32}P uitgezonden β -deeltjes (in cm).
2. Bereken de niet ingevulde getallen in de derde kolom van bovenstaande tabel. Wat kunt u concluderen ten aanzien van de verzwakking in lucht van de door ^{32}P uitgezonden β -straling binnen de gebruikelijke bron-werkafstand van 10 tot 60 cm?
3. Bereken het equivalente dosistempo in de huid (in mSv h^{-1}) ten gevolge van ^{32}P bij een homogene huidbesmetting van 1 MBq cm^{-2} , uitgaande van bovenstaande formule voor D_{huid} . Herhaal de berekening met de gegevens in figuur 3 van de Appendix.
4. Bereken hoe lang het duurt tot bij deze besmettingssituatie de deterministische jaarlimiet voor de equivalente huiddosis bij beroepsmatige blootstelling wordt bereikt.

26. Incident met een gammagrafiebron

(2000-2-2)

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

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

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het omgevingsdosisequivalent ten gevolge van externe straling die de onderhoudsmedewerker heeft opgelopen tijdens het uitsnijden van de lasnaad. Neem hierbij aan dat de afstand van de werknemer tot de bron 0,5 m bedroeg en dat het karwei 45 minuten in beslag nam.
2. Maak een schatting van de effectieve dosis ten gevolge van de externe straling die de onderhoudsmedewerker heeft opgelopen.
3. Wat is de hoogste equivalente huiddosis geweest, aannemende dat de activiteit 8 uur op de huid aanwezig is geweest?
4. Noem tenminste twee stralingshygiënische tekortkomingen die naar aanleiding van dit incident zijn te constateren.

27. Afscherming van een ^{24}Na -bron

(1991-2-2)

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de minimale dikte van de aluminium capsule, opdat alle door het bestraalde monster uitgezonden β -deeltjes van ^{24}Na worden tegengehouden.
2. Bereken het te verwachten kermatempo in lucht ten gevolge van de 1,37 MeV γ -fotonen op een afstand van 1 meter van een onafgeschermd bron van 37 GBq ^{24}Na .
3. Bereken het te verwachten kermatempo in lucht ten gevolge van de 2,75 MeV γ -fotonen op een afstand van 1 meter van een onafgeschermd bron van 37 GBq ^{24}Na .
4. Bereken het kermatempo in lucht op 1 meter hoogte boven het wateroppervlak indien een puntvormige ^{24}Na -bron van 37 GBq zich op een diepte van 2 meter onder het wateroppervlak bevindt.

28. Afscherming van geactiveerd materiaal

(1993-2-3)

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

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

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de activiteit van de bron ten tijde van de meting.
2. Het kermatempo in lucht aan het wateroppervlak moet beneden $25 \mu\text{Gy h}^{-1}$ blijven. Ga na of aan deze eis is voldaan. Doe voor de berekening van de verzwakking alsof ^{60}Co vervalt onder uitzending van twee fotonen met elk een energie van 1,33 MeV.
3. Bij welke afmeting van een kubusvormige verpakking leiden de twee transporteisen tot dezelfde afschermingseis?
4. Bereken de minimale dikte (in hele cm) van de loden afscherming opdat aan beide transporteisen is voldaan.

29. Afscherming van moeder en dochter

(1990-1-2)

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

Tabel 1. Eigenschappen van nucliden A en B.

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

Een technicus isoleert nuclide A in een zuivere vorm. Voor het vervoer plaatst hij het preparaat achtereenvolgens in een

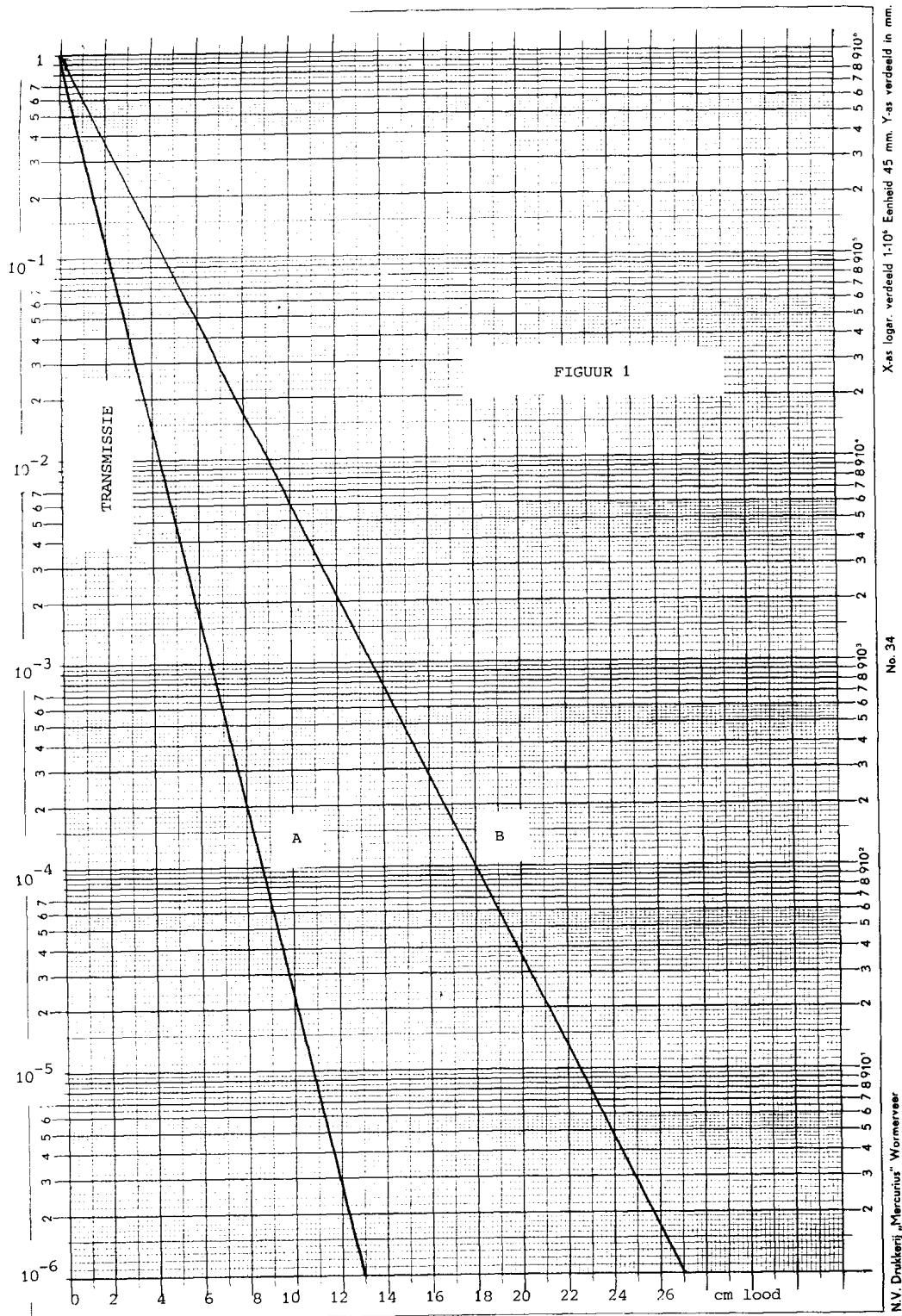
aantal containers en bepaalt telkens het omgevingsdosisequivalenttempo op 1 m van het oppervlak van de container. Bij een wanddikte van 50 mm lood meet hij $80 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Hoewel hij bekend is met de eigenschappen van nuclide A en met het feit dat het transport drie volle dagen zal duren, verzendt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

Gegeven:

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

Vragen:

1. De technicus vergeet twee dingen. Welke zijn deze?
2. Bereken de activiteit van nuclide A op het tijdstip van de isolatie.
3. Bereken de activiteit van nuclide B op het moment van aflevering van de container.
4. Wat had de wanddikte moeten zijn?
5. Bereken de massa van het lood in de gebruikte en in de noodzakelijke container.



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

30. Container voor opslag van ^{60}Co

(1995-1-3)

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

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

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

Gegeven:

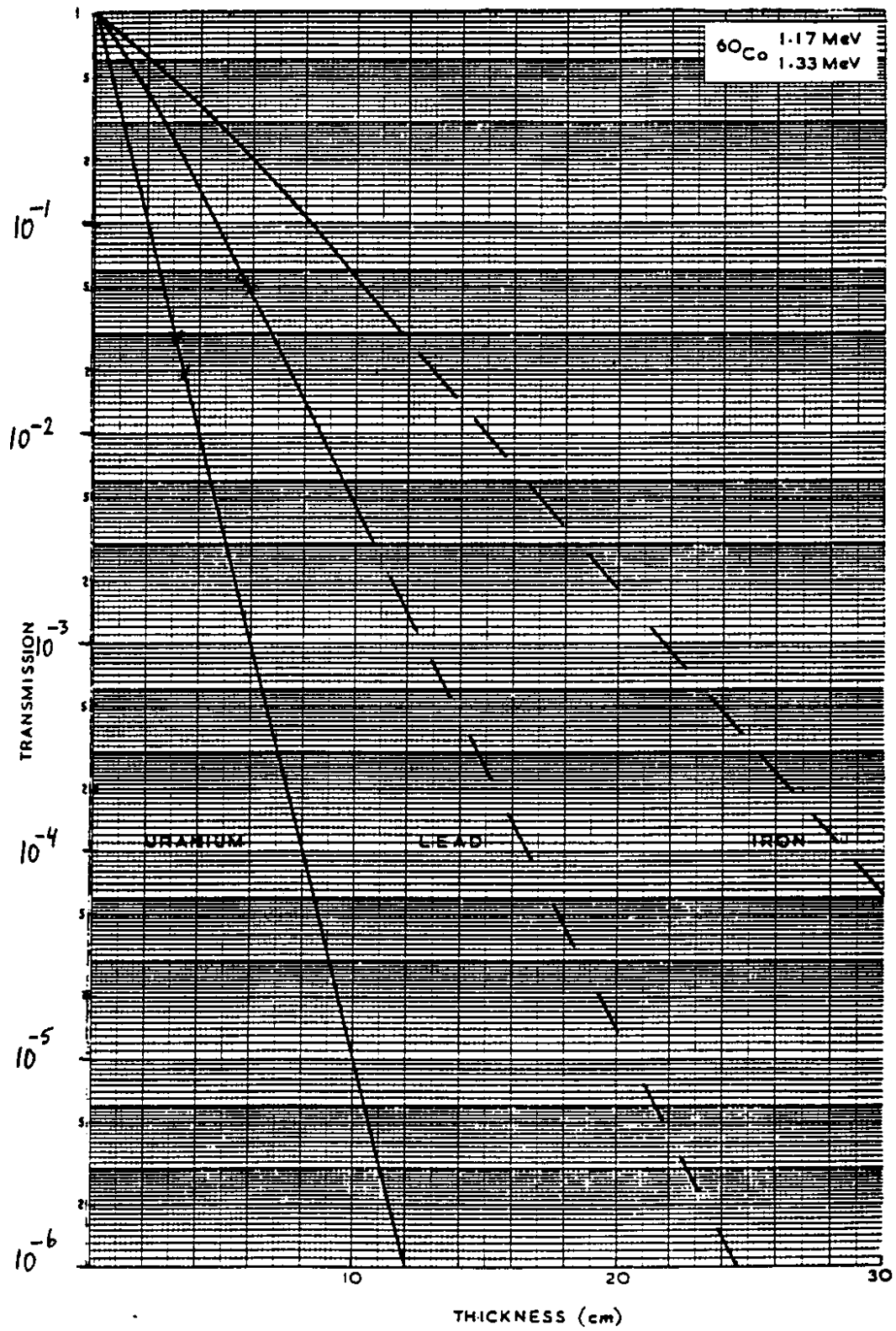
- de bronconstante van ^{60}Co voor kerma in lucht is $k = 0,305 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$
- transmissie van fotonen door ijzer, lood en uranium (zie figuur 1)
- de soortelijke massa van lood is $11,35 \text{ g cm}^{-3}$
- de soortelijke massa van uranium is $18,9 \text{ g cm}^{-3}$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

Vragen:

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

Aanwijzing: Benader de gezochte dikte door proberen.

2. Bereken de minimaal benodigde wanddikte van de container indien deze van uranium wordt gemaakt (afgerond naar boven op een veelvoud van een halve cm).
3. Bereken de massa van een container van lood met wanddikte als berekend bij vraag 1 (afgerond op 0,1 kg).
4. Bereken de massa van een container van uranium met wanddikte als berekend bij vraag 2 (afgerond op 0,1 kg).
5. Bereken de activiteit van ^{238}U en ^{235}U tezamen, dochternucliden niet meegerekend, voor een container van uranium met massa als berekend bij vraag 4.



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

31. Afscherming van een ionenwisselaar

(1997-1-1)

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

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

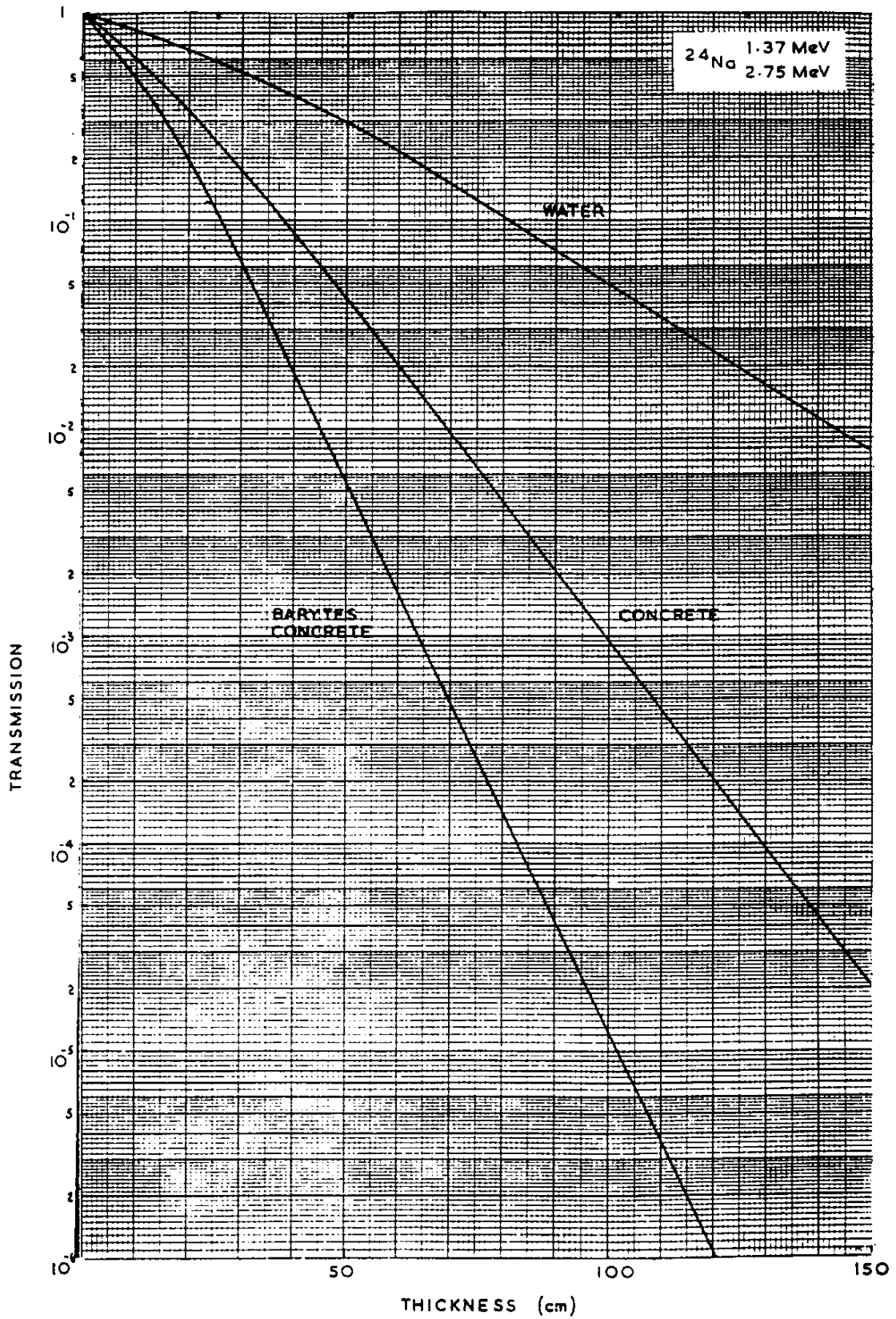
De reactor is gewoonlijk ongeveer 110 uur per week volcontinu in bedrijf. Halverwege deze periode heeft de ^{24}Na -activiteit in het koelwater reeds zijn maximale waarde (= verzadigingswaarde) bereikt. Op dat moment is de activiteitsconcentratie 40 MBq m^{-3} . Als benadering mag u deze activiteitsconcentratie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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de maximale ^{24}Na -activiteit die zich tijdens een bedrijfsweek in de ionenwisselaar kan bevinden. Verwaarloos de activiteit in de ionenwisselaar aan het begin van de bedrijfsweek.
2. Bereken het kermatempo in lucht op 2 meter afstand van de ionenwisselaar indien zich daarin de bij vraag 1 berekende ^{24}Na -activiteit bevindt. Beschouw deze als een puntbron.
3. Bereken de dikte van de betonnen muur die nodig is om het bij vraag 2 berekende kermatempo in lucht op 2 meter afstand van de ionenwisselaar te reduceren tot $1 \mu\text{Gy}$ per uur. Maak de berekening voor zowel normaal beton als voor verzaamd barietbeton.



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

32. Afscherming van een ^{137}Cs -bron

(1993-2-2)

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de dikte van de loodafscherming van de ^{137}Cs -bron opdat het kermatempo vrij in lucht op 0,5 meter afstand van de bron ten hoogste $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$ bedraagt.
2. Spelen de fotonen van ^{137}Cs -bron die bij de interacties in lood en beton worden verstrooid (*build up*) een rol van betekenis in het teltempo van de spectrometer ter plaatse van de fotopiek? Motiveer uw antwoord.
3. Bereken het fluentietempo van de 0,66 MeV fotonen van de ^{137}Cs -bron ter plaatse van het NaI(Tl)-kristal, rekening houdende met de verzwakking van de betonnen muur en de loodafscherming van de NaI(Tl)-detector in de spectrometer. Laat hierbij de bij vraag 1 berekende afscherming van de ^{137}Cs -bron buiten beschouwing.
4. Bereken de dikte van de loodafscherming van de ^{137}Cs -bron, opdat aan bovengenoemde eis voor de maximale verhoging van het teltempo van de spectrometer wordt voldaan.

33. Afscherming van een ^{60}Co -bron

(1990-1-1)

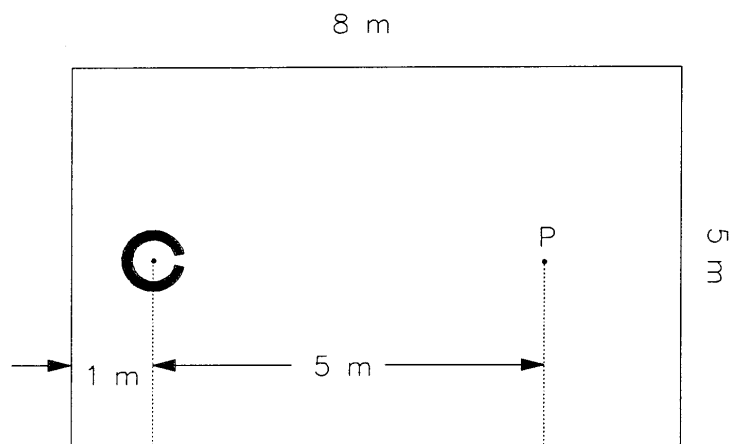
In een betonnen ruimte met een vloeroppervlak van $8\text{ m} \times 5\text{ m}$ bevindt zich een bestralingsopstelling voorzien van een ^{60}Co -bron van 75 GBq . De bron is in een loodkasteel geplaatst. Door een cirkelvormige, gecollimeerde opening treedt een bundel naar buiten. De stralingsbundel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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het kermatempo in lucht ten gevolge van de directe straling in punt P, als de afstand van dit punt tot de bron 5 m bedraagt.
2. Bereken in hetzelfde punt P de bijdrage tot het kermatempo in lucht ten gevolge van de straling die via de muur is terugverstrooid.
3. Wat is de maximale afstand tussen bron en het te bestralen object (punt P in figuur 1), indien de eis wordt gesteld dat de bijdrage van de terugverstrooide straling ten opzichte van de directe straling niet meer bedraagt dan 1% ?



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

34. Afscherming van ^{60}Co -activiteit

(1988-1-2)

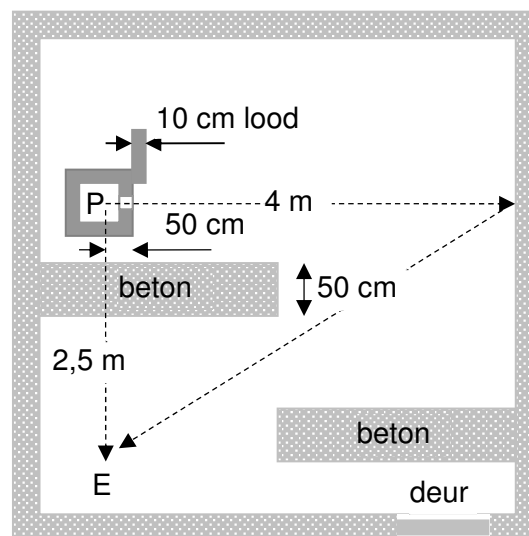
In een laboratorium wordt metaalkundig onderzoek verricht aan een sterk geactiveerd onderdeel uit een nucleaire installatie. De activiteit van het voorwerp is $1,5 \times 10^{12}$ Bq. Het voorwerp wordt in een loden afschermkast gebracht en gepositioneerd op lokatie P (zie figuur 1). Door een fout blijft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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Waarom mag de transmissiegrafiek voor beton worden gebruikt voor de straling die reeds door het lood is verzwakt?
2. Bereken het kermatempo in lucht op lokatie E ten gevolge van de directe straling.
3. Bereken het kermatempo ten gevolge van de straling die via de opening in de loodkast en de tegenoverliggende betonnen wand het punt E bereikt.



Figuur 1. Plattegrond van de onderzoeksruimte.

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

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

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

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

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

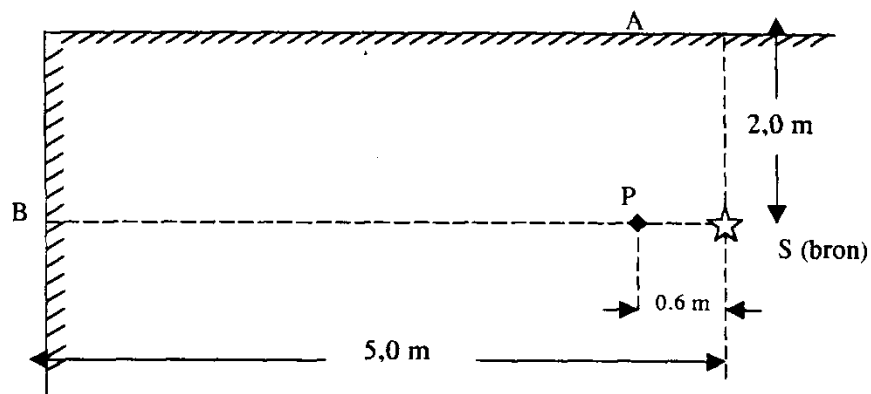
De wand bij punt B is tevens een buitenmuur van het gebouw. Aan deze muur grenst een voor publiek toegankelijk terreingedeelte, met een omheining tot een minimale afstand van 10 m tot de muur. Buiten deze omheining ligt een openbaar parkeerterrein dat zowel door bezoekers van het ziekenhuis als door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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de benodigde dikte van de betonnen muur tussen S en A, rekening houdende met de lekstraling en de via de patiënt verstrooide straling.
2. Bereken de benodigde dikte van de betonnen muur tussen S en B, rekening houdende met de primaire bundel en de lekstraling.
3. Bereken de maximale waarde voor de AID op het parkeerterrein.



Figuur 1. Plattegrond van de bestralingsruimte.

36. Afscherming van een betatron

(1992-2-2)

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

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

Gegeven:

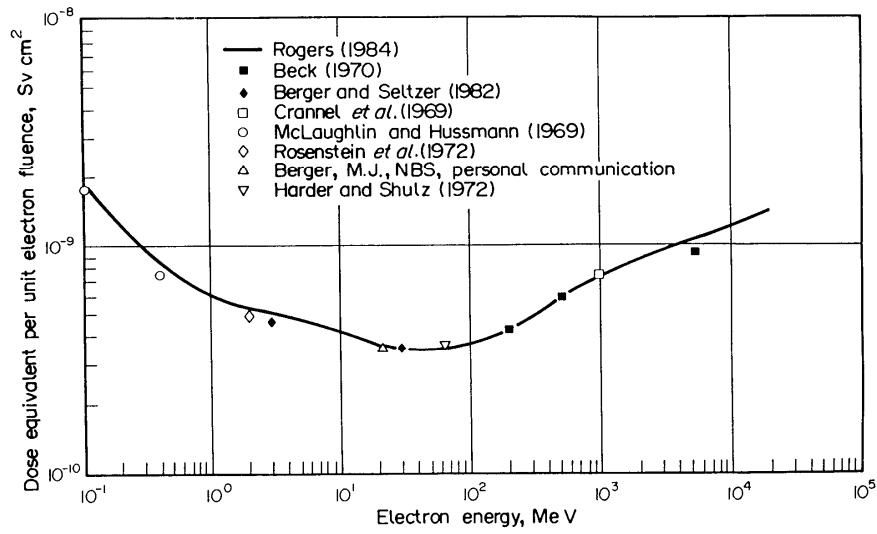
- de equivalente dosis in weefsel bij bestraling met elektronen (zie figuur 1)
- de dracht van elektronen in water (geldt ook voor zacht weefsel) (zie figuur 2)
- de remstralingsopbrengst (zie figuur 3)
- de transmissie van brede bundels remstraling door lood (zie Appendix, figuur 39)
- de transmissie van brede bundels remstraling door beton (zie Appendix, figuur 40)
- de omrekeningsfactor $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$
- de soortelijke massa van beton is 2350 kg m^{-3}
- de soortelijke massa van lood is 11350 kg m^{-3}

Vragen bij bestraling met elektronen:

1. Bepaal de dracht (in cm) van 10 MeV elektronen in zacht weefsel.
2. Bereken het maximale dosisequivalenttempo in zacht weefsel ten gevolge van de elektronenbundel bij een versnelspanning van 10 MV, een bundelstroom van 1 nA en een veldgrootte van 10 cm^2 .
3. Veronderstel dat door een combinatie van fouten een elektronenbestraling wordt uitgevoerd bij een versnelspanning van 30 MV in plaats van 10 MV. De overige instellingen zijn als vermeld bij vraag 2. Wat zijn in dat geval de dracht en het maximale dosisequivalenttempo?

Vragen bij bestraling met fotonen:

4. Bereken de bestralingstijd die nodig is om bij een versnelspanning van 30 MV en een bundelstroom van $1 \mu\text{A}$ op een afstand van 1 m van de trefplaat een dosis van 4 Gy in lucht te verkrijgen.
5. Bereken de benodigde dikte van de afscherming voor de materialen lood en beton.
6. Voor het vloerdeel waarop de afschermingsmuur is geplaatst, geldt een maximaal toegestane vloerbelasting van $10\,000 \text{ kg m}^{-2}$. De hoogte van de afscherming is 2,7 m. Geef aan de hand van een berekening aan, welke van de bij vraag 5 genoemde materialen op grond van de toegestane vloerbelasting bruikbaar zijn.



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

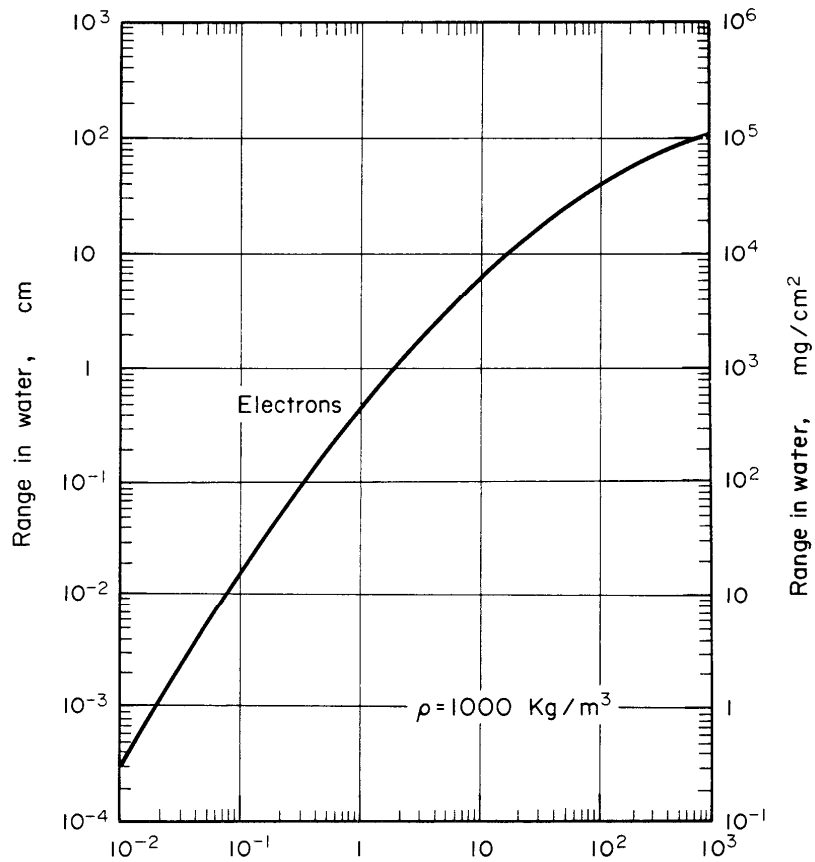
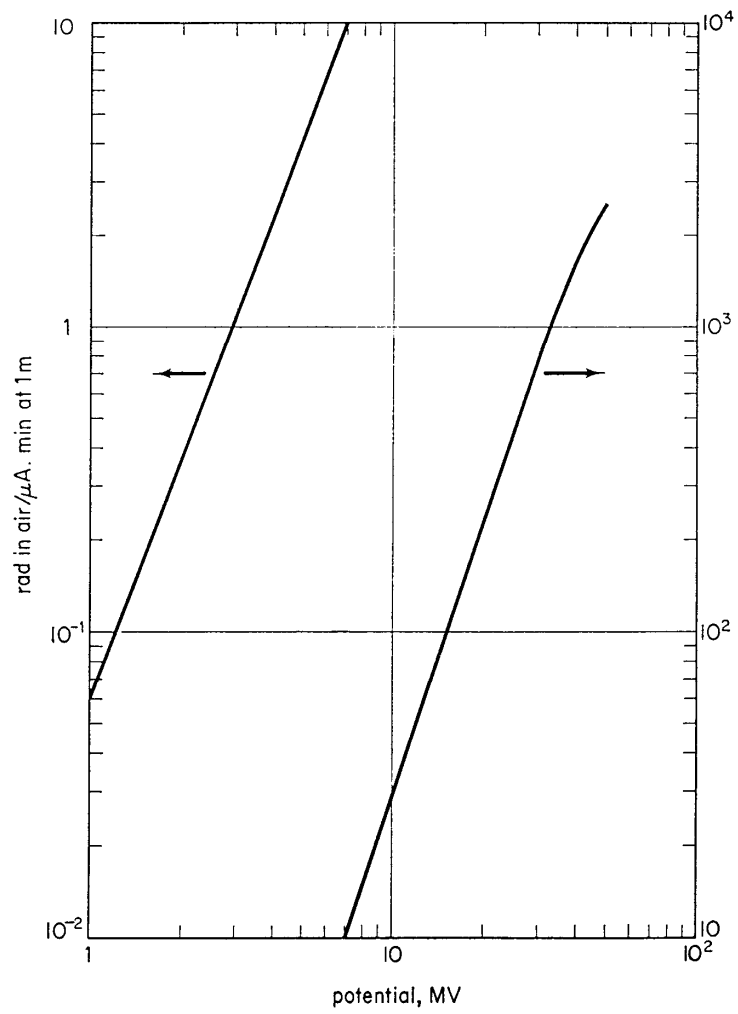


Fig. 28. Range of electrons in water.

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



Figuur 3. Remstralingsopbrengst op 1 m van het target.

37. Dosis bij radiodiagnostisch onderzoek

(1993-2-4)

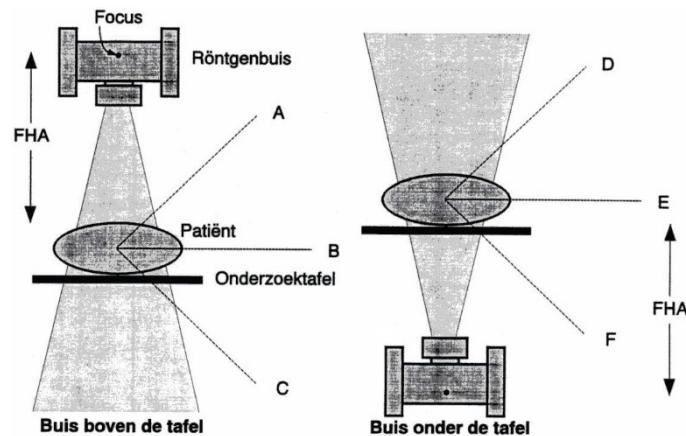
Een radiodiagnostisch onderzoek van de buik van een vrouwelijke patiënt bestaat uit het doorlichten met behulp van een beeldversterker en het maken van een röntgenfoto. Tijdens het onderzoek ligt de patiënt op een onderzoektafel. Tijdens het doorlichten staat de arts naast de patiënt.

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de verstrooide dosis bij het doorlichten op 100 cm van de patiënt, voor een FHA = 1 m, voor beide geometrieën en voor verstrooihoeken van 45°, 90° en 135° (dus voor de posities A t/m F).
2. Bereken voor de omstandigheden waaronder de röntgenfoto wordt gemaakt de dosis vrij in lucht D_{lucht} voor een FHA = 85 cm.
3. Bereken de effectieve dosis die de patiënt ontvangt ten gevolge van de röntgenfoto. Gebruik hierbij de gegevens van tabel 2.



Figuur 1. Schematische voorstelling van de bestralingssituatie.

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

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

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

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

38. Dosimetrie van röntgenstraling

(1995-1-2)

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

Gegeven:

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

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

k = opbrengst van het röntgentoestel (in mGy m² mA⁻¹ min⁻¹)

K_{\max} = maximaal toegelaten kerma (in mGy per jaar)

l = afstand tot het focus (in m)

W = *workload* (in mA min per jaar)

U = *use factor*

T = *occupancy factor*

Vragen:

1. Bepaal het maximale dosistempo (in mGy min⁻¹) in lucht zonder afscherming ter plaatse van het bedieningspaneel.
2. Bepaal het hiermee samenhangende geabsorbeerde dosistempo in weefsel.
3. Bepaal de minimale betondikte die nodig is om aan de gestelde eis te voldoen.

39. Afscherming van een röntgentoestel

(1999-1-2)

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

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

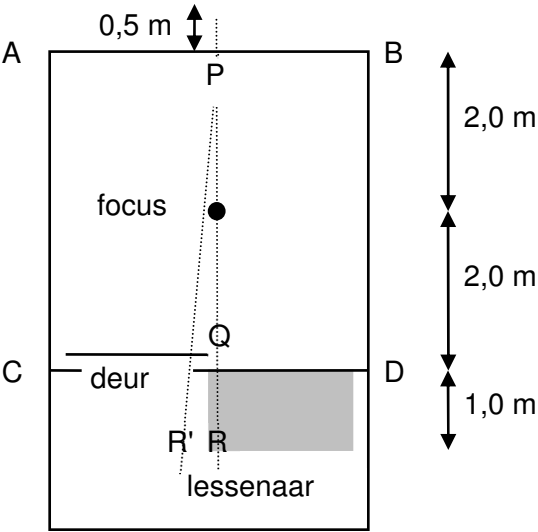
Ter plaatse van de muur A-B (zie figuur 1) beslaat de bundelvlak een oppervlakte van $2 \times 10^3 \text{ cm}^2$, met het punt P als centrum. Daarvandaan wordt straling terug verstrooid in de richting van de nevenruimte, waar de bedieningslessenaar staat. Neem aan dat voor die richting de verstrooihoek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

Gegeven:

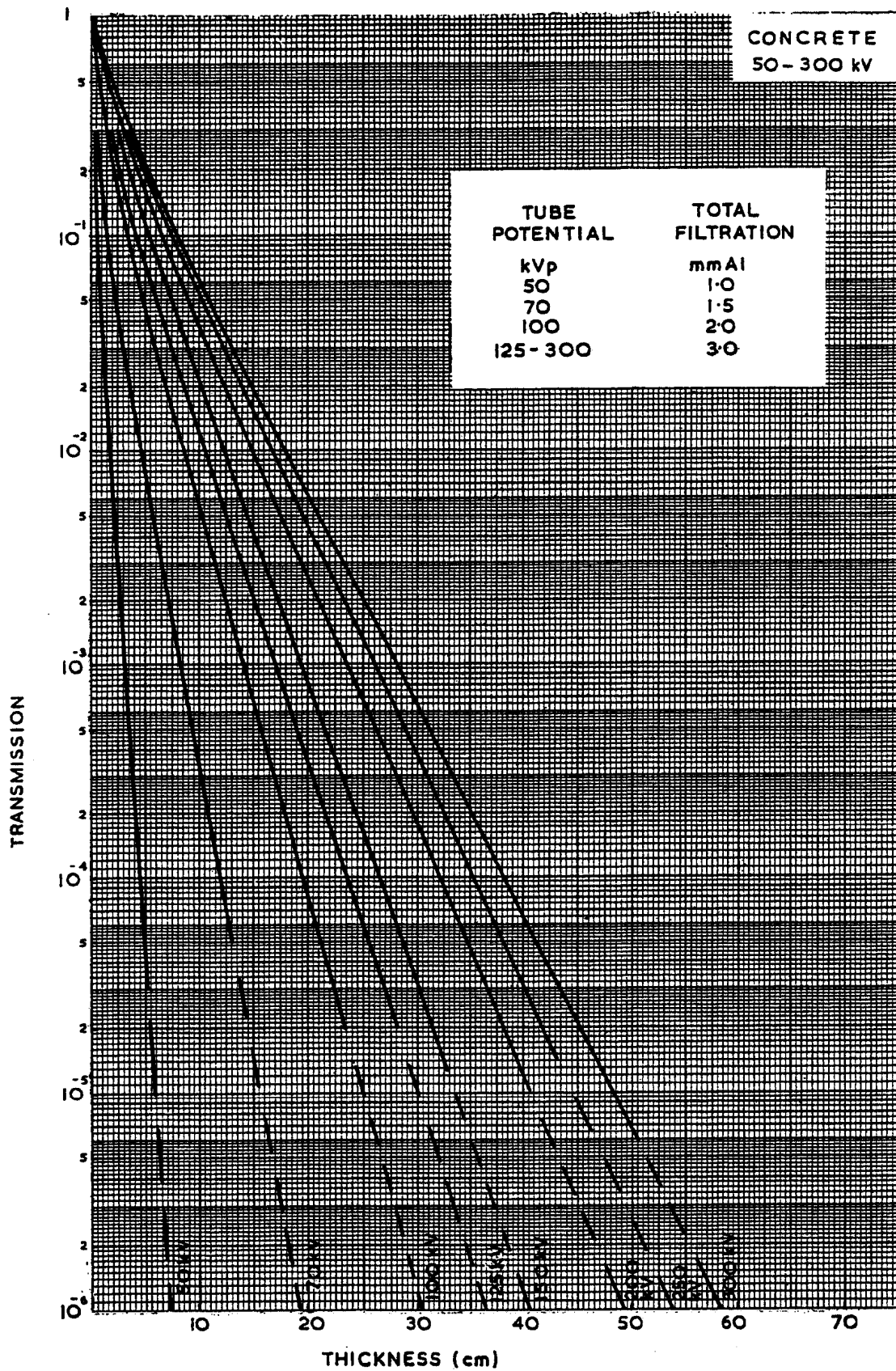
- een situatieschets van de bestralingsruimte (zie figuur 1)
- opbrengst van het röntgentoestel en transmissie van de opgewekte straling door lood (zie Appendix, figuur 42)
- de (constante) buisspanning is 100 kV
- de workload van het toestel is $12,5 \times 10^3 \text{ mA min}$ per week, gedurende 50 weken per jaar
- de bundelfiltratie is 2 mm Al
- de transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton (zie figuur 2)
- verstrooiingsfactoren voor beton (zie Appendix, figuur 44)
- de effectieve energie van de onder 180° verstrooide straling is vergelijkbaar met die van een röntgenspectrum opgewekt bij een spanning van 70 à 75 kV; hiervoor mogen de transmissiegrafieken behorende bij deze buisspanningen worden gebruikt

Vragen:

1. Bereken de benodigde dikte van de muur waarop de horizontale bundel is gericht (A-B in figuur 1). Neem hiervoor aan dat de bundel gedurende de volle bedrijfstijd op deze muur is gericht en dat eenzelfde persoon zich gedurende die tijd achter de muur ophoudt op 0,5 m afstand van het punt P waar de bundel-as de muur A-B treft.
2. Bereken de benodigde dikte van de muur waarachter de bedieningslessenaar komt te staan (C-D in figuur 1). Neem hiervoor aan dat eenzelfde persoon gedurende de volle bedrijfstijd verblijft op de positie R, op 1 m van het punt Q waar de as van de verstrooide bundel de betonmuur snijdt. Ga uit van dezelfde veronderstelling als in vraag 1 met betrekking tot de richting van de primaire bundel.
3. Bereken de benodigde dikte van het laagje lood op de deur. De verzwakking van de straling door het hout mag worden verwaarloosd. Ga voor de positie R' uit van dezelfde aanname als voor positie R in vraag 2.



Figuur 1. Plattegrond van de ruimte met het röntgentoestel.

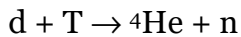


Figuur 2. Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton.

40. Afscherming van een neutronengenerator

(2000-2-4)

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



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

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

Gegeven:

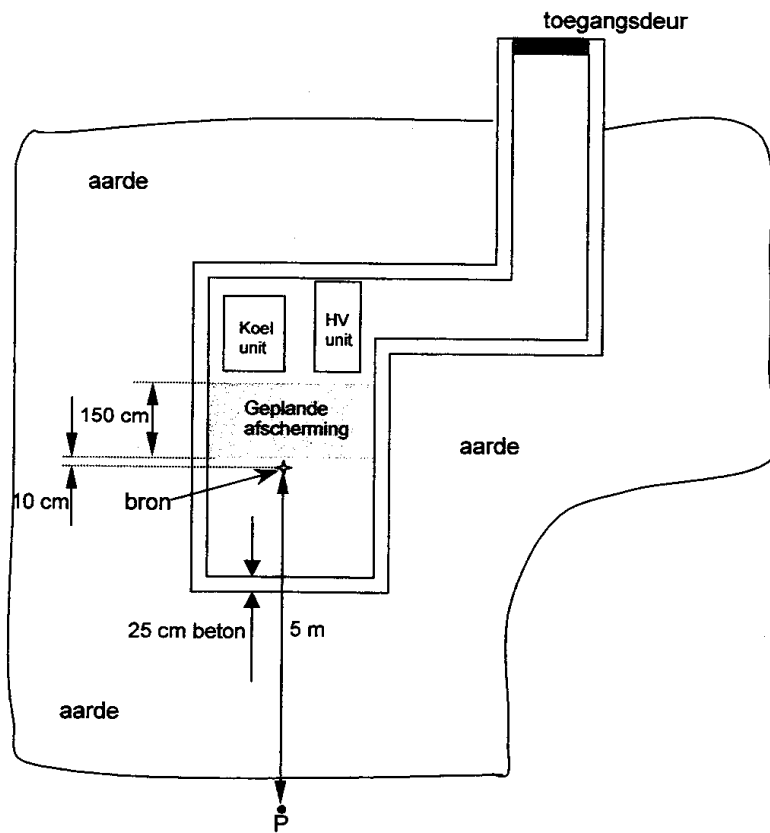
- een horizontale doorsnede door de bunker (zie figuur 1)
- omgevingsdosisequivalent voor mono-energetische neutronen (zie tabel 1)
- de transmissie van neutronen met een energie van 14 MeV door beton is:

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

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

Vragen:

1. Bereken het fluentietempo in punt P op 5 m afstand van de trefplaat (zie figuur 1) bij een niet afgeschermd generator.
2. Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo (in $\mu\text{Sv h}^{-1}$) in punt P op 5 m afstand van de trefplaat bij een niet afgeschermd generator.
3. Hoe dik moet de aarden wal zijn opdat het omgevingsdosisequivalenttempo in punt P op 5 m afstand van de trefplaat niet groter is dan $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Ga uit van alleen de bijdrage van de directe straling (dus geen *sky shine*). Neem verder aan dat achter de afscherming de meest bepalende neutronenenergie nog steeds 14 MeV bedraagt.
4. In de bunker moeten werkzaamheden worden verricht aan de hoogspannings- en koelunit. Er zijn betonnen klinkers beschikbaar waarmee op 10 cm vanaf de bron een wand ter dikte van 150 cm kan worden geconstrueerd, die nog net voldoende ruimte overlaat om achter de afscherming de werkzaamheden uit te voeren. Als eis wordt gesteld dat het omgevingsdosisequivalenttempo direct achter de afscherming niet meer dan $10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ mag bedragen. Ga na of de betonnen wand aan die eis voldoet.



Figuur 1. Horizontale doorsnede van de bunker met labyrint.

Tabel 1. Operationele grootheden per eenheid van neutronenfluentie uitgedrukt in pSv·cm² voor mono-energetische neutronen.

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

^aNot available.

Uitwerkingen

Vraagstuk 21

1. aflezen figuur 27:

$$60 \text{ keV} \quad \phi_{60\text{keV}} / K_1 = 1,0 \times 10^7 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1,0 \times 10^3 \text{ (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \text{ per } \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$K_1 / \phi_{60\text{keV}} = 1,0 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ per (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

$$511 \text{ keV} \quad \phi_{511\text{keV}} / K_1 = 1,2 \times 10^6 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1,2 \times 10^2 \text{ (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \text{ per } \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$K_1 / \phi_{511\text{keV}} = 8,3 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ per (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

2. 1 foton van elk $1,0 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} + 8,3 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} = 9,3 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1}$ per (foton $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) voor $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$ zijn er dus van elke energie:

$$\phi = (10 \mu\text{Gy h}^{-1} / 9,3 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ per (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1})) \times 1 = 1075 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

teltempo = fluentietempo \times oppervlak \times (1 - transmissie)

$$\text{massieke dikte detector} \quad d \times \rho = 1 \times 10^{-1} \text{ cm} \times 3,67 \text{ g cm}^{-3} = 0,367 \text{ g cm}^{-2}$$

$$\text{oppervlak detector} \quad 10 \text{ cm}^2$$

$$60 \text{ keV} \quad \text{transmissie} = e^{-(\mu/\rho)(d \times \rho)} = e^{-6,62 \times 0,367} = 0,088$$

$$\text{teltempo} = 1075 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 10 \text{ cm}^2 \times (1 - 0,088) = 9804 \text{ tps}$$

$$511 \text{ keV} \quad \text{transmissie} = e^{-(\mu/\rho)(d \times \rho)} = e^{-0,0941 \times 0,367} = 0,966$$

$$\text{teltempo} = 1075 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 10 \text{ cm}^2 \times (1 - 0,966) = 366 \text{ tps}$$

$$\text{totaal} \quad 9804 \text{ tps} + 366 \text{ tps} = 10170 \text{ tps}$$

3. $H^* = \phi \times (K / \phi) \times (H^* / K)$

invullen van K / ϕ (zie vraag 1) en H^* / K (zie figuur 28) levert:

$$60 \text{ keV} \quad K / \phi = 1,0 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ per (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1}); H^* / K = 1,75 \text{ Sv Gy}^{-1}$$

$$H^*(10) = 1075 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 1,0 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ per (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \times 1,75 \text{ Sv Gy}^{-1} \\ = 2 \mu\text{Sv h}^{-1}$$

$$511 \text{ keV} \quad K / \phi = 8,3 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ per (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1}); H^* / K = 1,21 \text{ Sv Gy}^{-1}$$

$$H^*(10) = 1075 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 8,3 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ per (foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \times 1,21 \text{ Sv Gy}^{-1} \\ = 11 \mu\text{Sv h}^{-1}$$

$$\text{totaal} \quad H^*(10) = 2 \mu\text{Sv h}^{-1} + 11 \mu\text{Sv h}^{-1} = 13 \mu\text{Sv h}^{-1}$$

Vraagstuk 22

1. $E_{\beta, \text{max}}(^{42}\text{K}) = 3521 \text{ keV} = 3,5 \text{ MeV}$

aflezen figuur 25

$$R(3,5 \text{ MeV}) = 1750 \text{ mg cm}^{-2}$$

$$= 1,75 \text{ g cm}^{-2} < \text{wanddikte ionisatiekamer}$$

2. massa lucht in ionisatiekamer

$$100 \text{ cm}^3 \times 1,205 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3} = 1,205 \times 10^{-1} \text{ g}$$

$$= 1,205 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$X = \text{lading} / \text{massa} \quad 94,6 \times 10^{-12} \text{ C} / 1,205 \times 10^{-4} \text{ kg} = 7,85 \times 10^{-7} \text{ C kg}^{-1}$$

$$D = 33,7 \text{ Gy per C kg}^{-1} \times 7,85 \times 10^{-7} \text{ C kg}^{-1} = 2,65 \times 10^{-5} \text{ Gy} = 26,5 \mu\text{Gy}$$

$$dD/dt = 26,5 \mu\text{Gy} / 6 \text{ min} = 4,42 \mu\text{Gy min}^{-1} = 265 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

afkomstig van γ -straling van ^{42}K en ^{51}Cr

3. GM-telbuis

$$f_{\text{geom}} = 1 \text{ cm}^2 / [4\pi \times (50 \text{ cm})^2] = 3,2 \times 10^{-5}$$

$$T_{\beta} = A(^{42}\text{K}) \times f_{\beta} \times f_{\text{geom}} \times f_{\text{det}}$$

$$= A(^{42}\text{K}) \times 1 \times 3,2 \times 10^{-5} \times 1 = 3,2 \times 10^{-5} A(^{42}\text{K})$$

$$\text{gemeten} \quad T_{\beta} = 3,53 \times 10^6 \text{ tpm} = 5,9 \times 10^4 \text{ tps}$$

$$\text{activiteit} \quad A(^{42}\text{K}) = 5,9 \times 10^4 \text{ tps} / 3,2 \times 10^{-5} = 1,8 \times 10^9 \text{ Bq} = 1,8 \times 10^3 \text{ MBq}$$

4. bijdrage van ^{42}K tot kermatempo:

$$0,032 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 1,8 \times 10^3 \text{ MBq} / (50 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 230 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

bijdrage van ^{51}Cr tot kermatempo:

$$265 \mu\text{Gy h}^{-1} - 230 \mu\text{Gy h}^{-1} = 35 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$\text{activiteit} \quad A(^{51}\text{Cr}) = 35 \mu\text{Gy h}^{-1} \times (50 \times 10^{-2} \text{ m})^2 / 0,0042 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \\ = 2,1 \times 10^3 \text{ MBq}$$

5. 1 cm^2 huid wordt bereikt door een fractie $f_{\text{geom}} = 1 \text{ cm}^2 / [4\pi \times (50 \text{ cm})^2] = 3,2 \times 10^{-5}$ van de β -deeltjes
 volgens figuur 6 van de Appendix is $h_{\text{huid}} = 7 \times 10^{-10} \text{ Sv s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$
 $H_{\text{huid}} = h_{\text{huid}} \times f_{\text{geom}} \times A(42\text{K})$
 $= 7 \times 10^{-10} \text{ Sv s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 \times 3,2 \times 10^{-5} \text{ per cm}^2 \times 1,8 \times 10^9 \text{ Bq} = 4,0 \times 10^{-5} \text{ Sv s}^{-1} = 0,14 \text{ Sv h}^{-1}$
6. opstelling alzijdig afschermen met tenminste $R(3,5 \text{ MeV}) = 1,75 \text{ g cm}^{-2}$ kunststof
 (bijvoorbeeld 1,5 cm perspex)

Vraagstuk 23

1. 15 cm vanaf het oppervlak is $15 \text{ cm} + (30 \text{ cm} / 2) = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$ vanaf het centrum
 1 doos bevat $27 \text{ kg} \times 150 \text{ Bq kg}^{-1} = 4050 \text{ Bq} = 4,05 \times 10^{-3} \text{ MBq}$
 effectieve soortelijke massa is $\rho = 27 \text{ kg} \times 10^3 \text{ g kg}^{-1} / (30 \text{ cm})^3 = 1,0 \text{ g cm}^{-3}$
 $dK_1/dt = B e^{-(\mu/\rho)(d \times \rho)} \times (k A / r^2)$
 $= (1 + 0,2 \times 15) \times e^{-0,085 \times (15 \times 1)} \times 0,077 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 4,05 \times 10^{-3} \text{ MBq} / (0,3 \text{ m})^2$
 $= 3,9 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1}$
2. 15 cm vanaf het oppervlak is $15 \text{ cm} + 30 \text{ cm} + (30 \text{ cm} / 2) = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$ vanaf het centrum van de tweede doos
 dK_2/dt
 $= (1 + 0,2 \times 45) \times e^{-0,085 \times (45 \times 1)} \times 0,077 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 4,05 \times 10^{-3} \text{ MBq} / (0,6 \text{ m})^2$
 $= 1,9 \times 10^{-4} \mu\text{Gy h}^{-1}$
3. uitgezonden energie $= f_{\gamma} \times E_{\gamma}$
 $= (0,946 \times 0,898) \times 662 \text{ keV per Bq s} = 563 \text{ keV per Bq s}$
 uitgezonden energie per kg vlees $= 150 \text{ Bq kg}^{-1} \times 563 \text{ keV per Bq s} \times 1,6 \times 10^{-16} \text{ J keV}^{-1}$
 $= 1,35 \times 10^{-11} \text{ J kg}^{-1} \text{ per s} = 1,35 \times 10^{-11} \text{ Gy s}^{-1}$
 $dK_{\gamma}/dt = 0,5 \times 1,35 \times 10^{-11} \text{ Gy s}^{-1} = 6,8 \times 10^{-12} \text{ Gy s}^{-1} = 2,4 \times 10^{-2} \mu\text{Gy h}^{-1} = 24 \text{ nGy h}^{-1}$

Vraagstuk 24

1. aflezen figuur 1 bij 60 keV
 $\text{TLD}(\text{CaSO}_4) / K = 12000 \text{ sd R}^{-1} = 1200 \text{ sd mGy}^{-1}$
 $\text{TLD}(\text{CaSO}_4) = 1200 \text{ sd mGy}^{-1} \times 1 \text{ mGy} = 1200 \text{ sd}$
 $\text{TLD}(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7) / K = 900 \text{ sd R}^{-1} = 90 \text{ sd mGy}^{-1}$
 $\text{TLD}(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7) = 90 \text{ sd mGy}^{-1} \times 1 \text{ mGy} = 90 \text{ sd}$
2. aflezen van figuur 28 bij $E = 60 \text{ keV}$
 $H_p(10) / K = 1,9 \text{ mSv mGy}^{-1}$
 $H_p(10) = 1,9 \text{ mSv mGy}^{-1} \times 1 \text{ mGy} = 1,9 \text{ mSv}$
3. persoon P
 verhouding
 aflezen figuur 1
 $\text{TLD}(\text{CaSO}_4) / \text{TLD}(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7) = 85 \text{ sd} / 85 \text{ sd} = 1$
 $E_{\gamma} > 1 \text{ MeV}$
 $\text{TLD}(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7) / K = 1000 \text{ sd R}^{-1} = 100 \text{ sd mGy}^{-1}$
 aflezen figuur 28 bij $E > 1 \text{ MeV}$
 $H_p(10) / K = 1,1 \text{ Sv Gy}^{-1}$
 $H_p(10) = (85 \text{ sd} / 100 \text{ sd mGy}^{-1}) \times 1,1 \text{ Sv Gy}^{-1} = 0,94 \text{ mSv}$
- persoon Q
 verhouding
 aflezen figuur 1
 $\text{TLD}(\text{CaSO}_4) / \text{TLD}(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7) = 315 \text{ sd} / 35 \text{ sd} = 9$
 $E_{\gamma} \approx 85 \text{ keV}$
 $\text{TLD}(\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7) / K = 950 \text{ sd R}^{-1} = 95 \text{ sd mGy}^{-1}$
 aflezen figuur 28 bij $E = 85 \text{ keV}$
 $H_p(10) / K = 1,85 \text{ Sv Gy}^{-1}$
 $H_p(10) = (35 \text{ sd} / 95 \text{ sd mGy}^{-1}) \times 1,85 \text{ Sv Gy}^{-1} = 0,68 \text{ mSv}$

Vraagstuk 25

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

2. 20 cm $4,67 \mu\text{Gy min}^{-1} \times (10 \text{ cm} / 20 \text{ cm})^2 = 1,17 \mu\text{Gy min}^{-1}$
 30 cm $4,67 \mu\text{Gy min}^{-1} \times (10 \text{ cm} / 30 \text{ cm})^2 = 0,52 \mu\text{Gy min}^{-1}$
 40 cm $4,67 \mu\text{Gy min}^{-1} \times (10 \text{ cm} / 40 \text{ cm})^2 = 0,29 \mu\text{Gy min}^{-1}$
 50 cm $4,67 \mu\text{Gy min}^{-1} \times (10 \text{ cm} / 50 \text{ cm})^2 = 0,19 \mu\text{Gy min}^{-1}$
 60 cm $4,67 \mu\text{Gy min}^{-1} \times (10 \text{ cm} / 60 \text{ cm})^2 = 0,13 \mu\text{Gy min}^{-1}$
 verzwakking speelt kennelijk geen rol gezien de goede overeenstemming met de kwadratenwet
3. de helft van de uitgezonden β -deeltjes gaat naar de huid, dus
 $\phi = 1 \times 10^6 \text{ Bq cm}^{-2} / 2 = 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 $dD_{\text{huid}}/dt = 1,602 \times 10^{-10} \text{ Gy per MeV g}^{-1} \times 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 2 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$
 $= 1,6 \times 10^{-4} \text{ Gy s}^{-1} = 0,58 \text{ Gy h}^{-1}$
 voor β -deeltjes is $w_R = 1 \text{ Sv Gy}^{-1}$
 $dH_{\text{huid}}/dt = w_R \times dD_{\text{huid}}/dt = 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 0,58 \text{ Gy h}^{-1} = 0,58 \text{ Sv h}^{-1} = 580 \text{ mSv h}^{-1}$
 $dH_{\text{huid}}/dt = h_{\text{huid}} \times A(^{32}\text{P})$
 volgens figuur 3 van de Appendix is $h_{\text{huid}} = 6 \times 10^{-10} \text{ Sv s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2$
 hieruit volgt $dH_{\text{huid}}/dt = 6 \times 10^{-10} \text{ Sv s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 \times 1 \times 10^6 \text{ Bq cm}^{-2}$
 $= 6,0 \times 10^{-4} \text{ Sv s}^{-1} = 2,16 \text{ Sv h}^{-1} = 2160 \text{ mSv h}^{-1}$
4. uitgaande van formule voor D_{huid} $500 \text{ mSv} / 580 \text{ Sv h}^{-1} = 0,86 \text{ h} = 52 \text{ min}$
 uitgaande van h_{huid} $500 \text{ mSv} / 2160 \text{ Sv h}^{-1} = 0,23 \text{ h} = 14 \text{ min}$

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

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

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

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

$$\rightarrow \text{integraal} = -0,5 \times \ln[\cos(\alpha_{\text{max}})]$$

de halveringsdikte is $d_{1/2} \approx 0,1 R_{\beta, \text{max}} \approx 0,1 \times 0,5 E_{\beta, \text{max}} = 0,05 E_{\beta, \text{max}} \text{ cm}$

stel dat de huiddiepte d niet wordt bereikt als $d > d_{1/2} \times \cos(\alpha) / \ln(2)$

$$\rightarrow \cos(\alpha_{\text{max}}) = d \times \ln(2) / d_{1/2}$$

$$\rightarrow \text{integraal} = 0,5 \times \ln(0,072 E_{\beta, \text{max}} / d)$$

neem $E_{\beta, \text{max}}(^{32}\text{P}) = 1,710 \text{ MeV}$ en $d = 0,07 \text{ mm} = 0,007 \text{ cm}$ (ondiepe dosis)

$$\rightarrow \text{integraal} = 0,5 \times \ln(0,072 \times 1,710 / 0,007) = 0,5 \times 2,9 = 1,45 \text{ (= effectieve ruimtehoek)}$$

uitgaande van 1 Bq cm^{-2} wordt daarmee

$$h_{\text{huid}} = w_R \times 1,602 \times 10^{-10} \text{ Gy per MeV g}^{-1} \times \text{fluentietempo} \times S/\rho \times \text{integraal}$$

$$= 1,602 \times 10^{-10} \text{ Sv per MeV g}^{-1} \times 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 2 \text{ MeV per g cm}^{-2} \times 1,45$$

$$= 4,6 \times 10^{-10} \text{ Sv s}^{-1} \text{ per Bq cm}^{-2}$$

Vraagstuk 26

1. $H^*(10) = h A t / r^2$

zonder afscherming:

$$H^*(10)$$

$$= 0,0012 \text{ Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 20 \times 10^3 \text{ MBq} \times (45 \text{ min} / 60 \text{ min h}^{-1}) / (0,5 \text{ m})^2$$

$$= 72 \text{ } \mu\text{Sv}$$

met afscherming:

$$H^*(10) = 5 \times 10^{-2} \times 72 \text{ } \mu\text{Sv} = 3,6 \text{ } \mu\text{Sv}$$

2. ga uit van AP-geometrie (van voren naar achteren) omdat dit de meest waarschijnlijke geometrie is en bovendien de grootste conversiefactor levert

aflezen figuur 29 bij $E_\gamma = 84 \text{ keV} = 8,4 \times 10^{-2} \text{ MeV}$ $E(\text{AP}) / H^*(10) = 0,85$

effectieve dosis

$$E = 0,85 \times 3,6 \text{ } \mu\text{Sv} = 3,1 \text{ } \mu\text{Sv}$$

3. $H_{\text{huid}} = h_{\text{huid}} \times A(^{170}\text{Tm}) \times t$

$$= 5 \times 10^{-10} \text{ Sv s}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ cm}^2 \times 26 \times 10^3 \text{ Bq cm}^{-2} \times 8 \text{ h} \times 3600 \text{ s h}^{-1} = 0,37 \text{ Sv}$$

4. er ging heel veel mis

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

Vraagstuk 27

1. $E_{\beta, \text{max}} = 1390 \text{ keV} = 1,39 \text{ MeV}$

aflezen figuur 25

$$R(1,39 \text{ MeV}) = 620 \text{ mg cm}^{-2} = 6,2 \text{ kg m}^{-2}$$

minimale dikte

$$6,2 \text{ kg m}^{-2} / 2,7 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3} = 2,3 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,3 \text{ mm aluminium}$$

2. $dK/dt = \varphi \times (\mu_{\text{en}}/\rho) \times E_\gamma$

$$\varphi = 0,999 \times 37 \times 10^9 \text{ Bq} / [4\pi \times (1 \text{ m})^2] = 2,94 \times 10^9 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\mu_{\text{tr}}/\rho = 3,16 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} / 1,205 \text{ kg m}^{-3} = 2,62 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

$$E_\gamma = 1,37 \text{ MeV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J MeV}^{-1} = 2,19 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$dK(1,37 \text{ MeV})/dt = 2,94 \times 10^9 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 2,62 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \times 2,19 \times 10^{-13} \text{ J}$$
$$= 1,69 \times 10^{-6} \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1} = 1,69 \text{ } \mu\text{Gy s}^{-1} \text{ op 1 meter}$$

3. $dK/dt = \varphi \times (\mu_{\text{en}}/\rho) \times E_\gamma$

$$\varphi = 0,999 \times 37 \times 10^9 \text{ Bq} / [4\pi \times (1 \text{ m})^2] = 2,94 \times 10^9 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\mu_{\text{tr}}/\rho = 2,57 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} / 1,205 \text{ kg m}^{-3} = 2,13 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

$$E_\gamma = 2,75 \text{ MeV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J MeV}^{-1} = 4,40 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$dK(2,75 \text{ MeV})/dt = 2,94 \times 10^9 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 2,13 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \times 4,40 \times 10^{-13} \text{ J}$$
$$= 2,76 \times 10^{-6} \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1} = 2,76 \text{ } \mu\text{Gy s}^{-1} \text{ op 1 meter}$$

4. in beide richtingen lineair interpoleren in figuur 30:

1,37 MeV $\mu \times d = 6,1 \text{ m}^{-1} \times 2,0 \text{ m} = 12,2$

$$B(12,2) = 29,3$$

$$\text{verzwakking} = B e^{-\mu d} = 29,3 \times e^{-12,2} = 1,5 \times 10^{-4}$$

2,75 MeV $\mu \times d = 4,3 \text{ m}^{-1} \times 2,0 \text{ m} = 8,6$

$$B(8,6) = 8,3$$

$$\text{verzwakking} = B e^{-\mu d} = 8,3 \times e^{-8,6} = 1,5 \times 10^{-3}$$

verwaarloos verzwakking door lucht

totale afstand tot bron is 2 m water + 1 m lucht = 3 m

$$dK/dt = 1,5 \times 10^{-4} \times dK(1,37 \text{ MeV})/dt + 1,5 \times 10^{-3} \times dK(2,75 \text{ MeV})/dt$$

$$= 1,5 \times 10^{-4} \times (1,69 \text{ } \mu\text{Gy s}^{-1} / 3^2) + 1,5 \times 10^{-3} \times (2,76 \text{ } \mu\text{Gy s}^{-1} / 3^2)$$

$$= 2,8 \times 10^{-5} \text{ } \mu\text{Gy s}^{-1} + 4,6 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{Gy s}^{-1} = 4,9 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{Gy s}^{-1} = 1,8 \text{ } \mu\text{Gy h}^{-1}$$

Vraagstuk 28

$$1. \text{ kermatempo} = 40 \times 10^{-2} \times A \times k(^{51}\text{Cr}) + 60 \times 10^{-2} \times A \times k(^{60}\text{Co})$$

$$= (40 \times 10^{-2} \times 0,0042 \mu\text{Gy m}^2 \text{MBq}^{-1} \text{h}^{-1} + 60 \times 10^{-2} \times 0,31 \mu\text{Gy m}^2 \text{MBq}^{-1} \text{h}^{-1}) \times A$$

$$= 0,188 A \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ per MBq op 1 meter}$$

$$\text{gemeten } dK/dt = 50 \text{ mGy h}^{-1} = 5,0 \times 10^4 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$\text{activiteit } A = 5,0 \times 10^4 \mu\text{Gy h}^{-1} / 0,188 \mu\text{Gy h}^{-1} = 2,66 \times 10^5 \text{ MBq} = 266 \text{ GBq}$$

2. in beide richtingen lineair interpoleren in figuur 30:

$$0,32 \text{ MeV} \quad \mu \times d = 0,1164 \text{ cm}^2 \text{g}^{-1} \times 1 \text{ g cm}^{-3} \times 160 \text{ cm} = 18,6$$

$$B(18,6) = 684$$

$$\text{verzwakking} = B e^{-\mu d} = 684 \times e^{-18,6} = 5,7 \times 10^{-6}$$

$$1,33 \text{ MeV} \quad \mu \times d = 0,062 \text{ cm}^2 \text{g}^{-1} \times 1 \text{ g cm}^{-3} \times 160 \text{ cm} = 9,9$$

$$B(9,9) = 22,0$$

$$\text{verzwakking} = B e^{-\mu d} = 22,0 \times e^{-9,9} = 1,1 \times 10^{-3}$$

kermatempo op 160 cm = 1,6 m boven wateroppervlak:

$$dK_{0,32\text{MeV}}/dt$$

$$= 40 \times 10^{-2} \times 0,0042 \mu\text{Gy m}^2 \text{MBq}^{-1} \text{h}^{-1} \times 2,66 \times 10^5 \text{ MBq} \times 5,7 \times 10^{-6} / (1,6 \text{ m})^2$$

$$= 1,0 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$dK_{1,33\text{MeV}}/dt$$

$$= 60 \times 10^{-2} \times 0,31 \mu\text{Gy m}^2 \text{MBq}^{-1} \text{h}^{-1} \times 2,66 \times 10^5 \text{ MBq} \times 1,1 \times 10^{-3} / (1,6 \text{ m})^2$$

$$= 21 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$dK/dt = dK_{0,32\text{MeV}}/dt + dK_{1,33\text{MeV}}/dt = 1,0 \times 10^{-3} \mu\text{Gy h}^{-1} + 21 \mu\text{Gy h}^{-1} = 21 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

voldaan aan de eis

$$3. \text{ transporteis (1)} \quad k A T / d^2 < 2 \text{ mGy h}^{-1}$$

$$d = \sqrt{(k A T / 2 \text{ mGy h}^{-1})}$$

$$\text{transporteis (2)} \quad k A T / (d + 100 \text{ cm})^2 < 0,1 \text{ mGy h}^{-1}$$

$$d + 100 \text{ cm} = \sqrt{(k A T / 0,1 \text{ mGy h}^{-1})}$$

de twee vergelijkingen leiden tot dezelfde waarde van d als:

$$(d + 100 \text{ cm}) / d = \sqrt{(2 \text{ mGy/h} / 0,1 \text{ mGy/h})} = \sqrt{20} = 4,47$$

$$d + 100 \text{ cm} = 4,47 d$$

$$d = 100 \text{ cm} / (4,47 - 1) = 100 \text{ cm} / 3,47 = 29 \text{ cm}$$

als de ribbe $2 \times 29 \text{ cm} = 58 \text{ cm}$ is, leiden de twee transporteisen tot dezelfde afscherming

4. na 2 weken is $A(^{51}\text{Cr})$ met factor $e^{-0,693 \times (2 \times 7) / 27,71} = 0,70$ gedaald, terwijl $A(^{60}\text{Co})$ nagenoeg onveranderd is

de loodafscherming zal ongetwijfeld door ^{60}Co worden bepaald

de kist heeft een ribbe van 50 cm

dit is kleiner dan 58 cm, dus transporteis (1) is bepalend

op 50 cm / 2 = 25 cm (oppervlak)

$$\text{dosistempo} \quad 60 \times 10^{-2} \times 0,31 \mu\text{Gy m}^2 \text{MBq}^{-1} \text{h}^{-1} \times 2,66 \times 10^5 \text{ MBq} / (0,25 \text{ m})^2$$

$$= 7,9 \times 10^5 \mu\text{Gy h}^{-1} = 790 \text{ mGy h}^{-1}$$

$$\text{limiet} \quad 2 \text{ mGy h}^{-1}$$

$$\text{benodigde transmissie} \quad T = 2 \text{ mGy h}^{-1} / 790 \text{ mGy h}^{-1} = 2,5 \times 10^{-3}$$

$$\text{aflezen figuur 31} \quad 11 \text{ cm lood}$$

de transmissie van de γ -straling van ^{137}Cs (0,66 MeV) is ongeveer 2 ordes van grootte kleiner

de transmissie van de γ -straling van ^{51}Cr (0,32 MeV) zal nog veel kleiner zijn

controle dosistempo op 100 cm + (50 cm / 2) = 125 cm (= 1 m vanaf het oppervlak):

$$\text{dosistempo} = (25 \text{ cm} / 125 \text{ cm})^2 \times 2 \text{ mGy h}^{-1} = 0,08 \text{ mGy h}^{-1} < 0,1 \text{ mGy h}^{-1}$$

voldoet aan de transporteis (2)

Vraagstuk 29

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

2. aflezen figuur 1 bij 5 cm lood en nuclide A:

$$\text{transmissie} \quad T_A = 5,0 \times 10^{-3}$$

$$\text{afstand} \quad r = 1 \text{ m} + (0,40 \text{ m} / 2) = 1,2 \text{ m}$$

$$dH_A^*/dt = h A_A T_A / r^2$$

$$= 0,07 \mu\text{Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times A_A \text{ MBq} \times 5,0 \times 10^{-3} / (1,2 \text{ m})^2$$

$$= 2,4 \times 10^{-4} A_A \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$\text{gemeten waarde} \quad 80 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$\text{activiteit van A} \quad A_A = 80 \mu\text{Gy h}^{-1} / 2,4 \times 10^{-4} \mu\text{Gy h}^{-1} = 3,3 \times 10^5 \text{ MBq}$$

3. $T_{1/2,A} \gg 3 \text{ d} \gg T_{1/2,B}$

op moment van aflevering is B dus in evenwicht met A, terwijl A nauwelijks is vervallen de activiteit van B

$$A_B = A_A = 3,3 \times 10^5 \text{ MBq}$$

4. aflezen figuur 1 bij 5 cm lood en nuclide B:

$$\text{transmissie} \quad T_B = 8,0 \times 10^{-2}$$

dus H^* nagenoeg geheel bepaald door nuclide B

zonder afscherming op afstand van 1 m + (0,40 m / 2) = 1,2 m (1 m vanaf het oppervlak):

$$dH_B^*/dt = 0,23 \mu\text{Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 3,3 \times 10^5 \text{ MBq} / (1,2 \text{ m})^2$$

$$= 5,3 \times 10^4 \mu\text{Gy h}^{-1} = 53 \text{ mGy h}^{-1}$$

limiet

$$0,1 \text{ mSv/h}$$

benodigde transmissie

$$T_B = 0,1 \text{ mGy h}^{-1} / 53 \text{ mGy h}^{-1} = 1,9 \times 10^{-3}$$

aflezen figuur 1 bij $1,9 \times 10^{-3}$ en nuclide B

$$\text{wanddikte} = 12,2 \text{ cm lood}$$

zonder afscherming op afstand van 0,40 m / 2 = 0,2 m (op het oppervlak):

$$dH_B^*/dt = 0,23 \mu\text{Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 3,3 \times 10^5 \text{ MBq} / (0,2 \text{ m})^2$$

$$= 1,9 \times 10^6 \mu\text{Gy h}^{-1} = 1900 \text{ mGy h}^{-1}$$

benodigde transmissie

$$T_B = 2 \text{ mGy h}^{-1} / 1900 \text{ mGy h}^{-1} = 1,1 \times 10^{-3}$$

aflezen figuur 1 bij $1,1 \times 10^{-3}$ en nuclide B

$$\text{wanddikte} = 13,3 \text{ cm lood}$$

dus H^* op oppervlak is bepalend; afronden op hele centimeters geeft 14 cm lood

aflezen figuur 1 bij 14 cm lood en nuclide A

$$\text{transmissie} = T_A < 1,0 \times 10^{-6} \ll T_B$$

dus bijdrage nuclide A is verwaarloosbaar

5. binnenstraal lood = 1 cm buitenstraal lood = wanddikte + 1 cm

$$\text{massa} = (4\pi/3) \times (R_{\text{buiten}}^3 - R_{\text{binnen}}^3) \times \rho_{\text{lood}}$$

$$\rho_{\text{lood}} = 11\,359 \text{ kg m}^{-3} = 11,35 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\text{gebruikte container} \quad (4\pi/3) \times [(6 \text{ cm})^3 - (1 \text{ cm})^3] \times 11,35 \text{ g cm}^{-3} = 1,0 \times 10^4 \text{ g} = 10 \text{ kg}$$

$$\text{benodigde container} \quad (4\pi/3) \times [(15 \text{ cm})^3 - (1 \text{ cm})^3] \times 11,35 \text{ g cm}^{-3} = 1,6 \times 10^5 \text{ g} = 160 \text{ kg}$$

Vraagstuk 30

de buitenstraal van de container met een wanddikte d (in m) en een boring van 1 cm = 0,01 m

$$r = d + (0,01 \text{ m} / 2) = d + 0,005 \text{ m}$$

1. de wanddikte volgt uit:

$$dK/dt = k A T(d) / r^2$$

$$= 0,305 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 10 \text{ MBq} \times T(d) / (d + 0,005 \text{ m})^2$$

$$\leq 50 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$T(d) / (d + 0,005 \text{ m})^2 \leq 50 \mu\text{Gy h}^{-1} / (0,305 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 10 \text{ MBq}) = 16,4 \text{ m}^{-2}$$

de transmissie $T(d)$ volgt uit aflezen van figuur 1 voor lood:

$$d = 0,050 \text{ m}$$

$$T(5) = 7,5 \times 10^{-2}$$

$$T(5) / (0,050 \text{ m} + 0,005 \text{ m})^2 = 7,5 \times 10^{-2} / (0,055 \text{ m})^2 = 24,8 \text{ m}^{-2} > 16,4 \text{ m}^{-2}$$

$$d = 0,055 \text{ m}$$

$$T(5,5) = 5,8 \times 10^{-2}$$

$$T(5,5) / (0,055 \text{ m} + 0,005 \text{ m})^2 = 5,8 \times 10^{-2} / (0,060 \text{ m})^2 = 16,1 \text{ m}^{-2} < 16,4 \text{ m}^{-2}$$

$$d = 0,060 \text{ m}$$

$$T(6) = 4,4 \times 10^{-2}$$

$$T(6) / (0,060 \text{ m} + 0,005 \text{ m})^2 = 4,4 \times 10^{-2} / (0,065 \text{ m})^2 = 10,4 \text{ m}^{-2} < 16,4 \text{ m}^{-2}$$

dus $d(\text{Pb}) = 5,5 \text{ cm}$ is voldoende

2. het kerntempo aan het oppervlak van uranium is $20 \mu\text{Gy h}^{-1}$; de wanddikte volgt uit:

$$dK/dt = k A T(d) / r^2$$

$$= 0,305 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 10 \text{ MBq} \times T(d) / (d + 0,005 \text{ m})^2$$

$$\leq 50 \mu\text{Gy h}^{-1} - 20 \mu\text{Gy h}^{-1} = 30 \mu\text{Gy h}^{-1}$$

$$T(d) / (d + 0,005 \text{ m})^2 \leq 30 \mu\text{Gy/h} / (0,305 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 10 \text{ MBq}) = 9,8 \text{ m}^{-2}$$

de transmissie $T(d)$ volgt uit aflezen van figuur 1 voor uranium:

$$d = 0,030 \text{ m}$$

$$T(3) = 3,1 \times 10^{-2}$$

$$T(3) / (0,030 \text{ m} + 0,005 \text{ m})^2 = 3,1 \times 10^{-2} / (0,035 \text{ m})^2 = 25,3 \text{ m}^{-2} > 9,8 \text{ m}^{-2}$$

$$d = 0,035 \text{ m}$$

$$T(3,5) = 1,7 \times 10^{-2}$$

$$T(3,5) / (0,035 \text{ m} + 0,005 \text{ m})^2 = 1,7 \times 10^{-2} / (0,040 \text{ m})^2 = 10,6 \text{ m}^{-2} > 9,8 \text{ m}^{-2}$$

$$d = 0,040 \text{ m}$$

$$T(4) = 9,8 \times 10^{-3}$$

$$T(4) / (0,040 \text{ m} + 0,005 \text{ m})^2 = 9,8 \times 10^{-3} / (0,045 \text{ m})^2 = 4,8 \text{ m}^{-2} < 9,8 \text{ m}^{-2}$$

dus $d(\text{U}) = 4,0 \text{ cm}$ is voldoende

3. volume gehele container $V_{\text{buiten}} = \pi \times (d + 0,5 \text{ cm})^2 \times (10 \text{ cm} + 2 \times d)$
 volume van de holte $V_{\text{binnen}} = \pi \times (0,5 \text{ cm})^2 \times 10 \text{ cm} = 2,5\pi \text{ cm}^3$
 massa $M = (V_{\text{buiten}} - V_{\text{binnen}}) \times \rho$
 lood ($d = 5,5 \text{ cm}$) $M = \pi \times [(6,0 \text{ cm})^2 \times 21 \text{ cm} - 2,5 \text{ cm}^3] \times 11,35 \text{ g cm}^{-3}$
 $= 26,9 \times 10^3 \text{ g} = 26,9 \text{ kg}$
4. uraan ($d = 4 \text{ cm}$) $M = \pi \times [(4,5 \text{ cm})^2 \times 18 \text{ cm} - 2,5 \text{ cm}^3] \times 18,9 \text{ g cm}^{-3}$
 $= 21,5 \times 10^3 \text{ g} = 21,5 \text{ kg}$
5. $A = \lambda \times N = \lambda \times (\text{massa} / \text{atoomgewicht}) \times \text{abundantie} \times N_{\text{Avogadro}}$
 $\lambda(^{238}\text{U}) = 0,693 / (4,468 \times 10^9 \text{ j} \times 365 \text{ d j}^{-1} \times 24 \text{ h d}^{-1} \times 3600 \text{ s h}^{-1}) = 4,9 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$
 $A(^{238}\text{U}) = 4,9 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \times (21,5 \times 10^3 \text{ g} / 238,03 \text{ g mol}^{-1}) \times 99,75 \times 10^{-2} \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
 $= 2,66 \times 10^8 \text{ Bq} = 266 \text{ MBq}$
 $\lambda(^{235}\text{U}) = 0,693 / (7,038 \times 10^8 \text{ j} \times 365 \text{ d j}^{-1} \times 24 \text{ h d}^{-1} \times 3600 \text{ s h}^{-1}) = 3,1 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$
 $A(^{235}\text{U}) = 3,1 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1} \times (21,5 \times 10^3 \text{ g} / 238,03 \text{ g mol}^{-1}) \times 0,25 \times 10^{-2} \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
 $= 4,21 \times 10^6 \text{ Bq} = 4 \text{ MBq}$
 totale activiteit = $266 \text{ MBq} + 4 \text{ MBq} = 270 \text{ MBq}$

Vraagstuk 31

1. de vangst van $^{24}\text{Na}^+$ -ionen wordt beschreven door de differentiaalvergelijking:

$$dA/dt + \lambda A = P$$

$T_{1/2} = 14,96 \text{ h} = 0,09 \text{ week} \ll 1 \text{ week}$, dus na 1 week is er nagenoeg volledig evenwicht in de evenwichtssituatie is $dA/dt = 0$, dus $\lambda A_{\text{evenwicht}} = P$

$$P = 4,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \times 40 \text{ MBq m}^{-3} \times 95 \times 10^{-2} = 152 \text{ MBq h}^{-1}$$

$$\lambda = 0,693 / 14,96 \text{ h} = 0,046 \text{ h}^{-1}$$

$$A_{\text{evenwicht}} = P / \lambda = 152 \text{ MBq h}^{-1} / 0,046 \text{ h}^{-1} = 3,3 \times 10^3 \text{ MBq} = 3,3 \text{ GBq}$$

2. $dK/dt = 0,43 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 3,3 \times 10^3 \text{ MBq} / (2 \text{ m})^2 = 355 \mu\text{Gy h}^{-1}$
3. benodigde transmissie $T = 1 \mu\text{Gy/h} / 355 \mu\text{Gy/h} = 2,8 \times 10^{-3}$
 aflezen figuur 1 86 cm gewoon beton, of 55 cm barietbeton

Vraagstuk 32

1. $dK/dt = 0,077 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 1 \times 10^3 \text{ MBq} / (0,5 \text{ m})^2$
 $= 308 \mu\text{Gy h}^{-1} = 3,08 \times 10^{-4} \text{ Gy h}^{-1}$

$$\text{benodigde transmissie } T = 10 \mu\text{Gy h}^{-1} / 308 \mu\text{Gy h}^{-1} = 3,2 \times 10^{-2}$$

$$\text{aflezen figuur 31 } d = 3,3 \text{ cm}$$

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

3. $\phi = A \times f_y \times f_{\text{abs,beton}} \times f_{\text{abs,lood}} / (4\pi r^2)$
 beton $(\mu/\rho) \times (d \times \rho) = 7,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \times 20 \times 10^{-2} \text{ m} \times 2350 \text{ kg m}^{-3} = 3,62$
 $f_{\text{abs,beton}} = e^{-3,62} = 2,7 \times 10^{-2}$
 lood $(\mu/\rho) \times (d \times \rho) = 10,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \times 10 \times 10^{-2} \text{ m} \times 11350 \text{ kg m}^{-3} = 12,26$
 $f_{\text{abs,beton}} = e^{-12,26} = 4,7 \times 10^{-6}$
 $\phi = 1 \times 10^9 \text{ Bq} \times (0,946 \times 0,898) \times 2,7 \times 10^{-2} \times 4,7 \times 10^{-6} / [4\pi \times (5 \text{ m})^2] = 0,34 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
4. oppervlak detector $O = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2 = 0,010 \text{ m}^2$
 aantal fotonen op detector $dN/dt = \phi \times O = 0,34 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 0,010 \text{ m}^2 = 3,4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
 NaI $(\mu/\rho) \times (d \times \rho) = 7,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \times 10 \times 10^{-2} \text{ m} \times 3670 \text{ kg m}^{-3} = 2,79$
 detectorrendement
 $\varepsilon = (1 - \text{transmissie}) \times (\text{relatief fotopiekrendement})$
 $= (1 - e^{-2,79}) \times (60 / 100) = 0,56$
 teltempo $T = dN/dt \times \varepsilon = 3,4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \times 0,56 = 1,9 \times 10^{-3} \text{ tps} < 10^{-2} \text{ tps}$
 er is dus geen extra loodafscherming nodig

Vraagstuk 33

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

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

nu x oplossen uit de vergelijking $dK_{\text{strooi}}/dt < 10^{-2} \times dK_{\text{direct}}/dt$

$$5,1 / (7 \text{ m} - x)^2 < 10^{-2} \times 2,3 \times 10^4 / x^2 = 230 / x^2$$

$$x^2 / (7 \text{ m} - x)^2 < 230 / 5,1 = 45$$

$$x / (7 \text{ m} - x) < \sqrt{45} = 6,7$$

$$x < 6,7 \times (7 \text{ m} - x) = 47 \text{ m} - 6,7x$$

$$x < 47 \text{ m} / (1 + 6,7) = 47 \text{ m} / 7,7 = 6,1 \text{ m}$$

Vraagstuk 34

1. na transmissie door lood is er relatief weinig verstrooide straling in de bundel
 het doorgelaten spectrum is daarom nagenoeg gelijk aan het primaire spectrum van ⁶⁰Co

2. aflezen figuur 31 bij 10 cm lood $T_{\text{lood}} = 4,5 \times 10^{-3}$
 aflezen figuur 33 bij 50 cm beton $T_{\text{beton}} = 9,0 \times 10^{-3}$
 $dK/dt = k A T_{\text{lood}} T_{\text{beton}} / r^2$
 $= 0,305 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 1,5 \times 10^6 \text{ MBq} \times 4,5 \times 10^{-3} \times 9,0 \times 10^{-3} / (2,5 \text{ m})^2$
 $= 2,96 \mu\text{Gy h}^{-1}$
3. afstand tot muur 4 m
 kermt tempo op muur $dK_{\text{muur}}/dt = 0,305 \mu\text{Gy m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 1,5 \times 10^6 \text{ MBq} / (4 \text{ m})^2$
 $= 2,86 \times 10^4 \mu\text{Gy h}^{-1}$
- bundelvlak op 50 cm 100 cm²
 bundelvlak op muur $100 \text{ cm}^2 \times (4 \text{ m} / 0,5 \text{ m})^2 = 6,4 \times 10^3 \text{ cm}^2$
 verstrooihoek $180^\circ - \arctan(2,5 / 4,0) = 180^\circ - 32^\circ = 148^\circ$
 aflezen figuur 44 verstrooiingsfactor = 0,012% per 100 cm² op 1 m
 afstand vanaf muur $\sqrt{(4 \text{ m})^2 + (2,5 \text{ m})^2} = 4,7 \text{ m}$
 $dK_{\text{verstrooid}}/dt$
 $= dK_{\text{muur}}/dt \times \text{verstrooiingsfactor} \times (\text{bundelvlak op muur} / 100 \text{ cm}^2) \times (1 \text{ m} / r)^2$
 $= 2,86 \times 10^4 \mu\text{Gy h}^{-1} \times 0,012 \times 10^{-2} \times (6,4 \times 10^3 \text{ cm}^2 / 100 \text{ cm}^2) \times (1 \text{ m} / 4,7 \text{ m})^2$
 $= 9,9 \mu\text{Gy h}^{-1}$

Vraagstuk 35

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

3. kortste afstand tot parkeerterrein $5 \text{ m} + 10 \text{ m} = 15 \text{ m}$
maximale effectieve jaardosis:

$$\text{ID} = (\text{weeklimiet in punt B}) \times 50 \text{ wk j}^{-1} \times (5 \text{ m} / 15 \text{ m})^2 \\ = 0,02 \text{ mSv wk}^{-1} \times 50 \text{ wk j}^{-1} / 9 = 0,11 \text{ mSv j}^{-1}$$

maximale waarde AID:

$$\text{AID} = \text{ID} \times \text{ABC} = 0,11 \text{ mSv j}^{-1} \times 0,01 = 1,1 \times 10^{-3} \text{ mSv j}^{-1} = 1,1 \mu\text{Sv j}^{-1}$$

Vraagstuk 36

- aflezen figuur 2 bij 10 MeV 6 cm water
- stroomdichtheid $1 \text{ nA} / 10 \text{ cm}^2 = 1,0 \times 10^{-10} \text{ C s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
fluentietempo $1,0 \times 10^{-10} \text{ C s}^{-1} \text{ cm}^{-2} / 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} = 6,25 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
aflezen figuur 1 bij 10 MeV $4,2 \times 10^{-10} \text{ Sv cm}^2$
dosisequivalenttempo $6,25 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 4,2 \times 10^{-10} \text{ Sv cm}^2 = 0,26 \text{ Sv s}^{-1}$
- aflezen figuur 2 bij 30 MeV 17 cm water
aflezen figuur 1 bij 30 MeV $3,4 \times 10^{-10} \text{ Sv cm}^2$
dosisequivalenttempo $6,25 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 3,4 \times 10^{-10} \text{ Sv cm}^2 = 0,21 \text{ Sv s}^{-1}$
- aflezen figuur 3 bij 30 MV $700 \text{ rad } \mu\text{A}^{-1} \text{ min}^{-1} = 7 \text{ Gy } \mu\text{A}^{-1} \text{ min}^{-1} \text{ op } 1 \text{ m}$
benodigde bundeltijd $4 \text{ Gy} / 7 \text{ Gy } \mu\text{A}^{-1} \text{ min}^{-1} = 0,57 \mu\text{A min} = 0,57 \text{ min bij } 1 \mu\text{A}$
- weekdosis $200 \text{ wk}^{-1} \times 4 \text{ Gy} \times (1 \text{ m} / 5 \text{ m})^2 = 32 \text{ Gy wk}^{-1}$
benodigde transmissie $T = 0,04 \text{ mGy wk}^{-1} \times 10^{-3} \text{ Gy mGy}^{-1} / 32 \text{ Gy wk}^{-1} = 1,25 \times 10^{-6}$
aflezen figuur 39 31 cm lood
aflezen figuur 40 280 cm beton
- massa muur per m^2
lood $2,7 \text{ m} \times 11 \text{ 350 kg m}^{-3} = 30 \text{ 645 kg m}^{-2}$
beton $2,7 \text{ m} \times 2350 \text{ kg m}^{-3} = 6345 \text{ kg m}^{-2}$
vloerbelasting bij lood is groter dan de maximaal toegestane waarde van 10 000 kg m^{-2}
dus neem beton

Vraagstuk 37

- aflezen figuur 41 bij 100 kV en 2,5 mm Al $8 \text{ mGy per mA min op } 1 \text{ m}$
belichtingstijd $60 \text{ s} = 1 \text{ min}$
anodestroom $0,5 \text{ mA}$
primaire dosis $8 \text{ mGy per mA min} \times 0,5 \text{ mA} \times 1 \text{ min} / (1 \text{ m})^2 = 4 \text{ mGy op } 1 \text{ m}$
bundelvlak $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 600 \text{ cm}^2$
verstrooide dosis $\text{primaire dosis} \times \text{verstrooiingsfactor} \times (\text{bundelvlak} / 400 \text{ cm}^2)$
 $= 4 \text{ mGy} \times \text{verstrooiingsfactor} \times (600 \text{ cm}^2 / 400 \text{ cm}^2)$
 $= 6 \times \text{verstrooiingsfactor} \quad (\text{in mGy})$

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

- aflezen figuur 41 bij 80 kV en 2,5 mm Al $5,5 \text{ mGy per mA min op } 1 \text{ m}$
belichting $90 \text{ mA s} = 1,5 \text{ mA min}$
primaire dosis $D = 5,5 \text{ mGy per mA min} \times 1,5 \text{ mA min} \times (1 \text{ m} / 0,85 \text{ m})^2 = 11,4 \text{ mGy}$

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

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

* $w_T = 0,12 / 13 = 0,00923$

$w_T = 0,12$ gewogen met factor 210 g / 370 g = 0,57 respectievelijk 160 g / 370 g = 0,43

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

Vraagstuk 38

- aflezen onderschrift figuur 43 bij 300 kV 20,9 mGy per mA min op 1 m
 buisstroom 10 mA
 afstand 5 m
 kermatempo $\frac{dK_{\text{lucht}}}{dt} = 20,9 \text{ mGy per mA min} \times 10 \text{ mA} \times (1 \text{ m} / 5 \text{ m})^2$
 $= 8,4 \text{ mGy min}^{-1}$
 aflezen figuur 26 bij 300 keV $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}} = (\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{lucht}} = 0,00287 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$
 dosistempo $\frac{dD_{\text{lucht}}}{dt} = \frac{dK_{\text{lucht}}}{dt} \times (\mu_{\text{en}}/\mu_{\text{tr}})_{\text{lucht}}$
 $= 8,4 \text{ mGy min}^{-1} \times 1 = 8,4 \text{ mGy min}^{-1}$
- aflezen figuur 26 bij 300 keV $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{weefsel}} = 0,00315 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$
 dosistempo $\frac{dD_{\text{weefsel}}}{dt} = \frac{dD_{\text{lucht}}}{dt} \times (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{weefsel}} / (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}$
 $= 8,4 \text{ mGy min}^{-1} \times 0,00315 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} / 0,00287 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$
 $= 9,2 \text{ mGy min}^{-1}$
- bij vraag 2 is de waarde $D_{\text{weefsel}} = 9,2 \text{ mGy}$ berekend voor $10 \text{ mA} \times 1 \text{ min} = 10 \text{ mA min}$
 work load $W = 10 \text{ 000 mA min wk}^{-1} \times 50 \text{ wk j}^{-1} = 5 \times 10^5 \text{ mA min}$
 use factor $U = 0,5$
 occupancy factor $T = 1$
 dosis $(W U T / 10 \text{ mA min}) \times D_{\text{weefsel}}$
 $= (5 \times 10^5 \text{ mA min} \times 0,5 \times 1 / 10 \text{ mA min}) \times 9,2 \text{ mGy}$
 $= 2,3 \times 10^5 \text{ mGy j}^{-1}$
 wettelijke jaarlimiet $1 \text{ mSv j}^{-1} / 1 \text{ Sv Gy}^{-1} = 1 \text{ mGy j}^{-1}$
 benodigde transmissie $1 \text{ mGy j}^{-1} / 2,3 \times 10^5 \text{ mGy j}^{-1} = 4,3 \times 10^{-6}$
 gewenste opbrengst $4,3 \times 10^{-6} \times 20,9 \text{ mGy per mA min} = 9,0 \times 10^{-5} \text{ mGy per mA min}$
 aflezen figuur 43 bij 300 kV en $9,0 \times 10^{-5} \text{ mGy per mA min}$ geeft 52 cm beton

Vraagstuk 39

1. volgens onderschrift figuur 42 is bij 100 kV de opbrengst 9,6 mGy per mA min op 1 m
work load per jaar $W = 12,5 \times 10^3 \text{ mA min wk}^{-1} \times 50 \text{ wk j}^{-1} = 6,25 \times 10^5 \text{ mA min}$
 afstand $r = 2 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 2,5 \text{ m}$

kerma in lucht

$$K_{\text{lucht}} = 9,6 \text{ mGy per mA min} \times 6,25 \times 10^5 \text{ mA min} \times (1 \text{ m} / 2,5 \text{ m})^2 = 9,6 \times 10^5 \text{ mGy}$$

$$\text{effectieve jaardosis} \quad E \approx 9,6 \times 10^5 \text{ mGy} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} = 9,6 \times 10^5 \text{ mSv}$$

$$\text{benodigde transmissie} \quad 1 \text{ mSv} / 9,6 \times 10^5 \text{ mSv} = 1,0 \times 10^{-6}$$

aflezen figuur 2 bij 100 kV geeft 31 cm beton (naar boven afgerond op hele cm)

2. afstand tot muur $r = 2 \text{ m}$

primaire kerma

$$K_p = 9,6 \text{ mGy per mA min} \times 6,25 \times 10^5 \text{ mA min} \times (1 \text{ m} / 2 \text{ m})^2 = 1,5 \times 10^6 \text{ mGy}$$

$$\text{bundelvlak} \quad O = 2 \times 10^3 \text{ cm}^2$$

$$\text{aflezen figuur 44 bij } 180^\circ \quad C_{\text{verstrooi}} = 0,072 \times 10^{-2} \text{ per } 100 \text{ cm}^2 \text{ op } 1 \text{ m}$$

$$\text{afstand vanaf muur} \quad r = 2 \text{ m} + 2 \text{ m} + 1 \text{ m} = 5 \text{ m}$$

verstrooide kerma

$$K_{\text{verstrooid}} = K_p \times C_{\text{verstrooi}} \times (O / 100 \text{ cm}^2) \times (1 \text{ m} / r)^2 \\ = 1,5 \times 10^6 \text{ mGy} \times 0,072 \times 10^{-2} \times (2 \times 10^3 \text{ cm}^2 / 100 \text{ cm}^2) \times (1 \text{ m} / 5 \text{ m})^2 = 8,6 \times 10^2$$

mGy

$$\text{effectieve jaardosis} \quad E \approx 8,6 \times 10^2 \text{ mGy} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} = 8,6 \times 10^2 \text{ mSv}$$

$$\text{benodigde transmissie} \quad 1 \text{ mSv} / 8,6 \times 10^2 \text{ mSv} = 1,2 \times 10^{-3}$$

aflezen figuur 2 bij 70 kV geeft 8 cm beton

3. voor deur moet dezelfde transmissie gelden als gevonden bij vraag 2, maar nu voor lood
 volgens onderschrift figuur 42 is bij 75 kV de opbrengst 6,1 mGy per mA min op 1 m
 gewenste opbrengst is dus $1,2 \times 10^{-3} \times 6,1 \text{ mGy per mA min} = 7,3 \times 10^{-3} \text{ mGy per mA min}$
 aflezen figuur 42 bij 75 keV en $7,3 \times 10^{-3} \text{ mGy per mA min}$ geeft 0,07 cm lood

Vraagstuk 40

1. flux $1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$
 afstand tot trefplaat $r = 5 \text{ m} = 500 \text{ cm}$
 fluentietempo = fluxdichtheid $d\Phi/dt = \varphi = \text{flux} / (4\pi r^2)$
 $= 1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1} / [4\pi \times (500 \text{ cm})^2]$
 $= 3,2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
2. aflezen figuur 2 bij 14 MeV $H^* / \Phi = 520 \text{ pSv cm}^2$
 omgevingsdosisequivalenttempo $dH^*/dt = 520 \text{ pSv cm}^2 \times d\Phi/dt = 520 \text{ pSv cm}^2 \times \varphi$
 $= 520 \text{ pSv cm}^2 \times 3,2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 $= 1,66 \times 10^7 \text{ pSv s}^{-1} = 6,0 \times 10^{10} \text{ pSv h}^{-1} = 6,0 \times 10^4 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$
3. transmissie van beton $T_{\text{beton}} = 6,6e^{-d/13}$
 benodigde transmissie $1 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1} / 6,0 \times 10^4 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1} = 1,7 \times 10^{-5} = 6,6e^{-d/13}$
 benodigde dikte beton $d = 13 \text{ cm} \times \ln(6,6 / 1,7 \times 10^{-5}) = 13 \text{ cm} \times 12,9 = 168 \text{ cm}$
 (naar boven afgerond op hele cm)

er is al een muur van 25 cm beton, er ontbreekt dus $168 \text{ cm} - 25 \text{ cm} = 143 \text{ cm}$ beton
 dit kan vervangen worden door $2 \times 143 \text{ cm} = 286 \text{ cm}$ aarde

4. transmissie muur $T_{\text{muur}} = 6,6e^{-150/13} = 6,4 \times 10^{-5}$
 afstand tot trefplaat $r = 10 \text{ cm} + 150 \text{ cm} = 160 \text{ cm}$
 fluentietempo = fluxdichtheid $d\Phi/dt = \varphi = \text{flux} \times T_{\text{muur}} / (4\pi r^2)$
 $= 1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1} \times 6,4 \times 10^{-5} / [4\pi \times (160 \text{ cm})^2]$
 $= 20 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

omgevingsdosisequivalenttempo

$$dH^*/dt = 520 \text{ pSv cm}^2 \times d\Phi/dt = 520 \text{ pSv cm}^2 \times \varphi = 520 \text{ pSv cm}^2 \times 20 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

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

de afscherming is dus onvoldoende

INWENDIGE BESMETTING

Formules gebruikt bij de dosimetrie van inwendige besmetting

De retentie wordt beschreven door een som van exponentiële functies:

$$R(t) = C_1 e^{-0,693 t/T_{1/2,1}} + C_2 e^{-0,693 t/T_{1/2,2}} + \dots + C_n e^{-0,693 t/T_{1/2,n}}$$

$$\text{met } \sum_n C_n = 1$$

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

Het aantal desintegraties in bronorgaan S :

$$U_S = f_1 C_S A_S(0) \int_{t_0}^{t_0+50} e^{-0,693 t/T_{1/2}^{\text{eff}}} dt \approx f_1 C_S A_S(0) T_{1/2}^{\text{eff}} / 0,693 \quad (\text{Bq s})$$

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

$$\frac{1}{T_{1/2}^{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{1/2}^{\text{biol}}} + \frac{1}{T_{1/2}^{\text{fys}}}$$

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

$$\begin{aligned} \text{SEE}(T \leftarrow S) &= Y \times E \times \text{SAF}(T \leftarrow S) \quad (\text{MeV g}^{-1}) \\ \text{SAF}(T \leftarrow S) &= \text{AF}(T \leftarrow S) / m_T \quad (\text{g}^{-1}) \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

$$E_{50} = \sum_T w_T H_{50,T} \quad (\text{Sv})$$

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

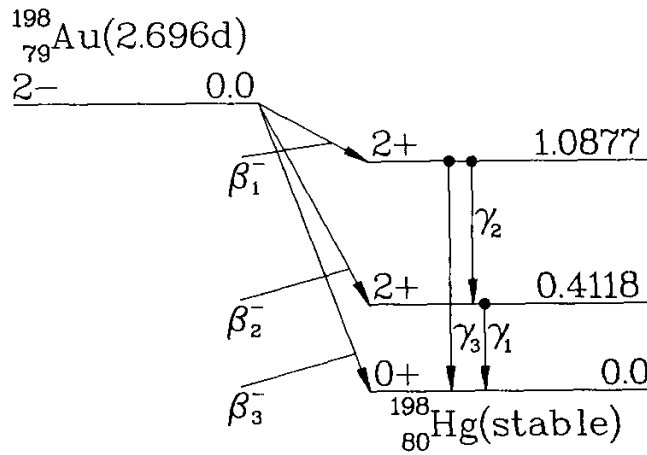
Ten gevolge van inwendige besmetting bevindt zich op een gegeven moment 1,0 MBq ^{198}Au in de lever.

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het aantal desintegraties U_s in de lever (in Bq s).
2. Bereken de gemiddelde energie die per desintegratie in de lever wordt gedeponeerd (in MeV per Bq s).
3. Bereken de specifieke effectieve energie $SEE(\text{lever} \leftarrow \text{lever})$.
4. Bereken de equivalente volg dosis $H_T(50)$ in de lever.



79-GOLD-198

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

22-DEC-78

RADIATION	y(i) (Bq-s) ⁻¹	E(i) (MeV)	y(i) × E(i)
β^- 1	1.30E-02	7.982E-02*	1.04E-03
β^- 2	9.87E-01	3.150E-01*	3.11E-01
γ 1	9.55E-01	4.118E-01	3.93E-01
ce-K, γ 1	2.88E-02	3.287E-01	9.46E-03
ce-L ₁ , γ 1	4.07E-03	3.970E-01	1.61E-03
ce-L ₂ , γ 1	4.29E-03	3.976E-01	1.71E-03
ce-L ₃ , γ 1	1.84E-03	3.995E-01	7.37E-04
ce-M, γ 1	2.54E-03	4.089E-01*	1.04E-03
γ 2	1.06E-02	6.759E-01	7.16E-03
γ 3	2.29E-03	1.088E 00	2.49E-03
K α_1 X-ray	1.38E-02	7.082E-02	9.75E-04
K α_2 X-ray	8.10E-03	6.889E-02	5.58E-04

LISTED X, γ AND γ_{\pm} RADIATIONS	4.04E-01
OMITTED X, γ AND γ_{\pm} RADIATIONS**	6.32E-04
LISTED β , ce AND Auger RADIATIONS	3.26E-01
OMITTED β , ce AND Auger RADIATIONS**	1.02E-03
LISTED RADIATIONS	7.31E-01
OMITTED RADIATIONS**	1.66E-03

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

Figuur 1. Radioactief verval van ¹⁹⁸Au.

42. ^{87}Rb in voedsel

(1993-2-1)

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de specifieke activiteit van het element Rb (in Bq g^{-1}).
2. Bereken de jaarlijkse inname via ingestie van ^{87}Rb (in Bq).
3. Bereken de effectieve volg dosis uitgaande van de gegeven waarde van $e_{\text{ing}}(50)$.
4. Bereken de evenwichtsactiviteit van ^{87}Rb in het lichaam ten gevolge van de jaarlijkse inname.
5. Bereken het aantal desintegraties U_S in het lichaam per Bq inname.
6. Bereken de specifieke effectieve energie SEE .
7. Bereken $e_{\text{ing}}(50)$ uitgaande van de bij vraag 5 en 6 gevonden waarden van U_S en SEE .

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het aantal desintegraties U_s (in Bq s) per Bq ingestie.
2. Bereken de specifieke effectieve energie SEE (in MeV g^{-1} per Bq s).
3. Bereken de effectieve volg dosis E_{50} per Bq ingestie, uitgaande van de bij vraag 1 en vraag 2 gevonden waarden van U_s en SEE .
4. Waaraan is het verschil tussen E_{50} en $e_{\text{ing}}(50)$ toe te schrijven?

44. Berekening van $e(50)$ van ^{35}S voor een baby

(1980-1-3)

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

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

Gegeven:

- $T_{1/2}(^{35}\text{S}) = 87,44 \text{ d}$
- ^{35}S zendt uitsluitend β -deeltjes uit met een gemiddelde energie van $0,049 \text{ MeV}$
- zwavel verdeelt zich homogeen over het gehele lichaam
- de uitscheiding van zwavel wordt beschreven door een enkele exponentiële functie
- volgens ICRP-56 is $f_1 = 1$ voor een 3 maanden oude baby; ga er in dit vraagstuk vanuit dat dit ook geldt voor een baby van 6 maanden
- voor een referentiebaby geldt: massa van het lichaam is 7700 g , zwavelgehalte van het lichaam is 500 mg kg^{-1} , melkconsumptie is 700 g per etmaal, en zwavelgehalte van melk is 140 mg kg^{-1} melk
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat het gewicht van de baby, de melkconsumptie en de zwavelopname constant zijn

Vragen:

1. Bereken de biologische halfwaardetijd van zwavel in het lichaam voor deze groep zuigelingen.
2. Bereken het aantal desintegraties U_S in het lichaam per Bq inname.
3. Bereken de specifieke effectieve energie SEE .
4. Bereken $e_{\text{ing}}(50)$ van ^{35}S voor deze groep zuigelingen, uitgaande van de bij vraag 2 en 3 gevonden waarden van U_S en SEE . Vergelijk het verkregen resultaat met de effectieve dosiscoëfficiënt voor volwassenen (zie Appendix, figuur 4).

45. Berekening van $e(50)$ van ^3H voor een volwassene

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het aantal desintegraties U_s per Bq inhalatie.
2. Bereken de specifieke effectieve energie SEE .
3. Bereken $e_{\text{inh}}(50)$ uitgaande van de bij vraag 1 en 2 gevonden waarden van U_s en SEE .

46. Berekening van $e(50)$ van ^3H voor een kind

(1991-2-4)

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

Gegeven:

- $T_{1/2}(^3\text{H}) = 12,35 \text{ j}$
- ^3H zendt uitsluitend β -deeltjes uit met een gemiddelde energie van 0,0057 MeV
- tritiumoxide verdeelt zich vrijwel onmiddellijk homogeen over het gehele lichaam
- het metabole model van een eenjarig kind bestaat uit twee compartimenten die beide het hele lichaam omvatten; de verdeling over deze compartimenten is als volgt: 97% met een biologische halveringstijd van 3,5 d en 3% met een biologische halveringstijd van 15 d
- de massa van een eenjarig referentiekind bedraagt 9800 g

Vragen:

1. Bereken het aantal desintegraties U_s in het lichaam van een eenjarig kind per Bq ingestie.
2. Bereken de specifieke effectieve energie SEE .
3. Bereken $e_{\text{ing}}(50)$ voor een eenjarig kind, uitgaande van de bij vraag 1 en 2 gevonden waarden van U_s en SEE . Vergelijk het verkregen resultaat met de effectieve dosiscoëfficiënt voor volwassenen (zie Appendix, figuur 1).

47. Inhalatie van getritieerd waterdamp

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

Gegeven:

- het debiet van de ventilatie bedraagt 2000 m³ per uur
- ga in dit vraagstuk uit van een ademtempo van 1,2 m³ h⁻¹
- bij een ademtempo van 1,2 m³ h⁻¹ is de effectieve inname 50% groter dan de geïnhaleerde activiteit als gevolg van opname van tritium via de huid
- de waterbalans van de referentiemens:
 - 1,4 l d⁻¹ urine
 - 0,65 l d⁻¹ zweet
 - 0,95 l d⁻¹ overig vocht
- de effectieve dosiscoëfficiënt voor inhalatie is $e_{\text{inh}}(50) = 1,8 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1}$

Vragen:

1. Bereken de effectieve volg dosis van een werknemer die 2000 uur per jaar in de hal werkt.
2. Bereken de activiteitsconcentratie van tritium in de urine van deze werknemer.

48. Inwendige besmetting met ^3H

(1987-2-2)

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

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

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

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

Gegeven:

- $T_{1/2}(^3\text{H}) = 12,35 \text{ j}$
- de standaardmens bevat 42 l lichaamswater
- de waterbalans van de referentiemens:
 - 1,4 l d⁻¹ urine
 - 0,65 l d⁻¹ zweet
 - 0,95 l d⁻¹ overig vocht
- de effectieve dosiscoëfficiënt is $e(50) = 1,8 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1}$

Vragen:

1. Bereken de activiteitsconcentratie in Bq ml⁻¹, zet deze waarden uit op enkel-logaritmisch grafiekpapier en bepaal de effectieve halveringstijd.
2. Bereken de jaarlijkse effectieve volg dosis voor de verwijdering van het horloge, aangenomen dat de evenwichtstoestand was ingetreden voordat het horloge werd afgedaan.
3. Bereken de effectieve volg dosis in het geval dat deze meting betrekking had op een eenmalige inname vlak voor de productie van het eerste urinemonster.

49. Tritiumoxide in de lucht

(1985-2-3)

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

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

Gegeven:

- bij 24 °C bevat verzadigde lucht 22 g water per m³ lucht
- de vloeistofscintillatieteller heeft in het tritiumkanaal een nuleffect van 20 tpm
- het telrendement voor tritium bedraagt 25%
- ga in dit vraagstuk uit van een ademtempo van 1,2 m³ h⁻¹
- bij een ademtempo van 1,2 m³ h⁻¹ is de effectieve inname 50% groter dan de geïnhalerde activiteit als gevolg van opname van tritium via de huid
- de standaardmens bevat 42 l lichaamswater
- de effectieve dosiscoëfficiënt voor inhalatie is $e_{inh}(50) = 1,8 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1}$
- bij continue inname van tritium en een lichaamsactiviteit van 1 Bq bedraagt de effectieve volg dosis $4,4 \times 10^{-10} \text{ Sv j}^{-1}$

Vragen:

1. Bereken de activiteitsconcentratie in het uitgevroren water (in Bq ml⁻¹).
2. Bereken de activiteitsconcentratie in de lucht (in Bq m⁻³).
3. Bereken de effectieve volg dosis die de dierenverzorger oploopt als hij 2000 uur per jaar in de dierenstal werkt.
4. Bereken de gemiddelde tritiumconcentratie in de urine van deze werknemer.
5. Bereken de totale tritiumactiviteit in het lichaam van deze werknemer.
6. Bereken de jaarlijkse effectieve volg dosis uitgaande van een continue inname van tritium.

50. Inwendige besmetting met ^{32}P

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

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Stel de retentieformule op.
2. Bereken de effectieve volg dosis als gevolg van inhalatie op basis van de urinemetingen.
3. Bereken de effectieve volg dosis als gevolg van inhalatie op basis van de faecesmeting.
4. Bereken de maximale volg dosis die per jaar onopgemerkt kan worden ontvangen.

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de biologische halveringstijd van HCl uitgaande van de gemeten activiteitsconcentraties in de urine.
2. Bereken de hoeveelheid activiteit die is ingeademd.
3. Bereken de effectieve volgdosis.

52. Ongeval met ^{51}Cr -poeder

(1997-2-4)

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

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bepaal de klasse (F, M of S) van de betreffende verbinding uitgaande van de longmetingen.
2. Bereken de ingenomen activiteit.
3. Bereken de effectieve volgdosis.

53. Injectie met ^{67}Ga -citraat

(1997-1-2)

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

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Maak een schatting van de effectieve volg dosis die een volwassen persoon bij een normaal galliumonderzoek ontvangt.
2. Welke activiteit is er op het tijdstip van de opname nog in de patiënt aanwezig?
3. Maak een schatting van de effectieve volg dosis voor de verpleegkundige.

54. Toediening van ^{99m}Tc -fosfonaat

(1999-1-3)

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

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

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken de effectieve volg dosis ten gevolge van een botonderzoek met ^{99m}Tc voor een patiënt met een normale nierfunctie.
2. Beredeneer of de effectieve volg dosis voor de dialysepatiënt hoger dan wel lager wordt wanneer het botonderzoek, inclusief injectie, vlak na de dialyse plaatsvindt, in tegenstelling tot het hier boven beschreven protocol.

55. Ingestie van ^{137}Cs

(1987-1-4)

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Toon aan dat na een jaar 90% van de verzadigingsconcentratie is bereikt.
2. Bereken de dagelijkse inname uitgaande van de gemeten ^{137}Cs -activiteit in het lichaam.
3. Wat is de effectieve volg dosis ten gevolge van een jaar lang dagelijkse inname?

56. Inwendige besmetting met ^{195m}Pt

(1991-1-2)

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

Gegeven:

- $T_{1/2}(^{195m}\text{Pt}) = 4,02 \text{ d}$
- in dit vraagstuk wordt gesteld dat $\text{AMAD} = 1 \mu\text{m}$
- de retentieformule is $R(t) = 0,20 e^{-0,693 t/0,25} + 0,76 e^{-0,693 t/8} + 0,04 e^{-0,693 t/200}$ (alle biologische halveringstijden in d)
- voor alle verbindingen is $f_1 = 0,01$
- alle verbindingen behoren tot klasse F
- longdepositiefracties voor een normale neusademmer (zie Appendix, figuur 50)
- de effectieve dosiscoëfficiënten zijn $e_{\text{ing}}(50) = 6,3 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1}$ en $e_{\text{inh}}(50) = 1,9 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1}$

Vragen:

1. Maak een schatting van de effectieve volg dosis indien de inname het gevolg was van ingestie.
2. Maak een schatting van de effectieve volg dosis indien de inname het gevolg was van inhalatie.

57. Incident met een ^{241}Am -bron

(2000-1-3)

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

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

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

<i>tijdstip (d)</i>	<i>activiteit (Bq d⁻¹)</i>
1	0,22
2	0,16
3	0,11

Gegeven:

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

Vragen:

1. Maak een schatting van de effectieve volg dosis indien de inname het gevolg was van ingestie.
2. Maak een schatting van de effectieve volg dosis indien de inname het gevolg was van inhalatie.

58. Bepaling van ^{241}Am in de urine

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Maak een schatting van de inname en de effectieve volg dosis bij ingestie.
2. Maak een schatting van de inname en de effectieve volg dosis bij inhalatie uitgaande van een AMAD van $1 \mu\text{m}$.
3. Maak een schatting van de inname en de effectieve volg dosis bij inhalatie uitgaande van een AMAD van $5 \mu\text{m}$.

59. Lekkende cilinder met ^{85}Kr

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

Gegeven:

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

Vragen:

1. Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo in deze ruimte.

60. ⁸⁵Kr-concentratie in de buitenlucht

(1989-1-4)

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

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

Gegeven:

- een aantal stralingshygiënische gegevens van ⁸⁵Kr (zie Appendix, figuur 13)
- de buitenlucht bevat 4,2 mg krypton per m³
- de massa van het kryptonmonster bedraagt 8,0 g
- het telrendement in de fotopiek bedraagt $2,5 \times 10^{-3}$ telpulsen per desintegratie
- de orgaanweegfactoren (zie Appendix, figuur 47)
- volgens het submersiemodel wordt het equivalente dosistempo ten gevolge van een half-oneindige radioactieve gaswolk gegeven door de formule:

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

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

Vragen:

1. Bereken de ⁸⁵Kr-concentratie in de buitenlucht.
2. Bereken de effectieve dosis voor personen buitenshuis voor 2000 uren per jaar uitgaande van de effectieve dosiscoëfficiënt voor submersie.
3. Bereken de effectieve dosis voor personen buitenshuis voor 2000 uren per jaar uitgaande van de hier boven gegeven formule voor $H_{\text{submersie}}$. Verklaar het verschil met het resultaat van vraag 2.
4. Maak een schatting van de equivalente huiddosis voor personen buitenshuis voor 2000 uren per jaar.

Uitwerkingen

Vraagstuk 41

- $$1 / T_{1/2, \text{eff}} = 1 / T_{1/2, \text{fys}} + 1 / T_{1/2, \text{biol}}$$

$$= (1 / 2,696 \text{ d}) + (1 / 3 \text{ d}) = 0,704 \text{ d}^{-1}$$

$$T_{1/2, \text{eff}} = 1,42 \text{ d} = 1,23 \times 10^5 \text{ s}$$

$$U_S = A \times T_{1/2, \text{eff}} / 0,693$$

$$= 1 \times 10^6 \text{ Bq} \times 1,23 \times 10^5 \text{ s} / 0,693 = 1,77 \times 10^{11} \text{ Bq s}$$
- volgens Appendix, figuur 46 $m_{\text{lever}} = 1800 \text{ g}$

$\langle E \rangle = \sum Y \times E \times AF(\text{lever} \leftarrow \text{lever})$

$AF(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) = SAF(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) \times m_{\text{lever}}$

elektronen: $AF(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) = 1$
 volgens figuur 1, "listed radiations" is $\sum Y_i \times E_i = 3,26 \times 10^{-1} \text{ MeV per Bq s}$
 $\langle E_\beta \rangle = 3,26 \times 10^{-1} \text{ MeV per Bq s} \times 1 = 0,326 \text{ MeV per Bq s}$

fotonen: volgens figuur 1

$E_{\gamma 1} = 0,4118 \text{ MeV}$	$Y_{\gamma 1} \times E_{\gamma 1} = 3,93 \times 10^{-1} \text{ MeV per Bq s}$
$E_{\gamma 2} = 0,6759 \text{ MeV}$	$Y_{\gamma 2} \times E_{\gamma 2} = 7,16 \times 10^{-3} \text{ MeV per Bq s}$
$E_{\gamma 3} = 1,088 \text{ MeV}$	$Y_{\gamma 3} \times E_{\gamma 3} = 2,49 \times 10^{-3} \text{ MeV per Bq s}$

lineair interpoleren in Appendix, figuur 48

412 keV	$SAF(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) = 8,84 \times 10^{-5} \text{ g}^{-1}$
	$AF = 8,84 \times 10^{-5} \text{ g}^{-1} \times 1800 \text{ g} = 0,159$
676 keV	$SAF(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) = 8,58 \times 10^{-5} \text{ g}^{-1}$
	$AF = 8,58 \times 10^{-5} \text{ g}^{-1} \times 1800 \text{ g} = 0,154$
1088 keV	$SAF(\text{lever} \leftarrow \text{lever}) = 7,97 \times 10^{-5} \text{ g}^{-1}$
	$AF = 7,97 \times 10^{-5} \text{ g}^{-1} \times 1800 \text{ g} = 0,143$

$\langle E_\gamma \rangle = \sum Y \times E \times AF$

$$= 3,93 \times 10^{-1} \text{ MeV per Bq s} \times 0,159 +$$

$$7,16 \times 10^{-3} \text{ MeV per Bq s} \times 0,154 +$$

$$2,49 \times 10^{-3} \text{ MeV per Bq s} \times 0,143 = 0,064 \text{ MeV per Bq s}$$

totaal $\langle E \rangle = \langle E_\beta \rangle + \langle E_\gamma \rangle = 0,326 \text{ MeV per Bq s} + 0,064 \text{ MeV per Bq s}$
 $= 0,390 \text{ MeV per Bq s}$
- $SEE = \langle E \rangle / m_{\text{lever}}$
 $= 1 \times 0,390 \text{ MeV per Bq s} / 1800 \text{ g} = 2,22 \times 10^{-4} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$
- $H_{50, T} = 1,6 \times 10^{-10} \times U_S \times w_R \times SEE$
 $= 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times 1,77 \times 10^{11} \text{ Bq s} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 2,22 \times 10^{-4} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$
 $= 6,3 \times 10^{-3} \text{ Sv} = 6,3 \text{ mSv}$

Vraagstuk 42

- vervalconstante $\lambda = 0,693 / T_{1/2}$
 $= 0,693 / (4,7 \times 10^{10} \text{ j} \times 365 \text{ d j}^{-1} \times 24 \text{ h d}^{-1} \times 3600 \text{ s h}^{-1})$
 $= 4,7 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$

aantal atomen per gram $N = (\text{massa} \times \text{abundantie} / \text{atoomgewicht}) \times N_{\text{Avogadro}}$
 $= (1 \text{ g} \times 27,8 \times 10^{-2} / 85,5 \text{ g mol}^{-1}) \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
 $= 2,0 \times 10^{21} \text{ per gram natuurlijk rubidium}$

specifieke activiteit $\lambda \times N = 4,7 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1} \times 2,0 \times 10^{21} \text{ g}^{-1}$
 $= 9,4 \times 10^2 \text{ Bq g}^{-1} = 0,94 \text{ Bq mg}^{-1}$
- jaarlijkse inname $A = 2,2 \text{ mg d}^{-1} \times 365 \text{ d j}^{-1} \times 0,94 \text{ Bq mg}^{-1} = 7,5 \times 10^2 \text{ Bq j}^{-1}$
- $E_{50} = A \times e_{\text{ing}}(50) = 7,5 \times 10^2 \text{ Bq} \times 1,5 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} = 1,1 \times 10^{-6} \text{ Sv} = 1,1 \text{ } \mu\text{Sv}$

4. de uitwisseling van rubidium wordt beschreven door de differentiaalvergelijking

$$dM/dt + \lambda M = P$$

in de evenwichtssituatie is $dM/dt = 0$, dus $\lambda M = P$

hoeveelheid rubidium die erin gaat $P = 2,2 \text{ mg d}^{-1}$

$T_{1/2, \text{eff}} \gg T_{1/2, \text{biol}}$ $T_{1/2, \text{eff}} \approx T_{1/2, \text{biol}} = 44 \text{ d}$

$$\lambda = 0,693 / T_{1/2, \text{eff}} = 0,693 / 44 \text{ d} = 0,016 \text{ d}^{-1}$$

hoeveelheid rubidium in lichaam

$$M = P / \lambda = 2,2 \text{ mg d}^{-1} / 0,016 \text{ d}^{-1} = 138 \text{ mg}$$

activiteit in lichaam

$$A = 138 \text{ mg} \times 0,94 \text{ Bq mg}^{-1} = 130 \text{ Bq}$$

5. $U_S = A \times f_1 \times T_{1/2, \text{eff}} / 0,693 = 1 \text{ Bq} \times 1 \times 44 \text{ d} / 0,693 = 63,5 \text{ Bq d} = 5,5 \times 10^6 \text{ Bq s}$

6. volgens Appendix, figuur 46

$$m_{\text{totale lichaam}} = 70 \text{ 000 g}$$

$$SEE = E_{\text{eff}} \times AF / m_{\text{totale lichaam}}$$

$$= 0,112 \text{ MeV per Bq s} \times 1 / 70 \text{ 000 g} = 1,6 \times 10^{-6} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$$

7. $e_{\text{ing}}(50) = 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times U_S \times w_R \times SEE$

$$= 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times 5,5 \times 10^6 \text{ Bq s} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 1,6 \times 10^{-6} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$$

$$= 1,4 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$$

Vraagstuk 43

1. de effectieve halveringstijd is:

$$1 / T_{1/2, \text{eff}} = (1 / 87,44 \text{ d}) + (1 / 140 \text{ d}) = 0,0186 \text{ d}^{-1} \rightarrow T_{1/2, \text{eff}} = 54 \text{ d}$$

$$U_S = A \times f_1 \times T_{1/2, \text{eff}} / 0,693 = 1 \text{ Bq} \times 1 \times 54 \text{ d} / 0,693 = 78 \text{ Bq d} = 6,7 \times 10^6 \text{ Bq s}$$

2. volgens Appendix, figuur 46

$$m_{\text{totale lichaam}} = 70 \text{ 000 g}$$

specifieke effectieve energie

$$SEE = E_{\text{eff}} / m_{\text{totale lichaam}}$$

$$= 0,049 \text{ MeV per Bq s} / 70 \text{ 000 g}$$

$$= 7,0 \times 10^{-7} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$$

3. $E_{50} = 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times U_S \times w_R \times SEE$

$$= 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times 6,7 \times 10^6 \text{ Bq s} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 7,0 \times 10^{-7} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$$

$$= 7,5 \times 10^{-10} \text{ Sv (per Bq inname)}$$

4. $e(50) - E_{50} = 7,7 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} - 7,5 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} = 0,2 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1}$

het verschil is toe te schrijven aan afrondingsfouten

Vraagstuk 44

1. de uitwisseling van zwavel wordt beschreven door de differentiaalvergelijking

$$dM/dt + \lambda M = P$$

in de evenwichtssituatie is $dM/dt = 0$, dus $\lambda M = P$

hoeveelheid zwavel die erin gaat $P = 700 \text{ g d}^{-1} \times 10^{-3} \text{ kg g}^{-1} \times 140 \text{ mg kg}^{-1} = 98 \text{ mg d}^{-1}$

hoeveelheid zwavel die eruit gaat $\lambda M = \lambda \times 7700 \text{ g} \times 10^{-3} \text{ kg g}^{-1} \times 500 \text{ mg kg}^{-1}$

$$= 3,85 \times 10^3 \lambda \text{ mg}$$

$$\lambda = P / M = 98 \text{ mg d}^{-1} / 3,85 \times 10^3 \text{ mg} = 0,0255 \text{ d}^{-1}$$

$$T_{1/2, \text{biol}} = 0,693 / \lambda = 0,693 / 0,0255 \text{ d}^{-1} = 27 \text{ d}$$

2. de effectieve halveringstijd is:

$$1 / T_{1/2, \text{eff}} = (1 / 87,44 \text{ d}) + (1 / 27 \text{ d}) = 0,0485 \text{ d}^{-1} \rightarrow T_{1/2, \text{eff}} = 21 \text{ d}$$

$$U_S = A \times f_1 \times T_{1/2, \text{eff}} / 0,693 = 1 \text{ Bq} \times 1 \times 21 \text{ d} / 0,693 = 30 \text{ Bq d} = 2,6 \times 10^6 \text{ Bq s}$$

3. $SEE = E_{\text{eff}} / m = 0,049 \text{ MeV per Bq s} / 7700 \text{ g} = 6,4 \times 10^{-6} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$

4. $e_{\text{ing}}(50) = 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times U_S \times w_R \times SEE$

$$= 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times 2,6 \times 10^6 \text{ Bq s} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 6,4 \times 10^{-6} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$$

$$= 2,7 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$$

dit is een factor $2,7 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} / 7,7 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} \approx 3,5$ groter dan voor een volwassene

dit ligt enerzijds aan de $70 \text{ 000 g} / 7700 \text{ g} \approx 9$ keer kleinere lichaamsmassa (maakt de

volgdoos groter) en anderzijds aan de $44 \text{ d} / 21 \text{ d} \approx 2$ keer kortere effectieve halveringstijd

(maakt de volgdoos kleiner)

Vraagstuk 45

1. $T_{1/2, \text{fys}} \gg T_{1/2, \text{biol}}$, dus $T_{1/2, \text{eff}} \approx T_{1/2, \text{biol}}$
 $U_S = A \times f_1 \times (0,97 \times T_{1/2, \text{eff}, 1} + 0,03 \times T_{1/2, \text{eff}, 2}) / 0,693$
 $= 1 \text{ Bq} \times 1 \times (0,97 \times 10 \text{ d} + 0,03 \times 40 \text{ d}) / 0,693 = 15,7 \text{ Bq d} = 1,4 \times 10^6 \text{ Bq s}$
2. volgens Appendix, figuur 46 $m_{\text{totale lichaam}} = 70 \text{ 000 g}$
 $SEE = E_{\text{eff}} / m_{\text{totale lichaam}}$
 $= 0,0057 \text{ MeV per Bq s} / 70 \text{ 000 g} = 8,1 \times 10^{-8} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$
3. $e_{\text{ing}}(50) = 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times U_S \times w_R \times SEE$
 $= 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times 1,4 \times 10^6 \text{ Bq s} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 8,1 \times 10^{-8} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$
 $= 1,8 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1}$

Vraagstuk 46

1. $T_{1/2, \text{fys}} \gg T_{1/2, \text{biol}}$, dus $T_{1/2, \text{eff}} \approx T_{1/2, \text{biol}}$
 $U_S = A \times f_1 \times (0,97 \times T_{1/2, \text{eff}, 1} + 0,03 \times T_{1/2, \text{eff}, 2}) / 0,693$
 $= 1 \text{ Bq} \times 1 \times (0,97 \times 3,5 \text{ d} + 0,03 \times 15 \text{ d}) / 0,693 = 5,55 \text{ Bq d} = 4,8 \times 10^5 \text{ Bq s}$
2. $SEE = E_{\text{eff}} / m$
 $= 0,0057 \text{ MeV per Bq s} / 9800 \text{ (g)} = 5,8 \times 10^{-7} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$
3. $e_{\text{ing}}(50) = 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times U_S \times w_R \times SEE$
 $= 1,6 \times 10^{-10} \text{ J kg}^{-1} \text{ per MeV g}^{-1} \times 4,8 \times 10^5 \text{ Bq s} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 5,8 \times 10^{-7} \text{ MeV g}^{-1} \text{ per Bq s}$
 $= 4,5 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1}$
 dit is een factor $4,5 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1} / 1,8 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1} \approx 2,5$ groter dan voor een volwassene

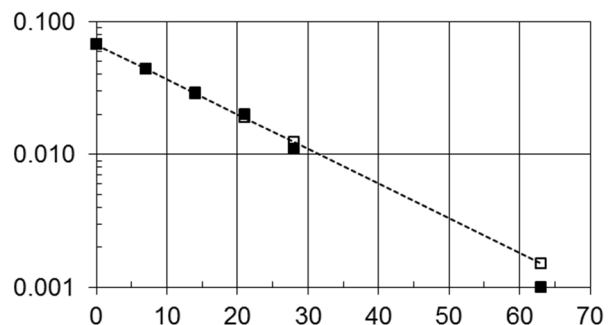
Vraagstuk 47

1. in de evenwichtssituatie zit de activiteit die per uur uit het basin ontsnapt in de lucht die per uur wordt geloosd
 de activiteitsconcentratie is dus $30 \text{ MBq} / 2000 \text{ m}^3 = 1,5 \times 10^4 \text{ Bq m}^{-3}$
 in 2000 uur wordt geïnhaleerd $2000 \text{ h} \times 1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \times 1,5 \times 10^4 \text{ Bq m}^{-3} = 3,6 \times 10^7 \text{ Bq}$
 effectieve innaming $A = (1 + 50 \times 10^{-2}) \times 3,6 \times 10^7 \text{ Bq} = 5,4 \times 10^7 \text{ Bq}$
 $E_{50} = A \times e(50) = 5,4 \times 10^7 \text{ Bq} \times 1,8 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1} = 9,7 \times 10^{-4} \text{ Sv} = 0,97 \text{ mSv}$
2. activiteitsinname per dag $(8 \text{ h d}^{-1} / 2000 \text{ h}) \times 5,4 \times 10^7 \text{ Bq} = 2,2 \times 10^5 \text{ Bq d}^{-1}$
 totale wateruitwisseling per dag $1,4 \text{ l d}^{-1} + 0,65 \text{ l d}^{-1} + 0,95 \text{ l d}^{-1} = 3,0 \text{ l d}^{-1} = 3,0 \times 10^3 \text{ ml d}^{-1}$
 activiteitsconcentratie in uitgescheiden water (dus ook in de urine):
 $2,2 \times 10^5 \text{ Bq d}^{-1} / 3,0 \times 10^3 \text{ ml d}^{-1} = 73 \text{ Bq ml}^{-1}$

Vraagstuk 48

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

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



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

Vraagstuk 49

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

Vraagstuk 50

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

- derde dag $0,33 \times 0,042 \times 0,865 \times \text{inname} = 0,012 \times \text{inname} = 436 \text{ Bq}$
 $\text{inname} = 436 \text{ Bq} / 0,012 = 3,63 \times 10^4 \text{ Bq}$
- gemiddelde inhalatie $\langle A_{\text{inh}} \rangle = (3,67 \times 10^4 + 3,73 \times 10^4 + 3,63 \times 10^4) \text{ Bq} / 3 = 3,7 \times 10^4 \text{ Bq}$
 effectieve volgdosis $E_{50} = \langle A_{\text{inh}} \rangle \times e(50)_{\text{inh}}$
 $= 3,7 \times 10^4 \text{ Bq} \times 1,1 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} = 4,1 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 41 \mu\text{Sv}$
3. 50% van ET_2 gaat naar maag-darmkanaal, waarvan $1 - f_1 = 0,2$ via faeces uitgescheiden
 invullen vervalscorrectie $C(5) = 0,785$
 activiteit in faeces:
 $50 \times 10^{-2} \times 0,21 \times 0,2 \times 0,785 \times \text{inname} = 0,0165 \times \text{inname} = 500 \text{ Bq}$
 $\text{inname} = 500 \text{ Bq} / 0,0165 = 3,0 \times 10^4 \text{ Bq}$
 effectieve volgdosis $\text{inname} \times e(50) = 3,0 \times 10^4 \text{ Bq} \times 1,1 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$
 $= 3,3 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 33 \mu\text{Sv}$
4. totaal naar TC $0,33$
 in het ongunstigste geval vindt de inname plaats op de eerste dag van de maand
 invullen retentieformule $R(29) = 0,4389, R(30) = 0,4339$ (alleen laatste 2 termen)
 uitscheiding $R(29) - R(30) = 0,4389 - 0,4339 = 0,005$
 vervalscorrectie $C(30) = 0,233$
 activiteit $0,33 \times 0,005 \times 0,233 \times \text{inname} = 0,0004 \times \text{inname}$
 detectielimiet $5 \text{ Bq/l} \times 1,4 \text{ l d}^{-1} \times 12 \text{ d j}^{-1} = 84 \text{ Bq j}^{-1}$ (12 keer per jaar gemeten)
 maximale inname $84 \text{ Bq j}^{-1} / 0,0004 = 2,1 \times 10^5 \text{ Bq j}^{-1}$
 maximale volgdosis $2,1 \times 10^5 \text{ Bq} \times 1,1 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} = 2,3 \times 10^{-4} \text{ Sv} = 0,23 \text{ mSv}$

Vraagstuk 51

1. $T_{1/2, \text{fys}} \gg T_{1/2, \text{biol}}$, dus $T_{1/2, \text{eff}} \approx T_{1/2, \text{biol}}$
 uitscheiding is evenredig met gemeten netto-teltempo
 $T(14) = T(0) \times e^{-0,693 \times 14 / T_{1/2, \text{biol}}}$
 $T_{1/2, \text{biol}} = 0,693 \times 14 \text{ d} / \ln[T(0) / T(14)]$
 $= 0,693 \times 14 \text{ d} / \ln(11\,520 \text{ tpm} / 5130 \text{ tpm}) = 0,693 \times 14 \text{ d} / 0,809 = 12 \text{ d}$
2. teltempo (in tpm) = activiteit (in Bq) \times telrendement \times teltijd (in s)
 $= A(t) \times 80 \times 10^{-2} \times 60 \text{ s} = 48 A(t)$
 activiteit in 8 ml urine $A(0) = 11\,520 \text{ tpm} / 48 = 240 \text{ Bq}$
 activiteit in 1,4 l urine $240 \text{ (Bq)} \times (1,4 \text{ l} \times 10^3 \text{ ml l}^{-1} / 8 \text{ ml}) = 4,2 \times 10^4 \text{ Bq}$
 bij een verbinding van klasse F en $f_1 = 1$ wordt alle gedeponeerde activiteit in TC opgenomen
 invullen retentieformule $R(0) = 1$ en $R(1) = e^{-0,693 \times 1/12} = 0,944$
 afname retentie $R(0) - R(1) = 1 - 0,944 = 0,056$
 uitscheiding per Bq inname = longdepositie \times afname retentie
 $= 48 \times 10^{-2} \times 0,056 = 0,027 \text{ Bq/d per Bq inname}$
 inname $4,2 \times 10^4 \text{ Bq} / 0,027 = 1,6 \times 10^6 \text{ Bq}$
3. effectieve volgdosis $E_{50} = A(0) \times e(50)$
 $= 1,6 \times 10^6 \text{ Bq} \times 4,9 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} = 7,8 \times 10^{-4} \text{ Sv} = 0,8 \text{ mSv}$

Vraagstuk 52

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

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

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

$$T_{1/2, \text{eff}} = 0,693 \times 30 \text{ d} / \ln(2,71) = 21 \text{ d}$$

$$1 / T_{1/2, \text{biol}} = 1 / T_{1/2, \text{eff}} - 1 / T_{1/2, \text{fys}} = (1 / 21 \text{ d}) - (1 / 27,71 \text{ d}) = 0,0115 \text{ d}^{-1}$$

$$T_{1/2, \text{biol}} = 1 / 0,0115 \text{ d}^{-1} = 87 \text{ d}$$

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

2. $AMAD = 5$ $BB + bb + AI = 0,012 + 0,0059 + 0,0066 + 0,0044 + 0,053 = 0,082$
na 1 uur is hiervan alleen de langzame component van 90% over

volgens de eerste meting was de inname dus ongeveer

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

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

Vraagstuk 53

1. gegeven is de effectieve dosiscoëfficiënt voor wondbesmetting $e(50) = 8,4 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1}$

ingespoten activiteit $A(0) = 200 \text{ MBq} = 2,0 \times 10^8 \text{ Bq}$

effectieve volgdozis $E_{50} = A(0) \times e_{\text{wond}}(50)$

$$= 2,0 \times 10^8 \text{ Bq} \times 8,4 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1} = 1,7 \times 10^{-2} \text{ Sv} = 17 \text{ mSv}$$

2. gegeven is de retentieformule $R(t) = 0,3 e^{-0,693 t/1} + 0,7 e^{-0,693 t/50}$ (halveringstijden in d)

gegeven is $T_{1/2, \text{fys}} = 78,23 \text{ h} = 3,26 \text{ d}$

resterende fractie na 72 h = 3 d

$$R(3) = 0,3 e^{-0,693 \times 3/1} + 0,7 e^{-0,693 \times 3/50} = 0,709$$

intussen vervalst de activiteit volgens

$$C(3) = e^{-0,693 \times 3/3,26} = 0,528$$

resterende activiteit

$$A(3) = R(3) \times C(3) \times A(0) = 0,709 \times 0,528 \times 200 \text{ MBq} = 75 \text{ MBq}$$

3. volgens de gegevens behoort galliumcitraat tot klasse F

voor deze klasse is $e_{\text{inh}}(50) = 1,1 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1}$ en is 1 dag na inhalatie nog een fractie $4,3 \times 10^{-1}$ van de geïnhalerde activiteit in het lichaam aanwezig

gemeten activiteit 8500 Bq

inhalatie

$$A = 8500 \text{ Bq} / 4,3 \times 10^{-1} = 2,0 \times 10^4 \text{ Bq}$$

effectieve volgdozis

$$E_{50} = A \times e_{\text{inh}}(50)$$

$$= 2,0 \times 10^4 \text{ Bq} \times 1,1 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} = 2,2 \times 10^{-6} \text{ Sv} = 2,2 \text{ } \mu\text{Sv}$$

Vraagstuk 54

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

2. vergelijk de twee situaties

- bij een patiënt die zelf geen urine produceert zal het bloed niet gezuiverd worden van afvalstoffen, zodat de activiteit die niet in het bot is opgenomen pas 2 dagen later bij de volgende nierdialyse zal worden uitgescheiden
de toegediende activiteit zal het lichaam niet (biologisch) verlaten en vervalst met de fysische halveringstijd van 6,0 h
- tijdens de dialyse wordt het bloed wel gezuiverd en zal de activiteit in de nierpatiënt afnemen met een effectieve halveringstijd van 2,8 h

conclusie: dezelfde activiteit ^{99m}Tc zal bij toediening na dialyse een hogere effectieve dosis veroorzaken dan bij toediening vlak voor dialyse

Vraagstuk 55

1. de uitwisseling van cesium wordt beschreven door de differentiaalvergelijking:

$$dA/dt + \lambda A = P$$

P is de inname, λ is de biologische vervaltijd

de oplossing is $A(t) = (P / \lambda) \times (1 - e^{-\lambda t})$

$$\lambda = 0,693 / T_{1/2, \text{biol}} = 0,693 / 110 \text{ d} = 6,3 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1} = 2,3 \text{ j}^{-1}$$

$$\text{verzadigingsactiviteit } (t = \infty) \quad A(\infty) = P / \lambda$$

$$\text{activiteit na 1 jaar} \quad A(1 \text{ j}) = A(\infty) \times (1 - e^{-2,3 \times 1}) = A(\infty) \times (1 - 0,10) = 0,90 A(\infty)$$

$$A(\infty) = A(1 \text{ j}) / 0,90 = 520 \text{ Bq} / 0,90 = 578 \text{ Bq}$$

2. in de evenwichtssituatie is
- $dA/dt = 0$
- , dus
- $\lambda A(\infty) = P$

$$\text{dagelijkse inname cesium} \quad P = \lambda A(\infty) = 6,3 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1} \times 578 \text{ Bq} = 3,64 \text{ Bq d}^{-1}$$

3. jaarlijkse inname cesium
- $365 \text{ d} \times 3,64 \text{ Bq d}^{-1} = 1,3 \times 10^3 \text{ Bq}$

$$\text{effectieve volgdozis} \quad E_{50} = A \times e_{\text{ing}}(50)$$

$$= 1,3 \times 10^3 \text{ Bq} \times 1,3 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$$

$$= 1,7 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 17 \mu\text{Sv}$$

Vraagstuk 56

- 1.
- $R(t) = 0,20 e^{-0,693 t/0,25} + 0,76 e^{-0,693 t/8} + 0,04 e^{-0,693 t/200}$

(alle biologische halveringstijden in d)

$$\text{invullen retentieformule} \quad R(0) = 1 \text{ en } R(1) = 0,75$$

$$\text{uitscheiding eerste dag} \quad R(0) - R(1) = 1 - 0,75 = 0,25$$

tijdens uitscheiding vervalt de activiteit volgens $C(t) = e^{-0,693 t/4,02}$

$$\text{invullen vervalscorrectie} \quad C(1) = 0,84$$

$$\text{uitgescheiden activiteit} \quad A_{\text{ing}} \times f_1 \times [R(0) - R(1)] \times C(1) = A_{\text{ing}} \times 0,01 \times 0,25 \times 0,84$$

$$= 0,0021 A_{\text{ing}}$$

$$= 1,4 \text{ l} \times 25 \text{ Bq l}^{-1} = 35 \text{ Bq}$$

inname

$$A_{\text{ing}} = 35 \text{ Bq} / 0,0021 = 17 \times 10^3 \text{ Bq}$$

effectieve volgdozis

$$E_{50} = A_{\text{ing}} \times e_{\text{ing}}(50)$$

$$= 17 \times 10^3 \text{ Bq} \times 6,3 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} = 1,1 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 11 \mu\text{Sv}$$

2. AMAD = 1

ET_1 doet niet mee

$$ET_2 = 0,21$$

$$BB + bb + AI = 0,0066 + 0,0058 + 0,0084 + 0,0081 + 0,11 = 0,139$$

klasse F

van ET_2 gaat 50% naar TC en 50% naar het maag-darmkanaal

(voor beide processen is de halveringstijd 10 min)

vanuit maag-darmkanaal gaat $f_1 = 0,01$ alsnog naar TC

van $BB + bb + AI$ gaat 100% naar TC

$$\text{totaal TC} \quad 50 \times 10^{-2} \times 0,21 + 50 \times 10^{-2} \times 0,21 \times 0,01 + 100 \times 10^{-2} \times 0,139 = 0,245$$

$$\text{uitgescheiden activiteit} \quad A_{\text{inh}} \times 0,245 \times [R(0) - R(1)] \times C(1) = A_{\text{inh}} \times 0,245 \times 0,25 \times 0,84$$

$$= 0,051 A_{\text{inh}}$$

$$= 35 \text{ Bq}$$

inname

$$A_{\text{inh}} = 35 \text{ Bq} / 0,051 = 0,69 \times 10^3 \text{ Bq}$$

effectieve volgdozis

$$E_{50} = A_{\text{inh}} \times e_{\text{inh}}(50)$$

$$= 0,69 \times 10^3 \text{ Bq} \times 1,9 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} = 1,3 \times 10^{-7} \text{ Sv} = 0,13 \mu\text{Sv}$$

Vraagstuk 57

- maak gebruik van de activiteitsconcentraties in de urine na ingestie en na inhalatie (zie gegevens); hieruit volgt inname = gemeten activiteit / concentratie
 - concentratie = $3,0 \times 10^{-5}$ Bq d⁻¹ per Bq
 ingestie = $0,22$ Bq d⁻¹ / $3,0 \times 10^{-5}$ Bq d⁻¹ per Bq = $0,7 \times 10^4$ Bq
 - concentratie = $4,8 \times 10^{-6}$ Bq d⁻¹ per Bq
 ingestie = $0,16$ Bq d⁻¹ / $4,8 \times 10^{-6}$ Bq d⁻¹ per Bq = $3,3 \times 10^4$ Bq
 - concentratie = $2,2 \times 10^{-6}$ Bq d⁻¹ per Bq
 ingestie = $0,11$ Bq d⁻¹ / $2,2 \times 10^{-6}$ Bq d⁻¹ per Bq = $5,0 \times 10^4$ Bq
 gemiddelde waarde $\langle A_{ing} \rangle = (0,7 + 3,3 + 5,0) \times 10^4$ Bq / 3 = $3,0 \times 10^4$ Bq
 effectieve volgdosis $E_{50} = \langle A_{ing} \rangle \times e_{ing}(50)$
 $= 3,0 \times 10^4$ Bq $\times 2,0 \times 10^{-7}$ Sv Bq⁻¹ = $6,0 \times 10^{-3}$ Sv = 6 mSv
- maak gebruik van de activiteitsconcentratie in de urine na inhalatie (zie gegevens) hieruit volgt inhalatie = gemeten activiteit / concentratie
 - concentratie = $1,8 \times 10^{-3}$ Bq d⁻¹ per Bq
 inhalatie = $0,22$ Bq d⁻¹ / $1,8 \times 10^{-3}$ Bq d⁻¹ per Bq = $1,2 \times 10^2$ Bq
 - concentratie = $2,3 \times 10^{-4}$ Bq d⁻¹ per Bq
 inhalatie = $0,16$ Bq d⁻¹ / $2,3 \times 10^{-4}$ Bq d⁻¹ per Bq = $7,0 \times 10^2$ Bq
 - concentratie = $1,3 \times 10^{-4}$ Bq d⁻¹ per Bq
 inhalatie = $0,11$ Bq d⁻¹ / $1,3 \times 10^{-4}$ Bq d⁻¹ per Bq = $8,5 \times 10^2$ Bq
 gemiddelde waarde $\langle A_{inh} \rangle = (1,2 + 7,0 + 8,5) \times 10^2$ Bq / 3 = $5,6 \times 10^2$ Bq
 effectieve volgdosis $E_{50} = \langle A_{inh} \rangle \times e_{inh}(50)$
 $= 5,6 \times 10^2$ Bq $\times 2,7 \times 10^{-5}$ Sv Bq⁻¹ = $1,5 \times 10^{-2}$ Sv = 15 mSv

Vraagstuk 58

- uitgescheiden activiteit $A_{ing} \times f_1 \times 10 \times 10^{-2} = A_{ing} \times 5 \times 10^{-4} \times 10 \times 10^{-2} = 5 \times 10^{-5} A_{ing}$
 $= 2,8$ l $\times 0,15$ Bq l⁻¹ = $0,42$ Bq
 inname $A_{ing} = 0,42$ Bq / $5 \times 10^{-5} = 8,4 \times 10^3$ Bq
 effectieve volgdosis $E_{50} = A_{ing} \times e_{ing}(50)$
 $= 8,4 \times 10^3$ Bq $\times 2,0 \times 10^{-7}$ Sv Bq⁻¹ = $1,7 \times 10^{-3}$ Sv = 1,7 mSv

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

- AMAD = 1
 - ET₁ doet niet mee
 ET₂ = 0,21
 BB + bb + AI = 0,0066 + 0,0058 + 0,0084 + 0,0081 + 0,11 = 0,139
 - type M van ET₂ gaat de helft van 10% naar TC en de andere helft naar het maag-darmkanaal (snelle bloedopname en mechanische reiniging hebben beide een halveringstijd van 10 min), en 90% in zijn geheel naar het maag-darmkanaal (mechanische reiniging wint het van de langzame opname in het bloed)
 vanuit het maag-darmkanaal gaat $f_1 = 5 \times 10^{-4}$ alsnog naar TC
 van BB+bb+AI gaat 10% naar TC
 - totaal TC $0,21 \times [10 \times 10^{-2} \times 0,5 \times (1 + 5 \times 10^{-4}) + 90 \times 10^{-2} \times 5 \times 10^{-4}] + 0,139 \times 10 \times 10^{-2}$
 $= 0,0245$
 - uitgescheiden activiteit $A_{inh} \times 0,0245 \times 10 \times 10^{-2} = 2,45 \times 10^{-3} A_{inh}$
 $= 0,42$ Bq
 - inname $A_{inh} = 0,42$ Bq / $2,45 \times 10^{-3} = 1,7 \times 10^2$ Bq
 - effectieve volgdosis $E_{50} = A_{inh} \times e_{inh}(50)$
 $= 1,7 \times 10^2$ Bq $\times 3,9 \times 10^{-5}$ Sv Bq⁻¹ = $6,6 \times 10^{-3}$ Sv = 6,6 mSv

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

Vraagstuk 59

1. de uitwisseling van krypton met de buitenwereld wordt beschreven door de differentiaalvergelijking:
 $dA/dt + \lambda A = P$
 A (in Bq) = activiteitsconcentratie (in Bq m⁻³) × ruimtevolumen (in m³)
 λ = ventilatievoud = ruimtevolumen per uur (in h⁻¹) = 1 h⁻¹
 P = lek = 40 MBq h⁻¹ = 40 × 10⁶ Bq h⁻¹
 in evenwicht is $dA/dt = 0$ $A = P / \lambda = 40 \times 10^6 \text{ Bq h}^{-1} / 1 \text{ h}^{-1} = 40 \times 10^6 \text{ Bq}$
 activiteitsconcentratie $a = 40 \times 10^6 \text{ Bq} / 500 \text{ m}^3 = 8 \times 10^4 \text{ Bq m}^{-3}$
 equivalente dosistempo $dH/dt = a \times e$
 $= 8 \times 10^4 \text{ Bq m}^{-3} \times 9,2 \times 10^{-13} \text{ Sv h}^{-1} \text{ per Bq m}^{-3}$
 $= 7,4 \times 10^{-8} \text{ Sv h}^{-1} = 74 \text{ nSv h}^{-1}$

Vraagstuk 60

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

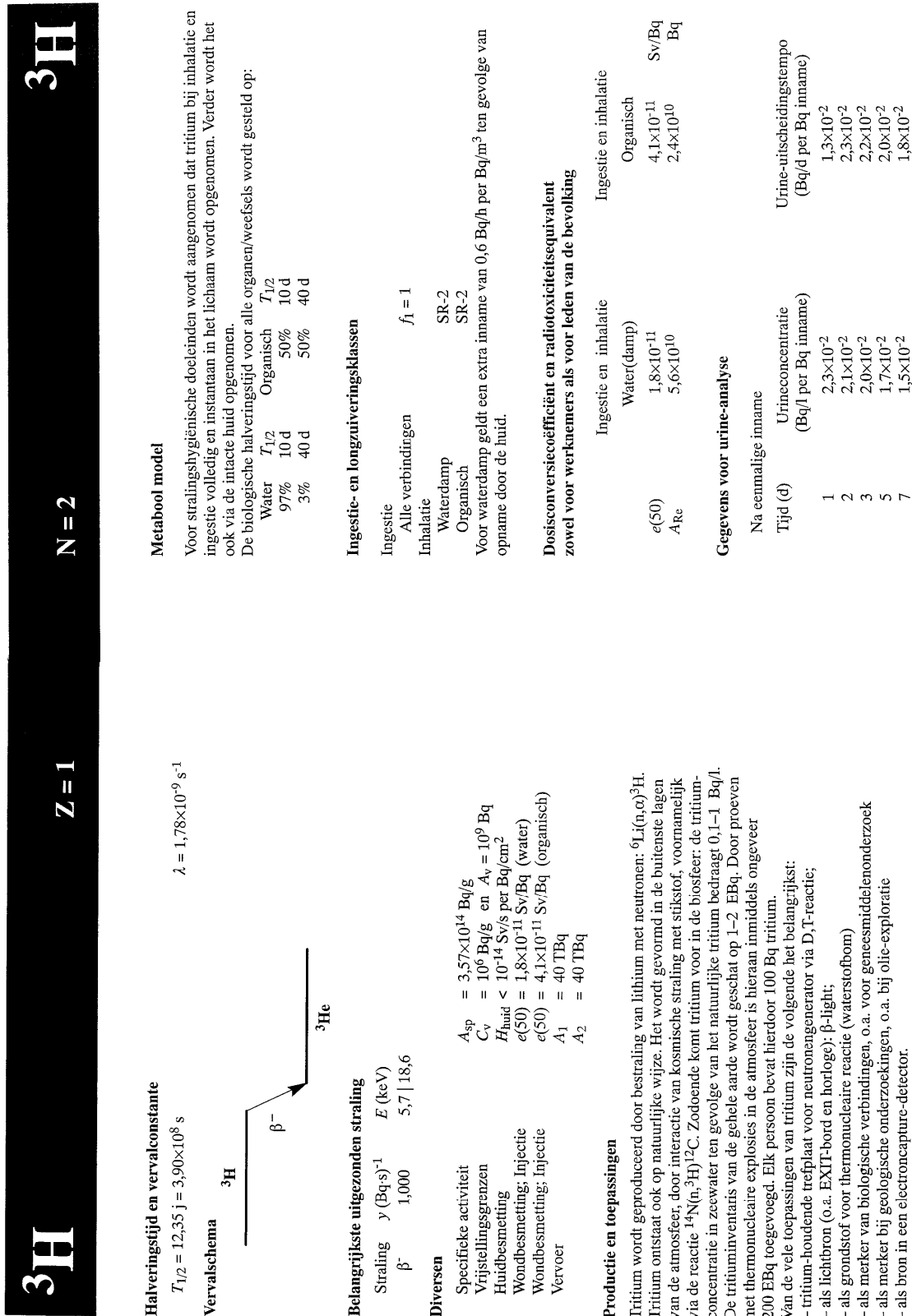
het verschil met het resultaat van vraag 2 als volgt te begrijpen:

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

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

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

APPENDIX

Figuur 1. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^3H

24Na

Z = 11

24Na

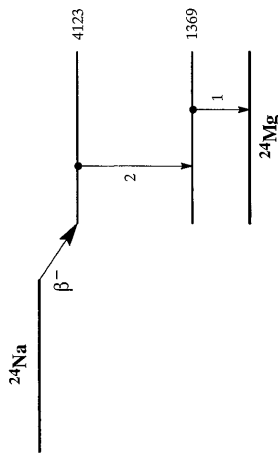
N = 13

Halveringsstijf en vervalconstante

$T_{1/2} = 14,96 \text{ h} = 5,39 \times 10^4 \text{ s}$

$\lambda = 1,29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq s) ⁻¹	E (keV)
β^-	0,999	554 1390
γ_1	1,000	1369
γ_2	0,999	2754

Bronconstanten

Kermtempo in lucht	$k = 0,43 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,49 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 3,22 \times 10^{17} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^1 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^5 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{fluid}} = 4 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting: Injectie	$e(50) = 3,1 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 0,2 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,2 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het nuclide wordt gevormd in een reactor door de vangst van thermische neutronen in natrium (²³Na). Het is dus een activeringsproduct. Toepassingen liggen

Figuur 2. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ²⁴Na

op het gebied van biologisch onderzoek, nucleaire-activeringsanalyse en dosimetrie van personen na overstraling met neutronen.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat natrium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 30% naar bot en 70% verdeeld over de overige organen/weefsels.

De biologische halveringsstijden in het botweefsel zijn: 10 dagen (99%) en 500 dagen (1%). De biologische halveringsstijf voor de overige organen/weefsels wordt gesteld op 10 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

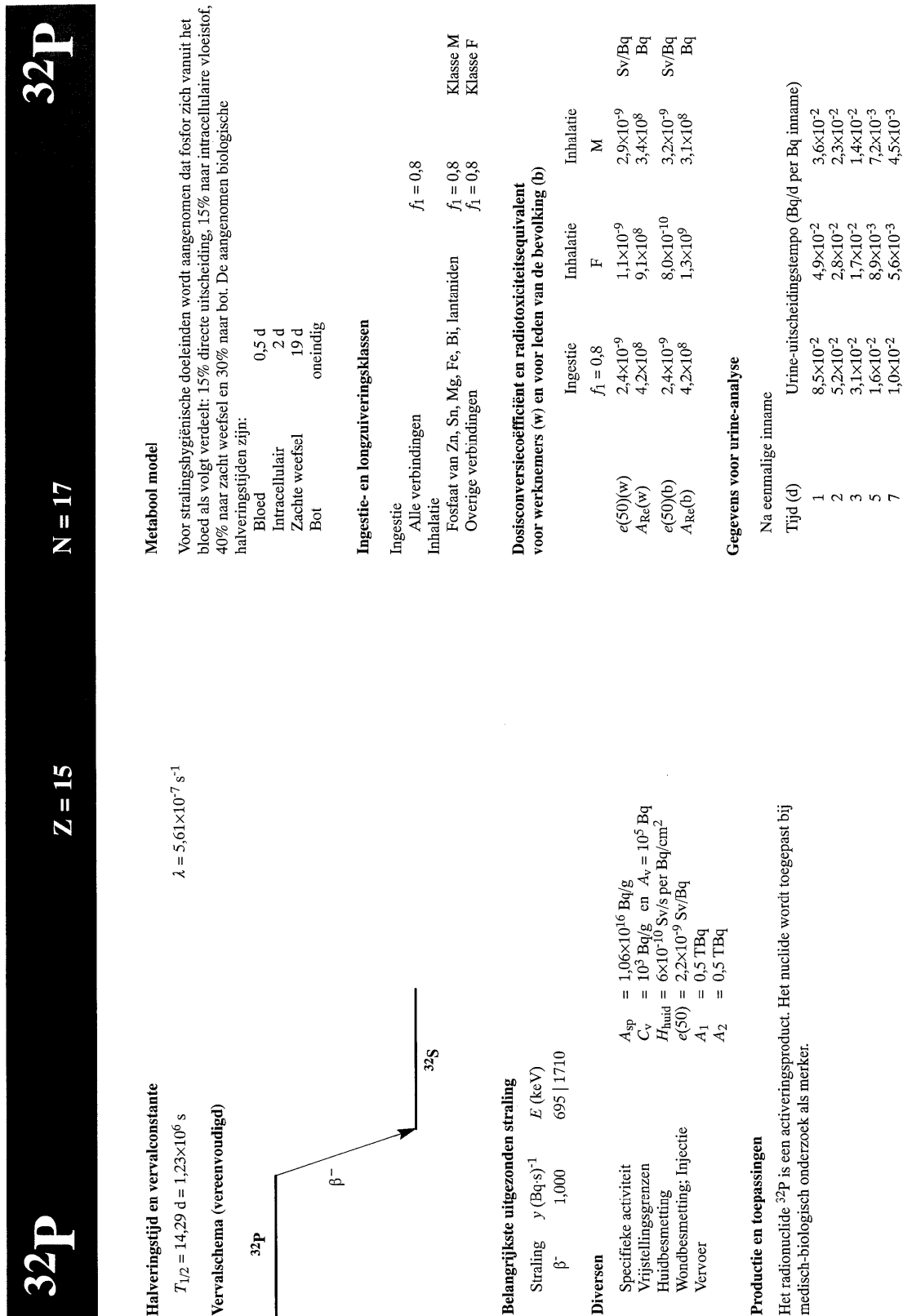
Ingestie			
Alle verbindingen	$f_1 = 1$		
Inhalatie			
Alle verbindingen	$f_1 = 1$		Klasse F

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

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

Gegevens voor totale-lichaamstelling

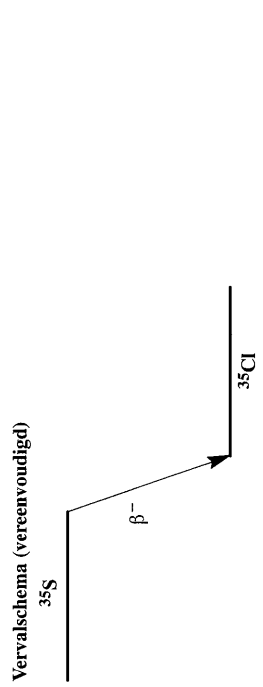
Na eenmalige inname	
Tijf (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
0,25	$5,6 \times 10^{-1}$
1	$1,9 \times 10^{-1}$
2	$5,2 \times 10^{-2}$
3	$1,5 \times 10^{-2}$
5	$1,4 \times 10^{-3}$
7	$1,3 \times 10^{-4}$



Figuur 3. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ³²P



Halveringstijd en vervalconstante
 $T_{1/2} = 87,44 \text{ d} = 7,55 \times 10^6 \text{ s}$
 $\lambda = 9,17 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β^-	1,000	49 167

Diversen

- Specifieke activiteit $A_{sp} = 1,58 \times 10^{15} \text{ Bq/g}$
- Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^6 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^9 \text{ Bq (damp)}$
- Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 3 \times 10^{-11} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
- Wondbesmetting; Injectie $e(50) = 7,7 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$ (organisch)
- Vervoer $A_1 = 40 \text{ TBq}$ (anorganisch)
- $A_2 = 3 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen
 Het radionuclide ³⁵S 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	$f_1 = 1$	$e(50) = 7,7 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$
Inhalatie	SR-1	$e(50) = 7,0 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$

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 radiotoxiceitsequivalent voor werknemers (w) en leden van de bevolking (b)

	Ingestie	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$f_1 = 0,1$	$f_1 = 0,8$	F	M
$A_{Re}(w)$	$1,9 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-11}$	$1,1 \times 10^{-9}$
$e(50)(b)$	$5,3 \times 10^9$	$7,1 \times 10^9$	$1,2 \times 10^{10}$	$9,1 \times 10^8$
$A_{Re}(b)$	$1,9 \times 10^{10}$	$1,4 \times 10^{10}$	$5,3 \times 10^{11}$	$1,3 \times 10^9$
	$5,3 \times 10^9$	$7,1 \times 10^9$	$1,9 \times 10^{10}$	$7,7 \times 10^8$

Gegevens voor urine-analyse

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

Figuur 4. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ³⁵S

36Cl

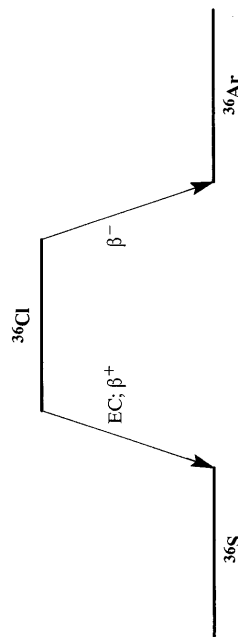
N = 19 Z = 17

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 3,01 \times 10^5 \text{ j} = 9,50 \times 10^{12} \text{ s}$$

$$\lambda = 7,30 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$$

Vervalchema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β^-	0,981	279 710

Bronconstanten

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

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 1,22 \times 10^9 \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^4 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-11} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting: Injectie	$e(50) = 8,2 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 10 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,6 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ³⁶Cl wordt geproduceerd door vangst van thermische neutronen in chloor. Het nuclide wordt toegepast als beta-ijkbron. Een speciale toepassing werd gevonden bij de reconstructie van de neutronenfluentie ten gevolge van de kern-explosies in Hiroshima en Nagasaki.

Metabool model
 Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat chloor zich vanuit het bloed homogeen over alle organen/weefsels verdeelt.
 De biologische halverings tijden voor de alle organen/weefsels wordt gesteld op 10 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	$f_1 = 1$
Alle verbindingen	$f_1 = 1$
Inhalatie	$f_1 = 1$
Chloride van H, Li, Na, K, Rb en Cs	Klasse F
Overige chloriden	Klasse M

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

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

Gegevens voor urine-analyse

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

Figuur 5. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ³⁶Cl

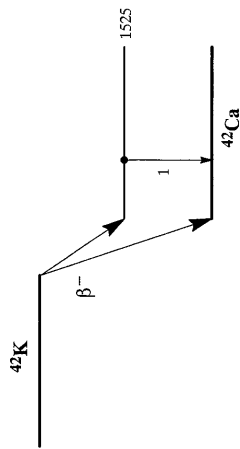
^{42}K **$N = 23$**

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 12,36 \text{ h} = 4,45 \times 10^4 \text{ s}$

$\lambda = 1,56 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq \cdot s) $^{-1}$	E (keV)
β^-	0,175	822 1996
β^-	0,821	1564 3521
γ	0,179	1525

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	$k = 0,032 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,037 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 2,24 \times 10^{17} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 7 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 2,3 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 0,2 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,2 \text{ TBq}$

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 radiotoxiteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

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

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
Tijd (d)	$7,1 \times 10^{-1}$
0,25	$5,3 \times 10^{-1}$
1	$2,6 \times 10^{-1}$
2	$1,6 \times 10^{-1}$
3	$6,5 \times 10^{-2}$
5	$3,5 \times 10^{-2}$
7	$1,6 \times 10^{-2}$
	$8,4 \times 10^{-3}$
	$1,1 \times 10^{-3}$
	$5,3 \times 10^{-4}$
	$6,9 \times 10^{-5}$
	$3,4 \times 10^{-5}$

Figuur 6. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{42}K

45Ca

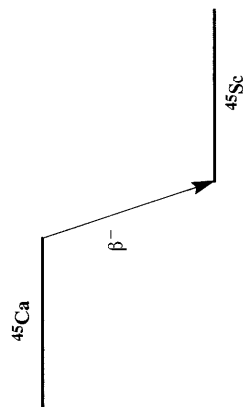
N = 25 Z = 20

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 163 \text{ d} = 1,41 \times 10^7 \text{ s}$$

$$\lambda = 4,92 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq s) ⁻¹	E (keV)
β ⁻	1,000	77 256

Diversen

- Specifieke activiteit $A_{sp} = 6,58 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$
- Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^4 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^7 \text{ Bq}$
- Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 2 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
- Wondbesmetting; Injectie $e(50) = 1,8 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
- Vervoer $A_1 = 40 \text{ TBq}$
 $A_2 = 1 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ⁴⁵Ca is een activeringsproduct. Het nuclide wordt onder meer gebruikt als marker bij medisch-biologisch onderzoek.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat calcium zich vanuit het bloed verdeelt naar bot en zacht weefsel. Een speciaal model is gepresenteerd in ICRP-20. Als benadering kan de volgende verdeling met bijbehorende biologische halveringstijden worden aangenomen:

Sponsachtig bot (32%)		Compact bot (33%)		Zacht weefsel (35%)	
Fractie	$T_{1/2}$	Fractie	$T_{1/2}$	Fractie	$T_{1/2}$
0,34	10 d	0,30	10 d	0,37	1,5 d
0,16	700 d	0,15	1100 d	0,29	45 d
0,50	2900 d	0,55	10500 d	0,14	100 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie			
Alle verbindingen	$f_1 = 0,3$		
Inhalatie			
Alle verbindingen	$f_1 = 0,3$		Klasse M

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

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

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname	
Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
0,25	$9,9 \times 10^{-1}$
1	$7,8 \times 10^{-1}$
2	$4,9 \times 10^{-1}$
3	$3,4 \times 10^{-1}$
5	$2,4 \times 10^{-1}$
7	$1,8 \times 10^{-1}$
	$2,2 \times 10^{-1}$

Figuur 7. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ⁴⁵Ca

46Sc

Z = 21

46Sc

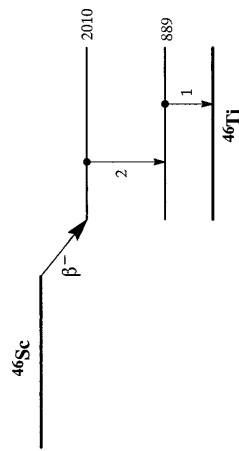
N = 25

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 83,80 \text{ d} = 7,24 \times 10^6 \text{ s}$

$\lambda = 9,57 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$

Vervalchema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β^-	1,000	112 357
γ_1	1,000	889
γ_2	1,000	1121

Bronconstanten

Kermtempo in lucht	$k = 0,26 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,30 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 1,25 \times 10^{15} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^1 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 3 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 2,3 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 0,5 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,5 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ⁴⁶Sc is een activeringsproduct.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat scandium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 40% naar bot, 30% naar lever, 10% naar milt en de rest homogeen verdeeld over de overige organen/weefsels. De biologische halveringstijden zijn:

Fractie	$T_{1/2}$
0,1	5 d
0,9	1500 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	$f_1 = 1 \times 10^{-4}$	Klasse S
Alle verbindingen		
Inhalatie	$f_1 = 1 \times 10^{-4}$	Klasse S
Alle verbindingen		

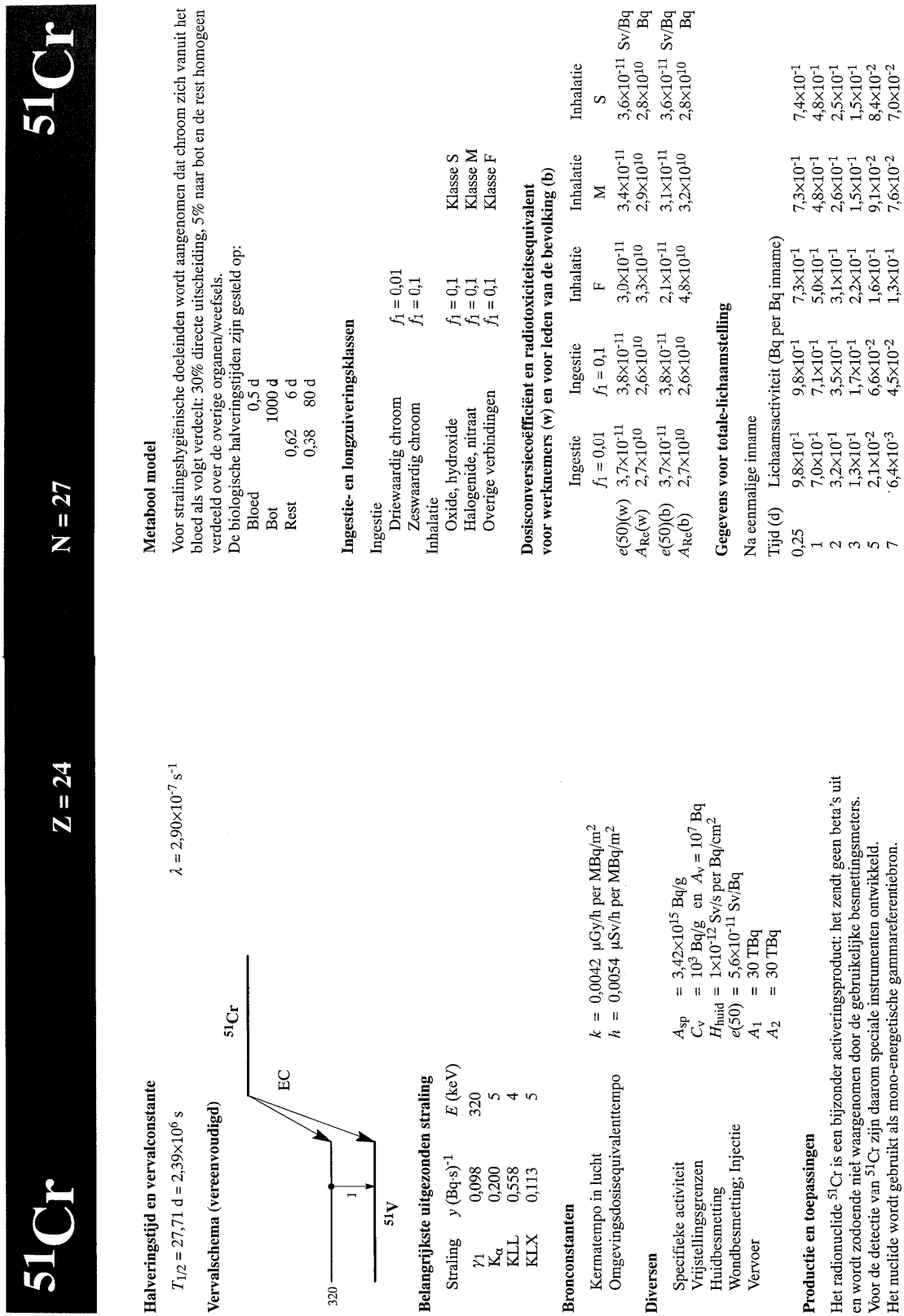
Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiceitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$1,5 \times 10^{-9}$	S
$A_{Re}(w)$	$6,7 \times 10^8$	$4,8 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
$e(50)(b)$	$1,5 \times 10^{-9}$	$2,1 \times 10^8 \text{ Bq}$
$A_{Re}(b)$	$6,7 \times 10^8$	$6,4 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$ $1,6 \times 10^8 \text{ Bq}$

Gegevens voor totale-lichaamsstelling

Na eenmalige inname	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
Tijd (d)	
0,25	$9,9 \times 10^{-1}$
1	$7,1 \times 10^{-1}$
2	$4,9 \times 10^{-1}$
3	$3,2 \times 10^{-1}$
5	$2,4 \times 10^{-1}$
7	$1,3 \times 10^{-1}$
	$1,8 \times 10^{-2}$
	$6,9 \times 10^{-2}$
	$2,5 \times 10^{-3}$
	$5,9 \times 10^{-2}$

Figuur 8. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ⁴⁶Sc

Figuur 9. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ⁵¹Cr

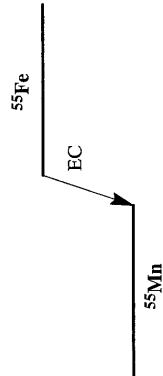


Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 985,4 \text{ d} = 8,51 \times 10^7 \text{ s}$

$\lambda = 8,14 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$

Vervalchema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
K α	0,250	6
K β	0,033	6
KLL	0,495	5
KLX	0,112	6

Bronconstanten

Kermtempo in lucht $k = 0,000 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ per MBq/m²
 Omgevingsdosis-equivalenttempo $h = 0,000 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ per MBq/m²

Diversen

Specifieke activiteit $A_{sp} = 8,91 \times 10^{13} \text{ Bq/g}$
 Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^4 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
 Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 1 \times 10^{-12} \text{ Sv/s}$ per Bq/cm²
 Wondbesmetting: Injectie $e(50) = 3,0 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
 Vervoer $A_1 = 40 \text{ TBq}$
 $A_2 = 40 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ⁵⁵Fe is een activeringsproduct dat ontstaat uit de reactie: ⁵⁴Fe(n,γ)⁵⁵Fe. Het nuclide zendt alleen karakteristieke röntgenstraling uit. Daarom is voor detectie een speciale detector ontwikkeld (zgn. Fe-55-detector). Het nuclide wordt gebruikt in een electroncapture-detector en bij röntgen-fluorescentie.

Metabool model

Het model wordt beschreven in ICRP-69. Het model bevat 17 compartimenten en 21 transportconstanten. Het gedrag van ijzer in het lichaam wordt voornamelijk bepaald door opname in het haemoglobine.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	Inhalatie	Inhalatie	Inhalatie
Alle verbindingen	$f_1 = 0,1$		
Oxide, hydroxide, halogenide	$f_1 = 0,1$	Klasse M	
Overige verbindingen	$f_1 = 0,1$	Klasse F	

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

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$f_1 = 0,1$	F	M
$A_{Re}(w)$	$3,3 \times 10^{-10}$	$9,2 \times 10^{-10}$	$3,3 \times 10^{-10}$
$e(50)(b)$	$3,0 \times 10^9$	$1,1 \times 10^9$	$3,0 \times 10^9$
$A_{Re}(b)$	$3,3 \times 10^{-10}$	$7,7 \times 10^{-10}$	$3,7 \times 10^{-10}$
	$3,0 \times 10^9$	$1,3 \times 10^9$	$2,7 \times 10^9$

Gegevens voor urine-analyse

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

Figuur 10. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ⁵⁵Fe

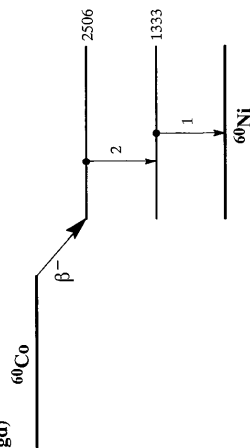
^{60}Co **$Z = 27$**

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 5,272 \text{ j} = 1,66 \times 10^8 \text{ s}$

$\lambda = 4,17 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$

Vervalchema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq.s) ⁻¹	E (keV)
β^-	0,999	96 318
γ_1	1,000	1333
γ_2	0,999	1173

Bronconstanten

Kernatempo in lucht	$k = 0,31 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,36 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 4,18 \times 10^{13} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^0 = 1 \text{ Bq/g !}$
Huidbesmetting	$A_v = 10^5 \text{ Bq}$
Wondbesmetting; Injectie	$H_{\text{huid}} = 3 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Vervoer	$e(50) = 1,9 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
	$A_1 = 0,4 \text{ TBq}$
	$A_2 = 0,4 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{60}Co is een activeringsproduct. Het komt voor als bijproduct in reactoren ten gevolge van de activering van staal. Daarnaast wordt het op velerlei terreinen toegepast. Voorbeelden zijn: radiotherapie, gammagrafie, doorstraling, ijking, demonstratie.

N = 33

^{60}Co

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat kobalt zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 50% directe uitscheiding, 5% naar lever en 45% naar de rest van het lichaam, met een biologische halveringstijd van 0,5 dag.

De biologische halveringstijden voor de organen zijn:

Fractie	$T_{1/2}$
0,6	6 d
0,2	60 d
0,2	800 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	
Oxide, hydroxide en anorganisch	$f_1 = 0,05$
Overige verbindingen	$f_1 = 0,1$
Inhalatie	
Oxide, hydroxide, halogenide, nitraat	$f_1 = 0,05$
Overige	$f_1 = 0,1$

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

	Ingestie	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie
	$f_1 = 0,05$	$f_1 = 0,1$	M	S
$e(50)(w)$	$2,5 \times 10^{-9}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$7,1 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-8}$
$A_{Re}(w)$	$4,0 \times 10^8$	$2,9 \times 10^8$	$1,4 \times 10^8$	$5,9 \times 10^7$
$e(50)(b)$	$2,5 \times 10^{-9}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$9,6 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-8}$
$A_{Re}(b)$	$4,0 \times 10^8$	$2,9 \times 10^8$	$1,0 \times 10^8$	$3,4 \times 10^7$

Gegevens voor totale-lichaamstelling

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

Figuur 11. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{60}Co

^{67}Ga **^{67}Ga**

N = 36

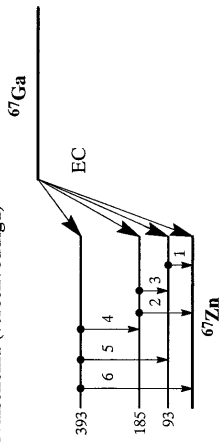
Z = 31

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 78,23 \text{ h} = 2,82 \times 10^5 \text{ s}$

$\lambda = 2,46 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Vervalchema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)	Straling	γ (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 $k = 0,018 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ per MBq/m²
 Omgevingsdosis-equivalenttempo $h = 0,025 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ per MBq/m²

Diversen

Specifieke activiteit $A_{sp} = 2,21 \times 10^{16} \text{ Bq/g}$
 Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
 Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 9 \times 10^{-11} \text{ Sv/s}$ per Bq/cm²
 Wondbesmetting: Injectie $e(50) = 8,4 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$
 Vervoer $A_1 = 7 \text{ TBq}$
 $A_2 = 3 \text{ TBq}$

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	$T_{1/2}$ 1 d	$T_{1/2}$ 50 d
0,3	0,7	50

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

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	$f_1 = 0,001$	Inhalatie	$f_1 = 0,001$	Klasse M	Klasse F
Alle verbindingen					
Inhalatie					
Oxide, hydroxide, carbide, halogenide, nitraat					
Overige					

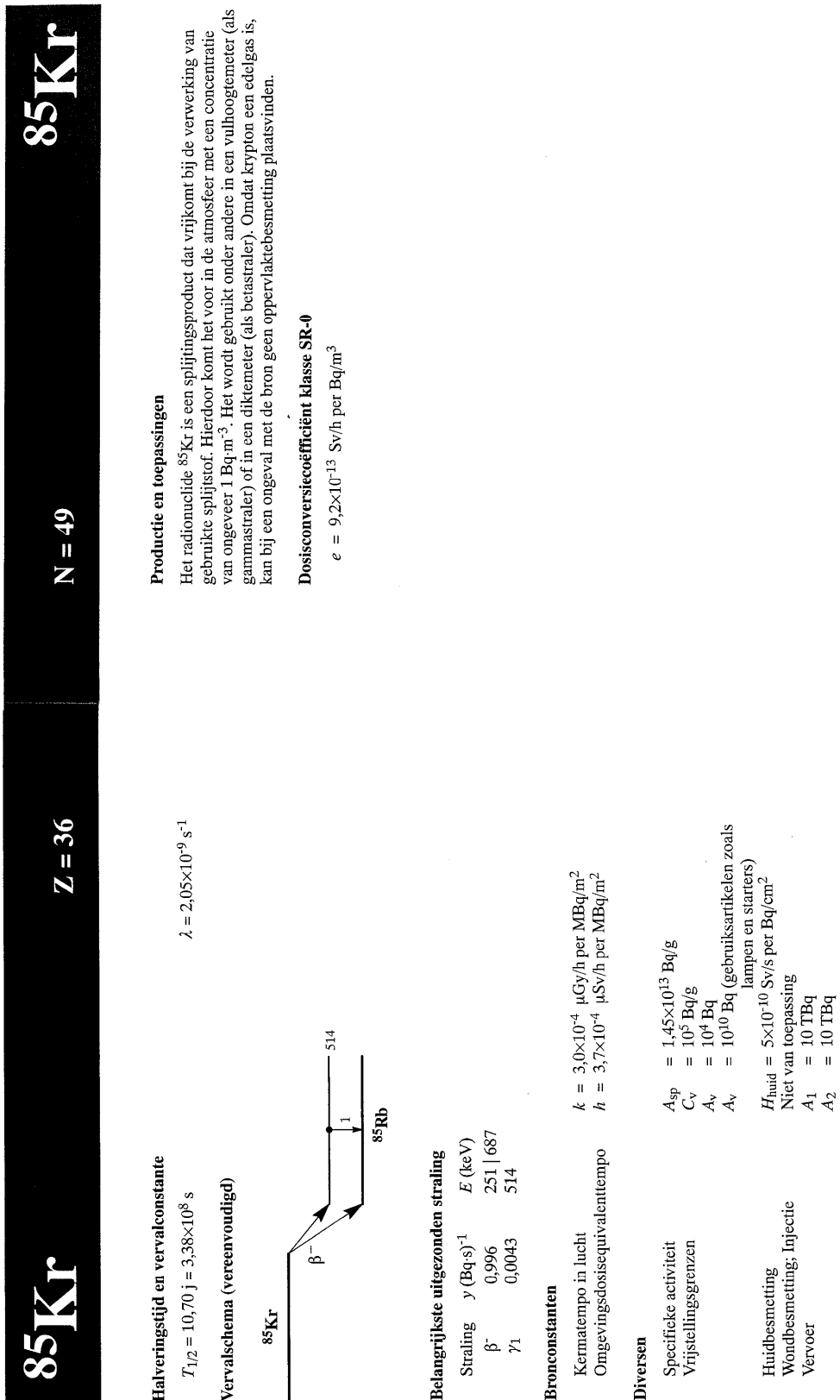
Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciëitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$1,9 \times 10^{-10}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-10}$
$A_{Re}(w)$	$5,3 \times 10^9$	$9,1 \times 10^9$	$3,6 \times 10^9$
$e(50)(b)$	$1,9 \times 10^{-10}$	$6,8 \times 10^{-11}$	$2,3 \times 10^{-10}$
$A_{Re}(b)$	$5,3 \times 10^9$	$1,5 \times 10^{10}$	$4,3 \times 10^9$

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
Tijd (d)	
0,25	$9,4 \times 10^{-1}$
1	$5,8 \times 10^{-1}$
2	$2,1 \times 10^{-1}$
3	$7,0 \times 10^{-2}$
5	$6,7 \times 10^{-3}$
7	$7,2 \times 10^{-4}$

Figuur 12. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{67}Ga



Figuur 13. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ⁸⁵Kr

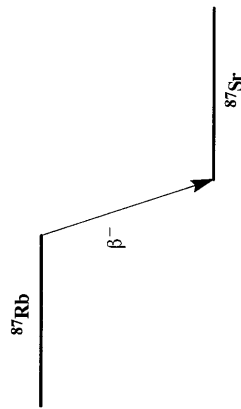
^{87}Rb **$Z = 37$** **$N = 50$** **^{87}Rb**

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 4,7 \times 10^{10} \text{ j} = 1,5 \times 10^{18} \text{ s}$

$\lambda = 4,7 \times 10^{-19} \text{ s}^{-1}$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq.s) ⁻¹	E (keV)
β^-	1,000	112 273

Diversen

- Specifieke activiteit $A_{sp} = 3,2 \times 10^3 \text{ Bq/g}$
- Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^4 \text{ Bq/g}$
- $A_v = 10^7 \text{ Bq}$
- Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 3 \times 10^{10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
- Wondbesmetting: Injectie $e(50) = 1,3 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
- Vervoer $A_1 = \text{Onbeperkt}$
- $A_2 = \text{Onbeperkt}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{87}Rb is van primordiale oorsprong. Het komt in geringe mate voor in de natuur: de referentiemans bevat ongeveer 500 Bq ^{87}Rb .

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat rubidium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 25% naar het skelet en 75% naar alle overige organen. De biologische halveringstijd voor alle organen is gesteld op 44 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

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

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

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

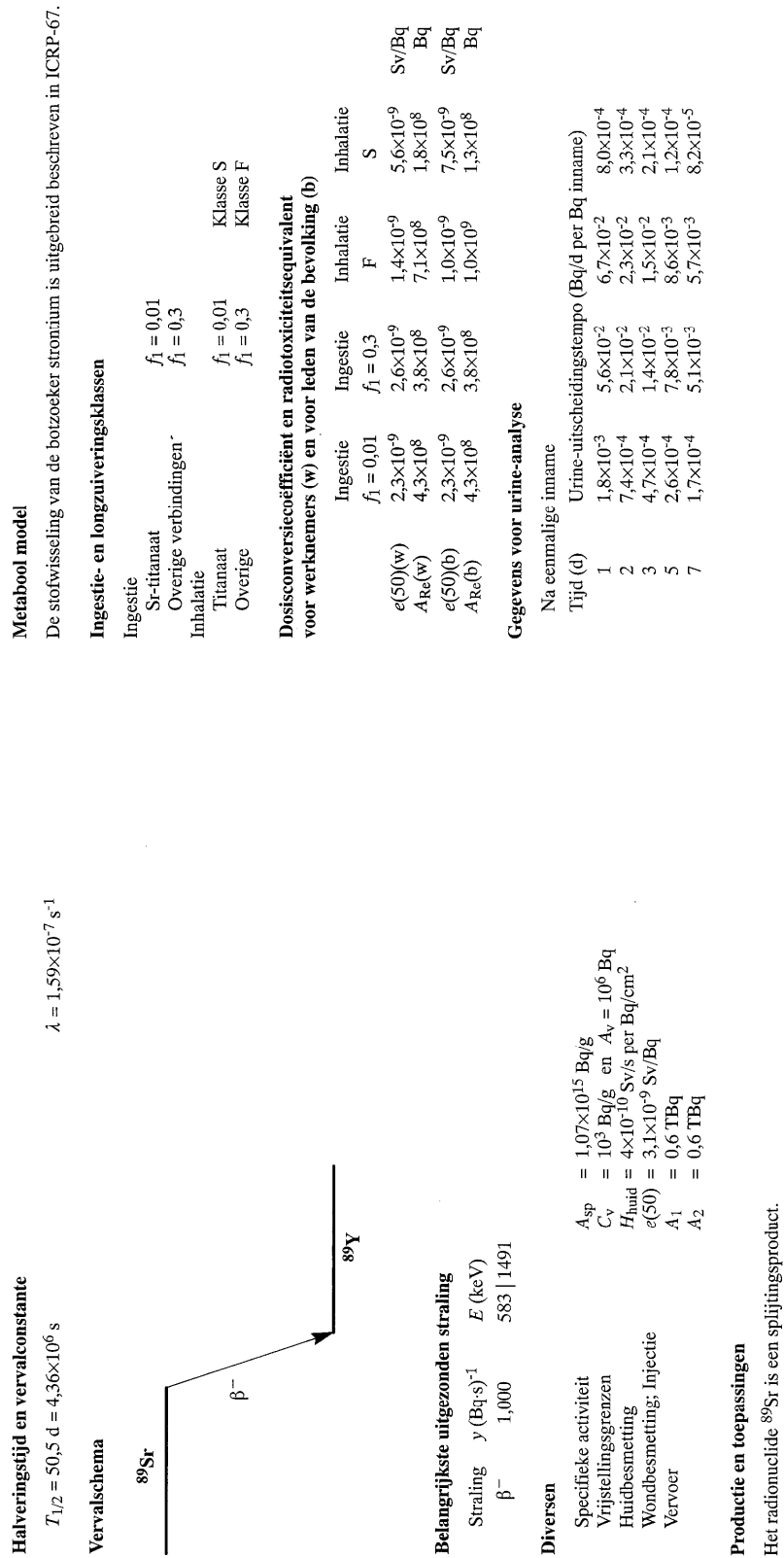
Gegevens voor totale-lichaamstelling

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

Figuur 14. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{87}Rb

⁸⁹Sr **N = 51**

Z = 38



Figuur 15. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ⁸⁹Sr

^{90}Sr **^{90}Sr**

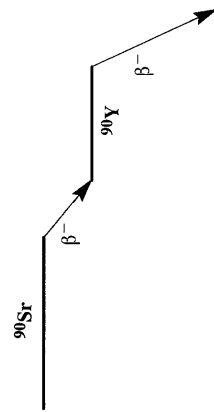
$Z = 38$ **$N = 52$**

Halveringstijd en vervalconstante

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

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

Vervalchema



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)	Van dochter ⁹⁰ Y ($T_{1/2} = 64 \text{ h}$):
β^-	1,000	196 546	Straling γ (Bq·s) ⁻¹ E (keV) 935 2284

Diversen

- Specifieke activiteit $A_{sp} = 5,12 \times 10^{12} \text{ Bq/g}$
- Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^4 \text{ Bq}$
- Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-10} \text{ Sv/s}$ per Bq/cm²
- Wondbesmetting, injectie $e(50) = 8,8 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
- Vervoer $A_1 = 0,3 \text{ TBq}$
 $A_2 = 0,3 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

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

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

Ingestie- en longzuiveringsklassen

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

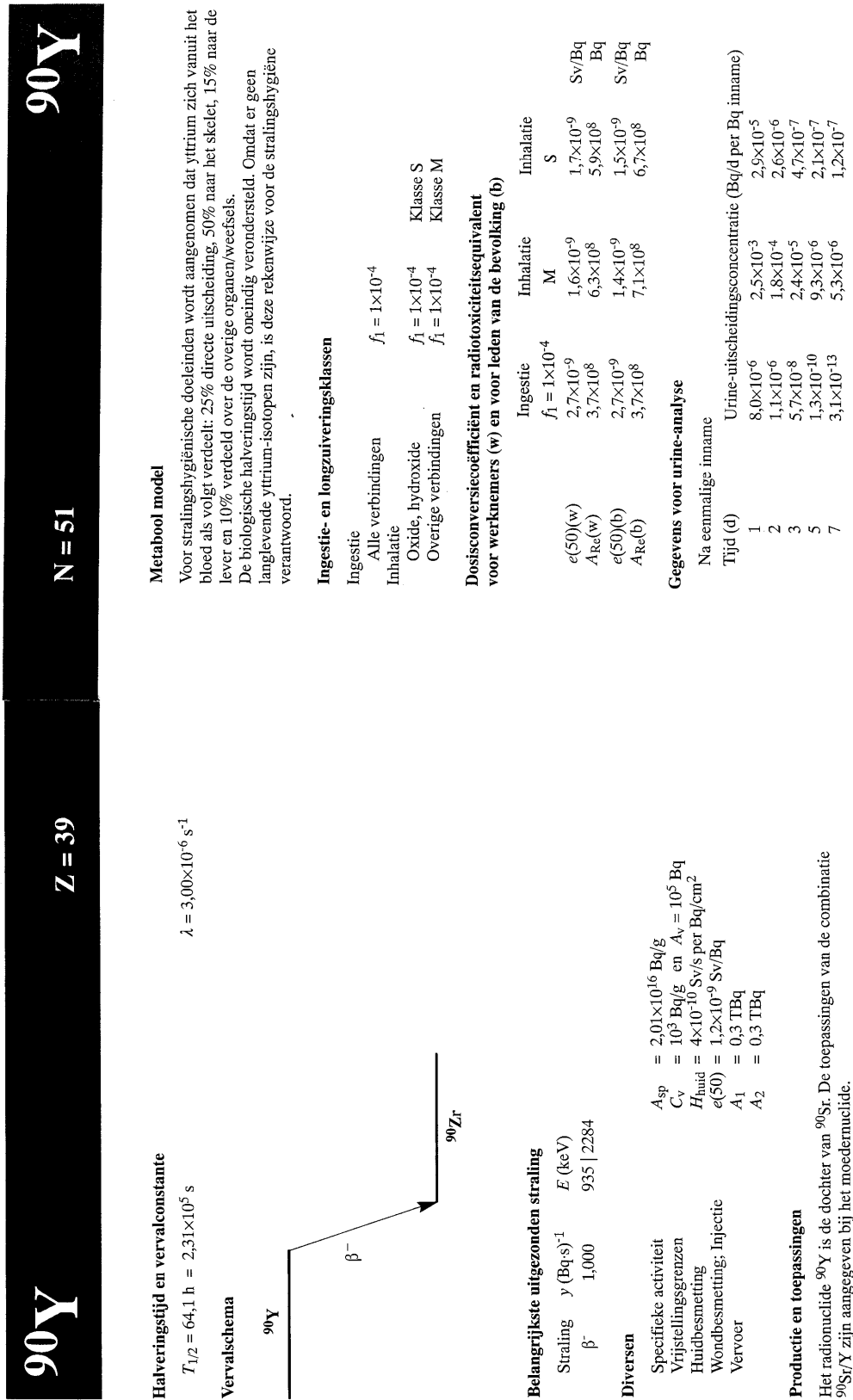
Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteits-equivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

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

Gegevens voor urine-analyse

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

Figuur 16. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ⁹⁰Sr



Figuur 17. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ⁹⁰Y

^{99m}Tc **^{99m}Tc**

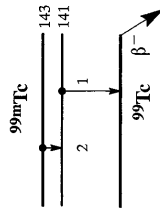
N = 56 **Z = 43**

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 6,006 \text{ h} = 2,17 \times 10^4 \text{ s}$

$\lambda = 3,21 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ	β^-	E (keV)
γ_1	0,889	141	141
ce M γ_2	0,914	2	2
ce N γ_2	0,076	2	2
K_{α}	0,062	18	18
LMX	0,102	2	2

Bronconstanten

$k = 0,018 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
 $h = 0,023 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

- Specifieke activiteit $A_{sp} = 1,95 \times 10^{17} \text{ Bq/g}$
- Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^7 \text{ Bq}$
- Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-11} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
- Wondbesmetting: Injectie $e(50) = 1,1 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$
- Vervoer $A_1 = 10 \text{ TBq}$
 $A_2 = 4 \text{ TBq}$

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	Inhalatie	$f_1 = 0,8$
Alle verbindingen		$f_1 = 0,8$
Inhalatie		
Halogenide, nitraat, hydroxide, oxide		$f_1 = 0,8$
Overige verbindingen		$f_1 = 0,8$

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

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie
	$f_1 = 0,8$	F	M
$e(50)(w)$	$2,2 \times 10^{-11}$	$2,0 \times 10^{-11}$	$2,9 \times 10^{-11}$
$A_{re}(w)$	$4,5 \times 10^{10}$	$5,0 \times 10^{10}$	$3,4 \times 10^{10}$
$e(50)(b)$	$2,2 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-11}$	$1,9 \times 10^{-11}$
$A_{re}(b)$	$4,5 \times 10^{10}$	$8,3 \times 10^{10}$	$5,3 \times 10^{10}$

Gegevens voor totale-lichaamstelling

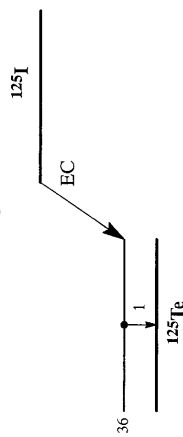
Na eenmalige inname	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
Tijd (d)	
0,25	$4,8 \times 10^{-1}$
1	$4,4 \times 10^{-2}$
2	$1,8 \times 10^{-3}$
3	$7,9 \times 10^{-5}$
5	$1,7 \times 10^{-7}$
7	$4,1 \times 10^{-10}$

Figuur 18. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{99m}Tc

125I **Z = 53**
N = 72 **125I**

Halveringstijd en vervalconstante
 $T_{1/2} = 59,39 \text{ d} = 5,13 \times 10^6 \text{ s}$
 $\lambda = 1,55 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)	Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
γ_1	0,067	35	L_{α}	0,061	4
ce $K\gamma_1$	0,803	4	L_{β}	0,059	4
ce $L\gamma_1$	0,105	31	KL	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

Kermt tempo in lucht $k = 0,034 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
 Omgevingsdosis equivalent tempo $h = 0,034 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit $A_{sp} = 6,51 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$
 Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^3 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
 Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 4 \times 10^{-12} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
 Wondbesmetting: Injectie $e(50) = 1,5 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
 Vervoer $A_1 = 20 \text{ TBq}$
 $A_2 = 3 \text{ TBq}$

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 verblijft in andere organen/weefsels dan de schildklier gescheidt 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	Inhalatie	$f_1 = 1$
Alle verbindingen		$f_1 = 1$
Inhalatie		
Damp (I_2)		$f_1 = 1$
Damp (CH_3I)		$f_1 = 1$
Overige verbindingen		$f_1 = 1$
		Klasse SR-1
		Klasse SR-1
		Klasse F
		70% depositie

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

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie	Inhalatie
	$f_1 = 1$	F	I_2	CH_3I
$e(50)(w)$	$1,5 \times 10^{-8}$	$7,3 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
$A_{Re}(w)$	$6,7 \times 10^7$	$1,4 \times 10^8$	$7,1 \times 10^7$	$9,1 \times 10^7$
$e(50)(b)$	$1,5 \times 10^{-8}$	$5,3 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
$A_{Re}(b)$	$6,7 \times 10^7$	$1,9 \times 10^8$	$7,1 \times 10^7$	$9,1 \times 10^7$

Gegevens voor schildkliermeting (na eenmalige inname)

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

Figuur 19. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{125}I

^{131}I **N = 78**

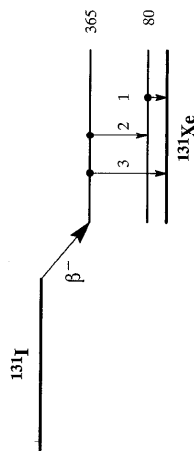
^{131}I **Z = 53**

Halveringstijd en vervalconstante

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

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

Vervalchema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ ($\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$)	E (keV)
β^-	0,894	192 606
γ_1	0,026	80
ce $K\gamma_1$	0,036	46
γ_2	0,061	284
γ_3	0,812	365

Bronconstanten

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

Diversen

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

Productie en toepassingen

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

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 verblijft in andere organen/weefsels dan de schildklier gescheiden met een halveringstijd van 12 dagen. Een tiende van het organisch jodium wordt onmiddellijk uitgescheiden via de feces, terwijl de rest (90%) terugkeert in het transfeercompartment. 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	$f_1 = 1$
Inhalatie	
Alle verbindingen	$f_1 = 1$
Damp (I_2)	$f_1 = 1$
Damp (CH_3I)	$f_1 = 1$
Overige verbindingen	$f_1 = 1$
	Klasse SR-1
	Klasse SR-1
	70% depositie
	Klasse F

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

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$f_1 = 1$	F	I_2	CH_3I
$A_{re}(w)$	$2,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$
$e(50)(b)$	$4,5 \times 10^7$	$9,1 \times 10^7$	$5,0 \times 10^7$	$6,7 \times 10^7$
$A_{re}(b)$	$2,2 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$
	$4,5 \times 10^7$	$1,3 \times 10^8$	$5,0 \times 10^7$	$6,7 \times 10^7$

Gegevens voor schildkliermeting (na eenmalige inname)

Tijd (d)	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)	I_2	CH_3I
0,25	$f_1 = 1$	F	CH_3I
1	$6,0 \times 10^2$	$5,2 \times 10^2$	$1,1 \times 10^1$
2	$2,4 \times 10^1$	$1,2 \times 10^1$	$2,3 \times 10^1$
3	$2,5 \times 10^1$	$1,2 \times 10^1$	$1,7 \times 10^1$
5	$1,9 \times 10^1$	$1,1 \times 10^1$	$2,0 \times 10^1$
7	$1,6 \times 10^1$	$9,0 \times 10^2$	$1,7 \times 10^1$
		$7,5 \times 10^2$	$1,4 \times 10^1$

Figuur 20. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{131}I

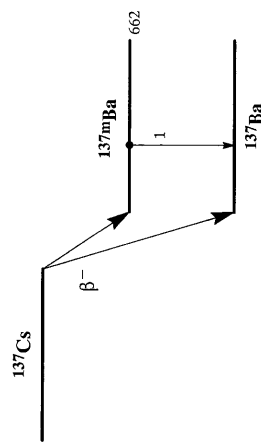
^{137}Cs **$N = 82$** **$Z = 55$** **^{137}Cs**

Halveringstijd en vervalconstante

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

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

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

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

Straling	y ($\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$)	E (keV)	Straling	y ($\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$)	E (keV)
β^-	0,946	173 512	γ_1	0,898	662
β^-	0,054	425 1173	ce K γ_1	0,083	624

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

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

Diversen

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

Productie en toepassingen

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

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat cesium zich vanuit het bloed homogeen over alle organen/weefsels verdeelt.

De biologische halveringstijden zijn:

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

Ingestie- en longzuiveringsklassen

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

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

	Ingestie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$1,3 \times 10^{-8}$	F
$A_{\text{rc}}(w)$	$7,7 \times 10^7$	$6,7 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
$e(50)(b)$	$1,3 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^8 \text{ Bq}$
$A_{\text{rc}}(b)$	$7,7 \times 10^7$	$4,8 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
		$2,1 \times 10^8 \text{ Bq}$

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
Tijd (d)	
0,25	$1,0 \times 10^0$
1	$9,9 \times 10^{-1}$
2	$9,6 \times 10^{-1}$
3	$9,4 \times 10^{-1}$
5	$9,0 \times 10^{-1}$
7	$8,8 \times 10^{-1}$

Figuur 21. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ^{137}Cs

170Tm

N = 101

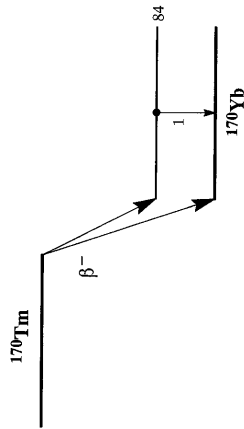
Z = 69

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 128,6 \text{ d} = 1,11 \times 10^7 \text{ s}$$

$$\lambda = 6,24 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

Vervalsschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)	Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β_1	0,240	298 884	K_{α}	0,035	52
β_2	0,759	323 968	LMM	0,073	6
γ_1	0,033	84	LMX	0,045	8
ce K γ_1	0,047	23	MXY	0,259	2
ce L γ_1	0,122	74			

Bronconstanten

Kernatempo in lucht $k = 0,0007 \mu\text{Gy/h}$ per MBq/m²
 Omgevingsdosis-equivalenttempo $h = 0,0012 \mu\text{Sv/h}$ per MBq/m²

Diversen

Specifieke activiteit $A_{sp} = 2,21 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$
 Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^3 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
 Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-10} \text{ Sv/s}$ per Bq/cm²
 Wondbesmetting, Injectie $e(50) = 1,4 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
 Vervoer $A_1 = 3 \text{ TBq}$
 $A_2 = 0,6 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ¹⁷⁰Tm is een activeringsproduct. Het wordt toegepast als bron voor gammagrafie.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat thulium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 21% directe uitscheiding, 65% naar bot, 4% naar lever, 10% naar de overige organen/weefsels. De biologische halveringstijd voor alle organen/weefsels wordt gesteld op 3500 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie $f_1 = 5 \times 10^{-4}$
 Alle verbindingen $f_1 = 5 \times 10^{-4}$
 Inhalatie $f_1 = 5 \times 10^{-4}$
 Alle verbindingen $f_1 = 5 \times 10^{-4}$ Klasse M

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

	Ingestie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$1,3 \times 10^{-9}$	M
$A_{Re}(w)$	$7,7 \times 10^8$	$5,2 \times 10^{-9}$ Sv/Bq
$e(50)(b)$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,9 \times 10^8$ Bq
$A_{Re}(b)$	$7,7 \times 10^8$	$6,6 \times 10^{-9}$ Sv/Bq
		$1,5 \times 10^8$ Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname		Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)
Tijd (d)	0,25	$9,9 \times 10^{-1}$
	1	$7,1 \times 10^{-1}$
	2	$4,9 \times 10^{-1}$
	3	$2,5 \times 10^{-1}$
	5	$1,5 \times 10^{-1}$
	7	$8,5 \times 10^{-2}$
		$2,7 \times 10^{-3}$
		$7,5 \times 10^{-2}$

Figuur 22. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ¹⁷⁰Tm

203Hg

N = 123

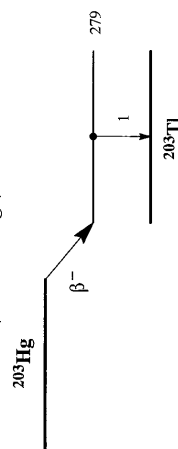
Z = 80

Halveringsstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 46,61 \text{ d} = 4,03 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\lambda = 1,72 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema (veereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq.s) ⁻¹	E (keV)
β^-	1.000	58 212
γ_1	0.815	279
ce K γ_1	0.138	194
$K_{\alpha 1}$	0.066	73
$K_{\alpha 2}$	0.039	71

Bronconstanten

$$k = 0,044 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$$

$$h = 0,040 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$$

Diversen

$$A_{sp} = 5,10 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$$

$$C_v = 10^2 \text{ Bq/g en } A_v = 10^5 \text{ Bq}$$

$$H_{huid} = 3 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$$

$$e(50) = 1,7 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$$

$$A_1 = 5 \text{ TBq}$$

$$A_2 = 1 \text{ TBq}$$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ²⁰³Hg is een activeringsproduct. Het nuclide wordt onder meer toegepast als gamma-ijkbron.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat anorganisch kwik zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 8% naar nieren en 92% verdeeld over de overige organen/weefsels. Van organisch kwik wordt aangenomen dat 5% naar de nieren gaat, 20% naar de hersens en de rest uniform over de overige organen/weefsels verdeeld is. De aangenomen biologische halveringstijden zijn:

Anorganisch kwik	Organisch kwik
Fractie	Fractie
$T_{1/2}$	$T_{1/2}$
0,95	0,95
40 d	80 d
0,05	10000 d
10000 d	0,05
	10000 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	$f_1 = 0,02$	
Anorganisch kwik	$f_1 = 0,4$, behalve	
Organische kwik	$f_1 = 1$	
Methyl-kwik		
Inhalatie	$f_1 = 0,02$	Klasse SR-1, 70% depositie
Kwikdamp		
Oxide, hydroxide, halogenide,		
nitraat, sulfide	$f_1 = 0,02$	Klasse M
Organisch kwik	$f_1 = 1$	Klasse F
Overige verbindingen	$f_1 = 0,02$	Klasse F

Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b), na inwendige besmetting met kwik

Anorganisch	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie	Inhalatie	Inhalatie
$f_1 = 0,02$	$f_1 = 0,02$	F	M	SR-1	
$e(50)(w)$	$5,4 \times 10^{-10}$	$5,9 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-9}$	Sv/Bq
$A_{re}(w)$	$1,9 \times 10^9$	$1,7 \times 10^9$	$5,3 \times 10^8$	$1,4 \times 10^8$	Bq
$e(50)(b)$	$5,4 \times 10^{-10}$	$4,7 \times 10^{-10}$	$2,3 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-9}$	Sv/Bq
$A_{re}(b)$	$1,9 \times 10^9$	$2,1 \times 10^9$	$4,3 \times 10^8$	$1,4 \times 10^8$	Bq
<u>Organisch</u>	<u>Ingestie</u>	<u>Ingestie</u>	<u>Inhalatie</u>	<u>Inhalatie</u>	
$f_1 = 0,4$	$f_1 = 1$	F	F		
$e(50)(w)$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,9 \times 10^{-9}$	$7,5 \times 10^{-10}$		
$A_{re}(w)$	$9,1 \times 10^8$	$5,3 \times 10^8$	$1,3 \times 10^9$		
$e(50)(b)$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,9 \times 10^{-9}$	$5,7 \times 10^{-10}$		
$A_{re}(b)$	$9,1 \times 10^8$	$5,3 \times 10^8$	$1,8 \times 10^9$		

Figuur 23. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ²⁰³Hg

241Am **N = 146**

Z = 95

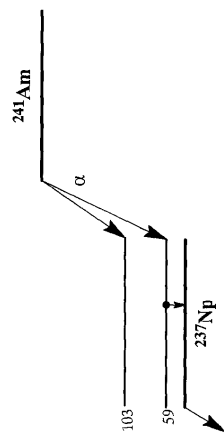
241Am

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 432,0 \text{ j} = 1,36 \times 10^{10} \text{ s}$

$\lambda = 5,08 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$

Vervalchema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)	Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
α_1	0,852	5486	γ_1	0,357	60
α terugshoot	0,852	93	ce-L- γ_1	0,308	39
α_2	0,128	5443	ce-M- γ_1	0,076	55
α terugshoot	0,128	92	L_β	0,305	18
L_α	0,244	14			

bronconstanten

Kernleefduur in lucht $k = 0,048 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
 Omgevingsdosis-equivalenttempo $h = 0,017 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Inversen

Specifieke activiteit $A_{sp} = 1,27 \times 10^{11} \text{ Bq/g}$
 Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^0 = 1 \text{ Bq/g}$
 $A_v = 10^4 \text{ Bq}$
 Huidbesmetting $H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{12} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
 Wondbesmetting, injectie $e(50) = 4,0 \times 10^{-4} \text{ Sv/Bq}$
 Vervoer $A_1 = 10 \text{ TBq}$
 $A_2 = 0,001 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ²⁴¹Am wordt geproduceerd in een kernreactor. Het nuclide wordt toegepast in brandmelders (ionisatiekamer), als ijkbrom voor alfa- en gammastraling en in een neutronenbron (Am/Be-bron).

Metabool model

Het gedetailleerde metabole model voor americium wordt beschreven in ICRP-67.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	$f_1 = 5 \times 10^{-4}$
Alle verbindingen	
Inhalatie	$f_1 = 5 \times 10^{-4}$
Alle verbindingen	Klasse M

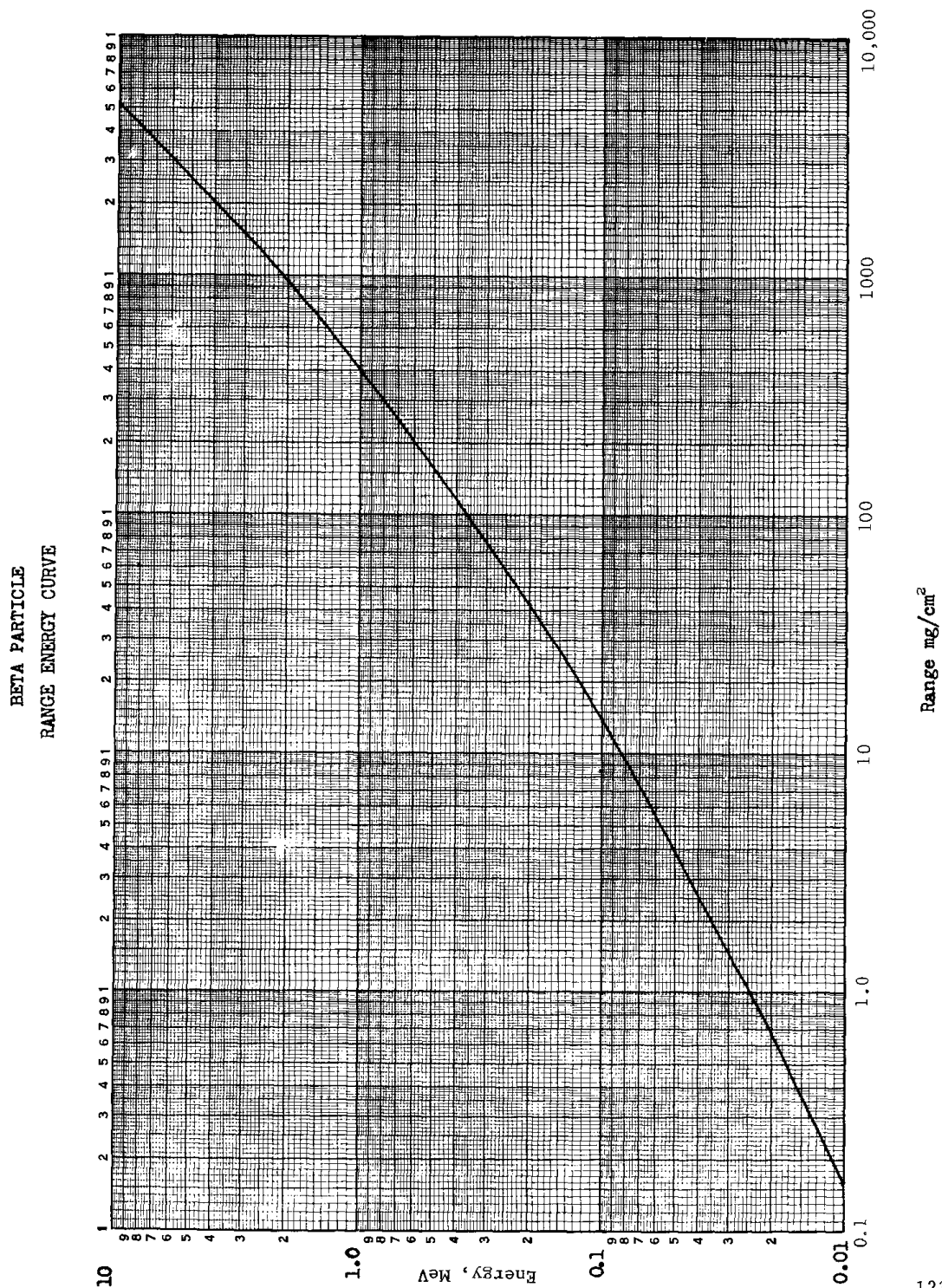
Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiceitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie	Inhalatie
$e(50)(w)$	$2,0 \times 10^{-7}$	M
$A_{Re}(w)$	$2,7 \times 10^{-5} \text{ Sv/Bq}$	$2,7 \times 10^{-5} \text{ Sv/Bq}$
$e(50)(b)$	$5,0 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-4} \text{ Bq}$
$A_{Re}(b)$	$2,0 \times 10^{-7} \text{ Sv/Bq}$	$3,9 \times 10^{-5} \text{ Sv/Bq}$
	$5,0 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^4 \text{ Bq}$

Gegevens voor urine-analyse

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

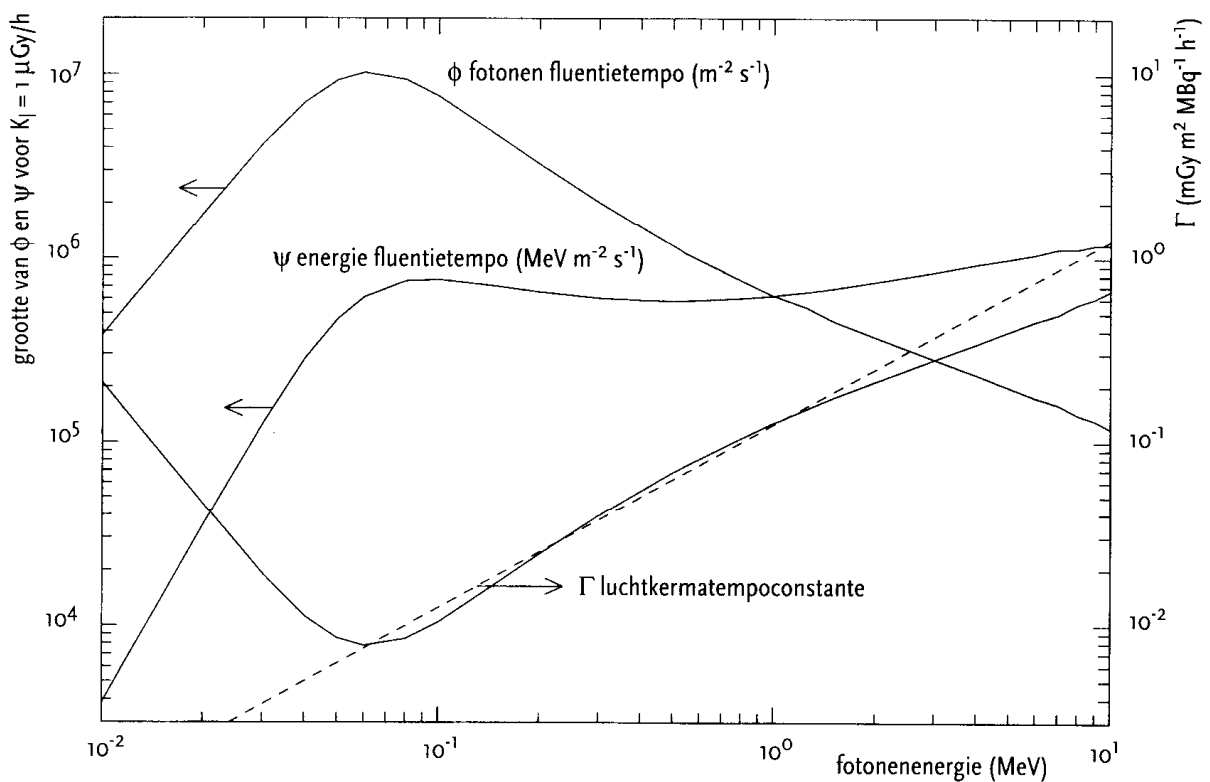
Figuur 24. Stralingshygiënische gegevens van het nuclide ²⁴¹Am



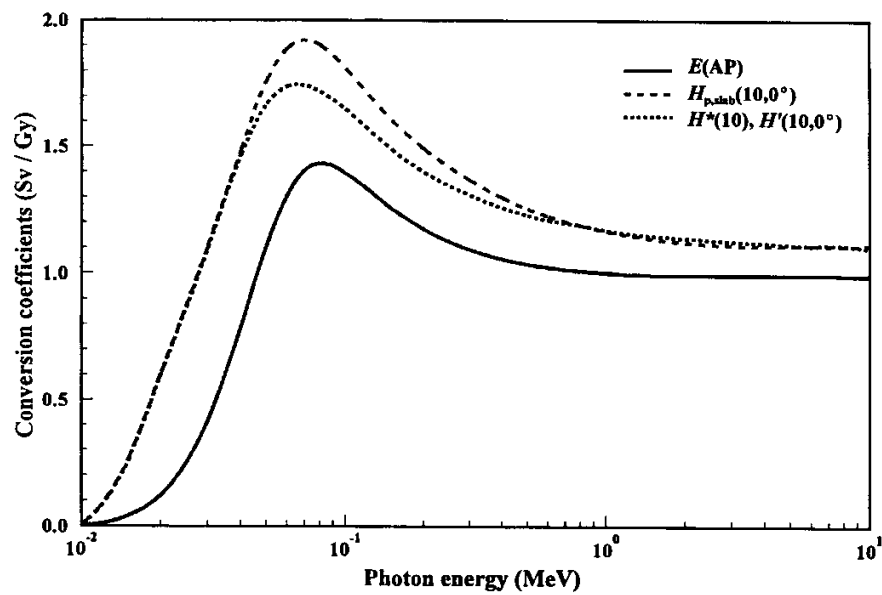
Figuur 25. Gereduceerde dracht van β -deeltjes als functie van de eindpuntsenergie

E_{foton} (MeV)	lucht		water		weefsel		bot	
	μ_{tr}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{tr}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{tr}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{tr}/ρ	μ_{en}/ρ
0,100	0,00227	0,00227	0,00248	0,00248	0,00244	0,00244	0,00439	0,00439
0,125	0,00238	0,00237	0,00262	0,00262	0,00259	0,00259	0,00358	0,00358
0,150	0,00247	0,00247	0,00275	0,00275	0,00272	0,00271	0,00316	0,00315
0,175	0,00257	0,00257	0,00286	0,00285	0,00282	0,00282	0,00307	0,00306
0,200	0,00266	0,00266	0,00295	0,00295	0,00292	0,00292	0,00301	0,00301
0,250	0,00277	0,00277	0,00308	0,00308	0,00305	0,00305	0,00304	0,00303
0,300	0,00287	0,00287	0,00319	0,00319	0,00316	0,00315	0,00307	0,00306

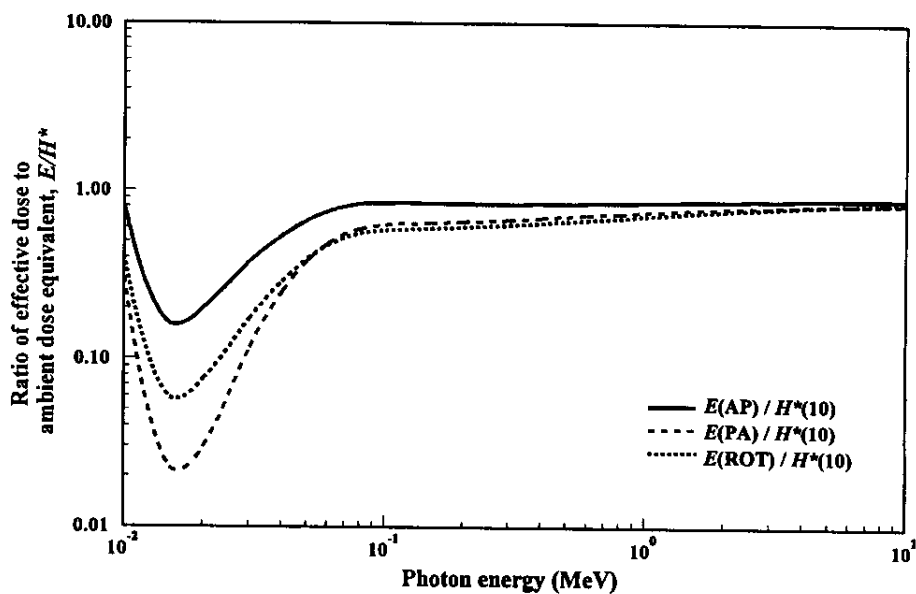
Figuur 26. Massieke energieoverdracht- en energieabsorptiecoëfficiënten μ_{tr}/ρ en μ_{en}/ρ (in $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) voor verschillende materialen.



Figuur 27. Fluentietempo en energiefluentietempo van fotonen overeenkomend met een kermatempo in lucht van $1 \mu\text{Gy/h}$, en de kermatempoconstante voor een puntbron die per desintegratie 1 foton met energie E_{γ} uitzendt (de onderbroken lijn geeft de benadering $\Gamma \approx E_{\text{foton}} / 8$ weer)



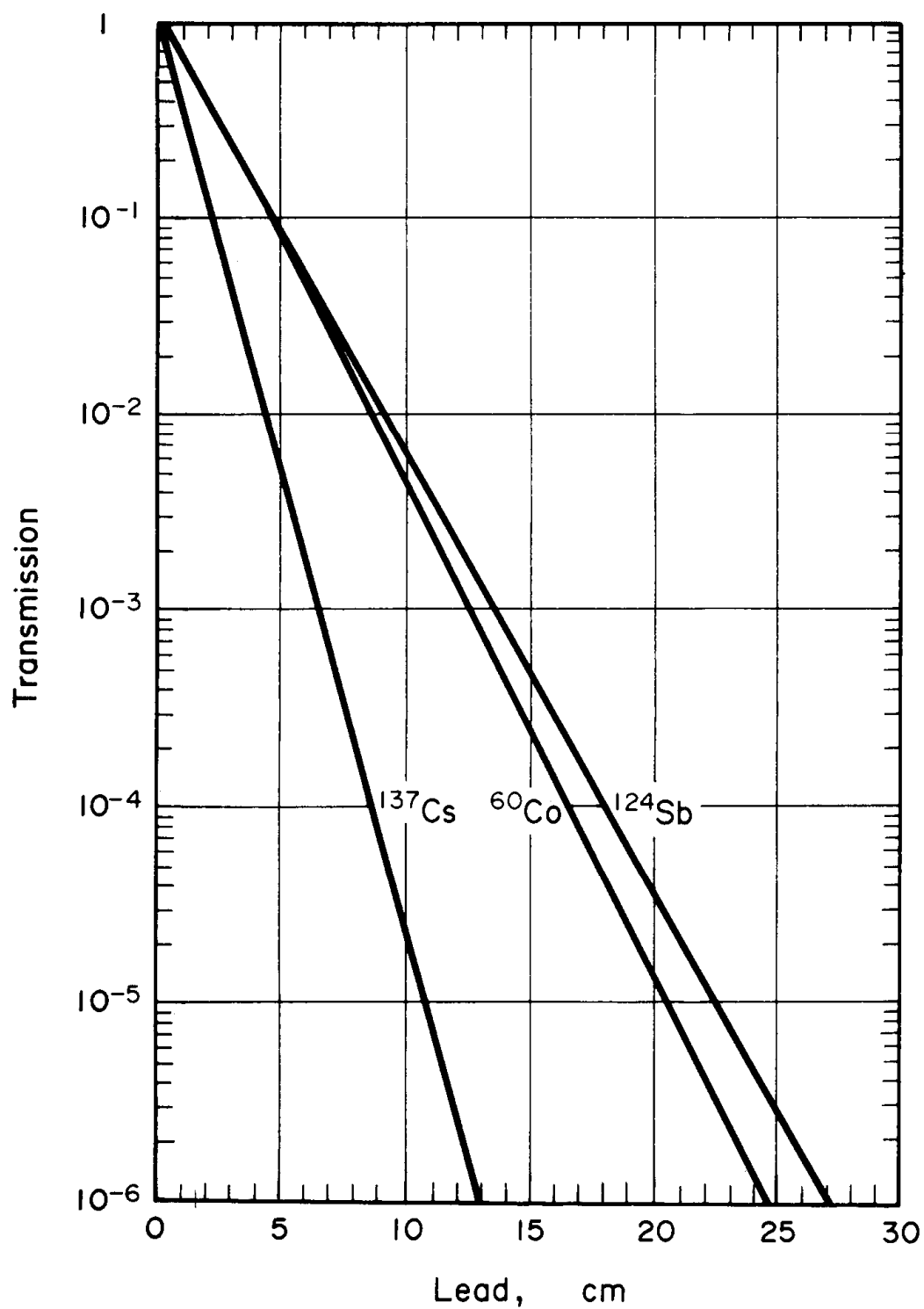
Figuur 28. Conversiecoëfficiënten voor luchtkerma K_a naar omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$, effectieve dosis $E(AP)$ in een fantoom van een volwassene in de anterior-posteriorgeometrie, en persoonsdosisequivalent $H_{p,slab}(10)$ in een ICRU-slab



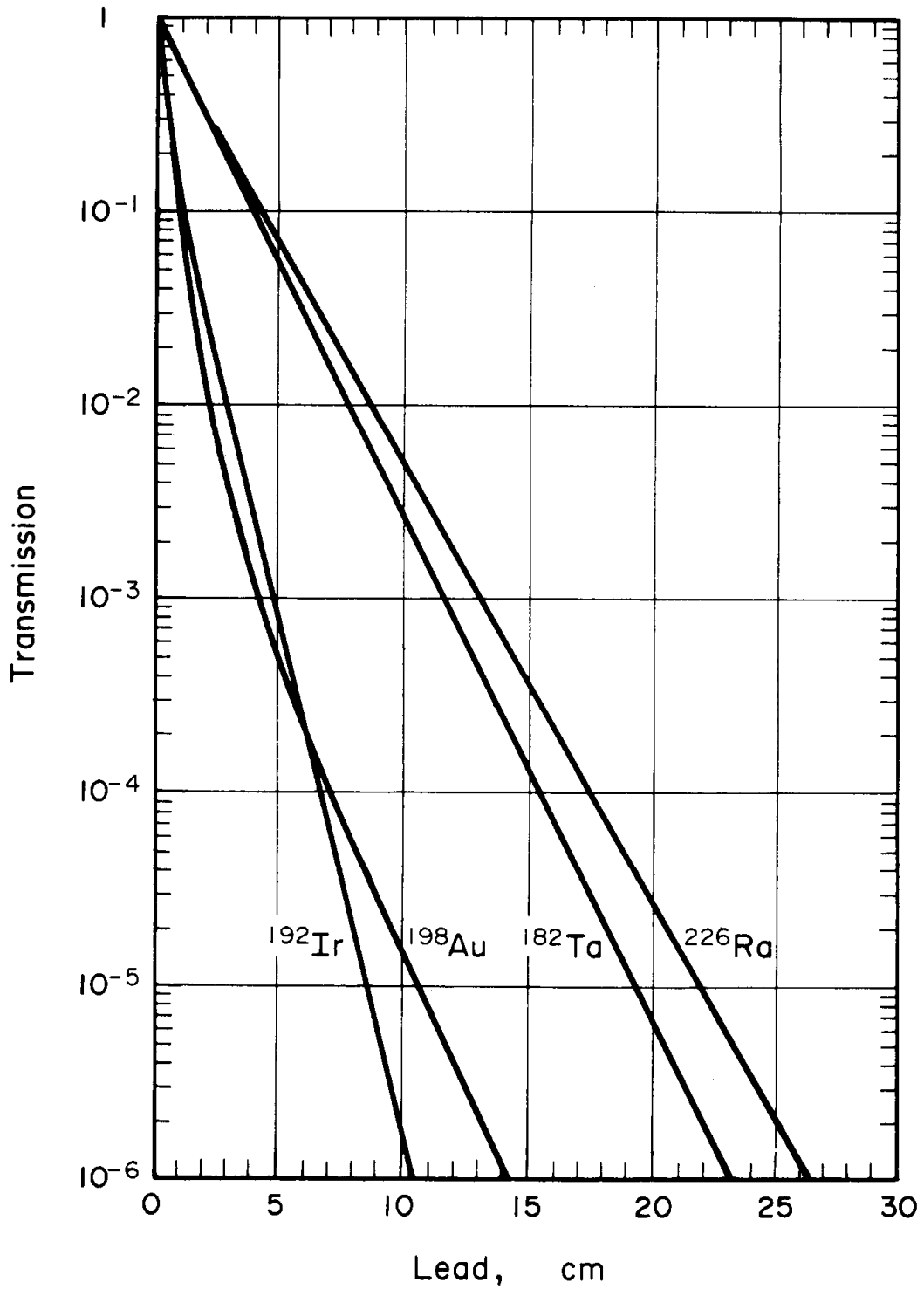
Figuur 29. Verhouding van effectieve dosis en omgevingsdosisequivalent als functie van de fotonenergie bij verschillende bestralingsgeometrieën, (AP = anterior-posterior, PA = posterior-anterior en ROT = roterend)

materiaal	E (MeV)	μd						
		1	2	4	7	10	15	20
water	0,25	3,09	7,14	23,0	72,9	166	456	982
	0,5	2,52	5,14	14,3	38,8	77,6	178	334
	1,0	2,13	3,71	7,68	16,2	27,1	50,4	82,2
	2,0	1,83	2,77	4,88	8,46	12,4	19,5	27,7
	3,0	1,69	2,42	3,91	6,23	8,63	12,8	17,0
	4,0	1,58	2,17	3,34	5,13	6,94	9,97	12,9
	6,0	1,46	1,91	2,76	3,99	5,18	7,09	8,85
	8,0	1,38	1,74	2,40	3,34	4,25	5,66	6,95
beton	0,5	2,18	3,66	7,72	16,5	29,1	58,1	98,3
	1,0	1,95	2,60	5,98	11,6	18,7	33,1	50,6
	2,0	1,75	2,52	4,38	7,65	11,4	18,2	25,7
	3,0							
	4,0							
	6,0							
	8,0							
ijzer	0,5	1,98	3,09	5,98	11,7	19,2	35,4	55,6
	1,0	1,87	2,89	5,39	10,2	16,2	28,3	42,7
	2,0	1,76	2,43	4,13	7,25	10,9	17,6	25,1
	3,0	1,55	2,15	3,51	5,85	8,51	13,5	19,1
	4,0	1,45	1,94	3,03	4,91	7,11	11,2	16,0
	6,0	1,34	1,72	2,58	4,14	6,02	9,89	14,7
	8,0	1,27	1,56	2,23	3,49	5,07	8,50	13,0
lood	0,5	1,24	1,42	1,69	2,00	2,27	2,65	2,73
	1,0	1,36	1,69	2,26	3,02	3,74	4,81	5,86
	2,0	1,39	1,76	2,51	3,66	4,84	6,87	9,00
	3,0	1,34	1,68	2,43	3,75	5,30	8,44	12,3
	4,0	1,27	1,56	2,25	3,61	5,44	9,80	16,3
	6,0	1,18	1,40	1,97	3,34	5,69	13,8	32,7
	8,0	1,14	1,30	1,74	2,89	5,07	14,1	44,6

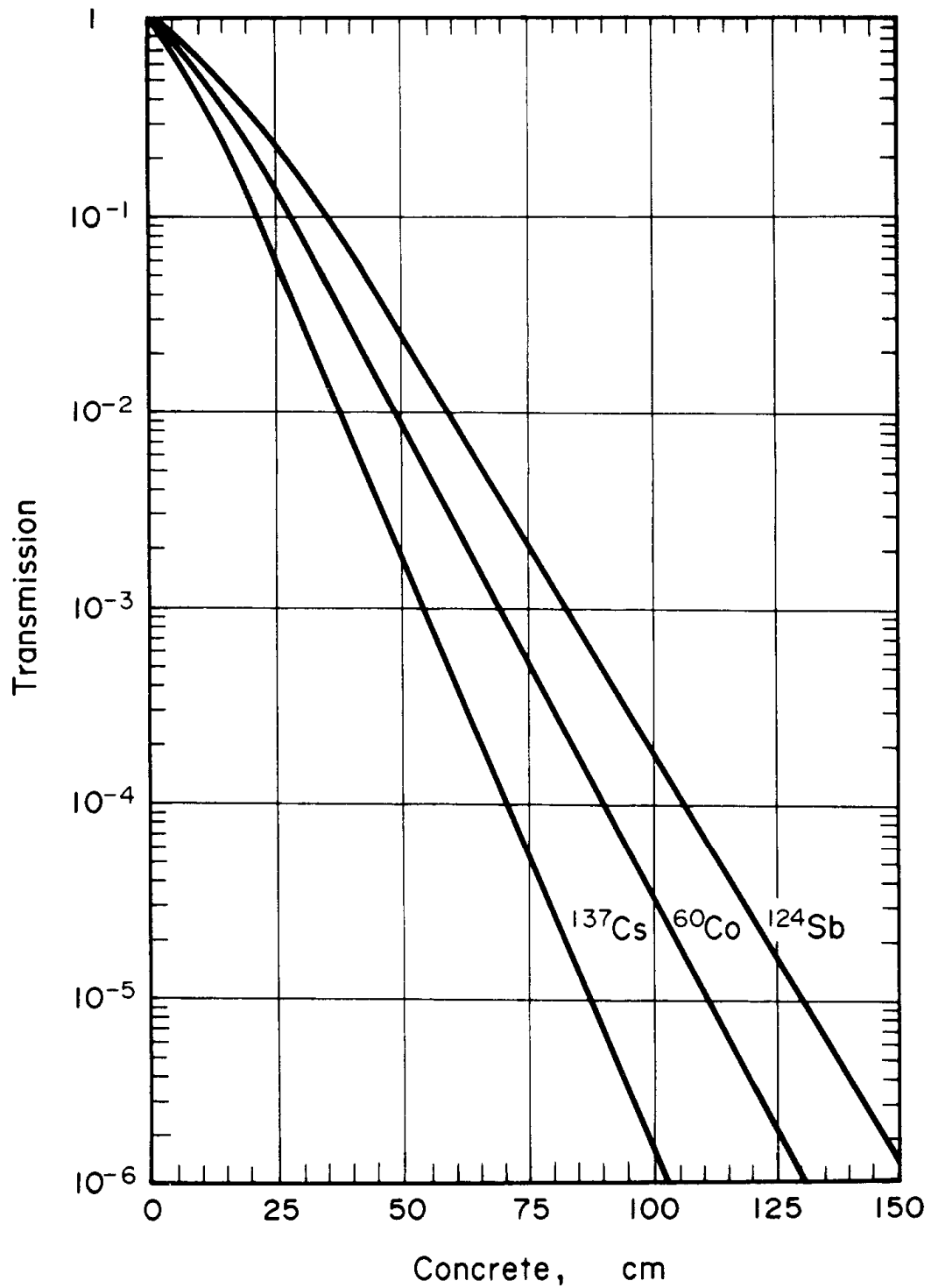
Figuur 30. Dosisopbouwfactoren voor een isotrope puntbron en verschillende materialen als functie van de dikte van de afscherming en de energie van de fotonen



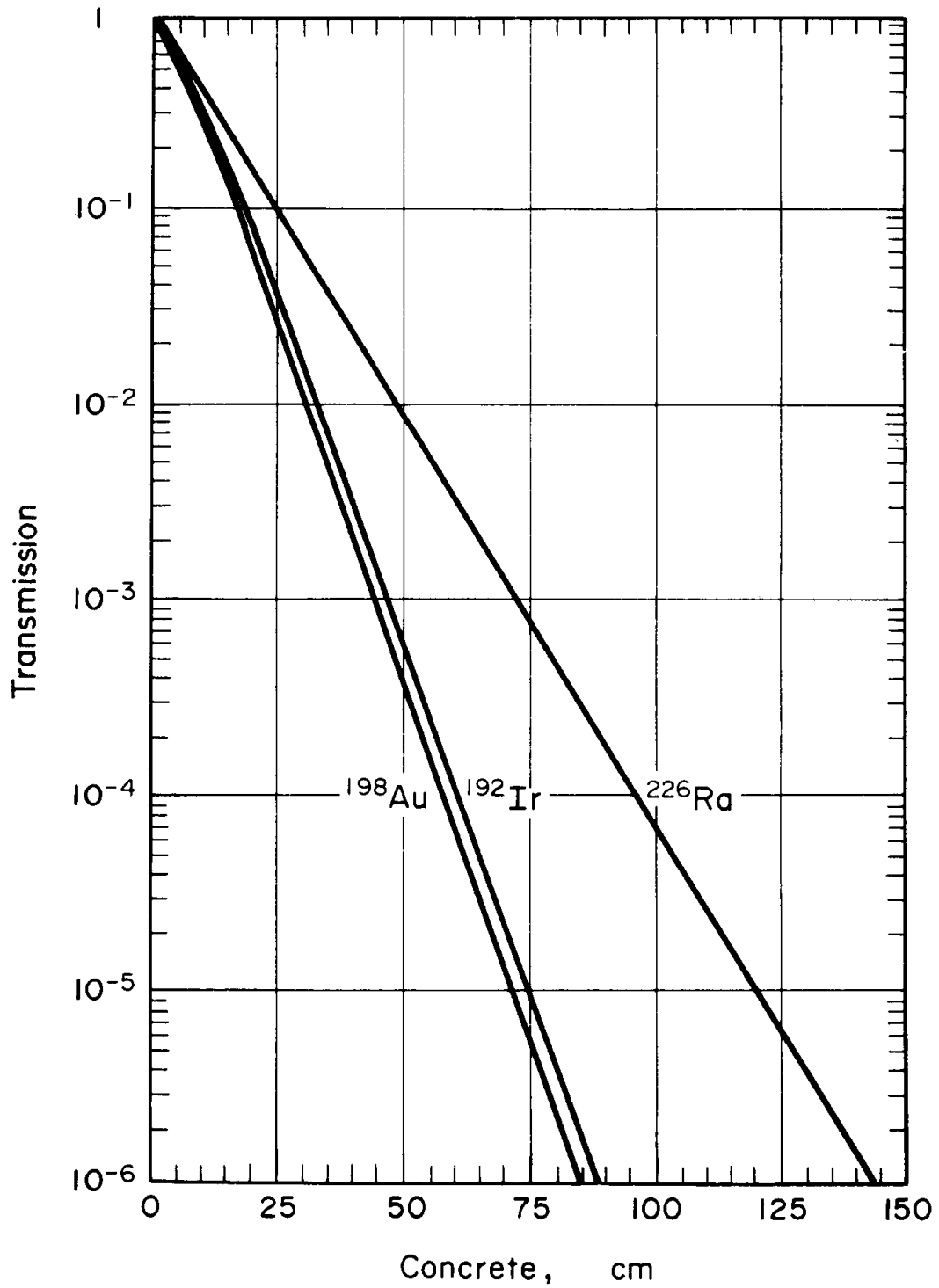
Figuur 31. Transmissie van brede bundels γ -straling door lood



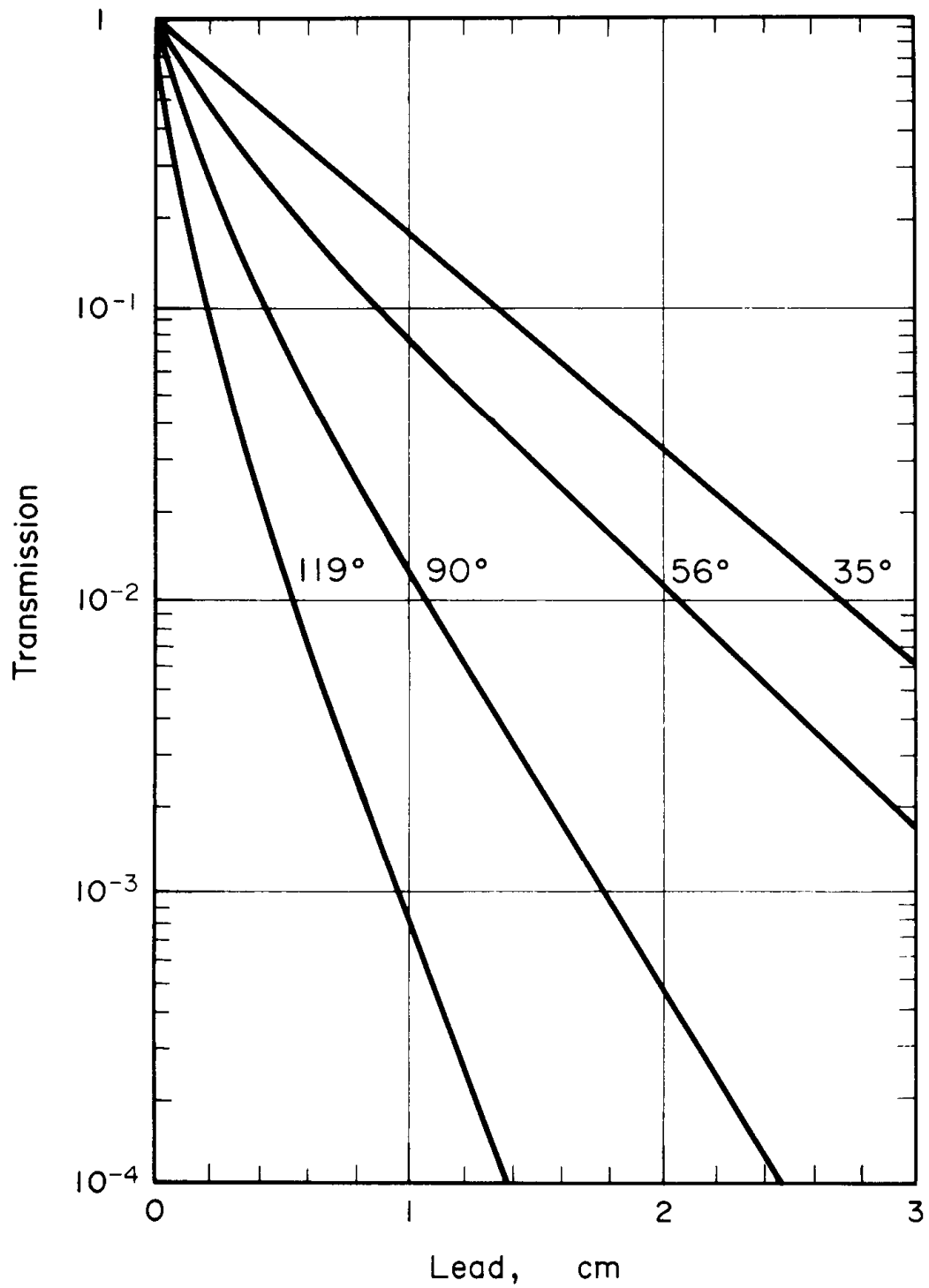
Figuur 32. Transmissie van brede bundels γ -straling door lood



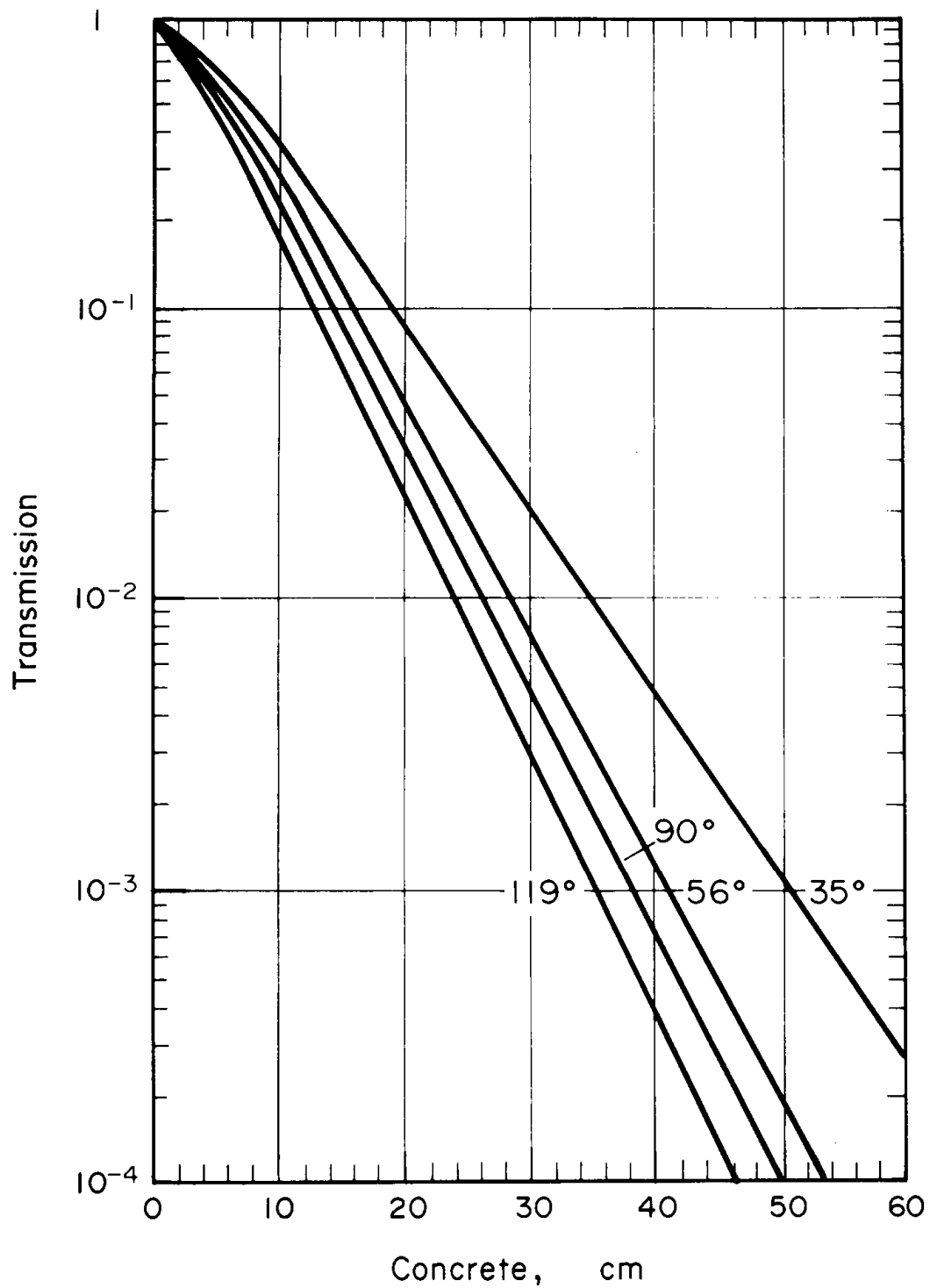
Figuur 33. Transmissie van brede bundels γ -straling door beton



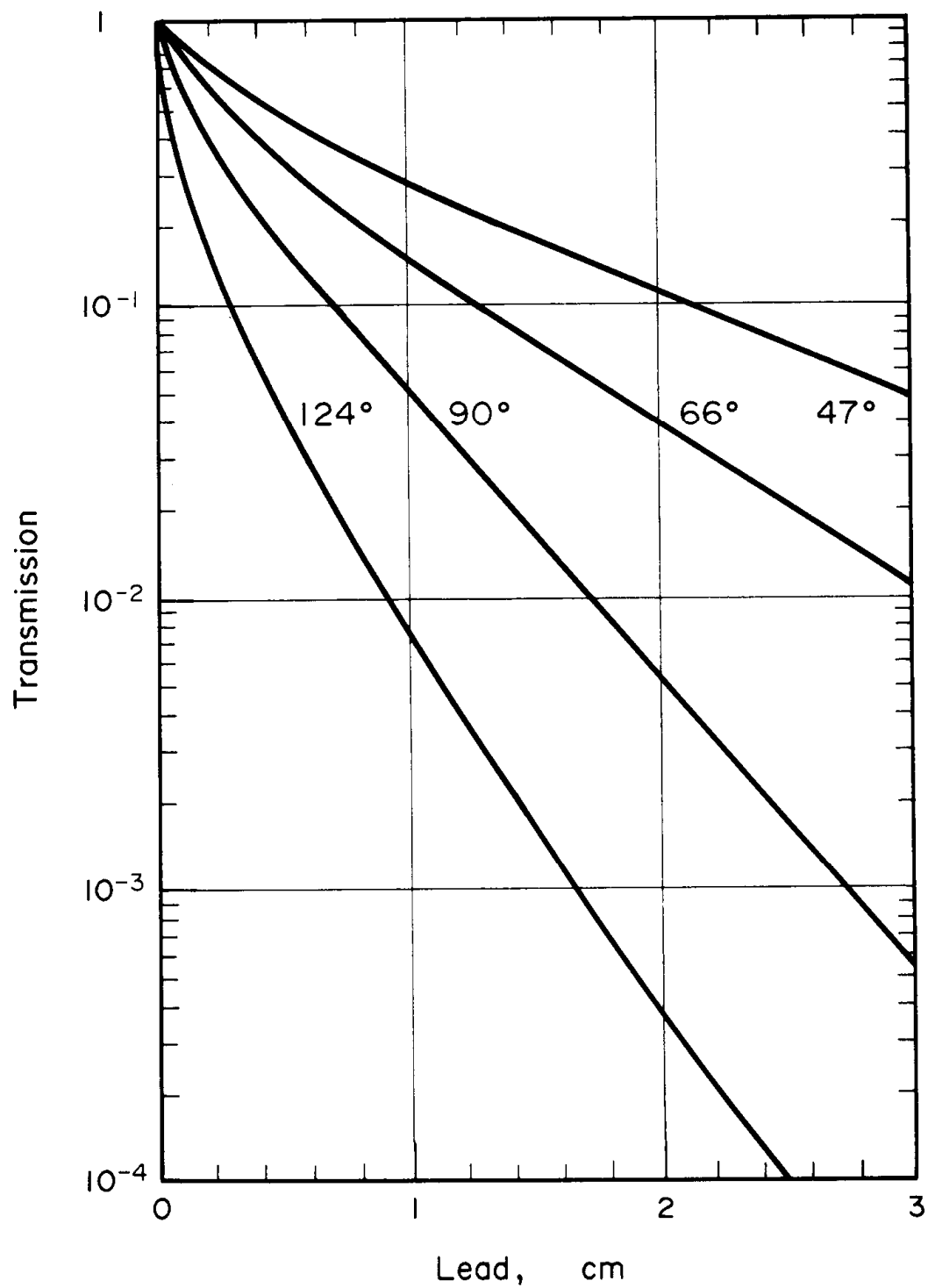
Figuur 34. Transmissie van brede bundels γ -straling door beton



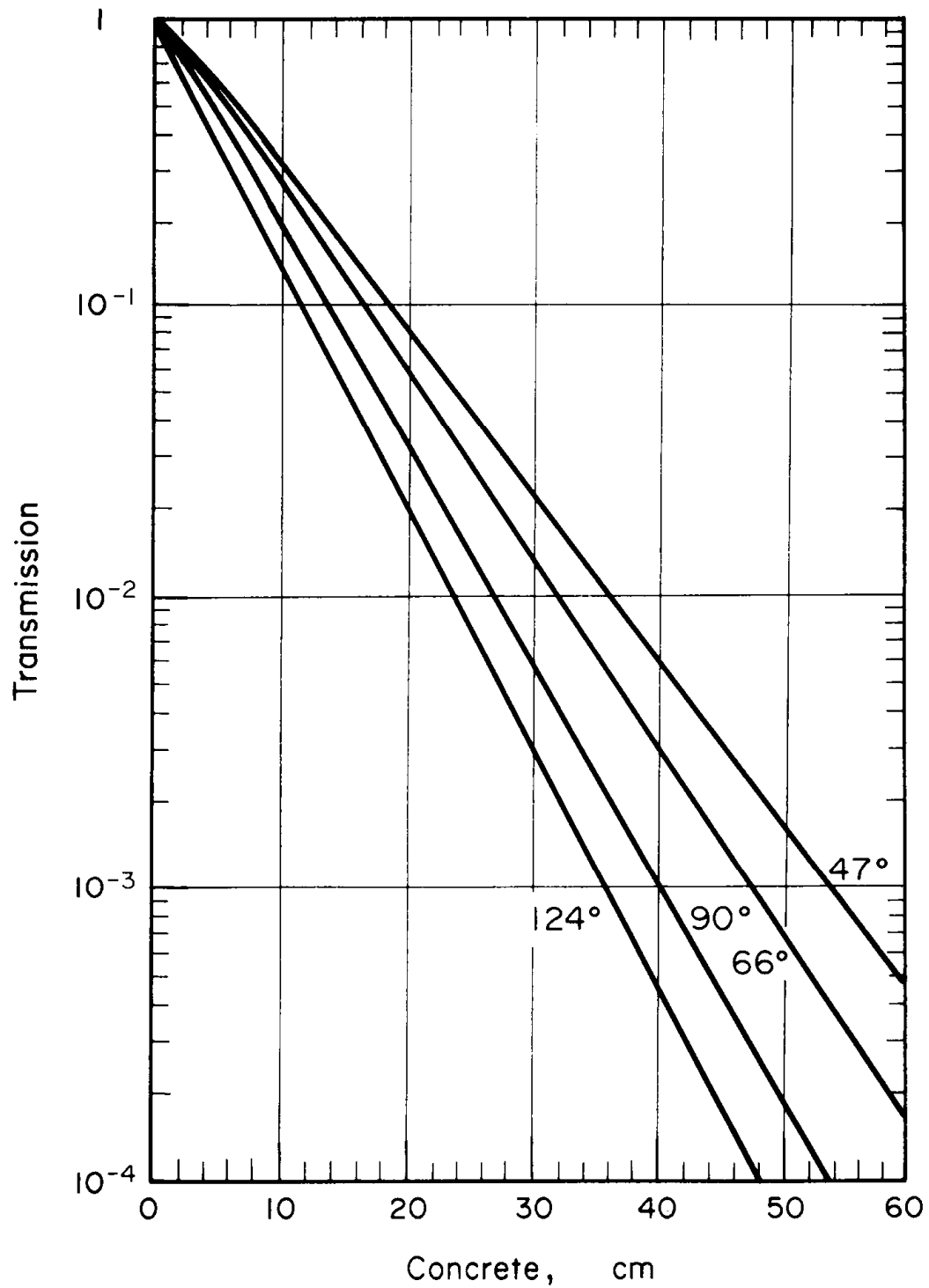
Figuur 35. Transmissie van aan beton verstrooide γ -straling van ^{137}Cs door lood



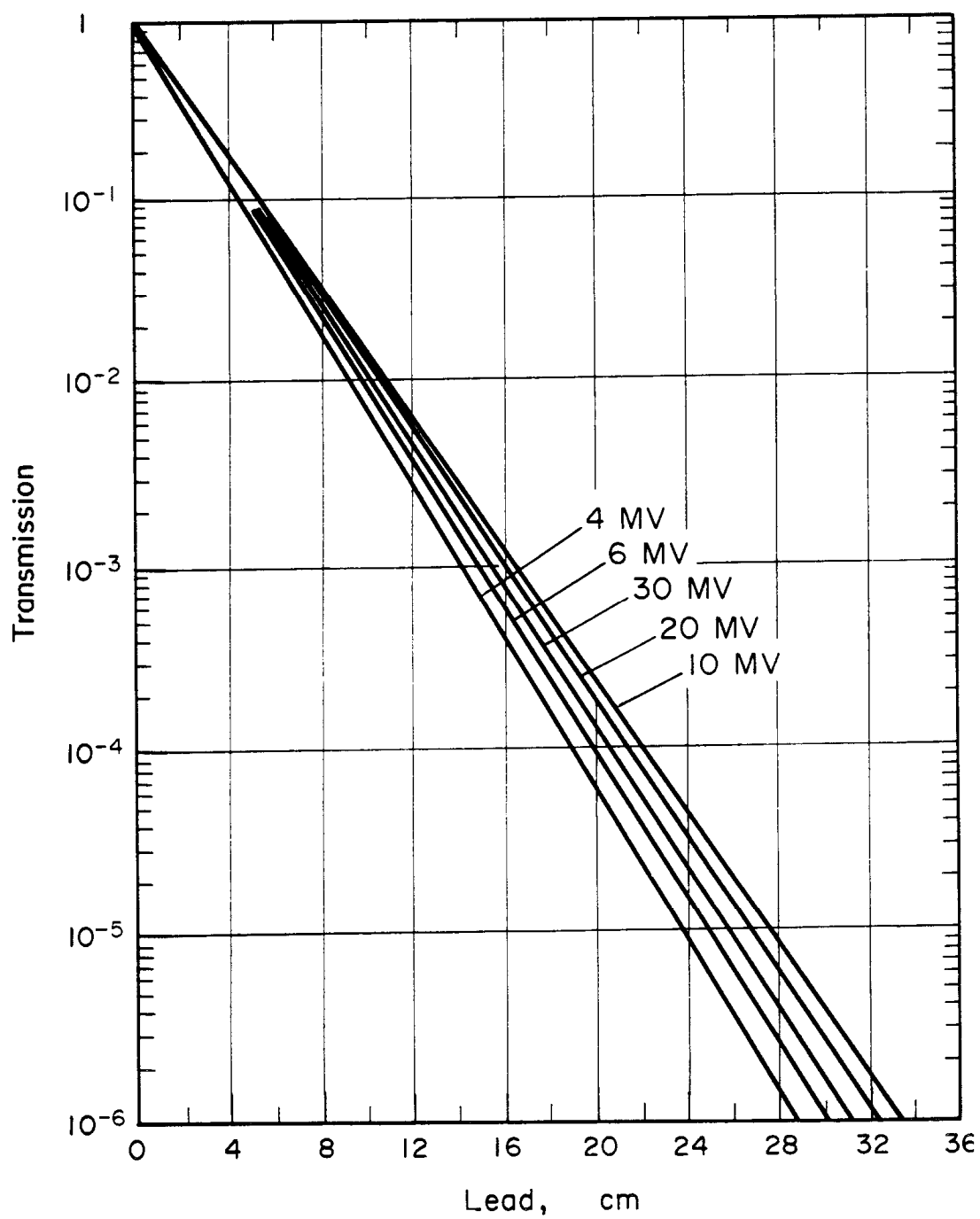
Figuur 36. Transmissie van aan beton verstrooide γ -straling van ^{137}Cs door beton



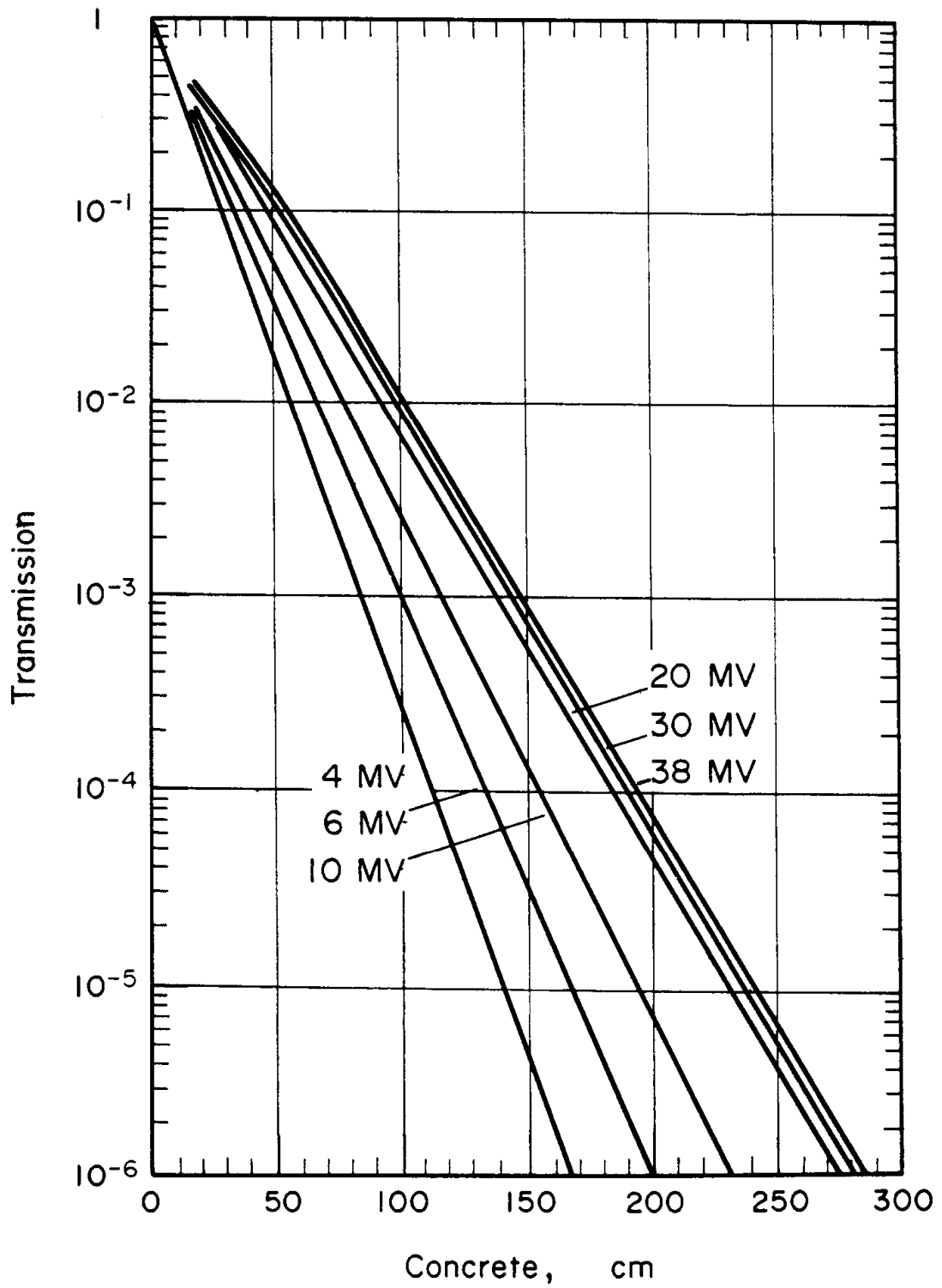
Figuur 37. Transmissie van aan een fantoom verstrooide γ -straling van ^{60}Co door lood



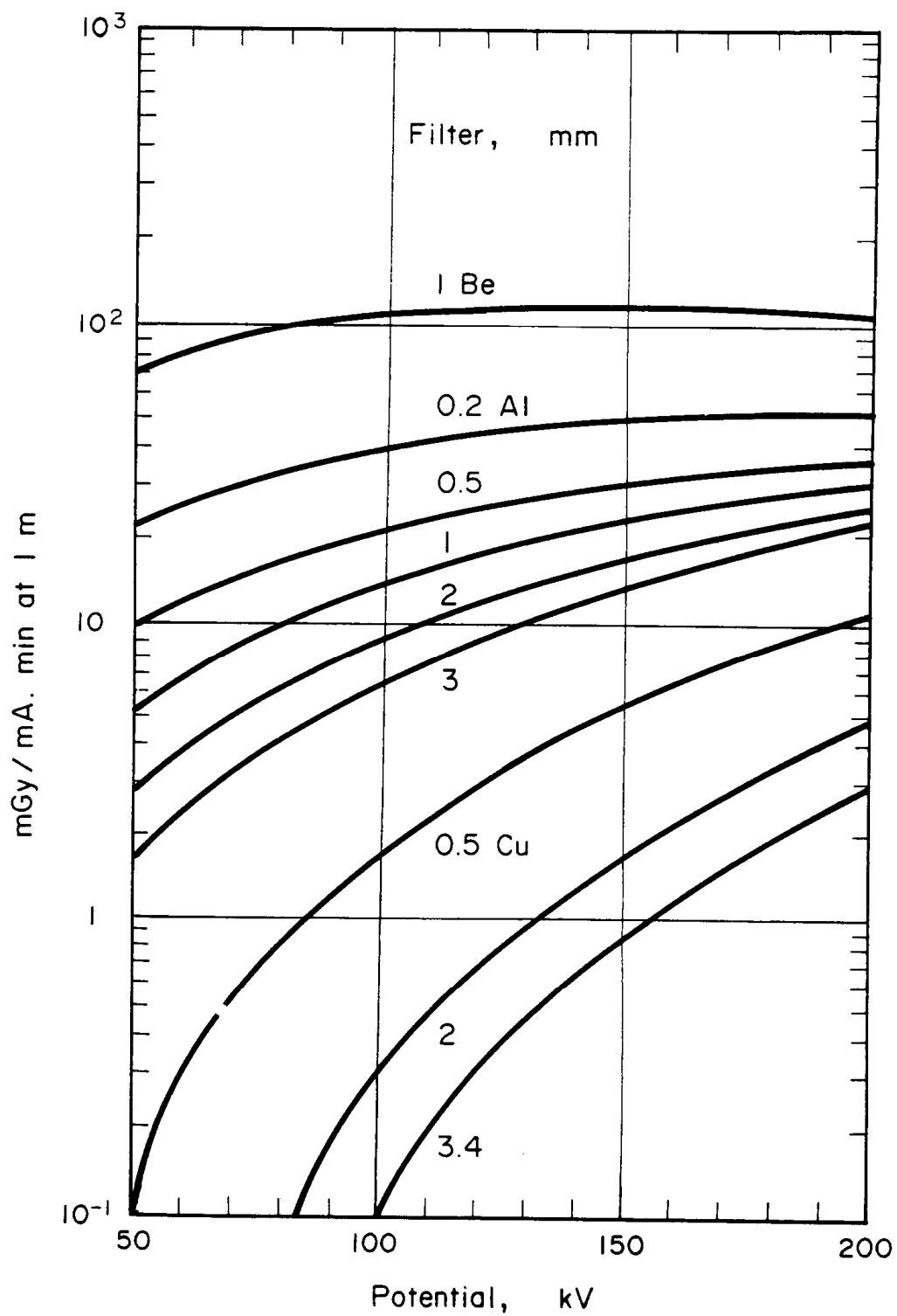
Figuur 38. Transmissie van aan een fantoom verstrooide γ -straling van ^{60}Co door beton



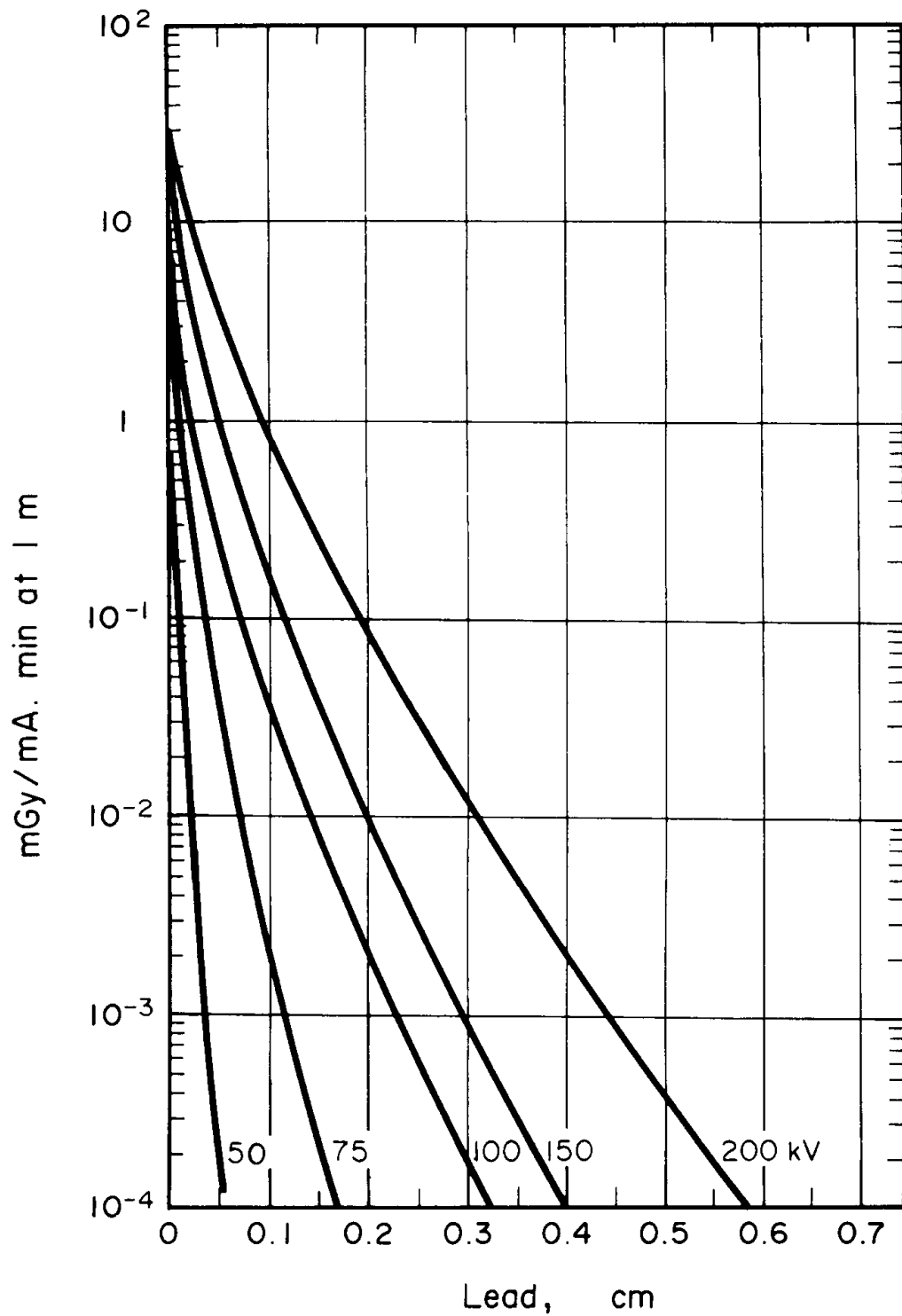
Figuur 39. Transmissie van brede bundels röntgenstraling door lood



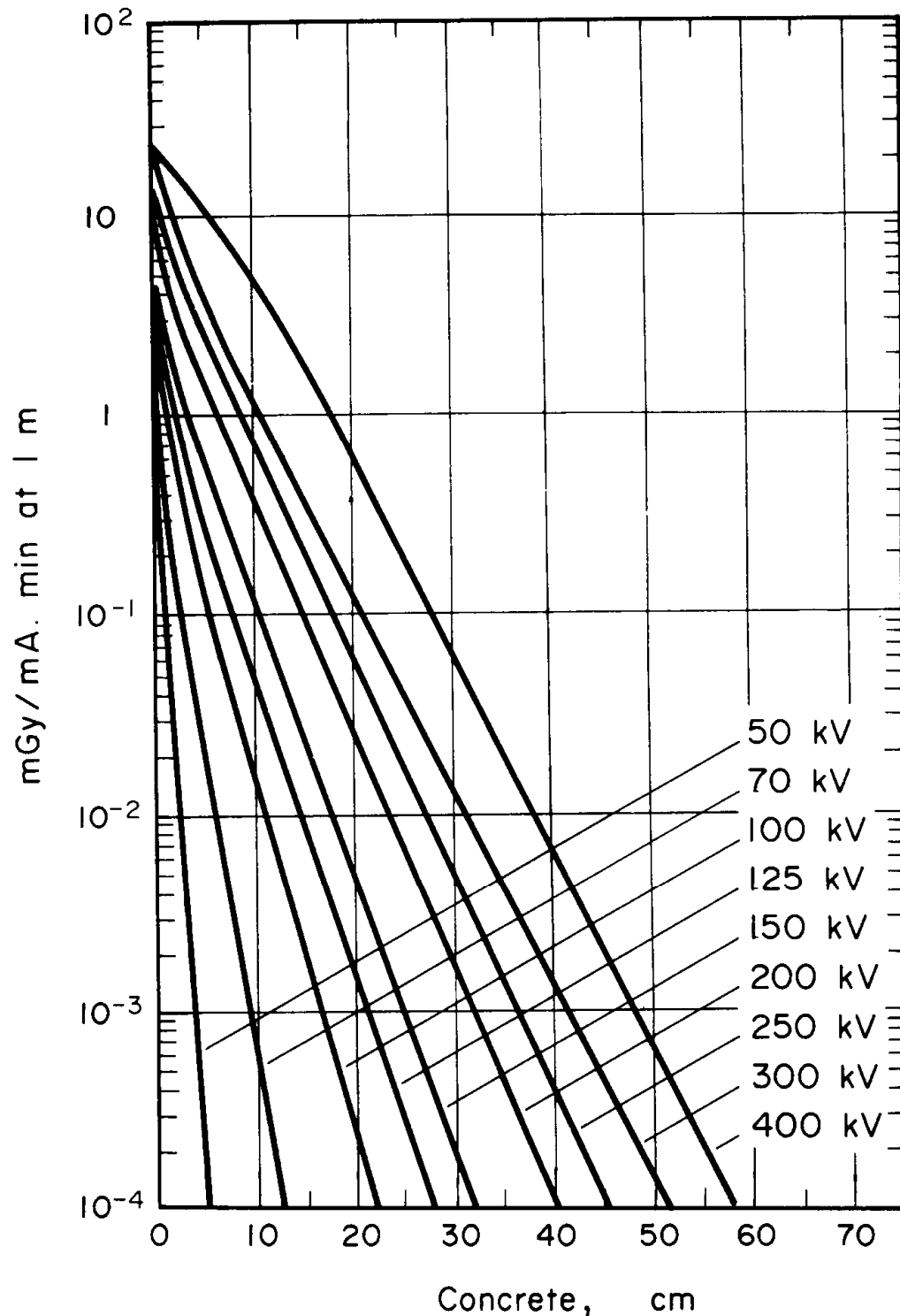
Figuur 40. Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton



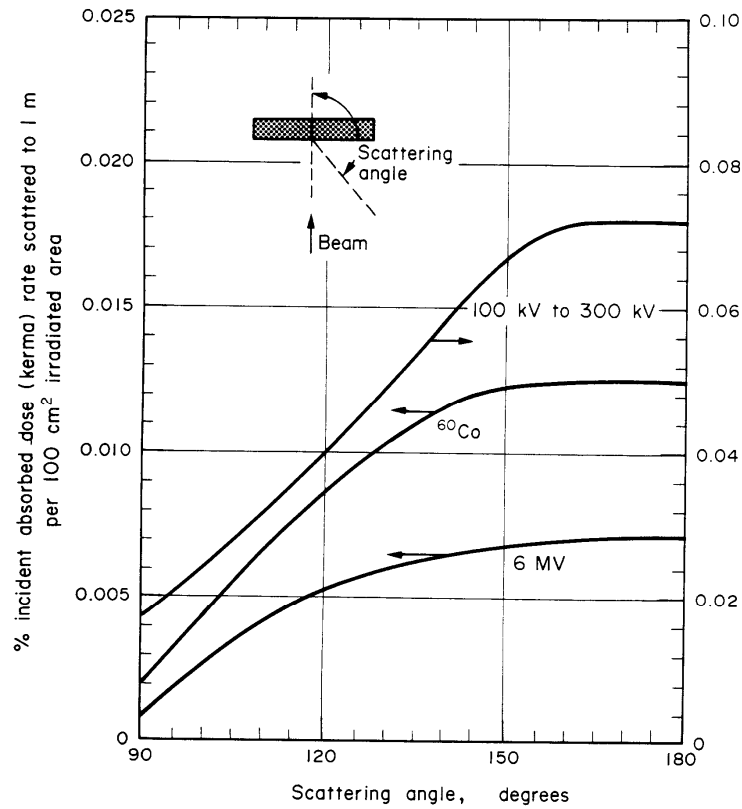
Figuur 41. Kermatempo voor verschillende filtraties



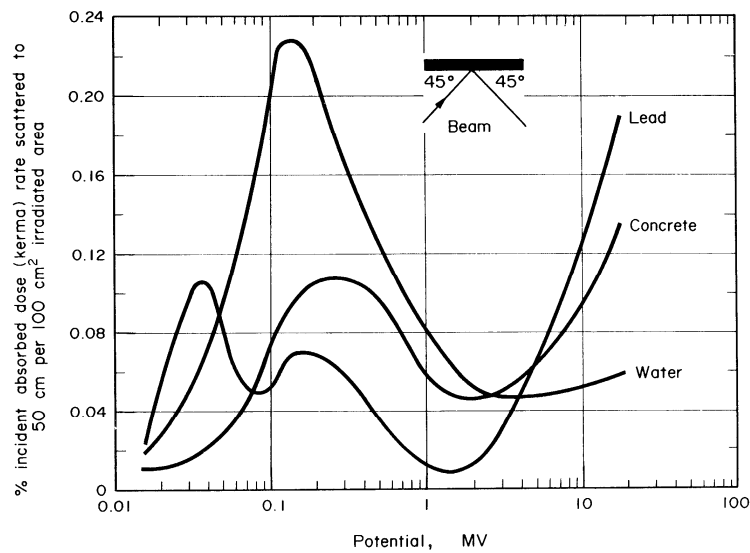
Figuur 42. Kermatempo en transmissie van röntgenstraling door lood (gelijkspanning, anode van wolfram en filter van 2 mm aluminium; de intensiteit bij 0 cm lood bedraagt 28,7 bij 200 kV, 18,3 bij 150 kV, 9,6 bij 100 kV, 6,1 bij 75 kV en 2,6 bij 50 kV)



Figuur 43. Kermatempo en transmissie van röntgenstraling door beton (50-300 kV: halve-sinusspanning, anode van wolfram en filter van 1 mm aluminium bij 50 kV, 1,5 mm aluminium bij 70 kV, 2 mm aluminium bij 100 kV en 3 mm aluminium bij 125-300 kV; 400 kV: gelijkspanning, anode van goud en filter van 3 mm koper; de intensiteit bij 0 cm beton bedraagt 23,5 bij 400 kV, 20,9 bij 300 kV, 13,9 bij 250 kV, 8,9 bij 200 kV, 5,2 bij 150 kV, 3,9 bij 125 kV, 2,8 bij 100 kV, 2,1 bij 70 kV en 1,7 bij 50 kV)



Figuur 44. Verstrooiing van röntgenstraling aan beton als functie van de verstrooihoek bij loodrechte inval



Figuur 45. Verstrooiing van röntgenstraling aan water, beton en lood als functie van de buisspanning (invalshoek = uitvalshoek = 45°)

bronorgaan	massa (g)	doelorgaan	massa (g)
eierstokken	11	eierstokken	11
teelballen	35	teelballen	35
spierweefsel	28 000	spierweefsel	28 000
rood beenmerg	1500	rood beenmerg	1500
compact bot	4000	botoppervlak	120
sponsachtig bot	1000		
longen	1000	longen	1000
schildklier	20	schildklier	20
inhoud maag	250	wand maag	150
inhoud dunne darm	400	wand dunne darm	640
inhoud dikke darm (boven)	220	wand dikke darm (boven)	210
inhoud dikke darm (onder)	135	wand dikke darm (onder)	160
nieren	310	nieren	310
lever	1800	lever	1800
alvleesklier	100	alvleesklier	100
huid	2600	huid	2600
milt	180	milt	180
bijnieren	14	bijnieren	14
inhoud blaas	200	wand blaas	45
		zwezerik	20
		baarmoeder	80
		hersenen	1400
zacht weefsel	63 000		
lichaamswater	42 000		
totale lichaam	70 000		

Figuur 46. Massa's van bron- en doelorganen van de referentiemens

orgaan (T)	w_T
borstweefsel	0,12
dikke darm	0,12
longen	0,12
maag	0,12
rood beenmerg	0,12
gonaden	0,08
blaas	0,04
lever	0,04
schildklier	0,04
slokdarm	0,04
botoppervlak	0,01
hersenen	0,01
huid	0,01
speekselklieren	0,01
13 overige organen *	0,12

* alvleesklier, baarmoeder(hals) / prostaat, bijnieren, dunne darm, extrathoraciaal longweefsel, galblaas, hart, lymfeklieren, milt, mondslimvlies, nieren, spierweefsel en zwezerik

Figuur 47. Orgaanweegfactoren w_T

doelorgaan	fotonenergie (keV)						
	50	100	200	500	1000	1500	2000
wand blaas	2,04E-7	6,16E-7	5,60E-7	1,21E-7	5,80E-7	8,48E-7	9,02E-7
maagwand	8,90E-6	7,07E-6	6,96E-6	6,50E-6	6,44E-6	6,00E-6	6,11E-6
nieren	1,95E-5	1,58E-5	1,36E-5	1,29E-5	1,18E-5	1,14E-5	1,10E-5
lever	1,52E-4	9,14E-5	8,82E-5	8,85E-5	8,07E-5	7,48E-5	6,86E-5
longen	1,45E-5	9,92E-6	8,84E-6	8,23E-6	7,90E-6	7,72E-6	6,96E-6
eierstokken	1,51E-6	1,63E-6	1,80E-6	6,53E-7	2,49E-6	3,44E-6	2,22E-6
alvleesklier	2,18E-5	1,77E-5	1,35E-5	1,66E-5	1,36E-5	1,21E-5	9,99E-6
botoppervlak	7,80E-6	4,93E-6	3,17E-6	2,53E-6	2,30E-6	2,26E-6	2,20E-6
rood beenmerg	9,33E-6	7,14E-6	4,64E-6	3,72E-6	3,21E-6	3,26E-6	3,17E-6
milt	2,93E-6	3,56E-6	3,34E-6	3,44E-6	3,81E-6	2,95E-6	3,14E-6
teelballen	3,42E-8	1,90E-7	3,05E-7	3,92E-7	8,76E-7	4,70E-7	4,79E-7
schildklier	8,81E-8	3,80E-7	8,23E-7	6,32E-7	6,81E-7	6,87E-7	6,90E-7
baarmoeder	9,07E-7	1,51E-6	1,40E-6	1,52E-6	1,28E-6	2,07E-6	1,81E-6
hele lichaam	9,48E-6	6,54E-6	5,94E-6	5,86E-6	5,49E-6	5,16E-6	4,86E-6

Figuur 48. Specifieke geabsorbeerde fracties SAF (in g⁻¹) voor bronorgaan lever

doelorgaan	fotonenergie (keV)						
	50	100	200	500	1000	1500	2000
wand blaas	2,28E-7	3,15E-7	6,27E-7	4,52E-7	1,25E-6	8,91E-7	9,65E-7
maagwand	5,86E-5	4,09E-5	3,36E-5	3,39E-5	2,93E-5	3,14E-5	2,65E-5
nieren	5,30E-5	3,61E-5	3,14E-5	2,93E-5	2,59E-5	2,55E-5	2,33E-5
lever	2,93E-6	3,78E-6	3,67E-6	3,69E-6	3,53E-6	3,45E-6	3,27E-6
longen	1,23E-5	8,97E-6	7,91E-6	7,56E-6	6,87E-6	6,21E-6	6,38E-6
eierstokken	1,19E-6	1,14E-6	2,05E-6	3,70E-7	1,70E-6	2,17E-6	3,46E-6
alvleesklier	1,23E-4	7,35E-5	6,58E-5	6,70E-5	5,80E-5	5,13E-5	4,94E-5
botoppervlak	8,30E-6	5,06E-6	3,25E-6	2,65E-6	2,48E-6	2,36E-6	2,18E-6
rood beenmerg	1,05E-5	7,47E-6	5,04E-6	3,90E-6	3,64E-6	3,35E-6	3,19E-6
milt	7,24E-4	4,21E-4	4,32E-4	4,49E-4	4,10E-4	3,77E-4	3,55E-4
teelballen	2,09E-8	1,42E-7	2,45E-7	3,30E-7	3,88E-7	4,14E-7	4,26E-7
schildklier	5,15E-8	2,70E-7	4,16E-7	5,10E-7	5,68E-7	5,83E-7	5,88E-7
baarmoeder	6,87E-7	1,61E-6	1,42E-6	1,61E-6	2,11E-6	6,25E-7	1,76E-6
hele lichaam	9,47E-6	6,52E-6	5,93E-6	5,82E-6	5,46E-6	5,16E-6	4,81E-6

Figuur 49. Specifieke geabsorbeerde fracties SAF (in g⁻¹) voor bronorgaan milt

AMAD (μm)	ET ₁	ET ₂	BB _{fast+seq}	BB _{slow}	bb _{fast+seq}	bb _{slow}	AI	totaal
0,0006	0,45	0,44	0,030	0,030	0,020	0,020	0,00029	0,99
0,001	0,40	0,40	0,039	0,039	0,048	0,048	0,0037	0,99
0,002	0,30	0,32	0,042	0,042	0,11	0,11	0,043	0,96
0,005	0,16	0,18	0,025	0,025	0,13	0,13	0,27	0,92
0,01	0,087	0,098	0,014	0,014	0,095	0,095	0,47	0,88
0,02	0,053	0,059	0,0081	0,0081	0,063	0,063	0,49	0,74
0,05	0,032	0,034	0,0047	0,0047	0,036	0,036	0,31	0,46
0,1	0,032	0,032	0,0034	0,0034	0,024	0,024	0,21	0,33
0,2	0,055	0,061	0,0032	0,0032	0,015	0,015	0,15	0,30
0,5	0,089	0,11	0,0040	0,0039	0,011	0,011	0,12	0,35
0,7	0,12	0,15	0,0051	0,0048	0,0094	0,0092	0,11	0,42
1	0,17	0,21	0,0066	0,0058	0,0084	0,0081	0,11	0,51
2	0,25	0,32	0,0099	0,0074	0,0080	0,0068	0,092	0,70
3	0,30	0,37	0,011	0,0073	0,0077	0,0060	0,077	0,78
5	0,34	0,40	0,012	0,0059	0,0066	0,0044	0,053	0,82
7	0,35	0,40	0,011	0,0046	0,0055	0,0032	0,038	0,81
10	0,35	0,38	0,0095	0,0031	0,0042	0,0021	0,024	0,77
15	0,34	0,36	0,0072	0,0018	0,0027	0,0011	0,012	0,71
20	0,32	0,33	0,0055	0,0011	0,00066	0,0018	0,0072	0,67

Figuur 50. Longdepositiefracties voor neusademmer (ademtempo = $1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)

AMAD (μm)	ET ₁	ET ₂	BB _{fast+seq}	BB _{slow}	bb _{fast+seq}	bb _{slow}	AI	totaal
0,0006	0,20	0,58	0,060	0,060	0,040	0,040	0,00061	0,99
0,001	0,18	0,49	0,066	0,066	0,081	0,081	0,0062	0,98
0,002	0,14	0,35	0,058	0,058	0,14	0,14	0,058	0,95
0,005	0,075	0,18	0,031	0,031	0,15	0,15	0,30	0,91
0,01	0,042	0,099	0,016	0,016	0,10	0,10	0,50	0,87
0,02	0,026	0,060	0,0091	0,0091	0,065	0,065	0,50	0,73
0,05	0,015	0,034	0,0052	0,0052	0,037	0,037	0,32	0,45
0,1	0,012	0,024	0,0038	0,0038	0,024	0,024	0,21	0,30
0,2	0,015	0,025	0,0040	0,0039	0,016	0,016	0,15	0,23
0,5	0,024	0,037	0,0066	0,0059	0,013	0,012	0,14	0,24
0,7	0,033	0,055	0,011	0,0086	0,013	0,012	0,14	0,28
1	0,047	0,083	0,017	0,012	0,014	0,012	0,16	0,34
2	0,082	0,17	0,039	0,020	0,020	0,014	0,17	0,52
3	0,10	0,24	0,054	0,023	0,024	0,014	0,17	0,62
5	0,12	0,32	0,068	0,021	0,026	0,012	0,13	0,71
7	0,13	0,37	0,071	0,018	0,024	0,0099	0,11	0,73
10	0,14	0,41	0,066	0,013	0,019	0,0070	0,073	0,72
15	0,14	0,43	0,054	0,0083	0,014	0,0041	0,042	0,69
20	0,13	0,43	0,043	0,0053	0,0095	0,0025	0,026	0,65

Figuur 51. Longdepositiefracties voor mondademmer (ademtempo = $1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)

RECENTE EXAMENS

