

# **Cursus Coördinerend Stralingsbeschermingsdeskundige**

## **Oefeningen**

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

**12 maart 2021**



rijksuniversiteit  
groningen



arbo, milieu en  
duurzaamheid



garp

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

# INHOUD

Leeswijzer .....	2
1 Wiskunde .....	3
2 Compartmentensystemen .....	9
3 Statistiek.....	15
4 Atoom- en kernbouw .....	21
5 Radioactiviteit.....	23
6 Wisselwerking van straling met materie .....	30
7 Basale dosimetrie.....	34
9 Operationele dosimetrie.....	37
10 Dosimetrie van inwendige besmetting .....	39
11 Detectie van straling .....	43
12 Afscherming van uitwendige straling .....	47
14 Wet- en regelgeving .....	53
15 Toestellen .....	59
16 Ingekapselde bronnen .....	61
17 Open bronnen .....	63
Appendix.....	65
A1 Enkel-logaritmisch grafiekpapier .....	66
A2 Eenzijdige overschrijdingskans $P(k)$ voor een normaalverdeling.....	67
A3 Kans op K-röntgenfluorescentie .....	67
A4 Massieke verzwakking-, energieoverdracht- en energieabsorptiecoëfficiënt.....	67
A5 Massieke verzwakkingscoëfficiënten van lood .....	68
A6 Verhouding van $E$ en $H^*(10)$ voor verschillende geometrieën, als functie van $E_\gamma$ .....	69
A7 $K_a$ , $H^*(10)$ en $E(AP)$ per eenheid van $\Phi$ als functie van $E_\gamma$ .....	69
A8 $K_a$ , $H^*(10)$ en $E(AP)$ per eenheid van $\Phi$ als functie van $E_{\text{neutron}}$ .....	70
A9 Longdepositie voor een volwassen man (neusademmer) .....	70
A10 Transmissie van brede bundels $\gamma$ -straling door beton.....	71
A11 Transmissie van brede bundels $\gamma$ -straling door lood.....	72
A12 Dosisopbouwfactor voor water, beton, ijzer en lood.....	73
A13 Transmissie van brede bundels $\gamma$ -straling van $^{252}\text{Cf}$ door beton, staal en lood ...	74
A14 Transmissie van brede bundels neutronen van $^{252}\text{Cf}$ door polyethyleen (= polyetheen) en lood.....	75
A15 De p-, q- en r-waarden volgens de richtlijn radionuclidenlaboratoria .....	76
A16 Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton.....	77

## Leeswijzer

Deze verzameling oefeningen is bedoeld om de cursist in de gelegenheid te stellen zijn eigen vaardigheden te toetsen. De opgaven zijn eenvoudig van aard en omvatten de stof die de cursist geacht wordt "in de vingers te hebben" tijdens het gecoördineerd landelijke deel-examen stralingsbescherming.

De meeste oefeningen zijn ook geschikt voor cursisten die de cursus Toezichthouder Stralingsbescherming voor toepassingen van verspreidbare radioactieve stoffen (TS VRS-C) volgen, met uitzondering van:

<i>hoofdstuk</i>	<i>titel</i>	<i>oefeningen</i>
1	Wiskunde	5, 12 en 13
2	Compartimentensystemen	alle
3	Statistiek	6, 7 en 8
4	Atoom- en kernbouw	4
5	Radioactiviteit	10 en 11
6	Wisselwerking van straling met materie	1, 2, 3, 9 en 10
7	Basale dosimetrie	4
9	Operationele dosimetrie	3, 4 en 5
10	Dosimetrie van inwendige besmetting	
11	Detectie van straling	11
12	Afscherming van uitwendige straling	
14	Wet- en regelgeving	
15	Toestellen	alle
16	Ingekapselde bronnen	3
17	Open bronnen	2

## 1 Wiskunde

1 Bereken de waarde van  $x$ .

a  $2^x = 2^3 \times 2^5$

b  $2^x = (2^3)^5$

c  $x^2 = 3^2 \times 5^2$

2 Druk onderstaande expressies uit in  $^{10}\log(5)$  en  $^{10}\log(3)$ :

a  $^{10}\log(15) - ^{10}\log(3)$

b  $^{10}\log(60)$

3 Gegeven is  $^{10}\log(2) = 0,301\ 03$ ,  $^{10}\log(3) = 0,477\ 12$  en  $^{10}\log(5) = 0,698\ 97$ . Bereken de waarde van  $x$  zonder gebruik te maken van een rekenmachine.

a  $x = ^{10}\log(2^3)$

d  $x = ^{10}\log(2 / 3)$

b  $x = ^{10}\log(3^2)$

e  $x = ^{10}\log(2 + 3)$

c  $x = ^{10}\log(2 \times 3)$

f  $x = ^{10}\log(2 - 3)$

4 Bereken de waarde van  $x$  met behulp van een rekenmachine.

a  $x = 1,234^{5,678}$

b  $5^x = 625$

c  $5^x = 620$

5 Iemand legt € 1000 in op een spaarrekening waarover hij jaarlijks 2% rente ontvangt.

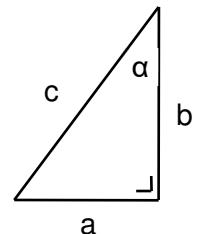
a na hoeveel jaar is zijn spaargeld verdubbeld?

*aanwijzing: los de vergelijking  $1000 \times 1,02^x = 2000$  op*

6 Van een rechthoekige driehoek met rechthoekszijden  $a$  en  $b$ , schuine zijde  $c$  en scherpe hoek  $\alpha$  geldt:  $\alpha = 5^\circ$  en  $a = 10$  m.

a bereken de hoek  $\alpha$  in radialen

b bereken  $b$  en  $c$  tot op één decimaal nauwkeurig



7 Los  $x$  en  $y$  op uit de volgende stelsels lineaire vergelijkingen:

a  $5x + y = 6$

$5x - y = 4$

b  $5x + 7y = 18$

$5x + 3y = 12$

c  $1,2x + 1,5y = 2,5$

$-2,3x + 3,0y = 0,3$

8 A en B liggen op een onderlinge afstand van 25 km. 's Ochtends om 8 uur precies vertrekken uit A en B tegelijkertijd twee wandelaars. De wandelaar die uit A vertrekt, loopt met een snelheid van 5 km per uur, die uit B met een snelheid van 6 km per uur.

a hoe laat ontmoeten ze elkaar?

b wat is de afstand van de plaats van ontmoeting tot A?

- 9 Het vermogen van Jan is 2,5 maal dat van Piet, terwijl Piet drie ton minder bezit dan Jan.  
a bereken de vermogens van Jan en Piet
- 10 Een jaar geleden was het vermogen van Jan 2,5 maal zo groot als dat van Piet. In dat jaar is het vermogen van Jan met drie ton toegenomen, en het vermogen van Piet met zes ton. Nu is het vermogen van Jan nog maar 2 maal zo groot als dat van Piet.  
a bereken de huidige vermogens van Jan en Piet
- 11 Bereken de wortels van de volgende vergelijkingen door ontbinding in factoren en met behulp van de wortelformule:  
a  $x^2 - 4x - 5 = 0$   
b  $x^2 - 5x + 6 = 0$   
c  $x^2 - 4x + 4 = 0$
- 12 De concentratie  $C(t)$  van een radioactieve stof in een ruimte wordt als functie van de tijd  $t$  (in uren) gegeven door de formule:  
$$C(t) = 10 e^{-\lambda t}$$
waarin  $\lambda$  een constante is die het ventilatievoud wordt genoemd. In een slecht geventileerde ruimte bedraagt  $\lambda = 0,5 \text{ h}^{-1}$ . Bereken in twee decimalen nauwkeurig:  
a de tijd die het duurt voordat de concentratie is gehalveerd  
b de procentuele daling van de concentratie per uur  
c de concentratie na 8 uur
- 13 Iemand stort iedere tiende dag van de maand een vast bedrag op een spaarrekening. Op 1 maart 2010 bedraagt het saldo € 1800. Op 1 juli 2010 is het saldo € 2500. Het saldo op de eerste dag van maand  $y$  bedraagt  $y = y_0 + a x$ , waarbij  $y_0$  het saldo op 1 januari 2010 is,  $x$  het aantal maanden en  $a$  het bedrag dat maandelijks wordt gestort.  
a bepaal  $a$  en  $y_0$  algebraïsch  
b bepaal  $a$  en  $y_0$  grafisch
- 14 Bereken de afgeleide van de volgende functies:  
a  $y = x^2 - 4x - 5$   
b  $y = e^{-0,1x}$   
c  $y = 0,1 e^{-0,1x}$   
d  $y = \ln(0,1x)$
- 15 Bereken de volgende bepaalde integralen:  
a  $\int_0^1 e^{-0,1t} dt$   
b  $\int_0^1 e^{-1t} dt$   
c  $\int_0^{10} e^{-0,1t} dt$   
d  $\int_0^\infty e^{-0,1t} dt$

**Antwoorden**

- 1 a  $2^x = 2^3 \times 2^5 = 2^{3+5} = 2^8$   $x = 8$   
 b  $2^x = (2^3)^5 = 2^{3 \times 5} = 2^{15}$   $x = 15$   
 c  $x^2 = 3^2 \times 5^2 = (3 \times 5)^2 = 15^2$   $x = 15$
- 2 a  ${}^{10}\log(15) - {}^{10}\log(3) = {}^{10}\log(15/3) = {}^{10}\log(5)$   
 b  ${}^{10}\log(60) = {}^{10}\log(3 \times 20) = {}^{10}\log(3 \times 100/5) = {}^{10}\log(3) + 2 - {}^{10}\log(5)$
- 3 a  $x = {}^{10}\log(2^3) = 3 \times {}^{10}\log(2) = 3 \times 0,301\ 03 = 0,903\ 09$   
 b  $x = {}^{10}\log(3^2) = 2 \times {}^{10}\log(3) = 2 \times 0,477\ 12 = 0,954\ 24$   
 c  $x = {}^{10}\log(2 \times 3) = {}^{10}\log(2) + {}^{10}\log(3) = 0,301\ 03 + 0,477\ 12 = 0,778\ 15$   
 d  $x = {}^{10}\log(2 / 3) = {}^{10}\log(2) - {}^{10}\log(3) = 0,301\ 03 - 0,477\ 12 = -0,176\ 09$   
 e  $x = {}^{10}\log(2 + 3) = {}^{10}\log(5) = 0,698\ 97$   
 f  $x = {}^{10}\log(2 - 3) = {}^{10}\log(-1)$  niet gedefinieerd!
- 4 a met behulp van de knop  $x^y$   $x = 1,234^{5,678} = 3,300$   
 met behulp van de knoppen **log** en **10<sup>x</sup>**  $\log(x) = 5,678 \times \log(1,234)$   
 $= 5,678 \times 0,091\ 32 = 0,5185$   
 $x = 10^{0,5185} = 3,300$   
 b  $5^x = 625$   $x \times \log(5) = \log(625)$   
 $x = \log(625) / \log(5) = 2,7959 / 0,6990 = 4,000$   
 merk op dat  $625 = 25 \times 25 = 5^2 \times 5^2 = 5^4$   
 c  $5^x = 620$   $x \times \log(5) = \log(620)$   
 $x = \log(620) / \log(5) = 2,7924 / 0,6990 = 3,995$
- 5 a  $1,02^x = 2000 / 1000 = 2$   
 $x \times {}^{10}\log(1,02) = {}^{10}\log(2)$   
 $x = {}^{10}\log(2) / {}^{10}\log(1,02) = 0,301\ 03 / 0,008\ 600\ 2 = 35$  jaar
- 6 a  $\alpha = 5^\circ \times (\pi \text{ rad} / 180^\circ) = 0,0873 \text{ rad}$   
 b  $b = a / \tan(\alpha) = 10 / 0,087\ 49 = 114,3 \text{ m}$   
 c  $a / \sin(\alpha) = 10 / 0,087\ 16 = 114,7 \text{ m}$
- 7 a  $5x + y = 6$   
 $\frac{5x - y = 4}{10x} +$   
 $= 10$   $x = 1$   
 $y = 6 - 5x = 6 - (5 \times 1) = 1$   
 b  $5x + 7y = 18$   
 $\frac{5x + 3y = 12}{4y} -$   
 $4y = 6$   $y = 6 / 4 = 1,5$   
 $5x = 18 - 7y = 18 - (7 \times 1,5) = 7,5$   $x = 7,5 / 5 = 1,5$   
 c  $1,2x + 1,5y = 2,5$   $| \times 2 |$   $2,4x + 3,0y = 5,0$   
 $-2,3x + 3,0y = 0,3$   $| \times 1 |$   $\frac{-2,3x + 3,0y = 0,3}{4,7x} -$   
 $4,7x = 4,7$   
 $x = 4,7 / 4,7 = 1,0$   
 $3,0y = 0,3 + 2,3x = 0,3 + (2,3 \times 1,0) = 2,6$   $y = 2,6 / 3,0 = 0,867$

- 8 stel de positie van de wandelaar uit A op  $x$  en die van de wandelaar uit B op  $y$   
kies de oorsprong van het coördinatenstelsel in A  
stel dat de ontmoeting plaatsvindt na  $t$  uur wandelen

a  $x = 0 + 5t$  en  $y = 25 - 6t$   
als de wandelaars elkaar ontmoeten is  $x = y$ , dus  $5t = 25 - 6t$ , dus  $11t = 25$   
 $t = (25 / 11)$  uur = 2,273 uur = 2 uur en 16 min  
de wandelaars ontmoeten elkaar om 10:16 uur

b de afstand tot A is  $5t = 5 \times 2,273 = 11,365$  km

- 9 a stel het vermogen van Jan op  $x$  en het vermogen van Piet op  $y$

$$x = 2,5y$$

$$\frac{x}{2,5} = y + 3$$

$$0 = 1,5y - 3 \quad y = 3 / 1,5 = 2 \text{ ton}$$

$$x = 2,5y = 2,5 \times 2 = 5 \text{ ton}$$

- 10 a stel het huidige vermogen van Jan op  $x$  en dat van Piet op  $y$

$$x - 3 = 2,5(y - 6) \quad x - 2,5y = -12$$

$$x = 2y \quad \frac{x - 2y = 0}{-0,5y = -12} \quad y = -12 / -0,5 = 24 \text{ ton}$$

$$x = 2y = 2 \times 24 = 48 \text{ ton}$$

- 11 de wortelformule luidt  $x_{1,2} = \{-b \pm \sqrt{(b^2 - 4ac)}\} / 2a$

a ontbinden	$x^2 - 4x - 5 = (x - 5)(x + 1) = 0$	$x_1 = 5 \quad x_2 = -1$
wortelformule	$x_{1,2} = \{+4 \pm \sqrt{(4^2 + 4 \times 1 \times 5)}\} / 2 = 2 \pm 3$	$x_1 = 5 \quad x_2 = -1$
b ontbinden	$x^2 - 5x + 6 = (x - 3)(x - 2) = 0$	$x_1 = 3 \quad x_2 = 2$
wortelformule	$x_{1,2} = \{+5 \pm \sqrt{(5^2 - 4 \times 1 \times 6)}\} / 2 = 2,5 \pm 0,5$	$x_1 = 3 \quad x_2 = 2$
c ontbinden	$x^2 - 4x + 4 = (x - 2)^2 = 0$	$x_1 = x_2 = 2$
wortelformule	$x_{1,2} = \{+4 \pm \sqrt{(4^2 - 4 \times 1 \times 5)}\} / 2 = 2 \pm 0$	$x_1 = 2 \quad x_2 = 2$

- 12 a  $\lambda t_{1/2} = \ln\{C(0) / C(t_{1/2})\} = \ln(2) = 0,69315$

$$t_{1/2} = 0,69315 / \lambda = 0,69315 / 0,5 = 1,39 \text{ uur}$$

b  $C(t+1) = 10 e^{-\lambda(t+1)} = 10 e^{-\lambda t} \times e^{-\lambda} = C(t) \times e^{-0,5} = 0,607 C(t)$

$$C(t+1) / C(t) = 0,607 = 60,7\% \quad \rightarrow 39,3\% \text{ afname per uur}$$

c  $C(8) = 10 e^{-0,5 \times 8} = 10 e^{-4} = 0,183$

- 13 a op 1 juli  $2500 = y_0 + 6a$

op 1 maart  $1800 = y_0 + 2a$

$$700 = 4a$$

$$a = 700 / 4 = \text{€ } 175$$

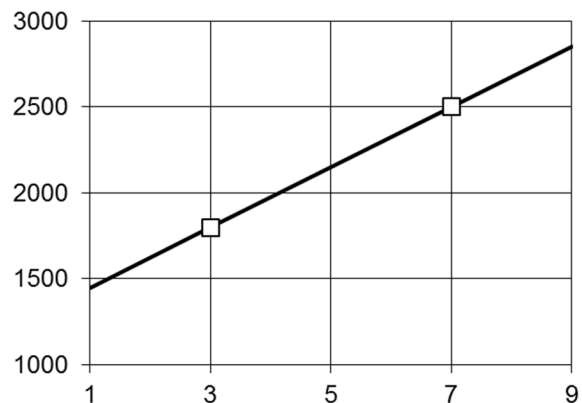
$$y_0 = 2500 - 6a$$

$$= 2500 - 1050 = \text{€ } 1450$$

- b zie grafiek:

helling = 175

doorsnijding  $y$ -as = 1450





- 14 a  $dy/dx = d(x^2)/dx - d(4x)/dx - d(5)/dx = 2x - 4$  (somregel)  
 b stel  $t = -0,1x$   
 $dy/dx = d(e^t)/dt \times dt/dx$   
 $= e^t \times d(-0,1x)/dx = -0,1e^{-0,1x}$  (kettingregel)  
 c  $dy/dx = 0,1 \times d(e^{-0,1x})/dx$   
 $= 0,1 \times (-0,1e^{-0,1x}) = -0,01e^{-0,1x}$  (somregel + resultaat b)  
 d stel  $t = 0,1x$   
 $dy/dx = d(\ln t)/dt \times dt/dx$   
 $= t^{-1} \times d(0,1x)/dx = (0,1x)^{-1} \times 0,1 = x^{-1}$  (kettingregel)  
 alternatief:  $y = \ln(0,1x) = \ln(0,1) + \ln(x)$   
 $dy/dt = 0 + x^{-1} = x^{-1}$  (somregel)
- 15 maak gebruik van de bepaalde integraal  $\int_a^b e^{-\mu t} dt = (e^{-\mu b} - e^{-\mu a}) / (-\mu)$   
 invullen van de coëfficiënten geeft:
- a  $\int_0^1 e^{-0,1t} dt = (e^{-0,1 \times 1} - e^{-0,1 \times 0}) / (-0,1)$   
 $= 10 \times (1 - e^{-0,1}) = 10 \times (1 - 0,905) = 0,95$
- b  $\int_0^1 e^{-1t} dt = (e^{-1 \times 1} - e^{-1 \times 0}) / (-1)$   
 $= (1 - e^{-1}) = 1 - 0,368 = 0,632$
- c  $\int_0^{10} e^{-0,1t} dt = (e^{-0,1 \times 10} - e^{-0,1 \times 0}) / (-0,1)$   
 $= 10 \times (1 - e^{-1}) = 10 \times (1 - 0,368) = 6,32$
- d  $\int_0^\infty e^{-0,1t} dt = (e^{-0,1 \times \infty} - e^{-0,1 \times 0}) / (-0,1)$   
 $= 10 \times (1 - e^{-\infty}) = 10 \times (1 - 0) = 10$



## 2 Compartmentensystemen

- 1 Los de volgende differentiaalvergelijken op:
  - a  $y (dy/dx) = x$
  - b  $dy/dx = 3x + 1$
  - c  $dy/dx = e^{-x}$
  - d  $y' - xy - y = 0$
  - e  $y' + 3y = 0$
  
- 2 Los de differentiaalvergelijking op met als beginvoorwaarde  $y = 4$  als  $x = 0$ :
  - a  $dy/dx = -2y$
  
- 3 De druk  $P$  in een gascilinder (in atmosfeer) als functie van de tijd  $t$  (in uren) voldoet aan de differentiaalvergelijking  $dP/dt + 0,7P = 0,7$ . Op tijdstip  $t = 0$  bedraagt de druk in de gascilinder  $P(0) = 21$  atmosfeer.
  - a bereken de functie  $P(t)$  die op ieder tijdstip de druk in de cilinder weergeeft
  - b bereken de druk in de cilinder voor  $t = \infty$  (oneindige tijd na  $t = 0$ )
  - c maak een schets van de druk in de eerste 10 uur na  $t = 0$   
*aanwijzing: bereken de coördinaten van enkele punten*
  
- 4 In een ruimte wordt de lucht geventileerd met een verversingsvoud van acht. Dat wil zeggen dat er per uur 8 maal het volume van de ruimte aan lucht wordt doorgepompt. Door een ongeval heeft zich chloor verspreid. Op tijdstip  $t = 0$  bevond zich in de ruimte van  $75 \text{ m}^3$  in totaal 1500 gram chloor. De MAC-waarde van chloor is 1 ppm of  $3 \text{ mg m}^{-3}$ .
  - a stel de differentiaalvergelijking voor de concentratie aan chloor op
  - b geef de functie die op elk moment de concentratie in  $\text{g m}^{-3}$  weergeeft (los dus de differentiaalvergelijking op)
  - c bereken de tijdsduur waarna de MAC-waarde niet meer overschreden wordt  
*opmerking: MAC = maximaal aanvaarde concentratie*
  
- 5 Er zijn twee cilindrische vaten met een cirkelvormige bodem opgesteld. Het eerste vat loost via een gat in de bodem naar het tweede vat. Het oppervlak van de bodem van het eerste vat is  $5 \text{ dm}^2$  en van het tweede  $1 \text{ dm}^2$ . De uitstroomsnelheid is evenredig met de hoogte van de waterspiegel in het vat en kan geschreven worden als  $0,2 h_1(t) \text{ l min}^{-1}$  (met  $h_1$  in dm). Men giet op tijdstip  $t = 0$  ineens 25 l water in het eerste vat.
  - a stel de differentiaalvergelijking op voor de hoogte van het water in het eerste vat
  - b bereken het verloop van de waterhoogten in beide vaten in de loop van de tijd; zet deze functies uit op enkel-logaritmisch grafiekpapier (zie appendix A1 van dit oefenboek)
  - c op welk tijdstip bedraagt de hoogte van het water in het eerste vat 1 dm ?

- 6 Er zijn drie cilindrische vaten opgesteld met cirkelvormige bodem. Het eerste vat loost via een gaatje in de bodem in het tweede vat en het tweede vat via een gaatje in de bodem naar het derde vat. Het oppervlak van de bodem van het eerste vat is  $5 \text{ dm}^2$ , van het tweede vat  $1 \text{ dm}^2$  en van het derde vat  $10 \text{ dm}^2$ . De uitstroomsnelheid is evenredig met de hoogte van de waterspiegel in het vat en bedraagt voor het eerste vat  $0,2 h_1(t) \text{ l min}^{-1}$  (met  $h_1$  in dm) en voor het tweede vat  $1,0 h_2(t) \text{ l min}^{-1}$  (met  $h_2$  in dm). De vaten zijn aanvankelijk leeg. Op tijdstip  $t = 0$  giet men ineens  $25 \text{ l}$  water in het eerste vat.
- bereken de waterhoogten in de drie vaten als functie van de tijd
  - zet deze functies uit op enkel-logaritmisch grafiekpapier (zie appendix A1 van dit oefenboek)
- 7 Een geheel met water gevuld overloopvat met een volume van  $20 \text{ l}$  wordt met een constante snelheid van  $0,50 \text{ l min}^{-1}$  bijgevuld met een oplossing van keukenzout in water met een concentratie van  $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ . Op tijdstip  $t = 0$  is het overloopvat geheel gevuld met water met een zoutconcentratie nul.
- bereken de concentratie van keukenzout in de vloeistof in dit vat als functie van de tijd  $t$
- 8 In een ruimte van  $50 \text{ m}^3$  is  $50 \text{ mg}$  ozon vrijgekomen. Ozon dissocieert spontaan met een halveringstijd van  $10$  minuten. De ruimte wordt tweevoudig geventileerd. De MAC-waarde van ozon is  $0,06 \text{ ppm} = 0,12 \text{ mg m}^{-3}$  als uurgemiddelde.
- wat is de effectieve halveringstijd van het ozon?
  - wat is de ozonconcentratie als functie van de tijd?
  - wordt in deze ruimte de MAC-waarde overschreden?
  - hoeveel ozon wordt er in het eerste uur geloosd?

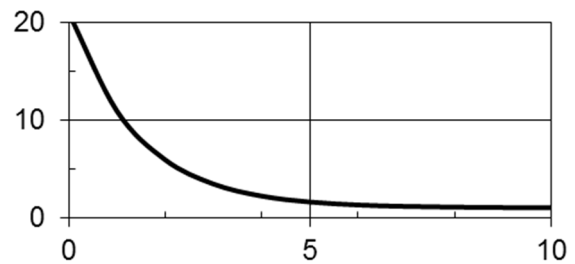
### Antwoorden

1 a  $y dy = x dx$   $0,5 y^2 = 0,5 x^2 + c$   $y^2 - x^2 = c'$   
 b  $dy = (3x+1) dx$   $y = 1,5 x^2 + x + c$   
 c  $dy/dx = e^{-x}$   $dy = e^{-x} dx$   $y = -e^{-x} + c$   
 d  $dy/x = (x+1) y$   $dy/y = (x+1) dx$   $\ln(y) = 0,5 x^2 + x + c$   
 e  $dy/dx = -3y$   $dy/y = -3 dx$   $\ln(y) = -3x + c$   $y = c' e^{-3x}$

2 a integreren levert  $\ln(y) = -2x + c$   
 algemene oplossing  $y = c' e^{-2x}$   
 invullen beginvoorwaarde  $4 = c' e^0 = c'$   
 $y = 4 e^{-2x}$

3 a  $dP/dt + 0,7P = 0,7$  dit is een differentiaalvgl. van type  $dy/dx + ay = k$   
 hiervan is de algemene oplossing  $y = (k/a) + c e^{-ax}$   
 $P(t) = 1 + c e^{-0,7t}$  atm  
 invullen beginvoorwaarde  $21 \text{ atm} = P(0) = 1 + c e^0 = 1 + c \rightarrow c = 20 \text{ atm}$   
 $P(t) = 1 + 20 e^{-0,7t}$  atm

b  $P(\infty) = 1 + 20 e^{-\infty}$   
 $= 1 + 0 = 1 \text{ atm}$   
 c zie grafiek



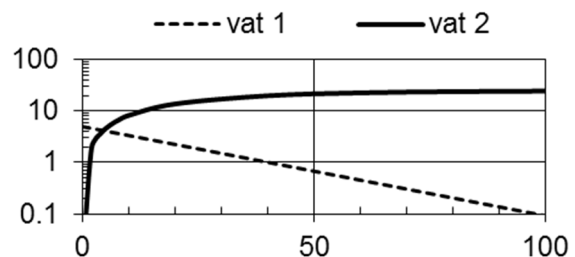
4 a  $d(C_1 V_1)/dt = -k_{12} C_1 V_1$   
 per uur wordt  $8V_1$  weggepompt  
 als t in uren, dan is  $k_{12} = 8$  per uur  
 dus  $dC_1/dt = -8 C_1$  (t in uren)  
 b  $C_1(t) = C_1(0) e^{-8t}$   
 $C_1(0) = 1500 / 75 = 20 \text{ g m}^{-3} \rightarrow C_1(t) = 20 e^{-8t} \text{ g m}^{-3}$   
 c MAC-waarde =  $3 \text{ mg m}^{-3} = 0,003 \text{ g m}^{-3}$   
 $0,003 = 20 e^{-8t}$   
 $\ln(0,003 / 20) = \ln(1,5 \times 10^{-4}) = -8,8 = -8t \rightarrow t = 1,1 \text{ uur}$

5 stel  $A_i$  = oppervlak van de bodem van vat i  
 a vat 1:  $dV_1/dt = A_1 \times dh_1/dt = -k_{12} = -0,2 h_1$   
 $dh_1/dt = -0,2 h_1 / A_1 = -h_1 \times 0,2 \text{ dm}^2 \text{ min}^{-1} / 5 \text{ dm}^2 = -h_1 \times 0,04 \text{ min}^{-1}$   
 $dh_1/dt + 0,04 h_1 = 0$

b vat 1:  $h_1(t) = c e^{-0,04t}$   
 $h_1(0) = 25 \text{ dm}^3 / 5 \text{ dm}^2$   
 $= 5 \text{ dm}$   
 $h_1(t) = 5 e^{-0,04t}$   
 vat 2:  $V_1 + V_2 = D = 25 \text{ l}$   
 $V_1 = h_1 \times A_1$   
 $= 5 e^{-0,04t} \times 5 = 25 e^{-0,04t}$   
 $V_2 = 25 (1 - e^{-0,04t})$   
 $h_2(t) = V_2 / A_2$   
 $= 25 (1 - e^{-0,04t}) / 1$   
 $= 25 (1 - e^{-0,04t})$

zie grafiek

c  $1 = 5 e^{-0,04t} \rightarrow t = \ln(0,2) / -0,04 = 40 \text{ min}$





6 stel  $A_i$  = oppervlak van de bodem van vat  $i$

a vat 1:  $dV_1/dt = -k_{12}$

$$A_1 \times dh_1/dt = -0,2 h_1$$

$$dh_1/dt = -0,2 h_1 / A_1 = -h_1 \times 0,2 \text{ dm}^2 \text{ min}^{-1} / 5 \text{ dm}^2 = -h_1 \times 0,04 \text{ min}^{-1}$$

$$dh_1/dt + 0,04 h_1 = 0$$

$$h_1(t) = c e^{-0,04t}$$

$$h_1(0) = 25 \text{ dm}^3 / 5 \text{ dm}^2 = 5 \text{ dm} \quad \rightarrow \quad h_1(t) = 5 e^{-0,04t}$$

vat 2:  $dV_2/dt = +k_{12} - k_{23}$

$$A_2 \times dh_2/dt = +0,2 h_1 - 1,0 h_2$$

$$dh_2/dt = +0,2 h_1 / A_2 - 1,0 h_2 / A_2$$

$$= +0,2 \times 5 e^{-0,04t} / 1 - 1,0 h_2 / 1 = +1,0 e^{-0,04t} - 1,0 h_2$$

$$dh_2/dt + 1,0 h_2 = 1,0 e^{-0,04t}$$

dit is een lineaire differentiaalvergelijking van de eerste orde met constante coëfficiënten (soort III) met  $K = 1$ ,  $a = 1$  en  $b = 0,04$

$$h_2(t) = (1/0,96) e^{-0,04t} + c e^{-t}$$

$$h_2(0) = 0 \quad \rightarrow \quad h_2(t) = 1,04 (e^{-0,04t} - e^{-t})$$

vat 3:  $V_1 + V_2 + V_3 = D = 25 \text{ dm}^3$

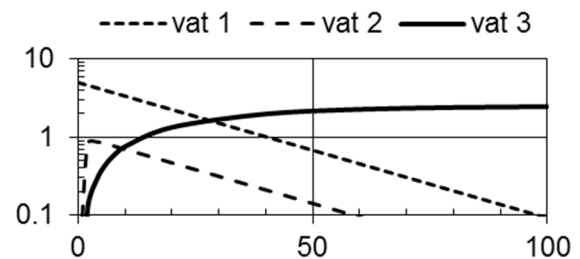
$$h_3(t) = V_3 / A_3 = (D - A_1 h_1 - A_2 h_2) / A_3$$

$$= (25 - 5 h_1 - 1 h_2) / 10 = 2,5 - 0,5 h_1(t) - 0,1 h_2(t)$$

invullen van  $h_1$  en  $h_2$  levert:

$$h_3(t) = 2,5 - 2,5 e^{-0,04t} - 0,104 (e^{-0,04t} - e^{-t})$$

b zie grafiek



7 #1 → #2 → #3  
aanvoer vat afvoer

$$C_1 = 1 \text{ g cm}^{-3} \quad dV_1/dt = 0,50 \text{ l min}^{-1}$$

$$V_2 = 20 \text{ l} = 2 \times 10^4 \text{ cm}^3$$

a aanvoer  $C_1 dV_1/dt = 500 \text{ g min}^{-1}$

afvoer  $C_2 dV_2/dt$

merk op dat  $dV_1/dt = dV_2/dt = 500 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$

$$V_2 (dC_2/dt) = \text{aanvoer} - \text{afvoer} = 500 - 500 C_2$$

$$2 \times 10^4 (dC_2/dt) + 500 C_2 = 500$$

$$dC_2/dt + 0,025 C_2 = 0,025$$

dit is een differentiaalvgl. van type  $dy/dx + ay = k$

hiervan is de algemene oplossing  $y = (k/a) + c e^{-ax}$

$$C_2(t) = (0,025 / 0,025) + c e^{-0,025t} = 1 + c e^{-0,025t}$$

$$C_2(0) = 0 = 1 + c \quad \rightarrow \quad c = -1 \quad \rightarrow \quad C_2(t) = 1 - e^{-0,025t}$$

- 8 a zonder ventilatie  $D = 2^{-t/T_{1/2}} = e^{-\lambda t}$   
 $T_{1/2} = 10 \text{ min} = 0,167 \text{ uur} \rightarrow \lambda_{\text{dis}} = \ln(2) / T_{1/2} = 4,16 \text{ per uur}$   
 met ventilatie  $dD/dt = -\lambda_{\text{dis}} D(t) - \lambda_{\text{vent}} D(t)$   
 $= -(4,16 + 2) D(t) = -6,16 D(t) = -\lambda_{\text{eff}} D(t)$   
 $T_{1/2, \text{eff}} = 0,693 / \lambda_{\text{eff}}$   
 $= 0,693 / 6,16 \text{ per uur} = 0,112 \text{ uur} = 6,8 \text{ min}$
- b  $D(t) = D(0) e^{-6,16t}$   
 concentratie  $C(t) = D(t) / V$   
 $C(0) = 50 \text{ mg} / 50 \text{ m}^3 = 1 \text{ mg m}^{-3}$   
 $C(t) = e^{-6,16t} \text{ mg m}^{-3}$
- c uurgemiddelde concentratie  $= \int_0^T C(t) dt / T = \int_0^T e^{-6,16t} dt / T = (1 - e^{-6,16T}) / (6,16 T)$   
 omdat de concentratie in eerste uur het hoogst zal zijn, volstaat invullen van  $T = 1$   
 dit levert een gemiddelde concentratie van  $0,16 \text{ mg/m}^3$  in het eerste uur  
 $\rightarrow$  overschrijding van de MAC-waarde
- d ten gevolge van ventilatie wordt er per tijdseenheid  $dD_{\text{lozing}}(t)/dt = \lambda_{\text{vent}} D(t)$  geloosd  
 $dD_{\text{lozing}}(t)/dt = 2 \times 50 \text{ m}^3 \times C(t) = 100 e^{-6,16t}$   
 integreren van 0 tot t levert  
 $D_{\text{lozing}}(t) = (100 / 6,16) (1 - e^{-6,16t}) = 16,2 (1 - e^{-6,16t})$   
 $\rightarrow$  geloosde hoeveelheid ozon na één uur is  $D_{\text{lozing}}(1) = 16,2 \text{ mg}$



### 3 Statistiek

- 1 Met een detector in een vaste meetopstelling wordt straling van een radioactieve bron gedetecteerd. Er worden 100 metingen gedaan van elk precies 1 minuut. De halveringstijd van de bron is erg lang vergeleken met de meettijd. De gevonden meetwaarden  $x_i$  zijn:

5895	5918	5846	5935	5954	5922	5807	5914	5861	5987
5857	5925	5868	5947	5989	5874	5896	5893	5842	5831
5934	5899	5781	5964	5853	6015	5877	5911	5898	6092
5988	5828	5794	5881	5804	5933	6023	5736	5953	6014
5907	5969	5812	6028	5904	5834	5909	6019	5822	6012
5959	5946	5919	5937	5855	5785	5984	5924	5959	5871
5819	5926	5948	5982	6037	5935	5862	6033	5845	5836
5923	6007	5825	6001	5979	6018	5751	5951	6003	5865
5839	5772	5942	5836	5847	6032	5927	5908	5905	5912
6012	5917	5936	5938	5897	5772	5955	5908	5873	5945

Hierbij is  $\sum x_i = 591\,113$  en  $\sum x_i^2 = 3\,494\,679\,543$

- maak een histogram met intervallen 5700-5749, 5750-5799, enzovoorts
  - bereken het gemiddelde  $\bar{x}$  van deze meetwaarden
  - bereken de standaarddeviatie  $\sigma$  van het aantal tellingen in 1 minuut
  - bepaal uit het histogram het percentage van de metingen die kleiner zijn dan  $\bar{x} - \sigma$  en het percentage van de metingen die groter zijn dan  $\bar{x} + \sigma$ ; vergelijk de waarden met wat men verwacht bij een normaalverdeling
  - hoeveel procent van de waarnemingen ligt in het interval  $[\bar{x} - \sigma; \bar{x} + \sigma]$ ? vergelijk deze waarde met wat men verwacht bij een normaalverdeling
  - herhaal de vragen d en e voor het interval  $[\bar{x} + 2\sigma; \bar{x} - 2\sigma]$
  - bereken de standaarddeviatie van het gemiddelde van de meetwaarden
  - geef het interval waarin de werkelijke waarde ligt met een waarschijnlijkheid van 95%
- 2 Bij een meting aan een radioactieve bron worden gedurende 1 minuut 300 telpulsen geregistreerd.
- hoe lang moet geteld worden om een nauwkeurigheid van 3% te bereiken bij een betrouwbaarheidsinterval van 67%?
  - hoe lang moet geteld worden om een nauwkeurigheid van 1% te bereiken bij een betrouwbaarheidsinterval van 67%?
  - hoe lang moet geteld worden om een nauwkeurigheid van 3% te bereiken bij een betrouwbaarheidsinterval van 95%?

- 3 Een meting aan een telmonster met een geringe hoeveelheid radioactiviteit levert 244 telpulsen op in 10 minuten. Een meting aan een blanco telmonster levert onder precies dezelfde omstandigheden 184 telpulsen in 10 minuten.
- bereken het bruto-teltempo en de standaarddeviatie hiervan in telpulsen per minuut (tpm); geef de uitkomst in de vorm  $T \pm \sigma$  tpm
  - herhaal de berekening van vraag a voor de meting van het nuleffect
  - herhaal de berekening van vraag a voor de meting van het netto-teltempo
  - geef de relatieve fout in het netto-teltempo
  - binnen welk interval ligt het werkelijk teltempo met een betrouwbaarheid van 95% ?
- 4 In een meetopstelling worden twee metingen gedaan, namelijk eerst aan een monster met geringe radioactiviteit (meting A) en vervolgens aan een blanco monster (meting B). Meting A levert in 24 minuten 100 telpulsen en meting B levert 100 telpulsen in 50 minuten.
- bereken het teltempo van meting A en de standaarddeviatie hiervan in telpulsen per minuut (tpm); geef de uitkomst in de vorm  $T_A \pm \sigma_A$  tpm
  - herhaal vraag a voor meting B; geef de uitkomst in de vorm  $T_B \pm \sigma_B$  tpm
  - bereken het netto-teltempo en de standaarddeviatie hiervan; geef de uitkomst in de vorm  $T \pm \sigma$  tpm
  - wat zou de relatieve fout in het netto-teltempo zijn geweest als beide metingen 60 minuten hadden geduurd?
  - bereken de minimale teltijd, opdat de relatieve fout in het netto-teltempo 10% bedraagt bij een betrouwbaarheidsinterval van 95%; ga er hierbij vanuit dat de teltijd van meting B op 200 minuten wordt gebracht.
- 5 Men wil de afschermdende werking van een absorber bepalen. Zonder absorber meet men in 20 minuten 1600 telpulsen (meting A), met absorber 480 telpulsen in 20 minuten (meting B). Als nuleffect meet men 80 telpulsen in 50 minuten (meting C).
- schrijf het netto-teltempo zonder absorber in de vorm  $T_A \pm \sigma_A$  tpm
  - schrijf het netto-teltempo met absorber in de vorm  $T_B \pm \sigma_B$  tpm
  - bereken de relatieve nauwkeurigheid van de afschermingsfactor  $F = T_B / T_A$
- 6 De stralingsdeskundige vermoedt dat een voorwerp radioactief besmet is. Bij controle met een GM-telbuis meet hij  $N_A = 1089$  telpulsen in 10 minuten. Een meting van de achtergrond levert in dezelfde tijd  $N_B = 1024$  telpulsen.
- bepaal de kans dat het voorwerp niet besmet is  
*aanwijzing: maak gebruik van de eenzijdige overschrijdingskans  $P(k)$  die gegeven is in appendix A2 van dit oefenboek*
- 7 Voer de volgende berekeningen uit, schrijf het resultaat op in wetenschappelijke notatie en laat daarbij alle niet significante cijfers weg.
- 5,31 - 2,3
  - 0,3010 + 0,4771
  - $1,25 \times 10^2 \times 2$
  - 2,718 281 83 / 3,14

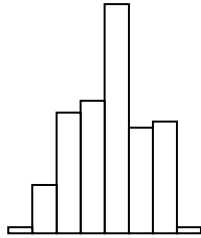
- 8 Er worden twee series activiteitsmetingen uitgevoerd aan dezelfde radioactieve bron, elk met een andere detector. De resultaten van beide meetseries staan in de volgende tabel.

<i>meetserie 1</i>	<i>meetserie 2</i>
98	103
100	100
114	105
120	107
85	101
97	103
111	106
119	108
89	102
107	105

- a bereken voor elk van de beide meetseries de gemiddelde waarde  $\bar{x}$   
b bereken voor elk van de beide meetseries de standaarddeviatie  $\sigma$  met behulp van de volgende formule

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

- c bereken voor elk van de beide meetseries de standaarddeviatie  $\sigma = \sqrt{\bar{x}}$   
d wat valt er te zeggen over de nauwkeurigheid, juistheid en precisie van de beide meetseries?

**Antwoorden**

- 1
- a
- b  $\bar{x} = (\sum x_i) / n = 591\,113 / 100 = 5911,13$
- c  $\sigma_x = \sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2] / (n - 1)}$   
 $= \sqrt{[\sum (x_i)^2 - \sum (2x_i\bar{x}) + \sum (\bar{x})^2] / (n - 1)} = \sqrt{[\sum (x_i)^2 - 2\bar{x}\sum x_i + \sum (\bar{x})^2] / (n - 1)}$   
 $= \sqrt{[\sum (x_i)^2 - 2\bar{x}(n\bar{x}) + n(\bar{x})^2] / (n - 1)} = \sqrt{[\sum (x_i)^2 - n(\bar{x})^2] / (n - 1)}$   
 $= \sqrt{[(3\,494\,679\,543 - 100 \times 5911,13^2) / 99]} = 73,4 \text{ tpm}$
- d de  $1\sigma$ -grenzen zijn 5837,7 en 5984,5  
er zijn 18 uitschieters groter (18%) en 18 uitschieters kleiner (18%)
- e in het  $1\sigma$ -interval liggen 64 van de 100 meetwaarden; bij een normaalverdeling is dat 68%
- f de  $2\sigma$ -grenzen zijn 5764,3 en 6057,9  
in het  $2\sigma$ -interval liggen 97 van de 100 meetwaarden; bij een normaalverdeling is dat 95%
- g  $\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} = 73,4 / \sqrt{100} = 7,3 \text{ tpm}$
- h het interval is  $[\bar{x} - 2\sigma_{\bar{x}}; \bar{x} + 2\sigma_{\bar{x}}] = [5896,5; 5925,7]$
- 2
- a voor een relatieve fout van 3% zijn  $(1 / 0,03)^2 = 1111$  telpulsen nodig  
tijd =  $1111 / 300 \text{ tpm} = 3,7 \text{ min}$
- b voor een relatieve fout van 1% zijn  $(1 / 0,01)^2 = 10\,000$  telpulsen nodig  
tijd =  $10\,000 / 300 \text{ tpm} = 33,3 \text{ min}$
- c een betrouwbaarheidsinterval van 95% correspondeert met  $2\sigma$ -grenzen, dus  $\sigma_{\text{rel}}$  is 1,5%  
voor een relatieve fout van 1,5% zijn  $(1 / 0,015)^2 = 4444$  telpulsen nodig  
 $t = 4444 / 300 \text{ tpm} = 14,8 \text{ min}$
- 3
- a  $T_1 = 244 / 10 = 24,4 \text{ tpm}$        $\sigma_1 = \sqrt{244} / 10 = 15,6 / 10 = 1,6 \text{ tpm}$   
 $T_1 \pm \sigma_1 = 24,4 \pm 1,6 \text{ tpm}$
- b  $T_2 = 184 / 10 = 18,4 \text{ tpm}$        $\sigma_2 = \sqrt{184} / 10 = 13,6 / 10 = 1,4 \text{ tpm}$   
 $T_2 \pm \sigma_2 = 18,4 \pm 1,4 \text{ tpm}$
- c  $T = T_1 - T_2 = 24,4 - 18,4 = 6,0 \text{ tpm}$   
 $\sigma = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} = \sqrt{(1,6^2 + 1,4^2)} = \sqrt{(2,56 + 1,96)} = \sqrt{4,5} = 2,1 \text{ tpm}$   
 $T \pm \sigma = 6,0 \pm 2,1 \text{ tpm}$
- d de relatieve fout is  $2,1 / 6,0 = 35\%$
- e een betrouwbaarheidsinterval van 95% correspondeert met  $2\sigma = 4,2 \text{ tpm}$   
het interval is dus  $[6,0 - 4,2; 6,0 + 4,2] = [1,8; 10,2] \text{ tpm}$

- 4
- a  $T_A = 100 / 24 = 4,17$  tpm       $\sigma_A = \sqrt{100 / 24} = 10 / 24 = 0,42$  tpm  
 $T_A \pm \sigma_A = 4,17 \pm 0,42$  tpm
- b  $T_B = 100 / 50 = 2,00$  tpm       $\sigma_B = \sqrt{100 / 50} = 10 / 50 = 0,20$  tpm  
 $T_B \pm \sigma_B = 2,00 \pm 0,20$  tpm
- c  $T = T_A - T_B = 4,17 - 2,00 = 2,17$  tpm  
 $\sigma = \sqrt{(\sigma_A^2 + \sigma_B^2)} = \sqrt{(0,42^2 + 0,20^2)} = \sqrt{(0,176 + 0,040)} = \sqrt{0,216} = 0,46$  tpm  
 $T \pm \sigma = 2,17 \pm 0,47$  tpm
- d  $\sigma_{\text{brutto}} = \sqrt{(24 / 60) \times 0,42} = 0,27$  tpm  
 $\sigma_{\text{nul}} = \sqrt{(50 / 60) \times 0,20} = 0,18$  tpm  
 $\sigma_{\text{netto}} = \sqrt{(\sigma_{\text{brutto}}^2 + \sigma_{\text{nul}}^2)} = \sqrt{(0,0729 + 0,0324)} = \sqrt{0,1053} = 0,32$  tpm  
de relatieve fout is  $0,32 / 2,17 = 15\%$
- e  $\sigma_{\text{nul}} = \sqrt{(50 / 200) \times 0,20} = 0,10$  tpm  
een betrouwbaarheidsinterval van 95% correspondeert met 2 $\sigma$   
geëist wordt een relatieve fout van 10%, dus  $2\sigma_{\text{netto}} = 0,1 \times 2,17 = 0,217$  tpm  
dus  $\sigma_{\text{netto}} = 0,1085$  tpm  
 $\sigma_{\text{brutto}} = \sqrt{(\sigma_{\text{netto}}^2 - \sigma_{\text{nul}}^2)} = \sqrt{(0,1085^2 - 0,10^2)} = \sqrt{0,0018} = 0,042$  tpm  
de teltijd moet dus  $(0,42 / 0,042)^2 \times 24 = 2400$  min = 40 uur bedragen
- 5
- a  $T_A = T_{A,\text{brutto}} - T_C = (1600 / 20) - (80 / 50) = 80,0 - 1,6 = 78,4$  tpm  
 $\sigma_{A,\text{brutto}} = \sqrt{1600 / 20} = 2,0$  tpm  
 $\sigma_C = \sqrt{80 / 50} = 0,18$  tpm  
 $\sigma_A = \sqrt{(\sigma_{A,\text{brutto}}^2 + \sigma_C^2)} = \sqrt{(4,00 + 0,03)} = \sqrt{4,03} = 2,0$  tpm  
 $T_A \pm \sigma_A = 78,4 \pm 2,0$  tpm
- b  $T_B = T_{B,\text{brutto}} - T_C = (480 / 20) - (80 / 50) = 24,0 - 1,6 = 22,4$  tpm  
 $\sigma_{B,\text{brutto}} = \sqrt{480 / 20} = 1,1$  tpm  
 $\sigma_C = \sqrt{80 / 50} = 0,18$  tpm  
 $\sigma_B = \sqrt{(\sigma_{B,\text{brutto}}^2 + \sigma_C^2)} = \sqrt{(1,21 + 0,03)} = \sqrt{1,24} = 1,1$  tpm  
 $T_B \pm \sigma_B = 22,4 \pm 1,1$  tpm
- c  $F = T_B / T_A = 22,4 / 78,4 = 0,286$   
de relatieve fouten van  $T_A$  en  $T_B$  moeten kwadratisch worden opgeteld  
 $\sigma_F / F = \sqrt{[(\sigma_A / T_A)^2 + (\sigma_B / T_B)^2]}$   
 $= \sqrt{[(2,0 / 78,4)^2 + (1,1 / 22,4)^2]}$   
 $= \sqrt{(0,00065 + 0,00241)} = \sqrt{0,00306} = 0,055$
- 6
- a het netto-aantal telpulsen is  $N_C = N_A - N_B = 1089 - 1024 = 65$   
de standaarddeviatie is  $\sigma_C = \sqrt{(1089 + 1024)} = \sqrt{2113} = 46$   
het verschil bedraagt  $k = 65 / 46 = 1,4$  standaarddeviaties  
de eenzijdige overschrijdingskans is  $P(1,4) = 0,081$   
de waarschijnlijkheid dat het voorwerp niet besmet is bedraagt dus 8,1%
- 7
- a 3,01       $\rightarrow 3,0 \times 10^0$
- b 0,7781       $\rightarrow 7,781 \times 10^{-1}$
- c  $2,50 \times 10^2$        $\rightarrow 3 \times 10^2$
- d 0,865 694 85       $\rightarrow 8,66 \times 10^{-1}$

- 8
- a serie 1  $\bar{x} = 104,0$   
serie 2  $\bar{x} = 104,0$
  - b serie 1  $\sigma = 12,1$   
serie 2  $\sigma = 2,6$
  - c serie 1  $\sigma = 10,2$   
serie 2  $\sigma = 10,2$
  - d serie 1 spreiding in meetresultaten is in overeenstemming met normaalverdeling  
nauwkeurigheid, juistheid en precisie van de gemiddelde waarde zijn (zeer  
waarschijnlijk) goed  
serie 2 spreiding in meetresultaten is veel kleiner dan statistisch verwacht  
de precisie lijkt groot, maar de detector is waarschijnlijk defect  
daarmee zijn nauwkeurigheid en juistheid (zeer waarschijnlijk) slecht

## 4 Atoom- en kernbouw

1 Bepaal het protongetal  $Z$ , het neutrongetal  $N$  en de verhouding  $N / Z$  voor onderstaande nucliden.

- |                     |                            |
|---------------------|----------------------------|
| a ${}^1_1\text{H}$  | d ${}^{60}_{27}\text{Co}$  |
| b ${}^3_1\text{H}$  | e ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ |
| c ${}^6_3\text{Li}$ | f ${}^{241}_{95}\text{Am}$ |

2 Het atoomgewicht van natrium en chloor bedraagt 22,99 respectievelijk 35,45. De constante van Avogadro is  $6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

a bereken het aantal moleculen in 1 gram keukenzout ( $\text{NaCl}$ )

3 De bindingsenergie van de K-, L-, M- en N-elektronen van lood is respectievelijk 88,01 keV, 15,86 keV, 3,85 keV en 0,90 keV. Bepaal de minimale energie van:

- karacteristieke K-röntgenfotonen van lood
- karacteristieke L-röntgenfotonen van lood
- karacteristieke M-röntgenfotonen van lood
- karacteristieke N-röntgenfotonen van lood

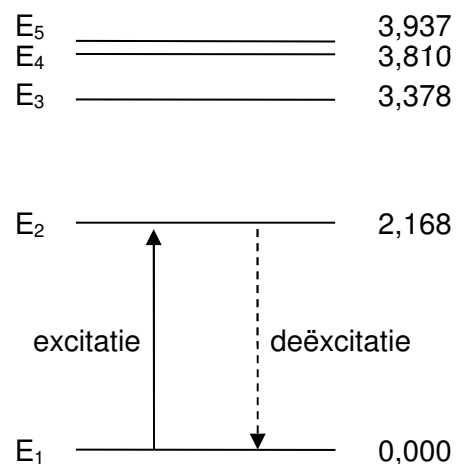
4 Als een gat in de K-schil wordt opgevuld, wordt er òf een Auger-elektron òf een karakteristiek röntgenfoton uitgezonden.

a bereken de verhouding van het aantal uitgezonden röntgenfotonen  $N_X$  en het aantal uitgezonden Auger-elektronen  $N_{\text{Auger}}$  ten gevolge van een gat in de K-schil van een ijzeratoom ( $Z = 26$ )

*aanwijzing: gebruik de gegevens in appendix A3 van dit oefenboek*

5 In nevenstaande figuur zijn de energietoestanden (in MeV) van het nuclide  ${}^{38}\text{Cl}$  gegeven.

a bereken de fotonenergieën van de overgangen tussen de eerste drie energietoestanden



**Antwoorden**

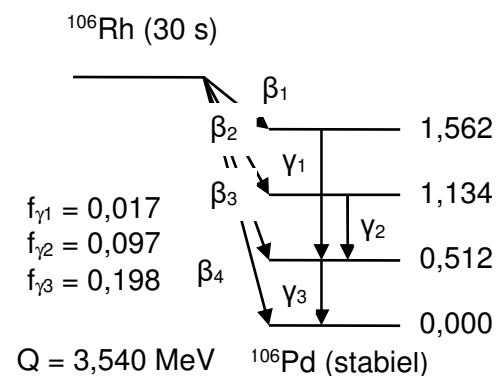
- 1
- |   |          |                      |                |
|---|----------|----------------------|----------------|
| a | $Z = 1$  | $N = 1 - 1 = 0$      | $N / Z = 0$    |
| b | $Z = 1$  | $N = 3 - 1 = 2$      | $N / Z = 2,00$ |
| c | $Z = 3$  | $N = 6 - 3 = 3$      | $N / Z = 1,00$ |
| d | $Z = 27$ | $N = 60 - 27 = 33$   | $N / Z = 1,22$ |
| e | $Z = 55$ | $N = 137 - 55 = 82$  | $N / Z = 1,49$ |
| f | $Z = 95$ | $N = 241 - 95 = 146$ | $N / Z = 1,54$ |
- 2
- |   |                            |   |
|---|----------------------------|---|
| a | molecuulgewicht            | $22,99 + 35,45 = 58,44$                                       |
|   | aantal moleculen in 1 gram | $(1 / 58,44) \times 6,02 \times 10^{23} = 1,0 \times 10^{22}$ |
- 3
- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| a | $E_{K-X} = 88,01 - 15,86 = 72,15$ keV |
| b | $E_{L-X} = 15,86 - 3,85 = 12,01$ keV  |
| c | $E_{M-X} = 3,85 - 0,90 = 2,95$ keV    |
| d | $E_{N-X} = 0,90 - 0,0 = 0,90$ keV     |
- 4
- |   |   |
|---|---|
| a | aflezen van appendix A3 van dit oefenboek geeft K-fluorescentieopbrengst $= \omega = 0,29$<br>$N_X / N_{\text{Auger}} = \omega / (1 - \omega) = 0,29 / 0,71 = 0,41$ |
|---|---|
- 5
- |   |   |
|---|---|
| a | $E_3 - E_1 = 3,378 - 0 = 3,378$ MeV     |
|   | $E_2 - E_1 = 2,168 - 0 = 2,168$ MeV     |
|   | $E_3 - E_2 = 3,378 - 2,168 = 1,210$ MeV |



## 5 Radioactiviteit

- Het netto teltempo ten gevolge van een radioactieve bron bedraagt 11 500 telpulsen per minuut (tpm) om 9:00 uur en 3200 tpm om 15:30 uur.
  - bereken de halveringstijd
  - bereken het netto teltempo om 12:00 uur
  - controleer het onder b gevonden antwoord grafisch
- Een geijkte hoeveelheid  $^{133}\text{Xe}$  ( $T_{1/2} = 5,25$  d) heeft op maandagmorgen 9:00 uur een activiteit van 100 MBq.
  - bepaal door berekening op welk tijdstip de activiteit is gedaald tot 75 MBq
  - bepaal grafisch op welk tijdstip de activiteit is gedaald tot 75 MBq
  - bepaal volgens beide methoden de activiteit op de voorafgaande vrijdag om 15:00 uur
- Een dragervrije bron van NaI met een sterkte van 37 kBq bevat als jodiumatomen uitsluitend het radionuclide  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 8,05$  d). Het massagetal van natrium is  $A = 23$ . De constante van Avogadro is  $6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .
  - bereken de massa van deze radioactieve stof
- De oude eenheid van activiteit is de curie. Deze is gedefinieerd als de activiteit van 1 gram radium.
  - bereken de activiteit (in Bq) van 1,0 gram  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 1600$  j)
- Tritium ( $^3\text{H}$ ) is radioactief en vervalt door uitzending van een  $\beta$ -deeltje naar de grondtoestand van een stabiel helium-isotoop. De maximale  $\beta$ -energie is 18,6 keV. De halveringstijd is 12,33 jaar.
  - hoe groot is het energieverval tussen begin- en eindtoestand?
  - teken het vervalschema met alle gegevens
- Het radionuclide  $^{13}\text{N}$  vervalt door uitzending van een positron naar de grondtoestand van het stabiele nuclide  $^{13}\text{C}$ . De maximale  $\beta^+$ -energie is 1,19 MeV. De halveringstijd bedraagt 10,0 minuten.
  - hoe groot is het energieverval tussen begin- en eindtoestand?
  - teken het vervalschema met alle gegevens

- Gegeven is het vervalschema van het radionuclide  $^{106}\text{Rh}$ . Er is geen interne conversie.
  - geef voor elke  $\beta$ -overgang de maximale energie
  - geef de emissiewaarschijnlijkheid van alle  $\beta$ -overgangen
  - hoeveel  $\beta$ -deeltjes worden per seconde door 1,0 kBq  $^{106}\text{Rh}$  uitgezonden?
  - hoeveel  $\gamma$ -fotonen worden per seconde door 1,0 kBq  $^{106}\text{Rh}$  uitgezonden?



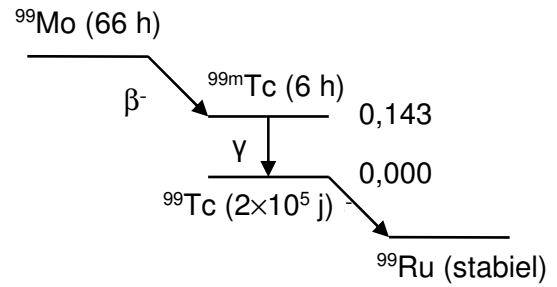


- 8 Het radionuclide  $^{125}\text{I}$  vervalt voor 100% naar een isomeer niveau van  $^{125}\text{Te}$  bij 35,46 keV. Tijdens het verval van dit isomere niveau treedt in 93,33% van de gevallen interne conversie op, en wel 80,30% K-elektronen, 10,47% L-elektronen, 2,09% M-elektronen en 0,50% N-elektronen.
- a bereken  $\alpha_{\text{tot}}$ ,  $\alpha_{\text{K}}$ ,  $\alpha_{\text{L}}$ ,  $\alpha_{\text{M}}$  en  $\alpha_{\text{N}}$
- 9 Het radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  vervalt met een emissiewaarschijnlijkheid  $f_{\beta_1} = 0,944$  naar  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  onder uitzending van een  $\beta^-$ -deeltje met  $E_{\beta_1, \text{max}} = 0,514$  MeV, en in de overige gevallen vervalt het rechtstreeks naar de grondtoestand van  $^{137}\text{Ba}$ . De energie van het isomere niveau  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  is 662 keV, en de conversiecoëfficiënt van de isomere overgang is  $\alpha = 0,110$ .
- a bereken de energie  $E_{\beta_2, \text{max}}$  van de  $\beta^-$ -overgang naar de grondtoestand van  $^{137}\text{Ba}$   
 b bereken de emissiewaarschijnlijkheid van het  $\gamma$ -foton  
 c teken het vervalschema met alle gegevens
- 10 Om 9:00 uur wordt een hoeveelheid  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  een laboratorium binnengebracht. Een uur later wordt de activiteit van het technetium bepaald. Op elk heel uur wordt deze activiteitsbepaling herhaald (zie onderstaande tabel).

<i>tijdstip t</i> (uur)	<i>activiteit A</i> (Bq)
10:00	$2,00 \times 10^6$
11:00	$1,78 \times 10^6$
12:00	$1,59 \times 10^6$
13:00	$1,42 \times 10^6$
14:00	$1,26 \times 10^6$
15:00	$1,13 \times 10^6$
16:00	$1,00 \times 10^6$
17:00	$0,89 \times 10^6$

- a zet de meetwaarden uit op enkel-logaritmisch grafiekpapier (zet de activiteit uit langs de  $y$ -as en het tijdstip langs de  $x$ -as)
- b wat was de activiteit op het moment dat het technetium het laboratorium binnenkwam?
- c hoe lang duurt het voordat de activiteit gehalveerd is?
- d geef de activiteit  $A$  als functie van de tijd  $t$  (gebruik hiervoor de exponentiële functie; neem 9:00 uur als  $t = 0$ , 10:00 uur als  $t = 1$  enzovoorts)
- e hoe groot is het aantal desintegraties tussen 10:00 en 17:00 uur?
- f geef het totaal aantal desintegraties sinds 9:00 uur als functie van  $t$
- g hoeveel radioactieve kernen bevatte het technetium toen het in het laboratorium werd gebracht?

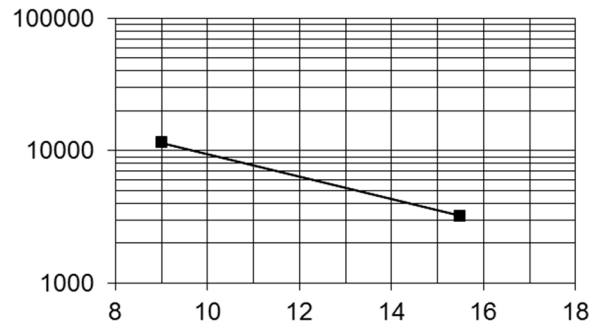
- 11 Het radionuclide  $^{99}\text{Mo}$  vervalst via de kort levende isomere toestand  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  naar de grondtoestand van  $^{99}\text{Tc}$ . Dit radionuclide heeft een lange halveringstijd en vervalst op zijn beurt naar stabiel  $^{99}\text{Ru}$ . Op tijdstip  $t = 0$  heeft men 1,0 GBq zuiver  $^{99}\text{Mo}$ .



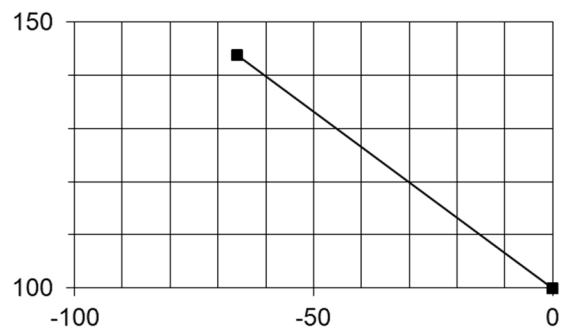
- wat zijn de activiteiten van  $^{99}\text{Mo}$  en  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  op tijdstip  $t = 6$  h ?
- wat zijn de activiteiten van  $^{99}\text{Mo}$  en  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  op tijdstip  $t = 66$  h ?
- wat is de activiteit van  $^{99}\text{Tc}$  op tijdstip  $t = 660$  h ?
- wat is de activiteit van  $^{99}\text{Tc}$  op tijdstip  $t = 2 \times 10^5$  j ?

**Antwoorden**

- 1  $N(t) = N(0) e^{-0,693 t/T_{1/2}}$  met  $N(0) = 11\,500$   
 a tussen 9:00 en 15:30 liggen 6,5 uren  
 $N(6,5) = 11\,500 e^{-0,693 \times 6,5/T_{1/2}} = 3200$   
 $0,693 \times 6,5 / T_{1/2} = \ln(11\,500 / 3200)$   
 $= \ln(3,59) = 1,28$   
 $T_{1/2} = 0,693 \times 6,5 / 1,28 = 3,52$  uur  
 b tussen 9:00 en 12:00 liggen 3,0 uren  
 $N(3,0) = 11\,500 e^{-0,693 \times 3/3,52}$   
 $= 11\,500 \times 0,554 = 6370$  tpm  
 c gebruik enkel-logaritmisch papier

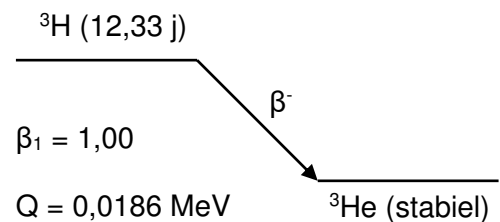


- 2  $T_{1/2} = 5,25 \times 24 = 126$  uur  
 a  $e^{-0,693 t/126} = 75 / 100 = 0,75$   
 $-0,693 t / 126 = \ln(0,75) = -0,288$   
 $t = 0,288 \times 126 / 0,693 = 52,4$  uur  
 dus woensdagmiddag om 13:24 uur  
 b gebruik enkel-logaritmisch papier  
 c tussen vrijdag 15:00 en maandag 9:00 liggen 66 uren  
 $A(-66) = 100 e^{-0,693 \times (-66)/126}$   
 $= 100 \times 1,44 = 144$  MBq

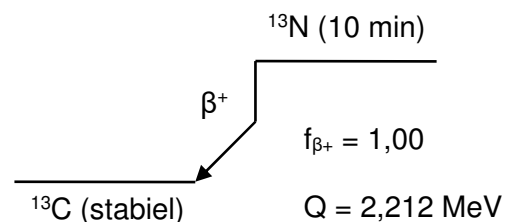


- 3 a  $\lambda(^{131}\text{I}) = \ln(2) / (8,05 \times 24 \times 3600) \text{ s}^{-1} = 9,97 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$   
 aantal atomen  $^{131}\text{I}$  is  $N = A / \lambda = 37 \times 10^3 / 9,97 \times 10^{-7} = 3,7 \times 10^{10}$   
 aantal gramatomen is  $N / N_{\text{Avo}} = 3,7 \times 10^{10} / 6,02 \times 10^{23} = 6,1 \times 10^{-14}$   
 de massa van het  $\text{Na}^{131}\text{I}$  is  $6,1 \times 10^{-14} \times (23 + 131) = 9,4 \times 10^{-12} \text{ g} = 9,4 \text{ pg}$
- 4 a 1 gram  $^{226}\text{Ra}$  =  $1 / 226$  mol bevat  $6,02 \times 10^{23} / 226 = 2,664 \times 10^{21}$  atomen  
 $\lambda(^{226}\text{Ra}) = 0,693 / (1600 \times 365 \times 24 \times 3600) = 1,373 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$   
 $A = \lambda N = 2,664 \times 10^{21} \times 1,373 \times 10^{-11} = 3,66 \times 10^{10} \text{ Bq} = 1,0 \text{ Ci}$

- 5 a  $Q = E_{\beta, \text{max}} = 18,6 \text{ keV} = 0,0186 \text{ MeV}$   
 b zie figuur



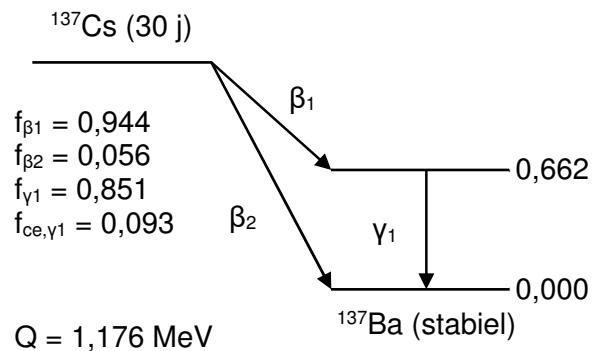
- 6 a  $Q = E_{\beta, \text{max}} + 1,022 = 1,19 + 1,022$   
 $= 2,212 \text{ MeV}$   
 b zie figuur



- 7 a  $E_{\beta_1, \max} = 3,540 - 1,562 = 1,978 \text{ MeV}$   
 $E_{\beta_2, \max} = 3,540 - 1,134 = 2,406 \text{ MeV}$   
 $E_{\beta_3, \max} = 3,540 - 0,512 = 3,028 \text{ MeV}$   
 $E_{\beta_4, \max} = 3,540 - 0,000 = 3,540 \text{ MeV}$   
 b  $f_{\beta_1} = f_{\gamma_1} = 0,017$   
 $f_{\beta_2} = f_{\gamma_2} = 0,097$   
 $f_{\beta_3} = f_{\gamma_3} - f_{\gamma_1} - f_{\gamma_2} = 0,198 - 0,017 - 0,097 = 0,084$   
 $f_{\beta_4} = 1 - f_{\gamma_3} = 1 - 0,198 = 0,802$   
 c er wordt altijd een  $\beta$ -deeltje uitgezonden; bij 1 kBq geeft dit 1000  $\beta$ -deeltjes per seconde  
 d aantal  $\gamma$ -fotonen is  $1000 \times (f_{\gamma_1} + f_{\gamma_2} + f_{\gamma_3}) = 1000 \times (0,017 + 0,097 + 0,198) = 312$  per seconde

- 8 a  $f_{\gamma} = 100\% - 93,33\% = 6,67\%$   
 $\alpha = N_{ce} / N_{\gamma}$   
 $\alpha_{\text{tot}} = N_{ce, \text{tot}} / N_{\gamma} = 93,33 / 6,67 = 13,99$   
 $\alpha_K = N_{ce, K} / N_{\gamma} = 80,30 / 6,67 = 12,04$   
 $\alpha_L = N_{ce, L} / N_{\gamma} = 10,47 / 6,67 = 1,57$   
 $\alpha_M = N_{ce, M} / N_{\gamma} = 2,09 / 6,67 = 0,31$   
 $\alpha_N = N_{ce, N} / N_{\gamma} = 0,50 / 6,67 = 0,07$

- 9 a  $E_{\beta_2, \max} = 0,514 + 0,662$   
 $= 1,176 \text{ MeV} = Q$   
 b  $f_{\beta_1} = f_{\beta_1} \times N_{\gamma_1} / (N_{\gamma_1} + N_{ce, \gamma_1})$   
 $= f_{\beta_1} / (1 + N_{ce, \gamma_1} / N_{\gamma_1})$   
 $= f_{\beta_1} / (1 + \alpha)$   
 $= 0,944 / 1,110 = 0,85$   
 c  $f_{\beta_2} = 1 - f_{\beta_1} = 1 - 0,944 = 0,056$   
 $f_{ce, \gamma_1} = \alpha \times f_{\beta_1} = 0,110 \times 0,85$   
 $= 0,0935$



- 10 a zie grafiek  
 b extrapoleer grafiek naar 9:00 uur en lees af:  $2,25 \times 10^6$  desintegraties per seconde  
 c aflezen uit de grafiek: ongeveer 6 uur (vergelijk de activiteiten van bijvoorbeeld 10:00 en 16:00 uur).  
 d een functie die lineair is op enkel-logaritmisch grafiekpapier kan beschreven worden door middel van een exponentiële functie:

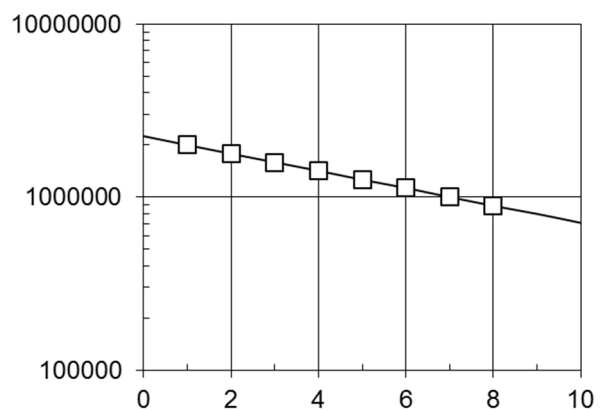
$$A(t) = A(0)e^{-\lambda t}$$

waarbij  $A(0)$  en  $\lambda$  constantes zijn

$$t = 0 \rightarrow A(0) = 2,25 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$t = 6 \rightarrow A = 0,5 A(0)$$

invullen van deze gegevens levert dan  $\lambda = 0,115$  per uur (de tijd is immers in uren gegeven)



- e totaal aantal vervallen kernen wordt berekend door "sommatie" (d.w.z. integratie) over het gevraagde tijdvak:

$$N = \int_{t=1}^{t=8} A(t) dt = A(0) \int_1^8 e^{-\lambda t} dt = \frac{A(0)}{-\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_1^8 = \frac{A(0)}{-\lambda} (e^{-8\lambda} - e^{-\lambda})$$

hierin is de eenheid van  $N$  gelijk aan (desintegraties / seconde)  $\times$  uur, omdat de eenheid van  $A$  desintegraties per seconde en die van  $\lambda$  per uur is om het totale aantal desintegraties te krijgen moet er daarom nog met 3600 seconden per uur worden vermenigvuldigd:

$$N = \frac{3600 A(0)}{\lambda} (e^{-\lambda} - e^{-8\lambda})$$

invullen van  $A(0)$  en  $\lambda$

$$N = 3,47 \times 10^{10} \text{ desintegraties}$$

- f  $N$  als functie van  $t$  wordt verkregen door als onder- en bovengrens van de integraal o respectievelijk  $t$  te nemen:

$$N = \int_0^t A(t) dt = A(0) \int_0^t e^{-\lambda t} dt = \frac{3600 A(0)}{-\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^t = \frac{3600 A(0)}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

- g het aantal aanwezige kernen op  $t = 0$  is gelijk aan het aantal desintegraties tussen de tijdstippen  $t = 0$  en  $t = \infty$  (zie ook de uitwerking vraag e):

$$N = \int_0^{\infty} A(t) dt = A(0) \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{3600 A(0)}{-\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{3600 A(0)}{\lambda}$$

invullen van  $A(0)$  en  $\lambda$

$$N = 7,04 \times 10^{10} \text{ desintegraties}$$

alternatief:  $A = \lambda \times N$

$$N = \lambda / A = 2,25 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \times 3600 \text{ s h}^{-1} / 0,115 \text{ h}^{-1} = 7,04 \times 10^{10}$$

- 11  $^{99}\text{Mo}$  vervalst met  $T_{1/2} = 66 \text{ h}$

$^{99\text{m}}\text{Tc}$  groeit eerst in met  $T_{1/2} = 6 \text{ h}$  en vervalst vervolgens samen met  $^{99}\text{Mo}$  met  $T_{1/2} = 66 \text{ h}$

$^{99}\text{Tc}$  groeit eerst in met  $T_{1/2} = 66 \text{ h}$  en vervalst vervolgens met  $T_{1/2} = 2 \times 10^5 \text{ j}$

merk op dat bij een moeder-dochterrelatie de ingroei altijd met de kortere en het verval altijd met de langere van de twee betrokken halveringstijden plaatsvindt

- a  $^{99}\text{Mo}$  is een beetje vervallen en  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  is voor de helft ingegroeid

$$A(^{99}\text{Mo}, t=6 \text{ h}) = e^{-0,693 \times 6/66} \times A(^{99}\text{Mo}, t=0) = 0,9 \times 1,0 \text{ GBq} = 0,9 \text{ GBq}$$

$$A(^{99\text{m}}\text{Tc}, t=6 \text{ h}) \approx 0,5 \times A(^{99}\text{Mo}, t=6 \text{ h}) = 0,45 \text{ GBq}$$

- b  $^{99}\text{Mo}$  is voor de helft vervallen en  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  is hiermee in evenwicht

$$A(^{99}\text{Mo}, t=66 \text{ h}) = 0,5 \times A(^{99}\text{Mo}, t=0) = 0,5 \times 1,0 \text{ GBq} = 0,5 \text{ GBq}$$

$$A(^{99\text{m}}\text{Tc}, t=66 \text{ h}) \approx A(^{99}\text{Mo}, t=66 \text{ h}) = 0,5 \text{ GBq}$$

- c  $^{99}\text{Mo}$  en  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  zijn nagenoeg geheel vervallen en er zijn evenveel  $^{99}\text{Tc}$ -atomen als er  $^{99}\text{Mo}$ -atomen waren op tijdstip  $t = 0$

bedenk dat  $A = \lambda N = 0,693 \times N / T_{1/2}$

$$A(^{99}\text{Tc}, t=660 \text{ h}) / A(^{99}\text{Mo}, t=0) = T_{1/2}(^{99}\text{Mo}) / T_{1/2}(^{99}\text{Tc}) = 66 \text{ h} / 2 \times 10^5 \text{ j} = 4 \times 10^{-8}$$

$$A(^{99}\text{Tc}, t=660 \text{ h}) = 4 \times 10^{-8} \times A(^{99}\text{Mo}, t=0) = 4 \times 10^{-8} \times 1,0 \text{ GBq} = 40 \text{ Bq}$$

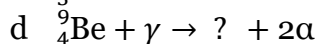
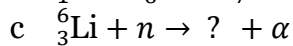
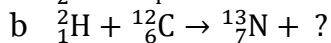
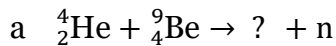
- d van  $^{99}\text{Mo}$  en  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  is geen spoor meer te bekennen en het gevormde  $^{99}\text{Tc}$  is voor de helft vervallen:

$$A(^{99}\text{Tc}, t=2 \times 10^5 \text{ j}) = 0,5 \times A(^{99}\text{Tc}, t=660 \text{ h}) = 0,5 \times 40 \text{ Bq} = 20 \text{ Bq}$$

## 6 Wisselwerking van straling met materie

- 1 Een radioactieve puntbron van 1 MBq zendt 1  $\gamma$ -foton per desintegratie uit.  
a bereken het fluentietempo en de fluxdichtheid op 1 m afstand van de bron.

- 2 Wat is het ontbrekende reactieproduct in onderstaande kernreacties:



- 3 Gegeven is de volgende formule voor de massieke dracht van een  $\alpha$ -deeltje:

$$R_\alpha(E)\rho = 3,2 \times 10^{-4} \sqrt{A} R_{\alpha,L}(E)$$

Hierin is  $E$  (in MeV) de energie van het  $\alpha$ -deeltje,  $A$  het (effectieve) massagetal van de materie en  $R_{\alpha,L}$  (in cm) de lineïeke dracht in lucht.

- a bereken de lineïeke dracht in water van  $\alpha$ -deeltjes met een energie van 5 MeV  
*aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel  $R_L = 0,3 E^{3/2}$*

- 4 Men wil een bolvormige, met lucht gevulde ionisatiekamer construeren. In het centrum zal een radioactieve bron worden geplaatst, die  $\alpha$ -deeltjes met een energie van 8 MeV uitzendt.

- a hoe groot moet de straal minimaal zijn, opdat de  $\alpha$ -deeltjes al hun energie aan de lucht in de ionisatiekamer afgeven?

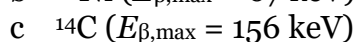
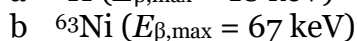
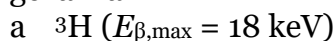
*aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel  $R_L = 0,3 E^{3/2}$*

- 5 Een  $\alpha$ -detector bestaat uit een ZnS-scintillator met fotomultiplicatorbuis. De scintillator is afgedekt met een aluminiumfolie met een dikte van  $1,5 \text{ mg cm}^{-2}$ . Tussen folie en bron bevindt zich  $0,5 \text{ cm}$  lucht. Het atoomgewicht van aluminium is  $A = 27$ , de dichtheid van aluminium is  $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$ , en de dichtheid van lucht is  $\rho_{\text{lucht}} = 1,2 \text{ mg cm}^{-3}$ .

- a bereken de energie die de  $\alpha$ -deeltjes tenminste moeten bezitten opdat deze de ZnS-scintillator kunnen bereiken

*aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel  $R_L = 0,3 E^{3/2}$*

- 6 In het centrum van een bolvormige ionisatiekamer met een straal van  $5 \text{ cm}$  wordt een  $\beta$ -bron geplaatst. Het telgas is argon waarvan de soortelijke massa  $\rho_{\text{Ar}} = 1,784 \text{ mg cm}^{-3}$  bedraagt bij  $0^\circ \text{ C}$  en  $1 \text{ atm}$ . Hoe groot moet de druk in de ionisatiekamer minimaal zijn opdat de volledige  $\beta$ -energie wordt afgegeven aan het telgas in het geval van



*aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel  $\rho R_{\beta,\text{max}} = 0,5 E_{\beta,\text{max}}$*



- 7 Bereken de omzettingsfactor  $g$  voor remstraling in het geval dat de  $\beta$ -straling van het radionuclide  $^{32}\text{P}$  ( $E_{\beta,\text{max}} = 1,71 \text{ MeV}$ ) gestopt wordt in
- aluminium ( $Z = 13$ )
  - koper ( $Z = 29$ )
  - lood ( $Z = 82$ )
- 8 Een van de natuurlijk voorkomende radionucliden is  $^{208}\text{Tl}$  dat een  $\gamma$ -foton met een energie van 2,6 MeV uitzendt.
- bereken de relatieve bijdragen van foto-effect, Compton-effect en paarvorming tot de verzwakking van deze  $\gamma$ -straling in lood  
*aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in appendix A5 van dit oefenboek*
- 9 Een foton met een energie van 10 MeV wordt over een hoek  $\theta$  verstrooid.
- bereken de de energie van het verstrooide foton als  $\theta = 10^\circ$
  - bereken de de energie van het verstrooide foton als  $\theta = 90^\circ$
  - bereken de de energie van het verstrooide foton als  $\theta = 180^\circ$
- 10 Voor de productie van  $^{60}\text{Co}$  bestraalt men 10 g kobalt met thermische neutronen. De neutronenfluxdichtheid is  $\phi = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  en de werkzame doorsnede voor neutronactivering is  $\sigma = 38 \text{ b}$ . De constante van Avogadro is  $6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . De halveringstijd van  $^{60}\text{Co}$  is  $T_{1/2} = 5,27 \text{ j}$ . Natuurlijk kobalt bestaat voor 100% uit het isotoop  $^{59}\text{Co}$ .
- bereken de gevormde activiteit na 1 dag
  - bereken de gevormde activiteit na 1 maand
  - bereken de gevormde activiteit na 1 jaar

**Antwoorden**

1 a  $\varphi = A f_V / (4\pi r^2) = 1 \times 10^6 \times 1 / (4\pi \times 1^2) = 8,0 \times 10^4 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

- 2 a  $^{12}_6\text{C}$   
 b n  
 c  $^3_1\text{H}$   
 d n

3 a  $1 / \sqrt{A_{\text{eff}}} = (2/18) / \sqrt{1} + (16/18) / \sqrt{16} = 0,11 + 0,22 = 0,33$   
 $A_{\text{eff}} = (1 / 0,33)^2 = 9,2$   
 $R_{\alpha,L} = 0,3 E^{3/2} = 0,3 \times 5^{3/2} = 3,35 \text{ cm}$   
 $R_{\alpha} \rho = 3,2 \times 10^{-4} \times \sqrt{9,2} \times 3,35 = 3,3 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-1}$   
 $R_{\alpha} = 3,3 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-1} / 1 \text{ g cm}^{-3} = 3,3 \times 10^{-3} \text{ cm} = 33 \text{ } \mu\text{m}$

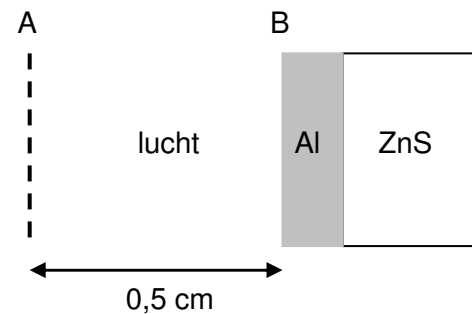
- 4 a de straal moet minimaal gelijk zijn aan de dracht van de  $\alpha$ -deeltjes in lucht  
 $R_L = 0,3 E^{3/2} = 0,3 \times 8^{3/2} = 6,8 \text{ cm}$

- 5 a dikte aluminium  $1,5 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2} / 2,7 \text{ g cm}^{-3}$   
 $= 0,56 \times 10^{-3} \text{ cm}$   
 in punt B moet de dracht in aluminium minimaal  $0,56 \times 10^{-3} \text{ cm}$  bedragen  
 $R_{\text{Al}} = 3,2 \times 10^{-4} (\sqrt{A} / \rho) R_L$  (zie oefening 3)  
 $= 3,2 \times 10^{-4} \times (\sqrt{27} / 2,7) R_L$   
 $= 6,16 \times 10^{-4} R_L$   
 $= 0,56 \times 10^{-3} \text{ cm}$

$$R_L = 0,56 \times 10^{-3} / 6,16 \times 10^{-4} = 0,9 \text{ cm}$$

in punt A moet de dracht in lucht minimaal  $0,5 + 0,9 = 1,4 \text{ cm}$  bedragen

$$E_{\alpha} = (1,4 / 0,3)^{2/3} = 2,8 \text{ MeV}$$



- 6 massieke straal ionisatiekamer  $R\rho = 5 \text{ cm} \times 1,784 \text{ mg cm}^{-3} = 8,9 \text{ mg cm}^{-2}$  ( $0^\circ \text{ C}$ , 1 atm)  
 a  $R\rho = 0,5 \times 0,018 = 9 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2} = 9 \text{ mg cm}^{-2}$   
 minimale druk =  $1 \text{ atm} \times (9 \text{ mg cm}^{-2} / 8,9 \text{ mg cm}^{-2}) = 1,0 \text{ atm}$  bij  $0^\circ \text{ C}$   
 b  $R\rho = 0,5 \times 0,067 = 34 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2} = 34 \text{ mg cm}^{-2}$   
 minimale druk =  $1 \text{ atm} \times (34 \text{ mg cm}^{-2} / 8,9 \text{ mg cm}^{-2}) = 3,8 \text{ atm}$  bij  $0^\circ \text{ C}$   
 c  $R\rho = 0,5 \times 0,156 = 78 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2} = 78 \text{ mg cm}^{-2}$   
 minimale druk =  $1 \text{ atm} \times (78 \text{ mg cm}^{-2} / 8,9 \text{ mg cm}^{-2}) = 8,8 \text{ atm}$  bij  $0^\circ \text{ C}$

7  $g = 2 \times 10^{-4} Z E_{\text{max}}$

a  $2 \times 10^{-4} \times 13 \times 1,71 = 0,004$

b  $2 \times 10^{-4} \times 29 \times 1,71 = 0,010$

c  $2 \times 10^{-4} \times 82 \times 1,71 = 0,028$

- 8 a volgens formule (6.10) van de syllabus is de verzwakking (= aantal wisselwerkingen) evenredig met  $\mu$   
 aflezen appendix A5 van dit oefenboek geeft:

foto-effect	$\mu_f / \rho = 0,0035 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	$\mu_f / \sum \mu = 0,084 = 8,4\%$
Compton-wisselwerking	$\mu_c / \rho = 0,030 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	$\mu_c / \sum \mu = 0,723 = 72,3\%$
paarvorming	$\mu_p / \rho = 0,008 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	$\mu_p / \sum \mu = 0,193 = 19,3\%$
totaal	$\sum \mu / \rho = 0,0415 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	

9 de Compton-formule luidt

$$E'_f = \frac{E_f}{1 + \frac{E_f}{0,511} [1 - \cos(\theta)]}$$

a  $\theta = 10^\circ$   $\cos(10^\circ) = 0,985$

$$E' = 10 \text{ MeV} / [1 + (10 / 0,511)(1 - 0,985)] = 7,73 \text{ MeV}$$

b  $\theta = 90^\circ$   $\cos(90^\circ) = 0$

$$E' = 10 \text{ MeV} / [1 + (10 / 0,511)(1 - 0)] = 0,49 \text{ MeV}$$

c  $\theta = 180^\circ$   $\cos(180^\circ) = -1$

$$E' = 10 \text{ MeV} / [1 + (10 / 0,511)(1 + 1)] = 0,25 \text{ MeV}$$

10 activiteit  $A = \sigma n \phi (1 - e^{-\lambda t}) \approx \sigma n \phi \lambda t$

werkzame doorsnede  $\sigma = 38 \text{ b} = 38 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$

aantal kobaltatomen  $n = (10 \text{ g} / 59 \text{ g mol}^{-1}) \times 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 1,0 \times 10^{23}$

vervalconstante  $\lambda = 0,693 / 5,272 \text{ j} = 0,13 \text{ j}^{-1} = 0,011 \text{ mnd}^{-1} = 0,00036 \text{ d}^{-1}$

a  $\lambda t = 0,00036$

$$A \approx 38 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 1,0 \times 10^{23} \times 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 0,00036 = 2,7 \times 10^{11} \text{ Bq} = 0,3 \text{ TBq}$$

b  $\lambda t = 0,011$

$$A \approx 38 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 1,0 \times 10^{23} \times 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 0,011 = 8,4 \times 10^{12} \text{ Bq} = 8 \text{ TBq}$$

c  $\lambda t = 0,13$

$$A \approx 38 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 1,0 \times 10^{23} \times 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 0,13 = 1,0 \times 10^{14} \text{ Bq} = 100 \text{ TBq}$$

## 7 Basale dosimetrie

- 1 Voor de vorming van één ion in lucht is gemiddeld een energie van 33,7 eV nodig.
  - a toon door berekening aan dat een exposie van 1 R overeenkomt met een geabsorbeerde dosis van 8,695 mGy in lucht.
  
- 2 In een ionisatiekamer met een volume van 500 ml lucht loopt een ionisatiestroom van 10 pA. De dichtheid van lucht bij kamertemperatuur is  $0,0012 \text{ g cm}^{-3}$ .
  - a bereken het exposietempo, uitgaande van de omrekeningsfactor:  
 $1 \text{ R} \rightarrow 2,58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1}$
  - b bereken het geabsorbeerde dosistempo; ga er vanuit dat de gehele ionisatiekamer gelijkmatig is bestraald.
  
- 3 In de volgende opgaven staat R voor röntgen en A voor ampère. Gegeven zijn de omrekeningsfactoren:  
 $1 \text{ R} \rightarrow 2,58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1}$   
 $1 \text{ R} \rightarrow 8,695 \text{ mGy}$   
 $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 
  - a druk  $1 \text{ R m}^2 \text{ Ci}^{-1} \text{ h}^{-1}$  uit in de eenheid  $\text{Sv m}^2 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$
  - b druk  $1 \text{ Sv m}^2 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$  uit in de eenheid  $\text{A m}^2 \text{ Bq}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
  
- 4 In een fotonenveld ( $E = 0,5 \text{ MeV}$ ) bedraagt het kerma in lucht 1,0 mGy. Bereken
  - a de geabsorbeerde dosis in lucht
  - b het kerma in spierweefsel
  - c de geabsorbeerde dosis in bot

*aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in appendix A4 van dit oefenboek*
  
- 5 Een radioactieve bron zendt een  $\gamma$ -foton uit met een energie van 2,6 MeV en een emissiewaarschijnlijkheid van 100%.
  - a maak een schatting van de bronconstante (in  $\mu\text{Gy h}^{-1} \text{ MBq}^{-1} \text{ m}^2$ )

*aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel  $d_\gamma = E_\gamma / 7$*

**Antwoorden**

- 1 a  $1 \text{ R} / \text{elektronlading} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1} / 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} = 1,6125 \times 10^{15} \text{ ionen per kg}$   
energie per massa  $E / M = 1,6125 \times 10^{15} \text{ kg}^{-1} \times 33,7 \text{ eV} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J eV}^{-1}$   
 $= 8,695 \times 10^{-3} \text{ J kg}^{-1} = 8,695 \text{ mGy}.$
- 2 a lading per tijd  $dQ/dt = 10 \text{ pA} = 10 \times 10^{-12} \text{ C s}^{-1}$   
massa  $M = 500 \text{ ml} \times 0,0012 \text{ g ml}^{-1} = 0,6 \text{ g} = 0,6 \times 10^{-3} \text{ kg}$   
exposietempo  $dX/dt = dQ/dt / M$   
 $= 10 \times 10^{-12} \text{ C s}^{-1} / [0,6 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 2,58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1} \text{ per R}]$   
 $= 6,46 \times 10^{-5} \text{ R s}^{-1} = 0,23 \text{ R h}^{-1}$
- b lading per tijd  $10 \text{ pA} = 10 \times 10^{-12} \text{ C s}^{-1}$   
ionen per tijd  $10 \times 10^{-12} \text{ C s}^{-1} / 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} = 6,25 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$   
energie per tijd  $dE/dt = 6,25 \times 10^7 \text{ s}^{-1} \times 33,7 \text{ eV} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J eV}^{-1}$   
 $= 3,37 \times 10^{-10} \text{ J s}^{-1}$   
massa  $M = 500 \text{ ml} \times 0,0012 \text{ g ml}^{-1} = 0,6 \text{ g} = 0,6 \times 10^{-3} \text{ kg}$   
geabsorbeerde dosistempo  $dD/dt = dE/dt / M$   
 $= 3,37 \times 10^{-10} \text{ J s}^{-1} / 0,6 \times 10^{-3} \text{ kg}$   
 $= 5,62 \times 10^{-7} \text{ Gy s}^{-1} = 2,0 \text{ mGy h}^{-1}$   
dus  $6,46 \times 10^{-5} \text{ R s}^{-1}$  komt overeen met  $5,62 \times 10^{-7} \text{ Gy s}^{-1}$ , ofwel 1 R komt correspondeert met 8,7 mGy
- 3 a  $1 \text{ R m}^2 \text{ Ci}^{-1} \text{ h}^{-1} = 1 \text{ R m}^2 \text{ Ci}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 0,008695 \text{ Gy R}^{-1} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} / 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq Ci}^{-1}$   
 $= 2,35 \times 10^{-13} \text{ Sv m}^2 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$
- b  $1 \text{ Sv m}^2 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1} = 1 \text{ Sv m}^2 \text{ Bq}^{-1} \text{ h}^{-1} \times 1 \text{ Gy Sv}^{-1} / [0,008695 \text{ Gy R}^{-1} \times 3600 \text{ (s h}^{-1})]$   
 $= 0,03195 \text{ R s}^{-1} \text{ m}^2 \text{ Bq}^{-1}$   
 $= 0,03195 \text{ R s}^{-1} \text{ m}^2 \text{ Bq}^{-1} \times 2,58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1} \text{ per R}$   
 $= 8,24 \times 10^{-6} \text{ C kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^2 \text{ Bq}^{-1}$   
 $= 8,24 \times 10^{-6} \text{ A m}^2 \text{ Bq}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
- 4 kerma is evenredig met  $\mu_{tr}/\rho$   
geabsorbeerde dosis is evenredig met  $\mu_{en}/\rho$
- a geabsorbeerde dosis in lucht  $= 1,0 \text{ mGy} \times (0,0296 / 0,0296) = 1,0 \text{ mGy}$   
b kerma in spierweefsel  $= 1,0 \text{ mGy} \times (0,0328 / 0,0296) = 1,11 \text{ mGy}$   
c geabsorbeerde dosis in bot  $= 1,0 \text{ mGy} \times (0,0317 / 0,0296) = 1,07 \text{ mGy}$
- 5 a  $d_\gamma = 2,6 / 7 = 0,36 \text{ } \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ MBq}^{-1} \text{ m}^2$



## 9 Operationele dosimetrie

- 1 In een gemengd stralingsveld loopt een werknemer een exposie op van 70 mR ten gevolge van  $\gamma$ -fotonen en een geabsorbeerde dosis van 0,5 mGy ten gevolge van neutronen. De stralingsweefactor van de neutronen is  $8 \text{ Sv Gy}^{-1}$ . Ga er vanuit dat het gehele lichaam gelijkmatig is bestraald. Gebruik de omrekeningsfactor  
 $1 \text{ R} \rightarrow 0,01 \text{ Gy}$ .
  - a bereken de effectieve dosis
  
- 2 De bijdrage tot de effectieve dosis ten gevolge van bestraling van de longen door de  $\alpha$ -emitter radon bedraagt 0,90 mSv per jaar. De stralingsweefactor voor  $\alpha$ -straling is 20 en de weefselweefactor voor de longen is 0,12.
  - a bereken de equivalente longdosis per jaar
  - b bereken de geabsorbeerde jaardosis van de longen
  
- 3 Tijdens een isotrope bestraling met 100 keV fotonen wordt een effectieve dosis van 10 mSv ontvangen. Wat zou de effectieve dosis zijn geweest bij een bestraling
  - a van voren
  - b van achteren
  - c van links
  - d van rechts

*aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in appendix A6 van dit oefenboek*
  
- 4 In een veld van 20 keV fotonen bedraagt het fluentietempo  $\phi = 1,0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . De fotonen komen uitsluitend van voren.
  - a bepaal het kermatempo in lucht
  - b bepaal het omgevingsdosisequivalent
  - c bepaal de effectieve dosis

*aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in appendix A7 van dit oefenboek*
  
- 5 In een veld van thermische neutronen met energie  $E_n = 25 \text{ meV}$  bedraagt het kerma in lucht 1 mGy. De neutronen komen uitsluitend van voren.
  - a bepaal het omgevingsdosisequivalent
  - b bepaal de effectieve dosis

*aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in appendix A8 van dit oefenboek*

**Antwoorden**

- 1 omdat het hele lichaam gelijkmatig is bestraald, is equivalente dosis = effectieve dosis
- a bijdrage gammastraling  
 stralingsweegfactor  $w_R = 1 \text{ Sv Gy}^{-1}$   
 effectieve dosis  $1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 70 \text{ mR} \times 0,01 \text{ Gy R}^{-1} = 0,70 \text{ mSv}$
- bijdrage neutronenstraling  
 stralingsweegfactor  $w_R = 8 \text{ Sv Gy}^{-1}$   
 effectieve dosis  $8 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 0,5 \text{ mGy} = 4,0 \text{ mSv}$   
 totale effectieve dosis  $E = 0,7 \text{ mSv} + 4,0 \text{ mSv} = 4,7 \text{ mSv}$
- 2 a equivalente longdosis  $H_{\text{long}} = E / w_{\text{long}}$   
 $= 0,90 \text{ mSv j}^{-1} / 0,12 = 7,5 \text{ mSv j}^{-1}$
- b stralingsweegfactor  $\alpha$ -straling  $w_R = 20 \text{ Sv Gy}^{-1}$   
 geabsorbeerde jaardosis  $D_{\text{long}} = H_{\text{long}} / w_R$   
 $= 7,5 \text{ mSv j}^{-1} / 20 \text{ Sv Gy}^{-1} = 0,38 \text{ mGy}$
- 3 aflezen van appendix A6 van dit oefenboek bij 0,1 MeV geeft  $E(\text{ISO}) / H^*(10) = 0,46$
- a  $E(\text{AP}) / H^*(10) = 0,85 \rightarrow E(\text{AP}) = (0,85 / 0,46) \times 10 \text{ mSv} = 18,5 \text{ mSv}$
- b  $E(\text{PA}) / H^*(10) = 0,63 \rightarrow E(\text{AP}) = (0,63 / 0,46) \times 10 \text{ mSv} = 13,7 \text{ mSv}$
- c  $E(\text{LLA}) / H^*(10) = 0,40 \rightarrow E(\text{AP}) = (0,40 / 0,46) \times 10 \text{ mSv} = 8,7 \text{ mSv}$
- d  $E(\text{RLA}) / H^*(10) = 0,35 \rightarrow E(\text{AP}) = (0,35 / 0,46) \times 10 \text{ mSv} = 7,6 \text{ mSv}$
- 4 aflezen van appendix A7 van dit oefenboek bij 0,02 MeV geeft
- a  $K_a = 1,3 \text{ pGy cm}^2 \times \varphi$   
 $= 1,3 \times 10^{-12} \text{ Gy cm}^2 \times 1,0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ Gy s}^{-1} = 1,3 \text{ mGy s}^{-1}$
- b  $H^*(10) = 1,0 \text{ pSv cm}^2 \times \varphi$   
 $= 1,0 \times 10^{-12} \text{ Sv cm}^2 \times 1,0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ Sv s}^{-1} = 1,0 \text{ mSv s}^{-1}$
- c  $E(\text{AP}) = 0,2 \text{ pSv cm}^2 \times \varphi$   
 $= 0,2 \times 10^{-12} \text{ Sv cm}^2 \times 1,0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 0,2 \times 10^{-3} \text{ Sv s}^{-1} = 0,2 \text{ mSv s}^{-1}$
- 5 aflezen van appendix A8 van dit oefenboek bij 0,025 eV geeft  $K_a = 0,2 \text{ pGy cm}^2$
- a  $H^*(10) = 10 \text{ pSv cm}^2 \rightarrow H^* = (10 \text{ pSv cm}^2 / 0,2 \text{ pGy cm}^2) \times 1 \text{ mGy} = 50 \text{ mSv}$
- b  $E(\text{AP}) = 7 \text{ pSv cm}^2 \rightarrow H^* = (7 \text{ pSv cm}^2 / 0,2 \text{ pGy cm}^2) \times 1 \text{ mGy} = 35 \text{ mSv}$



## 10 Dosimetrie van inwendige besmetting

- 1 Een laborant raakt via ingestie besmet met  $^{111}\text{In}$  ( $T_{1/2} = 2,8$  d). De volgende dag blijkt de ontlasting een activiteit van 80 kBq te bevatten. Gedurende de daarop volgende dagen wordt geen meetbare hoeveelheid activiteit in de ontlasting aangetroffen. Volgens de gegevens van de ICRP is  $f_1 = 0,02$  voor alle indiumverbindingen, en gaat vanuit het bloed alle activiteit naar organen en weefsels waar het volledig verval. De dosisconversiecoëfficiënt van  $^{111}\text{In}$  voor ingestie is  $e(50)_{\text{ing}} = 2,9 \times 10^{-10}$  Sv Bq $^{-1}$ .
  - a bereken de ingenomen activiteit
  - b bereken de effectieve volg dosis
  - c hoeveel activiteit treft men aan in de urine die gedurende de eerste 24 uur na inname wordt verzameld?
  
- 2 Bij een incident in de hal van een kerncentrale komt  $^{38}\text{Cl}$  ( $T_{1/2} = 37,2$  min) vrij. Alle werknemers die op dat moment in de hal aanwezig zijn, worden verzocht krachtig hun neus te snuiten voor nader onderzoek. Bij een van de werknemers blijkt de uitgesnoten activiteit 40 kBq  $^{38}\text{Cl}$  te bedragen. De meting werd 60 min na het incident verricht. De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie van  $^{38}\text{Cl}$  is  $e(50)_{\text{inh}} = 4,6 \times 10^{-11}$  Sv Bq $^{-1}$ .
  - a bereken de effectieve volg dosis voor het geval dat AMAD = 0,1  $\mu\text{m}$
  - b bereken de effectieve volg dosis voor het geval dat AMAD = 1  $\mu\text{m}$
  - c bereken de effectieve volg dosis voor het geval dat AMAD = 10  $\mu\text{m}$   
*aanwijzing: gebruik de gegevens in appendix A9 van dit oefenboek*
  
- 3 Bij onderhoudswerkzaamheden in het actieve deel van een kerncentrale worden de werknemers dagelijks na het werk gecontroleerd op inwendige besmetting met behulp van een totale lichaamsteller. Op zekere dag wordt bij een werknemer 1,0 kBq  $^{60}\text{Co}$  gemeten. De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie is  $e(50)_{\text{inh}} = 1,7 \times 10^{-8}$  Sv Bq $^{-1}$ . Volgens de gegevens van de ICRP bevindt zich 6 uur na inhalatie nog 74% van de ingeademde activiteit in het lichaam.
  - a bereken de ingeademde activiteit
  - b bereken de effectieve volg dosis als gevolg van dit incident
  
- 4 De urine van de werknemers in een plutoniumfabriek wordt regelmatig gecontroleerd op radioactieve besmetting. Op een kwade dag wordt bij een der werknemers 10 Bq  $^{239}\text{Pu}$  in de urine van de vorige dag aangetroffen. De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie is  $e(50)_{\text{inh}} = 8,3 \times 10^{-6}$  Sv Bq $^{-1}$ . Volgens de gegevens van de ICRP wordt gedurende de eerste dag na inname  $1,7 \times 10^{-5}$  Bq uitgescheiden met de urine, per becquerel ingeademde activiteit.
  - a bereken de activiteit die de werknemer heeft ingeademd
  - b bereken de effectieve volg dosis
  - c hoe groot is de kans dat deze werknemer zal overlijden ten gevolge van botkanker?

- 5 Het radionuclide  $^{85}\text{Kr}$  is een splijtingsproduct dat in de atmosfeer voorkomt met een concentratie van  $1 \text{ Bq m}^{-3}$ . De dosisconversiecoëfficiënt van  $^{85}\text{Kr}$  voor submersie is  $e = 2,2 \times 10^{-11} \text{ Sv d}^{-1}$  per  $\text{Bq m}^{-3}$ .
- a bereken de effectieve dosis per uur als gevolg van submersie
  - b bereken de effectieve jaardosis als gevolg van submersie

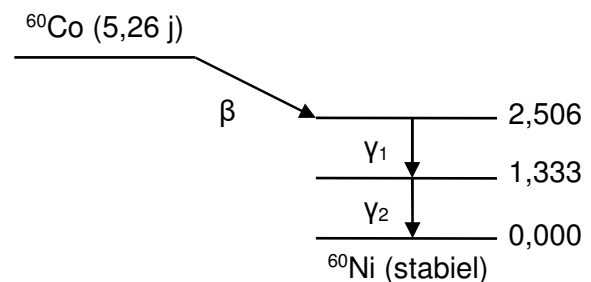
**Antwoorden**

- 1 a er wordt een fractie  $1 - f_i = 1 - 0,02 = 0,98$  uitgescheiden met de ontlasting na verval resteert een fractie  $e^{-0,693t/T^{1/2}} = e^{-0,693 \times 1,0/2,8} = 0,78$  van de activiteit ingestie  $A_{\text{ing}} = 80 \text{ kBq} / (0,98 \times 0,78) = 105 \text{ kBq} = 105 \times 10^3 \text{ Bq}$
- b effectieve volg dosis  $E(50) = e(50)_{\text{ing}} \times A_{\text{ing}}$   
 $= 2,9 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} \times 105 \times 10^3 \text{ Bq} = 3,0 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 30 \text{ } \mu\text{Sv}$
- c alle activiteit gaat naar organen/weefsels en vervalt daar volledig er is dus geen excretie via de urine op de eerste dag
- 2 a AMAD = 0,1  $\mu\text{m}$   
 gedeponeerde fractie  $ET_1 = 0,03$   
 vervalcorrectie  $e^{-0,693t/T^{1/2}} = e^{-0,693 \times 60/37,2} = 0,33$   
 inhalatie  $A_{\text{inh}} = 40 \text{ kBq} / (0,03 \times 0,33) = 4,0 \times 10^3 \text{ kB} = 4,0 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 effectieve volg dosis  $E(50) = e(50)_{\text{inh}} \times A_{\text{inh}}$   
 $= 4,6 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1} \times 4,0 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 $= 0,18 \times 10^{-3} \text{ Sv} = 180 \text{ } \mu\text{Sv}$
- b AMAD = 1  $\mu\text{m}$   
 gedeponeerde fractie  $ET_1 = 0,17$   
 inhalatie  $A_{\text{inh}} = 40 \text{ kBq} / (0,17 \times 0,33) = 0,71 \times 10^3 \text{ kB} = 0,71 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 effectieve volg dosis  $E(50) = e(50)_{\text{inh}} \times A_{\text{inh}}$   
 $= 4,6 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1} \times 0,71 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 $= 3,3 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 33 \text{ } \mu\text{Sv}$
- c AMAD = 10  $\mu\text{m}$   
 gedeponeerde fractie  $ET_1 = 0,35$   
 inhalatie  $A_{\text{inh}} = 40 \text{ kBq} / (0,35 \times 0,33) = 0,35 \times 10^3 \text{ kB} = 0,35 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 effectieve volg dosis  $E(50) = e(50)_{\text{inh}} \times A_{\text{inh}} = 4,6 \times 10^{-11} \text{ Sv Bq}^{-1} \times 0,35 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 $= 1,6 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 16 \text{ } \mu\text{Sv}$
- 3 a na 6 uur resteert 74% van de ingenomen activiteit.  
 inhalatie  $A_{\text{inh}} = 1,0 \text{ kBq} / 0,74 = 1,4 \text{ kBq} = 1,4 \times 10^3 \text{ Bq}$
- b effectieve volg dosis  $E(50) = e(50)_{\text{inh}} \times A_{\text{inh}}$   
 $= 1,7 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1} \times 1,4 \times 10^3 \text{ Bq}$   
 $= 2,4 \times 10^{-5} \text{ Sv} = 24 \text{ } \mu\text{Sv}$
- 4 a ingeademde activiteit  $A_{\text{inh}} = 10 \text{ Bq d}^{-1} / 1,7 \times 10^{-5} \text{ Bq d}^{-1} \text{ per Bq} = 6 \times 10^5 \text{ Bq}$
- b effectieve volg dosis  $E(50) = e(50)_{\text{inh}} \times A_{\text{inh}}$   
 $= 8,3 \times 10^{-6} \text{ Sv Bq}^{-1} \times 6 \times 10^5 \text{ Bq} = 5 \text{ Sv}$
- c volgens de ICRP is de risicofactor 5% per sievert plutonium is een botzoeker en het risico uit zich dus voornamelijk in de vorm van botkanker  
 kans op botkanker  $5 \text{ Sv} \times 5\% \text{ per Sv} = 25\%$
- 5 a  $dE/dt = 2,2 \times 10^{-11} \text{ Sv d}^{-1} \text{ per Bq m}^{13} \times 1 \text{ Bq m}^{-3} = 2,2 \times 10^{-11} \text{ Sv d}^{-1}$   
 $= 2,2 \times 10^{-11} \text{ Sv d}^{-1} / 24 \text{ h d}^{-1} = 9,2 \times 10^{-13} \text{ Sv h}^{-1}$
- b  $E = 2,2 \times 10^{-11} \text{ Sv d}^{-1} \times 365 \text{ d j}^{-1} = 8,0 \times 10^{-9} \text{ Sv j}^{-1} = 8,0 \text{ nSv j}^{-1}$



## 11 Detectie van straling

- 1 Door homogene bestraling van het telgas in een ionisatiekamer met  $\gamma$ -straling worden er per minuut  $3,6 \times 10^4$  ionen gevormd. Per ionisatie wordt een energie van 33,7 eV afgegeven. De massa van het telgas bedraagt 120 mg.
- hoe groot is de gevormde negatieve lading in coulomb per minuut?
  - hoe groot is de gevormde positieve lading in coulomb per minuut?
  - hoe groot is de stroom (in ampère) door de ionisatiekamer?
- 2 Men monteert een bron van de  $\alpha$ -emitter  $^{210}\text{Po}$  met een activiteit van 10 kBq in een ionisatiekamer. De  $\alpha$ -deeltjes hebben een energie van 5,5 MeV en worden geheel gestopt in het telgas. Per ionisatie wordt 33,7 eV afgegeven aan het gas.
- bereken het aantal ionen dat per seconde wordt gevormd
  - bereken de stroom die door de kamer loopt als deze in het ionisatiegebied werkt
  - bereken de stroom die door de kamer loopt als deze in het proportionele gebied werkt en de gasversterking 16 bedraagt
- 3 Voor een meting aan een  $\beta$ -preparaat wordt een GM-telbuis gebruikt. De teller geeft een teltempo van  $6,0 \times 10^4$  telpulsen per minuut (tpm) aan.
- bereken het ware teltempo als de dode tijd van de teller 180  $\mu\text{s}$  is
  - wat zou het ware teltempo geweest zijn als de meting was verricht met een proportionele telbuis met een dode tijd van 15  $\mu\text{s}$  ?
- 4 De effectieve dikte van de gaslaag in een met argon gevulde proportionele telbuis is 35 mm. De soortelijke massa van argon is  $1,66 \text{ mg cm}^{-3}$ . De massaverzwakkingscoëfficiënt van argon voor de  $K_{\alpha}$ -lijn van koper (8 keV) en de  $K_{\alpha}$ -lijn van molybdeen (13 keV) is  $112 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  respectievelijk  $27,5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ .
- bereken het detectorrendement bij 8 keV
  - bereken het detectorrendement bij 13 keV
- 5 Gegeven is het vervalschema van het nuclide  $^{60}\text{Co}$ . Op 65 cm van een puntvormige  $^{60}\text{Co}$ -bron is de fotonfluxdichtheid  $1400 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .
- bereken de activiteit van deze bron



- 7 Een cilindervormige detector heeft een diameter  $2r = 40$  mm. De afstand tussen bron en het voorvlak van de detector bedraagt  $h = 6$  cm. In onderstaande geldt dat  $R^2 = r^2 + h^2$ .

a bereken de geometriefactor volgens de formule

$$f_{\text{geometrie}} = \frac{1}{2}(1 - \cos\alpha) = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}}\right)$$

b bereken de geometriefactor volgens de formule

$$f_{\text{geometrie}} = \frac{\pi r^2}{4\pi R^2}$$

- 8 Met behulp van een GM-telbuis met een venster van  $3 \text{ cm}^2$  loodrecht op de stralingsrichting meet men op een afstand van  $100$  cm van een  $^{42}\text{K}$ -bron een nettoteltempo van  $175$  telpulsen per minuut. Het radionuclide  $^{42}\text{K}$  emitteert in  $82\%$  van de gevallen een  $\beta$ -deeltje met  $E_{\beta 1, \text{max}} = 3,5$  MeV en in  $18\%$  van de gevallen een  $\beta$ -deeltje met  $E_{\beta 2, \text{max}} = 2,0$  MeV. Er is geen absorptie.

a bereken het geometrisch rendement  $f_{\text{geometrie}}$

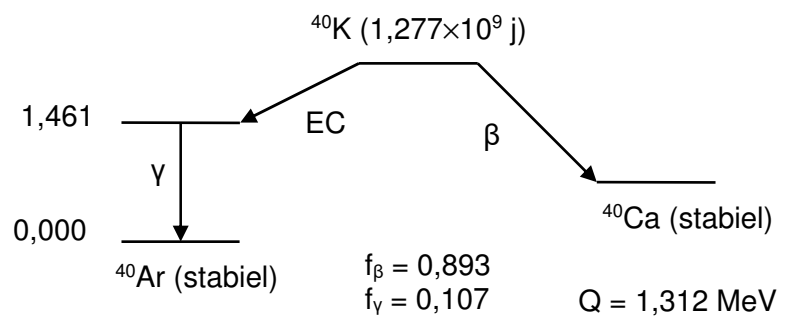
b bereken de activiteit van de bron

- 9 Een zeer uitgebreide uniforme oppervlaktebesmetting van  $5 \text{ Bq cm}^{-2}$   $^{14}\text{C}$  wordt gemeten met een GM-telbuis met een venster van  $7 \text{ cm}^2$  en een nuleffect van  $20$  telpulsen per minuut, en eveneens met een proportionele telbuis met een gevoelig oppervlak van  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  en een nuleffect van  $4$  telpulsen per seconde. Stel het intrinsieke detectorrendement in beide gevallen op  $100\%$ .

a bereken voor elk van beide monitoren het resulterende netto-teltempo

b bepaal voor beide besmettingsmonitoren de minimaal detecteerbare oppervlaktebesmetting; neem aan dat een significante oppervlaktebesmetting wordt gemeten indien het bruto-teltempo tenminste driemaal het nuleffect bedraagt

- 10 Een besmettingssurvey wordt uitgevoerd met een besmettingsmonitor met een lage achtergrond. Het nuleffect is  $2,30 \times 10^{-2}$  telpulsen per seconde, gemeten in  $65$  uur. Het rendement voor een  $\beta$ -emitter met



eindpuntsenergie  $E_{\beta, \text{max}} = 1,35$  MeV en emissierendement  $f_{\beta} = 1$  is  $f_{\text{geo}} \times f_{\text{det}} = 0,28$ . De monitor is ongevoelig voor  $\gamma$ -straling.

- a bereken het aantal telpulsen en de standaarddeviatie daarvan als gedurende  $500$  seconden uitsluitend achtergrondstraling wordt geregistreerd
- b bereken op grond van het bij a berekende resultaat het interval waarbinnen het werkelijke nuleffect ligt met een betrouwbaarheid van  $95\%$
- c bereken de  $^{40}\text{K}$ -activiteit die overeenkomt met de bovengrens van het bij b gevonden interval

## Antwoorden

- 1 a negatieve lading  $3,6 \times 10^4 \text{ min}^{-1} \times 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C} = 5,76 \times 10^{-15} \text{ C min}^{-1}$   
 b positieve lading eveneens  $5,76 \times 10^{-15} \text{ C min}^{-1}$   
 c stroom  $5,76 \times 10^{-15} \text{ C min}^{-1} = 0,96 \times 10^{-16} \text{ C s}^{-1} = 0,96 \times 10^{-16} \text{ A}$
- 2 a afgegeven energie  $10^4 \text{ Bq} \times 5,5 \times 10^6 \text{ eV per Bq s} = 5,5 \times 10^{10} \text{ eV s}^{-1}$   
 aantal ionen  $5,5 \times 10^{10} \text{ eV s}^{-1} / 33,7 \text{ eV} = 1,63 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$   
 b geen gasversterking  $I = 1,63 \times 10^9 \text{ s}^{-1} \times 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$   
 $= 2,6 \times 10^{-10} \text{ C s}^{-1} = 0,26 \text{ nA}$   
 c 16 maal zo groot als bij vraag b, dus  $16 \times 0,26 \text{ nA} = 4,2 \text{ nA}$
- 3 a gemeten teltempo  $= 6 \times 10^4 \text{ tpm} / 60 \text{ s min}^{-1} = 1 \times 10^3 \text{ tps}$   
 $T_W = 1 \times 10^3 / (1 - 180 \times 10^{-6} \text{ s} \times 1,0 \times 10^3 \text{ s}^{-1})$   
 $= 1 \times 10^3 / (1 - 0,18) = 1 \times 10^3 / 0,82 = 1,22 \times 10^3 \text{ tps}$   
 b  $T_W = 1 \times 10^3 / (1 - 15 \times 10^{-6} \text{ s} \times 1,0 \times 10^3 \text{ s}^{-1})$   
 $= 1 \times 10^3 / (1 - 0,015) = 1 \times 10^3 / 0,985 = 1,02 \times 10^3 \text{ tps}$
- 4 de massieke laagdikte is  $d\rho = 3,5 \text{ cm} \times 1,66 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3} = 0,0058 \text{ g cm}^{-2}$   
 a transmissie bij 8 keV  $T = e^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = e^{-112 \times 0,0058} = 0,52$   
 detectorefficiëntie  $f_{\text{det}} = 1 - T = 1 - 0,52 = 0,48$   
 b transmissie bij 13 keV  $T = e^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = e^{-27,5 \times 0,0058} = 0,85$   
 detectorefficiëntie  $f_{\text{det}} = 1 - T = 1 - 0,85 = 0,15$
- 5 a  $\Phi(R) = (\text{aantal fotonen}) / (\text{oppervlak bol met straal } R)$   
 fotonen per verval 2  
 fluxdichtheid  $\Phi = 2 \times A / (\text{oppervlak bol met straal } 65 \text{ cm})$   
 $= 2 \times A / (4\pi \times 65^2) = 3,77 \times 10^{-5} \text{ A}$   
 $= 1400 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
 activiteit  $A = 1400 / 3,77 \times 10^{-5} = 3,7 \times 10^7 \text{ Bq} = 37 \text{ MBq}$
- 6 a  $\Phi(R) = (\text{aantal fotonen}) / (\text{oppervlak bol met straal } R)$   
 deeltjes per verval 1  
 fluxdichtheid  $\Phi = 1 \times 37 \times 10^6 / (4\pi \times 50^2) = 1,18 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
 b oppervlak venster  $1 \text{ cm}^2$   
 teltempo  $1 \text{ cm}^2 \times 1,18 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1,18 \times 10^3 \text{ tps}$
- 7 a straal venster  $r = 40 \text{ mm} / 2 = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}$   
 afstand bron-venster  $h = 6 \text{ cm}$   
 openingshoek  $\tan(\alpha) = 2 / 6 = 0,33 \rightarrow \alpha = 18,43^\circ$   
 $f_{\text{geo}} = 0,5 \times [1 - \cos(18,43^\circ)] = 0,5 \times (1 - 0,949) = 0,0255$   
 b straal bol  $R^2 = h^2 + r^2 = 6^2 + 2^2 = 40 \text{ cm}^2$   
 $f_{\text{geo}} = (\pi r^2) / (4\pi R^2) = 2^2 / [4 \times 40] = 1 / 40 = 0,0250$
- 8 a  $N = A \times f_{\text{em}} \times f_{\text{geo}} \times t$   
 emissierendement  $f_{\text{em}} = 82\% + 18\% = 1$   
 geometriefactor  $f_{\text{geo}} = (\text{oppervlak venster}) / (\text{oppervlak bol met } r = 100 \text{ cm})$   
 $= 3 \text{ cm}^2 / [4\pi \times (100 \text{ cm})^2] = 2,39 \times 10^{-5}$   
 b aantal telpulsen  $N = A \times 1 \times 2,39 \times 10^{-5} \times 60 \text{ s} = 1,43 \times 10^{-3} \text{ A} = 175$   
 activiteit  $A = 175 / 1,43 \times 10^{-3} = 1,22 \times 10^5 \text{ Bq} = 122 \text{ kBq}$

- 9  $N = A \times f_{em} \times f_{geo} \times t$
- emissierendement  $f_{em} = 1$
- geometriefactor  $f_{geo} = 0,5$  ( $2\pi$ -geometrie)
- a GM-telbuis
- activiteit onder monitor  $A = \text{oppervlaktebesmetting} \times (\text{oppervlak detectorvenster})$   
 $= 5 \text{ Bq cm}^{-2} \times 7 \text{ cm}^2 = 35 \text{ Bq}$
- tijd  $t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
- teltempo  $N = 35 \text{ Bq} \times 1 \times 0,5 \times 1 \text{ min} \times 60 \text{ s min}^{-1} = 1050 \text{ tpm}$
- proportonele telbuis
- activiteit onder monitor  $A = \text{oppervlaktebesmetting} \times (\text{oppervlak detectorvenster})$   
 $= 5 \text{ Bq cm}^{-2} \times 100 \text{ cm}^2 = 500 \text{ Bq}$
- tijd  $t = 1 \text{ s}$
- teltempo  $N = 500 \text{ Bq} \times 1 \times 0,5 = 250 \text{ tps}$
- b bruto-teltempo = 3 × nuleffect  
dus netto-teltempo = 2 × nuleffect
- GM-telbuis
- netto-teltempo  $2 \times N_{nul} = 2 \times 20 = 40 \text{ tpm}$
- $A_{min} = 5 \text{ Bq cm}^{-2} \times (40 \text{ tpm} / 1050 \text{ tpm}) = 0,19 \text{ Bq cm}^{-2}$
- proportionele telbuis
- netto-teltempo  $2 \times N_{nul} = 2 \times 4 = 8 \text{ tps}$
- $A_{min} = 5 \text{ Bq cm}^{-2} \times (8 \text{ tps} / 250 \text{ tps}) = 0,16 \text{ Bq cm}^{-2}$
- 10 a nul-effect  $N_{nul} = 2,30 \times 10^{-2} \text{ tps} \times 500 \text{ s} = 11,5$
- standaarddeviatie  $\sigma_{nul} = \sqrt{11,5} = 3,4$
- b betrouwbaarheidsinterval van 95% correspondeert met  $2\sigma_{nul} = 2 \times 3,4 = 6,8$
- interval  $N_{nul} \pm 2\sigma_{nul} = [11,5-6,8; 11,5+6,8] = [4,7; 18,3]$
- c  $N = A \times f_{em} \times f_{geo} \times f_{det} \times t$
- emissierendement  $f_{em} = 0,893$
- detectierendement  $f_{geo} \times f_{det} = 0,28$
- tijd 500 s
- aantal telpulsen  $N = A \times 0,893 \times 0,28 \times 500 \text{ s} = 125 A$   
 $= 18,3$  (bovengrens)
- maximale activiteit  $A_{max} = 18,3 / 125 = 0,15 \text{ Bq}$



## 12 Afscherming van uitwendige straling

- 1 Een veiligheidsbril is gemaakt van plexiglas, ook wel perspex genaamd. Deze kunststof heeft een gemiddelde atoommassa  $A = 12,4$  en een soortelijke massa  $\rho = 1,19 \text{ g cm}^{-3}$ . De bril heeft een dikte van 2 mm en wordt gebruikt om de ooglenzen te beschermen tegen  $\beta$ -straling. Bepaal de transmissie van de bril voor  $\beta$ -deeltjes met een maximale energie van
  - a 0,5 MeV
  - b 1,0 MeV
  - c 2,0 MeV

*aanwijzing: maak gebruik van de vuistregels  $\rho R_{\beta, \max} = 0,5 E_{\beta, \max}$  en  $d_{1/2} = 0,1 R_{\beta, \max}$*
- 2 Een radioactieve bron bevat een nuclide dat slechts één  $\gamma$ -overgang bezit. Met een  $\gamma$ -detector in een smalle bundel van deze  $\gamma$ -straling meet men een netto-teltempo van 4500 telpulsen per minuut (tpm). Als een plaatje lood van 3,0 mm dikte in de bundel wordt geplaatst, bedraagt het netto-teltempo nog maar 1200 tpm.
  - a bereken de halveringsdikte van lood voor de betreffende  $\gamma$ -straling
- 3 Een smalle bundel mono-energetische  $\gamma$ -straling valt op een absorber bestaande uit water, lood of een combinatie van beide materialen. De halveringsdikte van water is  $d_{1/2, \text{water}} = 5,5 \text{ cm}$ ; van lood is deze  $d_{1/2, \text{lood}} = 0,08 \text{ cm}$ . Bereken de transmissie als de absorber bestaat uit
  - a 1,0 cm water
  - b 0,2 cm lood
  - c twee lagen lood van elk 0,1 cm met daartussen 1 cm water
- 4 Ter bepaling van de massaverzwakkingscoëfficiënt  $\mu/\rho$  van aluminium voor  $\gamma$ -straling wordt een serie metingen verricht met een bron die  $\gamma$ -straling uitzendt met een energie van 800 keV. De metingen vinden plaats in de smalle bundelgeometrie, met behulp van een dikke loodcollimator en een serie vlakke absorbers van aluminium met diktes variërend van 1 tot 128 mm. Als detector wordt een GM-telbuis gebruikt. Het aantal telpulsen per minuut (tpm) als functie van de absorberdikte (in mm) bedraagt:

<i>absorberdikte</i>	0	1	2	4	8	16	32	64	128
<i>teltempo</i>	1805	1720	1725	1680	1530	1404	1020	620	198

Het nuleffect, gemeten met een dik loodblok als absorber, levert 20 tpm. De soortelijke massa van aluminium is  $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$ .

- a zet de transmissie uit tegen de dikte op enkel-logaritmisch papier
- b bepaal de halveringsdikte  $d_{1/2}$  van aluminium voor deze  $\gamma$ -energie
- c bepaal de massaverzwakkingscoëfficiënt  $\mu/\rho$  van aluminium voor deze  $\gamma$ -energie

- 5 Men wil de intensiteit van de  $\gamma$ -straling van  $^{137}\text{Cs}$  met behulp van beton respectievelijk lood reduceren met een factor 1000. De  $\gamma$ -energie bedraagt  $E_\gamma = 0,66$  MeV. De massaverzwakkingscoëfficiënten van beton en lood voor deze  $\gamma$ -energie zijn  $(\mu/\rho)_{\text{beton}} = 0,0772$   $\text{cm}^2$   $\text{g}^{-1}$  respectievelijk  $(\mu/\rho)_{\text{lood}} = 0,100$   $\text{cm}^2$   $\text{g}^{-1}$ . Verder is  $\rho_{\text{beton}} = 2,35$   $\text{g cm}^{-3}$  en  $\rho_{\text{lood}} = 11,35$   $\text{g cm}^{-3}$ .
- bepaal de benodigde diktes met behulp van transmissiefiguren  
*aanwijzing: maak gebruik van de transmissies in appendix A10 en A11 van dit oefenboek*
  - bereken de benodigde diktes met behulp van de massaverzwakkingscoëfficiënten en de buildup-factoren  
*aanwijzing: bepaal eerst de noodzakelijke waarde van  $\mu d$ , en zoek dan de daarbij horende build-up-factor  $B$  in appendix A12 van dit oefenboek; herhaal zo nodig de procedure totdat de waarde van  $B$  niet meer verandert*

- 6 Voor een experiment met neutronen wordt gebruik gemaakt van een ingekapselde  $^{252}\text{Cf}$ -bron. Voor de plaats waar deze bron opgeslagen wordt, moet een afscherming worden ontworpen. Bij het verval van  $^{252}\text{Cf}$  komt  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - en neutronenstraling vrij.

- de verzwakking van  $\gamma$ - en neutronenstraling door de bronhouder mag worden verwaarloosd
- de bron mag als puntbron worden beschouwd
- de bijdragen van de dochternucliden mogen worden verwaarloosd
- $^{252}\text{Cf}$  vervalst voor 96,9% door  $\alpha$ -verval en voor 3,1% door spontane splijting
- de halveringstijd van  $^{252}\text{Cf}$  is  $T_{1/2} = 2,646$  jaar
- de dosisconversiefactor voor  $^{252}\text{Cf}$ -neutronen is  $h = 5,3 \times 10^{-10}$   $\text{Sv cm}^2$
- de transmissie van  $\gamma$ -straling en neutronen van  $^{252}\text{Cf}$  (zie appendix A13 en A14); aangenomen mag worden dat de grafieken als een rechte geëxtrapoleerd mogen worden
- de activiteit van de  $^{252}\text{Cf}$ -bron is  $A_n = 2,36 \times 10^8$  neutronen per seconde

- bereken het equivalente dosistempo op  $r = 1$  m van de bron ten gevolge van de neutronen, als de  $^{252}\text{Cf}$ -bron wordt afgeschermd door een 45 cm dikke polyetheenplaat

Om de  $\gamma$ -straling tegen te houden wordt bovendien een loden afscherming aangebracht. Een conservatieve benadering voor de afscherming van een brede bundel  $\gamma$ -straling van  $^{252}\text{Cf}$  met polyetheen is de aanname dat de halveringsdikte  $d_{1/2} = 17$  cm en de dosisopbouwfactor  $B = 2$ .

- bereken de benodigde aanvullende looddikte die achter de polyetheenplaat moet worden aangebracht, als geëist wordt dat het equivalente dosistempo ten gevolge van de  $\gamma$ -straling van de  $^{252}\text{Cf}$ -bron met een factor 100 wordt verzwakt ten opzichte van de onafgeschermd bron

Het geabsorbeerde dosistempo ten gevolge van de  $\gamma$ -straling op  $r = 1$  m van de  $^{252}\text{Cf}$ -bron, achter een 45 cm dikke polyetheenplaat is  $D_\gamma(0 \text{ cm lood}) = 10$   $\mu\text{Gy h}^{-1}$ .

- bereken het equivalente dosistempo ten gevolge van de  $\gamma$ -straling op  $r = 1$  m van de  $^{252}\text{Cf}$ -bron, achter een afscherming bestaande uit een 45 cm dikke polyetheenplaat plus de bij vraag b berekende looddikte

- d bereken het totale equivalente dosistempo van  $\gamma$ -straling en neutronen op  $r = 1$  m van de  $^{252}\text{Cf}$ -bron, achter een afscherming bestaande uit een 45 cm dikke polyetheenplaat plus de bij vraag b berekende looddikte

**Antwoorden**

1 dikte bril  $d = 2 \text{ mm} = 0,2 \text{ cm}$

a  $R_{\beta, \max} = 0,5 \times 0,5 / 1,19 \text{ g cm}^{-3} = 0,21 \text{ cm}$

$$d / R_{\beta, \max} = 0,2 \text{ cm} / 0,21 \text{ cm} = 1$$

$$T = 0 \text{ want } d \approx R_{\beta, \max}$$

b  $R_{\beta, \max} = 0,5 \times 1,0 / 1,19 \text{ g cm}^{-3} = 0,42 \text{ cm}$

$$d_{1/2} = 0,1 \times 0,42 \text{ cm} = 0,04 \text{ cm}$$

$$T = e^{-0,693 \times 0,2 / 0,04} = e^{-3,5} = 0,03$$

c  $R_{\beta, \max} = 0,5 \times 2,0 / 1,19 \text{ g cm}^{-3} = 0,84 \text{ cm}$

$$d_{1/2} = 0,1 \times 0,84 \text{ cm} = 0,08 \text{ cm}$$

$$T = e^{-0,693 \times 0,2 / 0,08} = e^{-1,7} = 0,2$$

2 a  $T = e^{-\mu d} = e^{-\mu \times 3}$

$$= 1200 \text{ tpm} / 4500 \text{ tpm} = 0,27$$

$$\mu = -\ln(0,27) / 3 \text{ mm} = 0,44 \text{ mm}^{-1}$$

$$d_{1/2} = 0,693 / \mu = 0,693 / 0,44 \text{ mm}^{-1} = 1,6 \text{ mm lood}$$

3 a  $T(1,0 \text{ cm water}) = 2^{-1,0/5,5} = 0,88$

b  $T(0,2 \text{ cm lood}) = 2^{-0,2/0,08} = 0,18$

c  $T = 0,88 \times 0,18 = 0,16$

4 a plot transmissie  $T = N(d) / N(0)$   
op enkel-logaritmisch papier

b aflezen grafiek bij  $d = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$ :

$$T = 0,40$$

$$= e^{-\mu d} = e^{-\mu \times 5}$$

$$\mu = -\ln(0,40) / 5 \text{ cm}$$

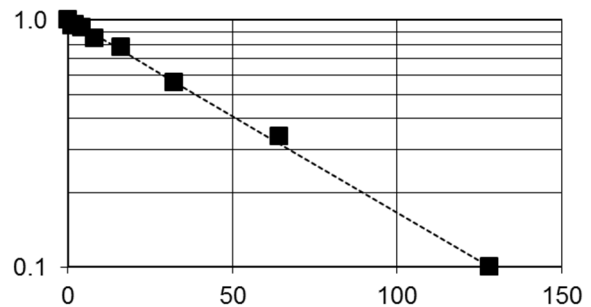
$$= 0,916 / 5 \text{ cm} = 0,183 \text{ cm}^{-1}$$

$$d_{1/2} = 0,693 / 0,183 \text{ cm}^{-1}$$

$$= 3,8 \text{ cm aluminium}$$

c  $\mu/\rho = 0,183 \text{ cm}^{-1} / 2,7 \text{ g cm}^{-3}$

$$= 0,068 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$



5 a aflezen appendix A10 en A11 van dit oefenboek bij  $T = 0,001$ :

beton 53 cm

lood 6,5 cm

b  $T = B e^{-\mu d} = 0,001$

$$\mu_{\text{beton}} = 0,0772 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times 2,35 \text{ g cm}^{-3} = 0,181 \text{ cm}^{-1}$$

$$\mu_{\text{lood}} = 0,100 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times 11,35 \text{ g cm}^{-3} = 1,135 \text{ cm}^{-1}$$

bepaal in elke stap  $B$  door middel van lineaire interpolatie naar  $E_\gamma$  en  $\mu d$

beton neem eerst  $B = 1$   $\mu d = -\ln(0,001 / 1) = 6,91 \rightarrow B \approx 13,5$

neem nu  $B = 13,5$   $\mu d = -\ln(0,001 / 13,5) = 9,51 \rightarrow B \approx 21,8$

neem nu  $B = 21,8$   $\mu d = -\ln(0,001 / 21,8) = 10,0 \rightarrow B \approx 23,4$

neem nu  $B = 23,4$   $\mu d = -\ln(0,001 / 23,4) = 10,1 \rightarrow B \approx 23,8$

$$d = 10,1 / 0,181 \text{ cm}^{-1} = 56 \text{ cm}$$

lood neem eerst  $B = 1$   $\mu d = -\ln(0,001 / 1) = 6,91 \rightarrow B \approx 2,51$

neem nu  $B = 2,3$   $\mu d = -\ln(0,001 / 2,51) = 7,83 \rightarrow B \approx 2,68$

neem nu  $B = 2,5$   $\mu d = -\ln(0,001 / 2,68) = 7,89 \rightarrow B \approx 2,70$

neem nu  $B = 2,5$   $\mu d = -\ln(0,001 / 2,70) = 7,90 \rightarrow B \approx 2,70$

$$d = 7,90 / 1,135 \text{ cm}^{-1} = 7,0 \text{ cm}$$



- 6 a aflezen appendix A14 van dit oefenboek bij  $d_{\text{polyetheen}} = 30 \text{ cm}$   
 $T = e^{-\mu \times 30} = 0,01$   
 extrapoleren naar  $d = 45 \text{ cm}$  geeft transmissie  
 $T = e^{-\mu \times 45} = (e^{-\mu \times 30})^{45/30} = 0,01^{1,5} = 0,001$   
 $H^*_{\text{neutronen}} = h_n \times (A_n / 4\pi r^2) \times T$   
 $= 5,3 \times 10^{-10} \text{ Sv cm}^2 \times [2,36 \times 10^8 \text{ s}^{-1} / (4\pi \times 100^2 \text{ cm}^2)] \times 0,001$   
 $= 1,0 \times 10^{-9} \text{ Sv s}^{-1} = 3,6 \times 10^{-6} \text{ Sv h}^{-1} = 3,6 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$
- b  $T = T_{\text{polyetheen}} \times T_{\text{lood}} = B \times 2^{-45/d_1/2} \times T_{\text{lood}} = 2 \times 2^{-45/17} \times T_{\text{lood}} = 0,32 T_{\text{lood}}$   
 $= 0,01$   
 $T_{\text{lood}} = 0,01 / 0,32 = 0,031$   
 aflezen appendix A13 van dit oefenboek bij  $T_{\text{lood}} = 0,031$   
 $d_{\text{lood}} = 5,5 \text{ cm}$
- c  $H^*_{\gamma}(5,5 \text{ cm lood}) = D_{\gamma}(0 \text{ cm lood}) \times w_R \times T_{\text{lood}}$   
 $= 10 \text{ } \mu\text{Gy h}^{-1} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 0,031 = 0,31 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$
- d aflezen appendix A14 van dit oefenboek bij 5,5 cm lood  
 $T_{\text{lood}}(\text{voor neutronen}) = 0,8$   
 $H^*_{\text{neutronen}}(0 \text{ cm lood}) = 3,6 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$  (zie antwoord a)  
 $H^*_{\text{neutronen}}(5,5 \text{ cm lood}) = H^*_{\text{neutronen}}(0 \text{ cm lood}) \times T_{\text{lood}}(\text{voor neutronen})$   
 $= 3,6 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1} \times 0,8 = 2,9 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$   
 $H^*_{\text{totaal}} = H^*_{\gamma}(5,5 \text{ cm lood}) + H^*_{\text{neutronen}}(5,5 \text{ cm lood})$   
 $= 0,31 + 2,9 = 3,2 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$

## 14 Wet- en regelgeving

- 1 De overheid heeft dosislimieten vastgesteld ter voorkoming van kansgebonden effecten. Hoe groot is de limiet waaraan de vergunninghouder zich moet houden:
  - a voor een niet blootgestelde werknemer
  - b voor een blootgestelde werknemer
  - c voor een lid van de bevolking binnen een inrichting
  - d voor een lid van de bevolking buiten een inrichting
  - e voor een ongeborn kind
  
- 2 De overheid heeft dosislimieten vastgesteld ter voorkoming van weefselreacties. Hoe groot is de limiet voor
  - a de ooglen van een niet blootgestelde werknemer
  - b de ooglen van een blootgestelde werknemer
  - c de huid en extremiteiten van een niet blootgestelde werknemer
  - d de huid en extremiteiten van een blootgestelde werknemer
  
- 3 In een bepaald gebied grenzen twee bedrijven aan elkaar. Hoe groot is de maximaal te ontvangen dosis op de terreingrens, indien
  - a een van beide bedrijven beschikt over een kernenergiewetvergunning
  - b elk van beide bedrijven beschikt over een kernenergiewetvergunning
  - c noem een argument waarom de werkelijke dosis waarschijnlijk kleiner is
  - d noem een argument waarom de werkelijke dosis mogelijk groter is
  
- 4 Een bedrijf kan aantonen dat de jaardosis ten gevolge van externe straling op de terreingrens onder het zogenaamde secundair niveau blijft.
  - a hoe groot is het secundair niveau?
  - b is het bedrijf om deze reden vrijgesteld van het aanvragen van een kernenergiewetvergunning?
  
- 5 De grootte van  $e(50)$  is een maat voor de radiotoxiciteit van het radionuclide.
  - a is de radiotoxiciteit van  $^{60}\text{Co}$  groter of kleiner dan die van  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  ?
  - b is de radiotoxiciteit van  $^{60}\text{Co}$  is groter of kleiner dan die van  $^{125}\text{I}$  ?

*aanwijzing: maak gebruik van onderstaande dosisconversiecoëfficiënten*

$^{60}\text{Co}$	$e(50)_{inh} = 2,9 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$	$e(50)_{ing} = 3,4 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$e(50)_{inh} = 1,5 \times 10^{-7} \text{ Sv Bq}^{-1}$	$e(50)_{ing} = 2,8 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$
$^{125}\text{I}$	$e(50)_{inh} = 5,3 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$	$e(50)_{ing} = 1,5 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$
  
- 6 Het besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming kent onder meer de begrippen "bewaakte zone" en "gecontroleerde zone".
  - a mag een blootgestelde werknemer die is ingedeeld in categorie B werken in een gecontroleerde zone?
  - b mogen niet blootgestelde werknemers werken in een bewaakte zone?

- 7 Er zijn vluchtwegmarkeringen in de handel, zogenaamde bèta-lights, die "vanzelf" oplichten omdat ze tot 800 GBq tritiumgas bevatten. De massieke activiteit van zuiver tritium bedraagt 357 TBq g<sup>-1</sup>.
- a moet voor het in bezit hebben van een dergelijke vluchtwegmarkering een kern-energiewetvergunning worden aangevraagd, uitgaande van de vrijstellingswaardes voor activiteit en activiteitsconcentratie in matige hoeveelheden volgens het besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming?  
*aanwijzing: de vrijstellingswaardes zijn  $A_v = 1 \times 10^9$  Bq en  $C_v = 1 \times 10^6$  Bq g<sup>-1</sup>*
- 8 Een bepaald type rookmelder bevat 36 kBq <sup>241</sup>Am. De massieke activiteit van zuiver <sup>241</sup>Am bedraagt 127 GBq g<sup>-1</sup>.
- a is een dergelijke rookmelder vergunningplichtig, registratieplichtig of geen van beide, uitgaande van de vrijstellingswaardes voor activiteit en activiteitsconcentratie in matige hoeveelheden volgens het besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming?  
*aanwijzing: de vrijstellingswaardes zijn  $A_v = 1 \times 10^4$  Bq en  $C_v = 1 \times 10^0$  Bq g<sup>-1</sup>*
- 9 Gloeikousjes in ouderwetse gaslampen zijn gemaakt van katoen dat geïmpregneerd is met radioactief thoriumnitraat.
- a staat deze toepassing op de lijst van gerechtvaardigde handelingen in de regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming?  
*zie: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040509>*
- 10 Bij het Opleidingsinstituut Tandheelkunde staan vast opgestelde röntgentoestellen voor diagnostisch gebruik.
- a zijn deze toestellen vergunningplichtig, registratieplichtig of kan worden volstaan met een kennisgeving?
- 11 Een plastic container is gevuld met zand dat verontreinigd is met 37 MBq <sup>226</sup>Ra en volgproducten. De stralingsbeschermingsdeskundige wil deze container als vrijgesteld collo verzenden. De container wordt verpakt in een grote kartonnen doos.
- a is deze wijze van verzenden toegestaan?  
b welke is het maximaal toegestane equivalente dosistempo op het oppervlak van de doos  
*aanwijzing: de grenswaardes voor <sup>226</sup>Ra zijn  $A_1 = 0,3$  TBq en  $A_2 = 0,02$  TBq*
- 12 De stralingsbeschermingsdeskundige wil een flesje met 5 ml <sup>111</sup>InCl in een zoutzure oplossing verzenden. Het flesje wordt ingesloten in een conservenblik en vervolgens verpakt in een grote kartonnen doos.
- a wat is de maximale hoeveelheid activiteit die op deze wijze als vrijgesteld collo mag worden verzonden?  
b wat is het maximaal toegestane equivalente dosistempo op het oppervlak van de doos?  
*aanwijzing: de grenswaardes voor <sup>111</sup>In zijn  $A_1 = 2$  TBq en  $A_2 = 2$  TBq*



- 13 Voor toestellen in de medische en veterinaire praktijk hanteert men limieten voor het maximaal toelaatbare equivalente dosistempo ten gevolge van lekstraling.
- hoe groot is de limiet in geval van een diagnostisch toestel?
  - hoe groot is de limiet in geval van een therapeutisch toestel?
- 14 De stralingsbeschermingsdeskundige veegt een ingekapselde  $\gamma$ -bron en stelt door middel van een meting vast dat de afgewreven activiteit 50 Bq bedraagt.
- moet deze bron als "lek" worden beschouwd?
  - beantwoord vraag a als niet de bron zelf, maar de bronhouder was geveegd
  - beantwoord vraag a als het een  $\alpha$ -bron betreft
- 15 In een C-laboratorium wordt regelmatig een met  $^{125}\text{I}$  gelabelde jodiumverbinding gemaakt. Hierbij wordt onder meer de jodium houdende oplossing gecentrifugeerd in de zuurkast. Per experiment wordt 10 MBq verwerkt. De experimenten duren maximaal 4 uur. De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie is  $e(50)_{\text{inh}} = 7,3 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$ . Er worden geen andersoortige experimenten in het C-laboratorium verricht.
- bepaal het maximale aantal experimenten dat per week in het C-laboratorium mag worden uitgevoerd  
*aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in appendix A15 van dit oefenboek*
- 16 In een B-laboratorium wordt tweemaal per dag in een NEN-gekeurde zuurkast een experiment uitgevoerd met een fosforverbinding dat gelabeld is met het radionuclide  $^{32}\text{P}$ . De verbinding wordt hierbij in een kogelmolen tot poeder fijngemalen. De  $e(50)_{\text{inh}}$  van  $^{32}\text{P}$  voor de betreffende verbinding bedraagt  $2,9 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$ . Er worden geen andere experimenten in het B-laboratorium uitgevoerd.
- bereken de maximale hoeveelheid activiteit waarmee per experiment gewerkt mag worden
  - bereken de effectieve volg dosis die een laborant maximaal kan oplopen indien hij ten gevolge van slordige werken telkens 0,01% van de activiteit inademt
  - wordt de laborant op grond van antwoord b ingedeeld als blootgestelde werknemer en, zo ja, in welke categorie?  
*aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in appendix A15 van dit oefenboek*
- 17 Bij een besmettingscontrole wordt vastgesteld dat een gebied van  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  op één van de tafels in een radionuclidenlaboratorium besmet is met  $1 \text{ kBq } ^{45}\text{Ca}$ . Nadat de besmetting zo goed mogelijk is schoongemaakt, blijkt er nog steeds 90% van de activiteit op de tafel te zijn achtergebleven.
- is de tafel besmet, uitgaande van de normen gegeven in de voormalige richtlijn radionuclidenlaboratoria?

**Antwoorden**

- 1
  - a 1 mSv
  - b 20 mSv
  - c 1 mSv
  - d 0,1 mSv (dit geldt per vergunninghouder)
  - e 1 mSv (vanaf het moment dat de zwangerschap is gemeld)
- 2
  - a 15 mSv
  - b 20 mSv
  - c 50 mSv
  - d 500 mSv
- 3
  - a 0,1 mSv
  - b 0,2 mSv
  - c jaardosis indien mogelijk onder secundair niveau door toepassing van ALARA
  - d de factor 0,25 bij het vaststellen van de Multifunctionele Individuele Dosis hierdoor wordt de effectieve limiet  $0,1 \text{ mSv} / 0,25 = 0,4 \text{ mSv}$
- 4
  - a  $10 \mu\text{Sv}$   
door toepassing van de factor 0,25 bij het vaststellen van de Multifunctionele Individuele Dosis wordt de effectieve waarde  $10 \mu\text{Sv} / 0,25 = 40 \mu\text{Sv}$
  - b nee, maar het bedrijf wordt wel geacht voldoende aan ALARA te hebben gedaan
- 5
  - a kleiner
  - b bij inhalatie groter, maar bij ingestie kleiner
- 6
  - a ja, mits gegarandeerd is dat hun effectieve dosis niet groter is dan 6 mSv per jaar
  - b ja, mits gegarandeerd is dat hun effectieve dosis niet groter is dan 1 mSv per jaar
- 7
  - a ja  
want de totale activiteit (800 GBq) en de activiteitsconcentratie ( $357 \text{ TBq g}^{-1}$ ) zijn beide groter dan de vrijstellingswaarde (1 GBq respectievelijk  $10^{-6} \text{ TBq g}^{-1}$ )  
*informatie: deze toepassing valt onder consumentenproducten waarvoor volgens de ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming afwijkende regels gelden; zie <https://wetten.overheid.nl/BWBR0040581>*
- 8
  - a vergunningplichtig  
want de totale activiteit (36 kBq) en de activiteitsconcentratie ( $127 \text{ GBq g}^{-1}$ ) zijn beide groter dan de vrijstellingswaarde (10 kBq respectievelijk  $1 \text{ Bq g}^{-1}$ ); zie verder de bij antwoord 7 gegeven informatie
- 9
  - a de toepassing staat op de lijst van niet gerechtvaardigde handelingen het gebruik van reeds aanwezige ionisatierookmelders in woningen is echter vooralsnog toegestaan; zie verder de bij antwoord 7 gegeven informatie
- 10
  - a vergunningplichtig  
want de toestellen worden gebruikt voor onderwijsdoeleinden
- 11
  - a grenswaarde voor  $^{226}\text{Ra}$  is  $A_1 = 0,3 \text{ TBq}$   
in een vrijgesteld collo mag maximaal  $10^{-3} \times A_1 = 0,3 \text{ GBq} = 300 \text{ MBq}$  worden verstuurd; de verzendingswijze is dus toegestaan
  - b  $5 \mu\text{Sv h}^{-1}$

- 12 a grenswaarde voor  $^{111}\text{In}$  is  $A_1 = 2 \text{ TBq}$   
in een vrijgesteld collo mag maximaal  $10^{-3} \times A_1 = 2 \text{ GBq}$  worden verstuurd  
b  $5 \mu\text{Sv h}^{-1}$
- 13 a  $1 \text{ mSv h}^{-1}$  op 1 m van het focus  
b  $10 \text{ mSv h}^{-1}$  op 1 m van het focus
- 14 a het criterium is  $185 \text{ Bq}$ , dus niet lek  
b het criterium is  $18,5 \text{ Bq}$ , dus wel lek volgens de concept-richtlijn ingekapselde bronnen  
*opmerking: dit onderdeel niet is opgenomen in de regelgeving*  
c het criterium is  $18,5 \text{ Bq}$ , dus wel lek; zie opmerking bij b
- 15 a voor de omschreven handeling radiotoxiciteitsequivalent  $p = -3, q = 2, r = 2$   
 $\text{Re}_{\text{inh}} = 1 \text{ Sv} / e(50)_{\text{inh}} = 1 \text{ Sv} / 7,3 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$   
 $= 1,37 \times 10^8 \text{ Bq}$   
maximale activiteit  $A_{\text{max}} = 0,02 \times \text{Re}_{\text{inh}} \times 10^{p+q+r}$   
 $= 0,02 \times 1,37 \times 10^8 \text{ Bq} \times 10^{-3+2+2}$   
 $= 2,7 \times 10^7 \text{ Bq} = 27 \text{ MBq}$   
belastingfactor per experiment  $B = (4 \text{ h} / 40 \text{ h}) \times (10 \text{ MBq} / 27 \text{ MBq}) = 1 / 27$   
maximale aantal experimenten per week  $= 1 / B = 27$
- 16 a voor de omschreven handeling radiotoxiciteitsequivalent  $p = -4, q = 3, r = 2$   
 $\text{Re}_{\text{inh}} = 1 \text{ Sv} / e(50)_{\text{inh}} = 1 \text{ Sv} / 2,9 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}$   
 $= 3,45 \times 10^8 \text{ Bq}$   
maximale activiteit  $A_{\text{max}} = 0,02 \times \text{Re}_{\text{inh}} \times 10^{p+q+r}$   
 $= 0,02 \times 3,45 \times 10^8 \text{ Bq} \times 10^{-4+3+2}$   
 $= 6,9 \times 10^7 \text{ Bq}$   
b aantal experimenten  $2 \text{ per dag} \times 5 \text{ d wk}^{-1} \times 50 \text{ wk j}^{-1} = 500 \text{ per jaar}$   
maximale activiteit  $A = 500 \text{ per jaar} \times 6,9 \times 10^7 \text{ Bq} = 3,5 \times 10^{10} \text{ Bq per jaar}$   
maximale inhalatie  $A_{\text{inh}} = 0,01 \times 10^{-2} \times A$   
 $= 0,01 \times 10^{-2} \times 3,5 \times 10^{10} = 3,5 \times 10^6 \text{ Bq}$   
maximale volgdosis  $E(50) = e(50)_{\text{inh}} \times A_{\text{inh}}$   
 $= 2,9 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} \times 3,5 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 $= 1,0 \times 10^{-2} \text{ Sv} = 10 \text{ mSv}$   
c de blootstelling is meer dan  $1 \text{ mSv}$   
de laborant is dus een blootgestelde weknemer  
de blootstelling is meer dan  $6 \text{ mSv}$   
de laborant wordt dus ingedeeld als blootgesteld werknemer categorie-A  
*opmerking: er is geen rekening gehouden met potentiële blootstellingen*
- 17 a oorspronkelijke besmetting was  $10^3 \text{ Bq} / (10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}) = 10 \text{ Bq cm}^{-2}$   
na het schoonmaken is  $90\%$  achtergebleven, dus  $10\%$  afgewreven  
de afwrijfbaar activiteit was dus  $0,1 \times 10 \text{ Bq cm}^{-2} = 1 \text{ Bq cm}^{-2}$   
norm in de richtlijn radionuclidenlaboratoria is  $4 \text{ Bq cm}^{-2}$ ; de tafel is dus niet besmet



## 15 Toestellen

- 1 Een radiotherapietoestel is maximaal 10 uur per week in gebruik.
  - a wat is de uurlimiet in de bedieningsruimte?
  - b hoe ligt dit bij een versneller die 5000 uren per jaar wordt bedreven?
  
- 2 Iemand staat op 1 m afstand van een patiënt die met een röntgentoestel wordt bestraald, en ontvangt ten gevolge van de strooistraling een effectieve dosis van  $10 \mu\text{Sv}$ .
  - a wat zou de effectieve dosis zijn geweest als deze persoon vier passen van elk een halve meter achteruit had gedaan?
  - b wat zou de effectieve dosis zijn geweest als deze persoon een pas van een halve meter dichterbij had gestaan?
  
- 3 Een vergunningplichtige röntgengenerator staat in een ruimte die grenst aan de openbare weg. Zonder afschermende betonnen muur bedraagt de geabsorbeerde dosis op straat  $1 \text{ Gy}$  per week. De dichtheid van beton bedraagt  $\rho = 2,35 \text{ g cm}^{-3}$  en de massaverzwakkingscoëfficiënt is  $\mu/\rho = 0,041 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ . De buildup-factor is  $B = 10$ .
  - a bereken de minimaal benodigde muurdikte aan de kant van de straat
  
- 4 In de industrie wordt een röntgentoestel met een buisspanning van  $400 \text{ kV}$  gebruikt om materiaal te bestralen met een geabsorbeerde dosis van  $100 \text{ Gy}$ . Het materiaal bevindt zich op  $50 \text{ cm}$  van het focus. Er wordt maximaal 1 bestraling per dag uitgevoerd. In het verlengde van de bundel, op  $5 \text{ m}$  van het focus, bevindt zich een kantoorruimte. Bestralingsruimte en kantoor zijn gescheiden door een betonnen muur.
  - a bereken de belichting per bestraling (in  $\text{mA min}$ )
  - b bereken de minimaal benodigde dikte van de muur  
*aanwijzing: verwaarloos de absorptie in het bestraalde materiaal en maak gebruik van de gegevens in appendix A16 van dit oefenboek*

**Antwoorden**

- 1 a maximaal aantal uren  $10 \text{ h wk}^{-1} \times 50 \text{ wk j}^{-1} = 500 \text{ h j}^{-1}$   
jaarlimiet  $1 \text{ mSv j}^{-1}$   
uurlimiet  $1 \text{ mSv j}^{-1} / 500 \text{ h j}^{-1} = 0,002 \text{ mSv h}^{-1} = 2 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$
- b een persoon zal voor zijn werk niet langer dan 2000 uur per jaar worden blootgesteld, ook al is de versneller 5000 uur per jaar in gebruik  
uurlimiet  $1 \text{ mSv j}^{-1} / 2000 \text{ h j}^{-1} = 0,0005 \text{ mSv h}^{-1} = 0,5 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$
- 2 a oude afstand  $r_1 = 1 \text{ m}$   
nieuwe afstand  $r_2 = r_1 + 4 \times 0,5 \text{ m} = 3 \text{ m}$   
effectieve dosis  $E = 10 \text{ } \mu\text{Sv} \times (r_1 / r_2)^2 = 10 \text{ } \mu\text{Sv} / 9 = 1,1 \text{ } \mu\text{Sv}$
- b oude afstand  $r_1 = 1 \text{ m}$   
nieuwe afstand  $r_2 = r_1 - 1 \times 0,5 \text{ m} = 0,5 \text{ m}$   
effectieve dosis  $E = 10 \text{ } \mu\text{Sv} \times (r_1 / r_2)^2 = 10 \text{ } \mu\text{Sv} \times 4 = 40 \text{ } \mu\text{Sv}$
- 3 a jaardosis zonder afscherming  $H^*(0) = 1 \text{ Gy wk}^{-1} \times 50 \text{ wk j}^{-1} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} = 50 \text{ Sv j}^{-1}$   
jaarlimiet  $H^*(d) = 100 \text{ } \mu\text{Sv j}^{-1} = 1 \times 10^{-4} \text{ Sv j}^{-1}$   
benodigde transmissie  $T(d) = H^*(d) / H^*(0)$   
 $= 1 \times 10^{-4} \text{ Sv j}^{-1} / 50 \text{ Sv j}^{-1} = 2,0 \times 10^{-6}$   
 $= \text{Be}^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = 10 \times e^{-0,041 \times d \times 2,35} = 100 e^{-0,096 \times d}$
- dikte muur  $0,096 \times d = -\ln(2 \times 10^{-6} / 10) = 15,4$   
 $d = 15,4 / 0,096 = 160 \text{ cm beton}$
- 4 a aflezen appendix A16 van dit oefenboek bij 400 kV  
 $dD(1 \text{ m})/dt = 23,5 \text{ mGy per mA min op } 1 \text{ m van focus}$   
op 50 cm van focus  $dD(50 \text{ cm})/dt = 23,5 \text{ (mGy)} \times (0,5 \text{ m} / 1 \text{ m})^2$   
 $= 94 \text{ mGy per mA min}$   
geabsorbeerde dosis  $100 \text{ Gy} = 1 \times 10^5 \text{ mGy}$   
belichting  $1 \times 10^5 \text{ mGy} / 94 \text{ mGy per mA min} = 1064 \text{ mA min}$
- b op 5 m van het focus  $dD(5 \text{ m})/dt = dD(50 \text{ cm})/dt \times (0,5 \text{ m} / 5 \text{ m})^2$   
 $= 1 \times 10^5 \text{ (mGy)} / 100$   
 $= 1000 \text{ mGy per bestraling}$   
aantal bestralingen  $1 \text{ per dag} \times 5 \text{ d wk}^{-1} \times 50 \text{ wk j}^{-1} = 250 \text{ per jaar}$   
jaardosis zonder afscherming  $H^*(0) = 250 \times 1000 \text{ mGy} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} = 2,5 \times 10^5 \text{ mSv}$   
jaarlimiet  $H^*(d) = 1 \text{ mSv}$   
benodigde transmissie  $T(d) = H^*(0) / H^*(d)$   
 $= 1 \text{ mSv} / 2,5 \times 10^5 \text{ mSv} = 4 \times 10^{-6}$
- aflezen appendix A16 van dit oefenboek bij  
 $D = 23,5 \text{ mGy per mA min} \times T(d)$   
 $= 23,5 \text{ mGy per mA min} \times 4 \times 10^{-6}$   
 $= 9,4 \times 10^{-5} \text{ mGy per mA min}$
- benodigde dikte  $d = 58 \text{ cm beton}$

## 16 Ingekapselde bronnen

- 1 Een werknemer pakt uit gewoonte een bronnetje van 0,4 MBq  $^{60}\text{Co}$  steeds met zijn vingers vast. Als hij een lange pincet zou gebruiken, duurt de handeling twee maal zo lang. Stel de gemiddelde afstand tussen bron en vingers op 5 mm zonder gebruik van pincet, en op 5 cm met gebruik van pincet.
  - a met welke factor kan de dosis op de vingers worden gereduceerd door van een pincet gebruik te maken?
  - b geef nog een reden om een gesloten bron met een pincet vast te pakken
  
- 2 Ten gevolge van een lekkende  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -bron komt 50 MBq op de werktafel terecht. De radionucliden  $^{90}\text{Sr}$  en  $^{90}\text{Y}$  zenden uitsluitend  $\beta$ -straling uit met een maximale energie van 0,55 MeV respectievelijk 2,29 MeV.
  - a bereken het equivalente dosistempo op 10 cm afstand van de besmette plek met behulp van de vuistregel
  - b bereken de effectieve volg dosis als 1% van deze activiteit zou worden ingeslikt  
*aanwijzing: maak gebruik van de volgende gegevens*

*bronconstante voor  $\beta$ -straling*

$$d_{\beta} = 9 \mu\text{Gy h}^{-1} \text{MBq}^{-1} \text{m}^2$$

*bronconstante voor  $\gamma$ -straling ( $E_{\gamma}$  in MeV)*

$$d_{\gamma} = E_{\gamma} / 7 \mu\text{Gy h}^{-1} \text{MBq}^{-1} \text{m}^2$$

*dosisconversiecoëfficiënt voor  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$*

$$e(50)_{\text{ing}} = 31 \text{mSv MBq}^{-1}$$

- 3 Een bron van  $^{60}\text{Co}$  en een bron van  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  bevatten elk een activiteit van 1 MBq. Het radionuclide  $^{60}\text{Co}$  zendt achtereenvolgens twee  $\gamma$ -fotonen uit met energieën van 1,17 MeV respectievelijk 1,33 MeV. De radionucliden  $^{90}\text{Sr}$  en  $^{90}\text{Y}$  zijn zuivere  $\beta$ -emitters.
  - a bereken het omgevingsdosisequivalenttempo  $dH^*/dt$  op 50 cm afstand van de  $^{60}\text{Co}$ -bron
  - b bereken het equivalente dosistempo  $dH_{\beta}/dt$  op 50 cm afstand van de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -bron met behulp van de vuistregel
  - c bereken de verhouding van de onder a en b berekende waarden van  $dH^*/dt$  en  $dH_{\beta}/dt$
  - d geldt dezelfde verhouding ook voor de effectieve doses?

**Antwoorden**

- 1 a dosis is evenredig met de tijd en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand; de reductiefactor is dus  $2 \times (0,5 \text{ cm} / 5 \text{ cm})^2 = 0,02$   
 b voorkomen van in- en uitwendige besmetting
- 2 a de  $\beta$ -energieën zijn zo groot dat absorptie in lucht geen rol van betekenis speelt de radionucliden  $^{90}\text{Sr}$  en  $^{90}\text{Y}$  zenden elk 1  $\beta$ -deeltje uit, dus samen 2  $\beta$ -deeltjes  
 $dH_{\beta}/dt = 2 \times (50 \text{ MBq} / 1 \text{ MBq}) \times (100 \text{ cm} / 10 \text{ cm})^2 \times 9 \mu\text{Gy h}^{-1} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1}$   
 $= 9 \times 10^4 \mu\text{Sv h}^{-1} = 90 \text{ mSv h}^{-1}$   
 b ingeslikte activiteit  $A_{\text{ing}} = 50 \text{ MBq} \times 10^{-2} = 0,50 \text{ MBq}$   
 effectieve volgdosis  $E(50) = e(50)_{\text{ing}} \times A_{\text{ing}}$   
 $= 31 \text{ mSv MBq}^{-1} \times 0,50 \text{ MBq} = 15,5 \text{ mSv}$
- 3 a de totale  $\gamma$ -energie is  $1,17 + 1,33 = 2,50 \text{ MeV}$   
 de bronconstante is  $d_{\gamma} = 2,50 / 7 = 0,36 \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ MBq}^{-1} \text{ m}^2$   
 $dH_{\gamma}/dt = 0,36 \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ MBq}^{-1} \text{ m}^2 \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 1 \text{ MBq} / (0,5 \text{ m})^2 = 1,4 \mu\text{Sv h}^{-1}$   
 b de radionucliden  $^{90}\text{Sr}$  en  $^{90}\text{Y}$  zenden elk 1  $\beta$ -deeltje uit, dus samen 2  $\beta$ -deeltjes  
 $dH_{\beta}/dt = 2 \times 9 \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ MBq}^{-1} \text{ m}^2 \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 1 \text{ MBq} / (0,5 \text{ m})^2 = 72 \mu\text{Sv h}^{-1}$   
 c  $dH_{\beta}/dt / dH_{\gamma}/dt = 72 \mu\text{Sv h}^{-1} / 1,4 \mu\text{Sv h}^{-1} = 51$   
 d de  $\beta$ -deeltjes hebben een korte dracht en worden in weinig materie gestopt, waardoor de lokale equivalente dosis hoog is  
 de effectieve dosis is veel kleiner omdat de huid (orgaanweegfactor  $w_{\text{huid}} = 0,01$ ) en de buitenste weefsellaag vrijwel de enige organen zijn die worden bestraald  
 $dE_{\beta}/dt / dE_{\gamma}/dt = (w_{\text{huid}} \times dH_{\beta}/dt) / (dH_{\gamma}/dt) = 0,01 \times 51 \approx 0,5$



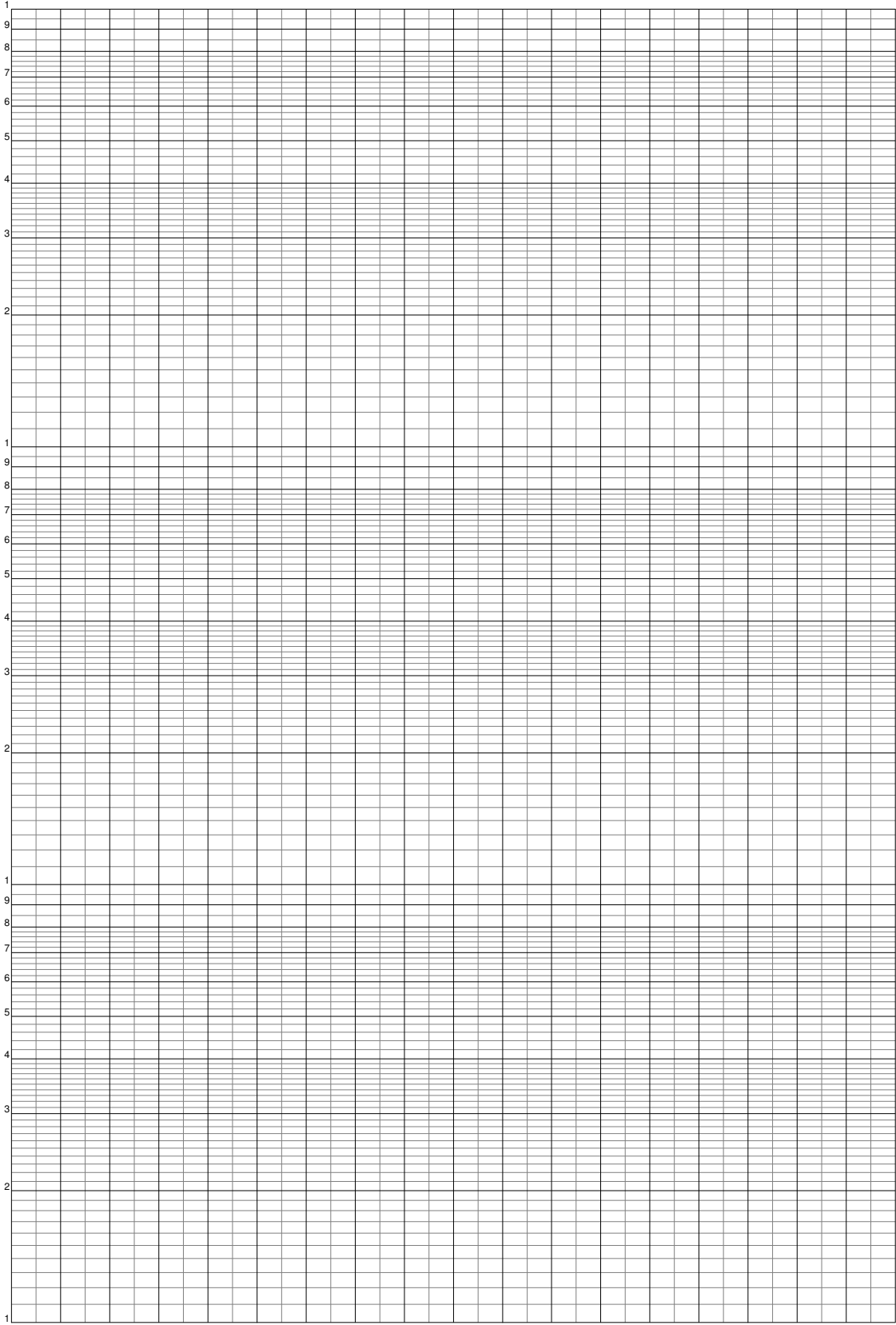
## 17 Open bronnen

- 1 Een blootgestelde werknemer inhaleert 0,26 MBq  $^{131}\text{I}$  de vorm van jodiumdamp.
  - a bereken de effectieve volg dosis
  - b bereken de equivalente dosis van de schildklier; ga er hierbij vanuit dat dit het enige orgaan is dat bijdraagt tot de effectieve volg dosis  
*aanwijzing: de dosisconversiecoëfficiënt van  $^{131}\text{I}$  is  $e(50)_{inh} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$  en de weefselweegfactor van de schildklier is  $w_{schildklier} = 0,04$*
  
- 2 Een vat bevat 40 l waterig  $^{14}\text{C}$ -houdend afval. De activiteitsconcentratie bedraagt 1 kBq per ml.
  - a mag de inhoud via het riool worden geloosd?
  - b zo niet, mag het met water zodanig worden aangelengd dat het wel op het riool mag worden geloosd?
  - c zo niet, mag het vat zolang worden opgeslagen dat de inhoud wel op het riool mag worden geloosd?  
*aanwijzing: de dosisconversiecoëfficiënt van  $^{14}\text{C}$  is  $e(50)_{ing} = 5,8 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1}$ ; het secundaire niveau voor lozing in water is  $w_{SN} = 100 \text{ Re}_{ing}$ ; omdat de halveringstijd  $T_{1/2} > 250$  jaar, is de correctiefactor  $R_w = 100$*

**Antwoorden**

- 1 a inhalatie  $A_{inh} = 2,6 \text{ MBq} = 0,26 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 effectieve volgdosis  $E(50) = e(50)_{inh} \times A_{inh}$   
 $= 2,0 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1} \times 0,26 \times 10^6 \text{ Bq}$   
 $= 0,0052 \text{ Sv} = 5,2 \text{ mSv}$
- b equivalente orgaandosis  $H_{\text{schildklier}} = E(50) / w_{\text{schildklier}}$   
 $= 5,2 \text{ mSv} / 0,04 = 130 \text{ mSv}$
- 2 a radiotoxiciteitseenheid  $1 \text{ Re}_{ing} = 1 \text{ Sv} / e(50)_{ing}$   
 $= 1 \text{ Sv} / 5,8 \times 10^{-10} \text{ Sv Bq}^{-1} = 1,7 \times 10^9 \text{ Bq}$   
 lozingslimiet  $w_{SN} / R_w = 100 \text{ Re}_{ing} / 100 = 1 \text{ Re}_{ing} = 1,7 \times 10^9 \text{ Bq}$
- totale activiteit  $A = 40 \text{ l} \times 10^3 \text{ ml l}^{-1} \times 10^3 \text{ Bq ml}^{-1} = 4 \times 10^7 \text{ Bq}$   
 dit is meer dan de gecorrigeerde lozingslimiet  
 het vat mag dus niet op het riool worden geloosd
- b verdunnen vermindert de totale activiteit niet en is dus geen oplossing
- c afval mag maximaal 2 jaar in opslag worden gehouden  
 omdat  $T_{1/2} > 250 \text{ jaar} \gg 2 \text{ jaar}$ , is opslag geen oplossing  
*opmerking: indien òf de totale activiteit per jaar òf de activiteitsconcentratie kleiner is dan de vrijgavewaarde, mag de activiteit overgedragen worden aan een derde ongeacht of deze over een vergunning beschikt of niet; deze derde is vervolgens niet gebonden aan verdere regels en mag de activiteit op het riool lozen; hieruit blijkt dat verschillende regelgevingen nog wel eens op gespannen voet met elkaar kunnen staan*

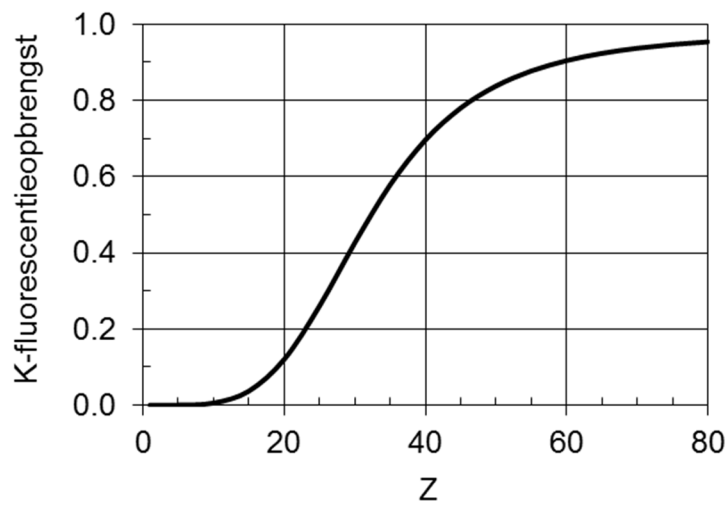
## **Appendix**



A1 Enkel-logaritmisch grafiekpapier

$k$	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

A2 Eenzijdige overschrijdingskans  $P(k)$  voor een normaalverdeling

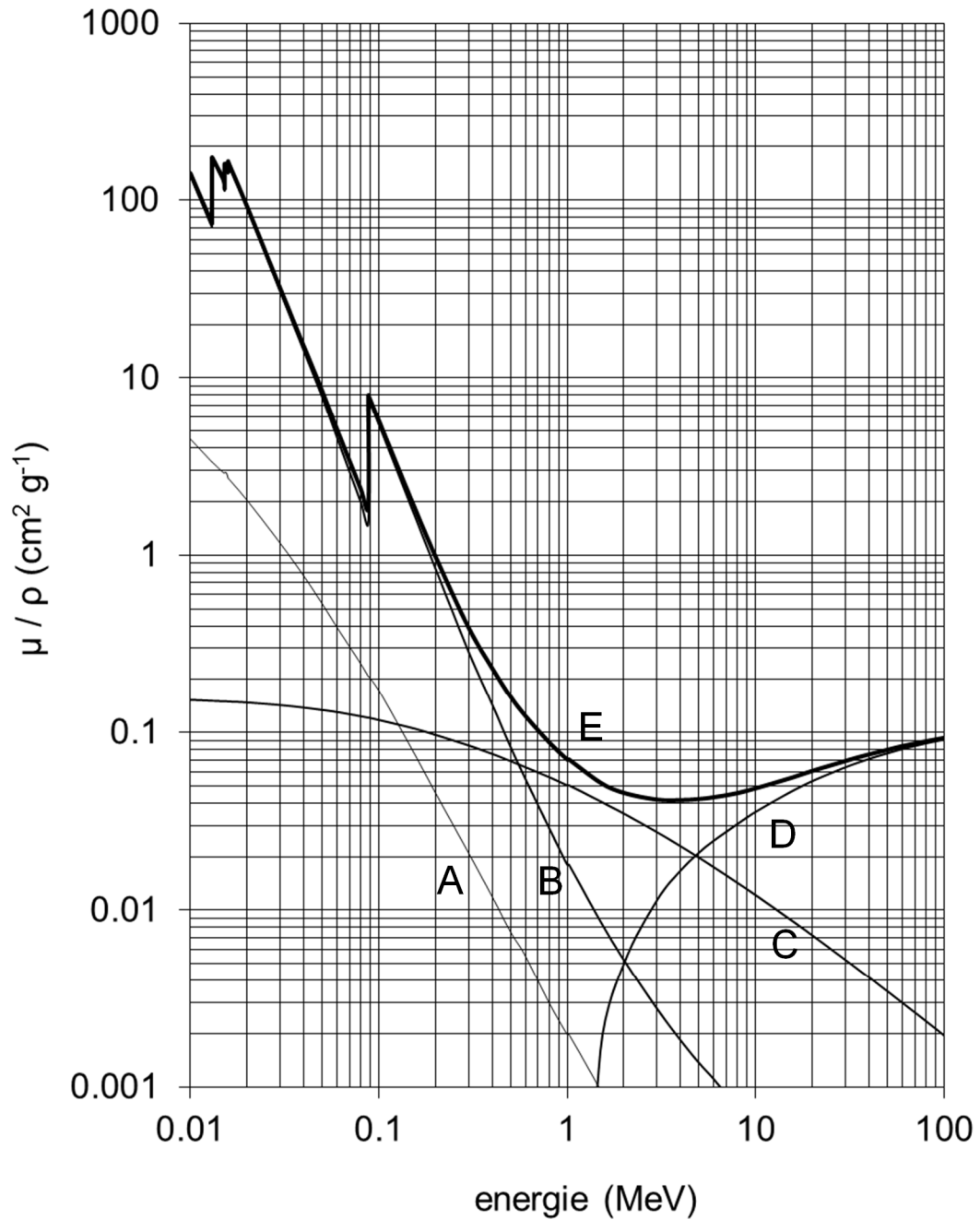


A3 Kans op K-röntgenfluorescentie

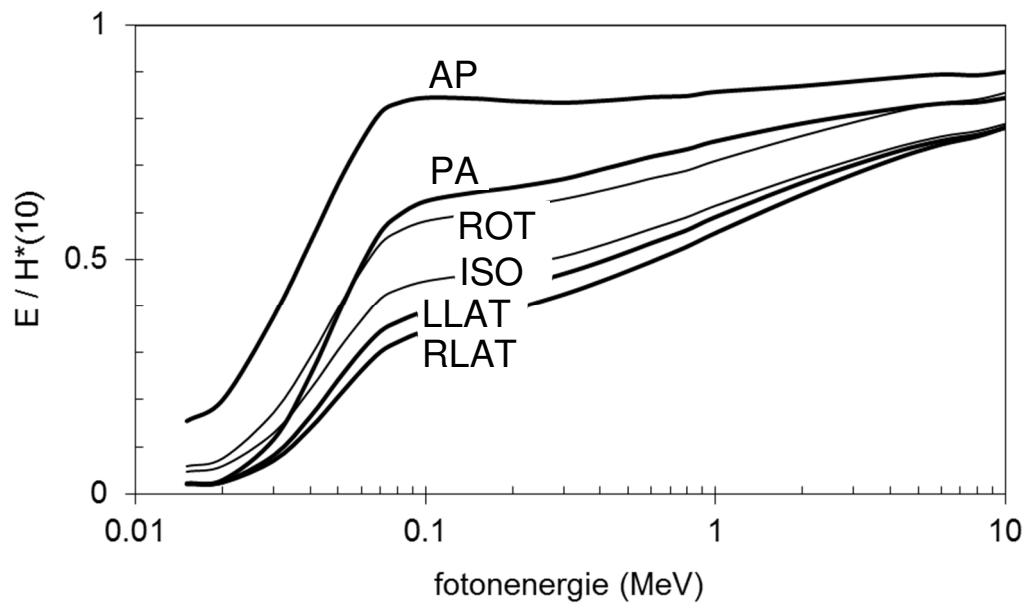
materiaal	$\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )	$\mu_{\text{tr}}/\rho$ ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )	$\mu_{\text{en}}/\rho$ ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )
water	0,0966	0,0330	0,0330
spier	0,0958	0,0328	0,0328
bot	0,0926	0,0317	0,0317
lucht	0,0868	0,0296	0,0296
lood	0,0886	0,0503	0,0481

A4 Massieke verzwakking-, energieoverdracht- en energieabsorptiecoëfficiënt voor enkele materialen en een fotonenergie van 0,5 MeV

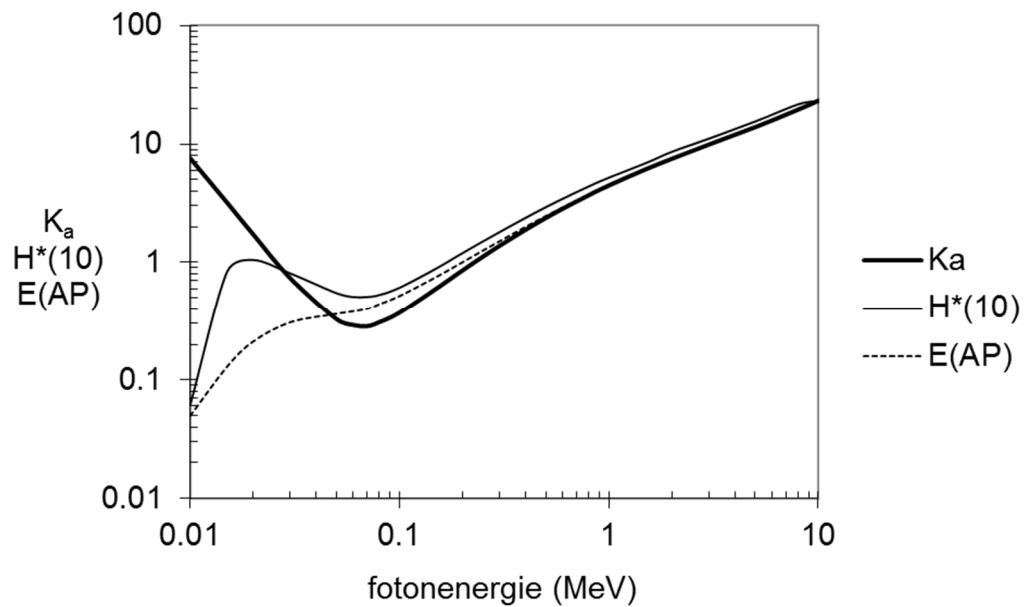
## Lood



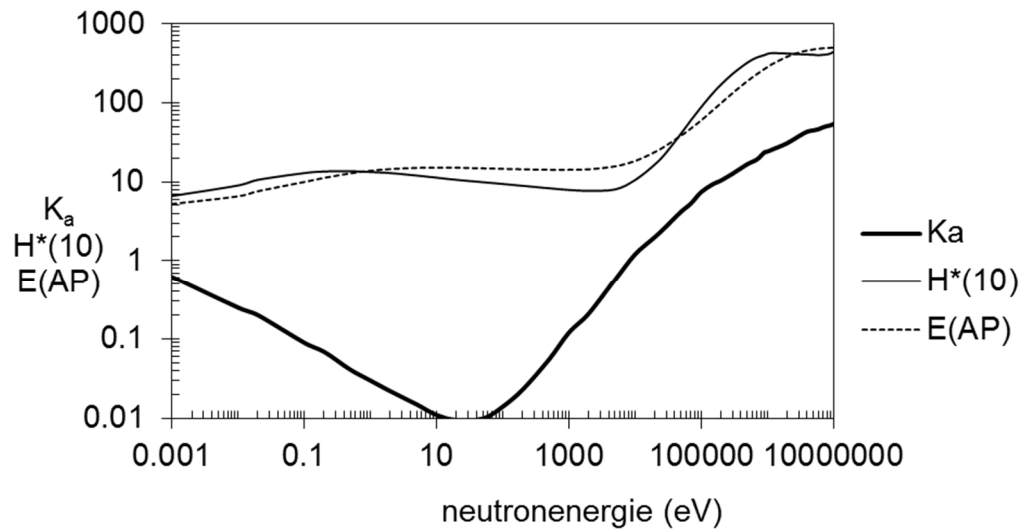
- A5 *Massieke verzwakkingscoëfficiënten van lood*  
 (A) Rayleigh-verstrooiing, (B) foto-elektrisch effect, (C) Compton-effect,  
 (D) paarvorming en (E) de totale massieke verzwakkingscoëfficiënt  $\mu/\rho$



A6 Verhouding van  $E$  en  $H^*(10)$  voor verschillende geometrieën, als functie van  $E_\gamma$



A7  $K_a$ ,  $H^*(10)$  en  $E(AP)$  per eenheid van  $\Phi$  als functie van  $E_\gamma$   
( $K_a$  in  $\text{pGy cm}^2$ , en  $H^*(10)$  en  $E(AP)$  in  $\text{pSv cm}^2$ )

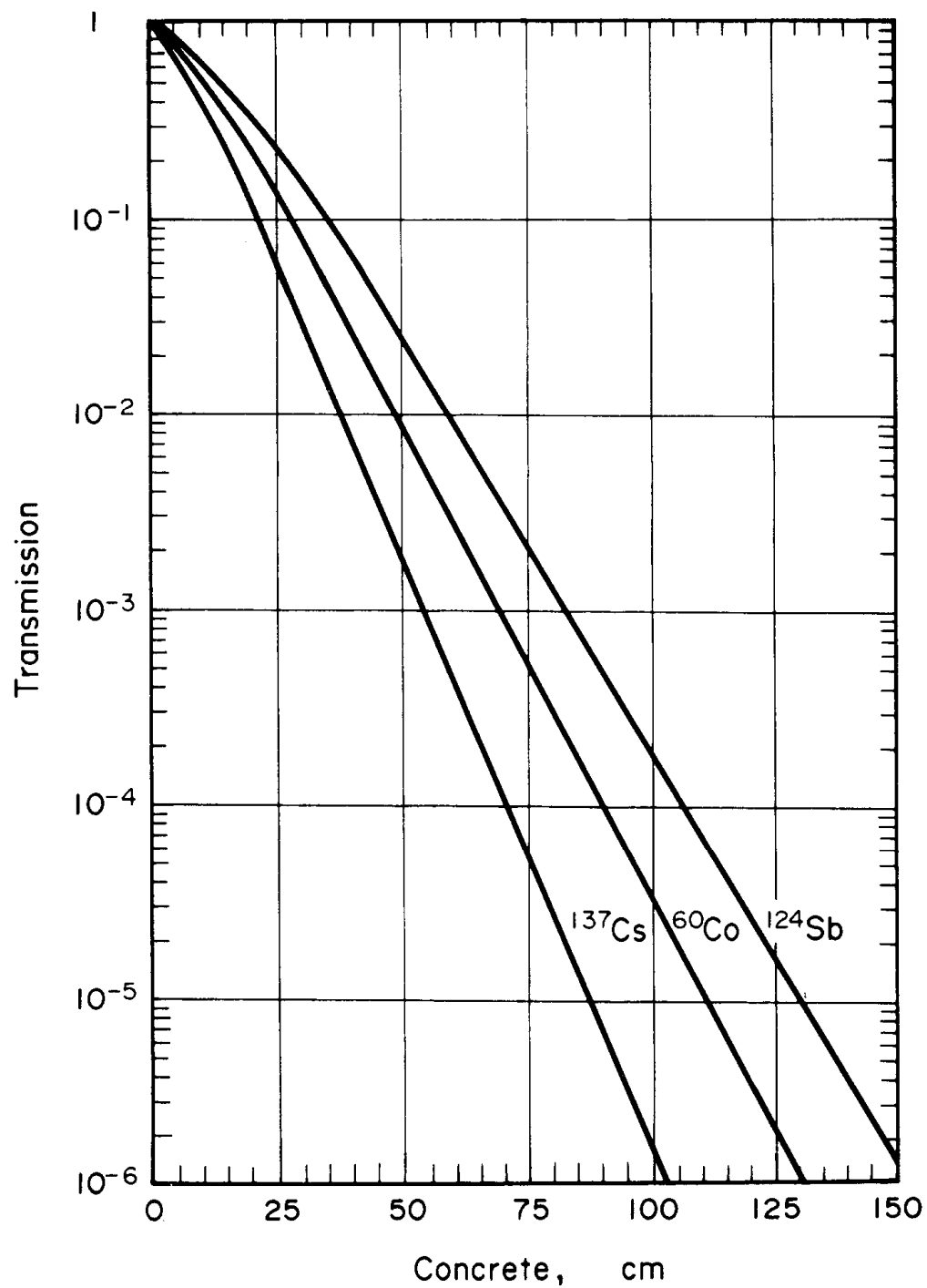


A8  $K_a$ ,  $H^*(10)$  en  $E(AP)$  per eenheid van  $\Phi$  als functie van  $E_{neutron}$   
( $K_a$  in  $pGy\ cm^2$ ,  $H^*(10)$  en  $E(AP)$  in  $pSv\ cm^2$ )

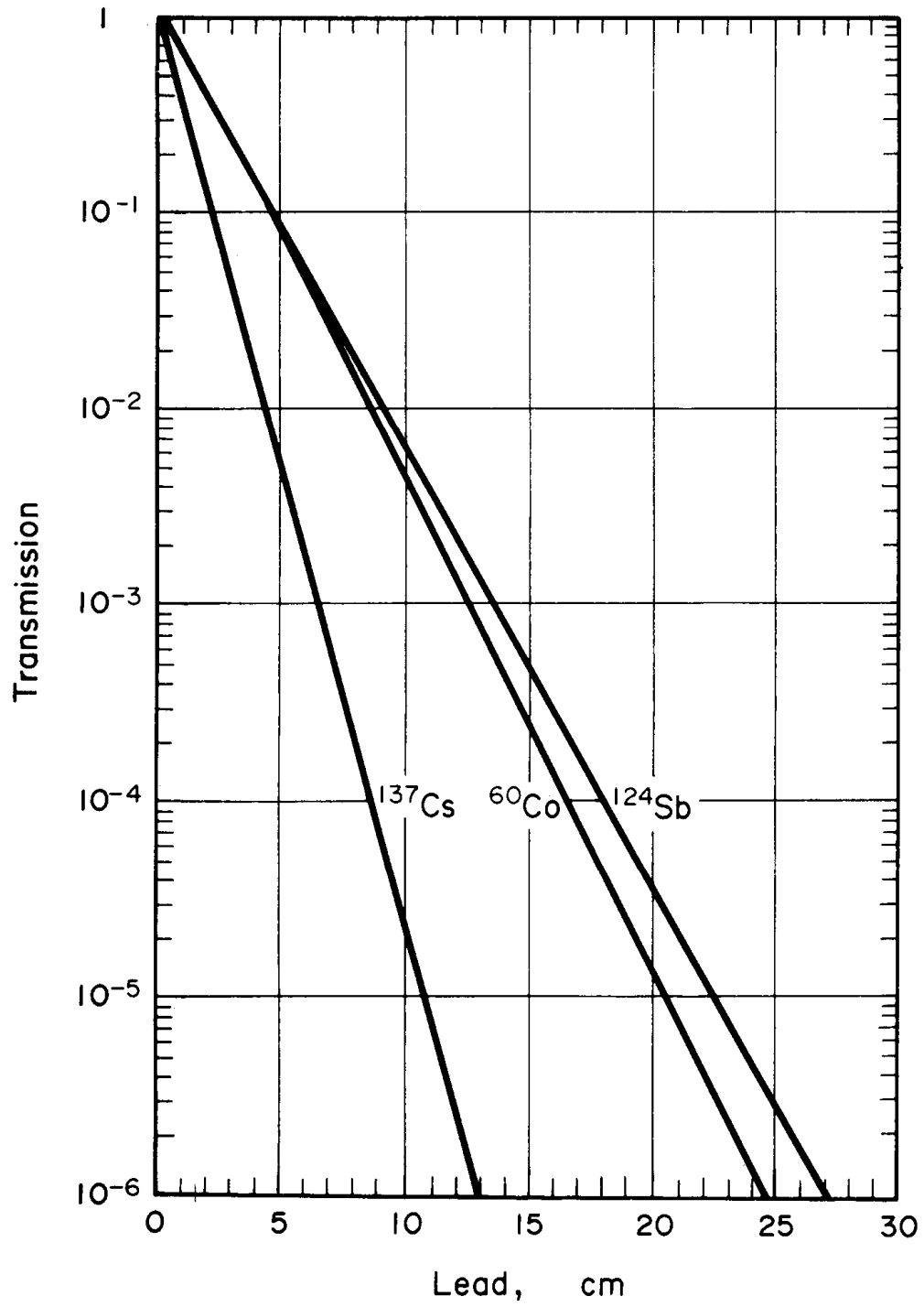
$AMAD$ ( $\mu m$ )	$ET_1$	$ET_2$	$BB$	$bb$	$AI$	<i>totaal</i>
0,0006	0,45	0,44	0,06	0,04	0,00	0,99
0,001	0,40	0,40	0,08	0,10	0,00	0,99
0,002	0,30	0,32	0,08	0,22	0,04	0,96
0,005	0,16	0,18	0,05	0,26	0,27	0,92
0,01	0,09	0,10	0,03	0,19	0,47	0,88
0,02	0,05	0,06	0,02	0,13	0,49	0,74
0,05	0,03	0,03	0,01	0,07	0,31	0,46
0,1	0,03	0,03	0,01	0,05	0,21	0,33
0,2	0,06	0,06	0,01	0,03	0,15	0,30
0,5	0,09	0,11	0,01	0,02	0,12	0,35
0,7	0,12	0,15	0,01	0,02	0,11	0,42
1	0,17	0,21	0,01	0,02	0,11	0,51
2	0,25	0,32	0,02	0,01	0,09	0,70
3	0,30	0,37	0,02	0,01	0,08	0,78
5	0,34	0,40	0,02	0,01	0,05	0,82
7	0,35	0,40	0,01	0,01	0,04	0,81
10	0,35	0,38	0,01	0,00	0,02	0,77
15	0,34	0,36	0,01	0,00	0,01	0,71
20	0,32	0,33	0,01	0,00	0,01	0,67

A9 *Longdepositie voor een volwassen man (neusademer)*





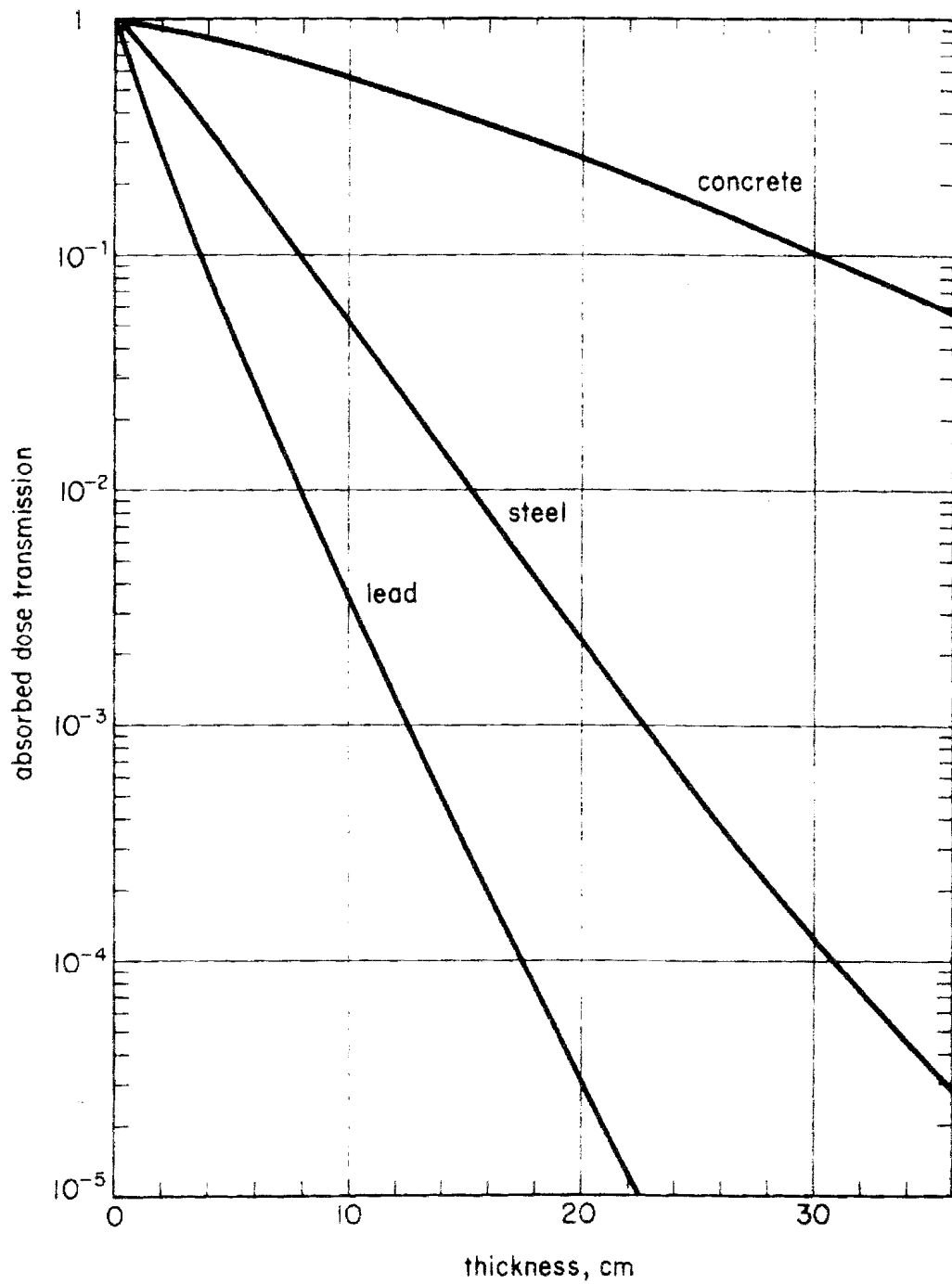
A10 Transmissie van brede bundels  $\gamma$ -straling door beton



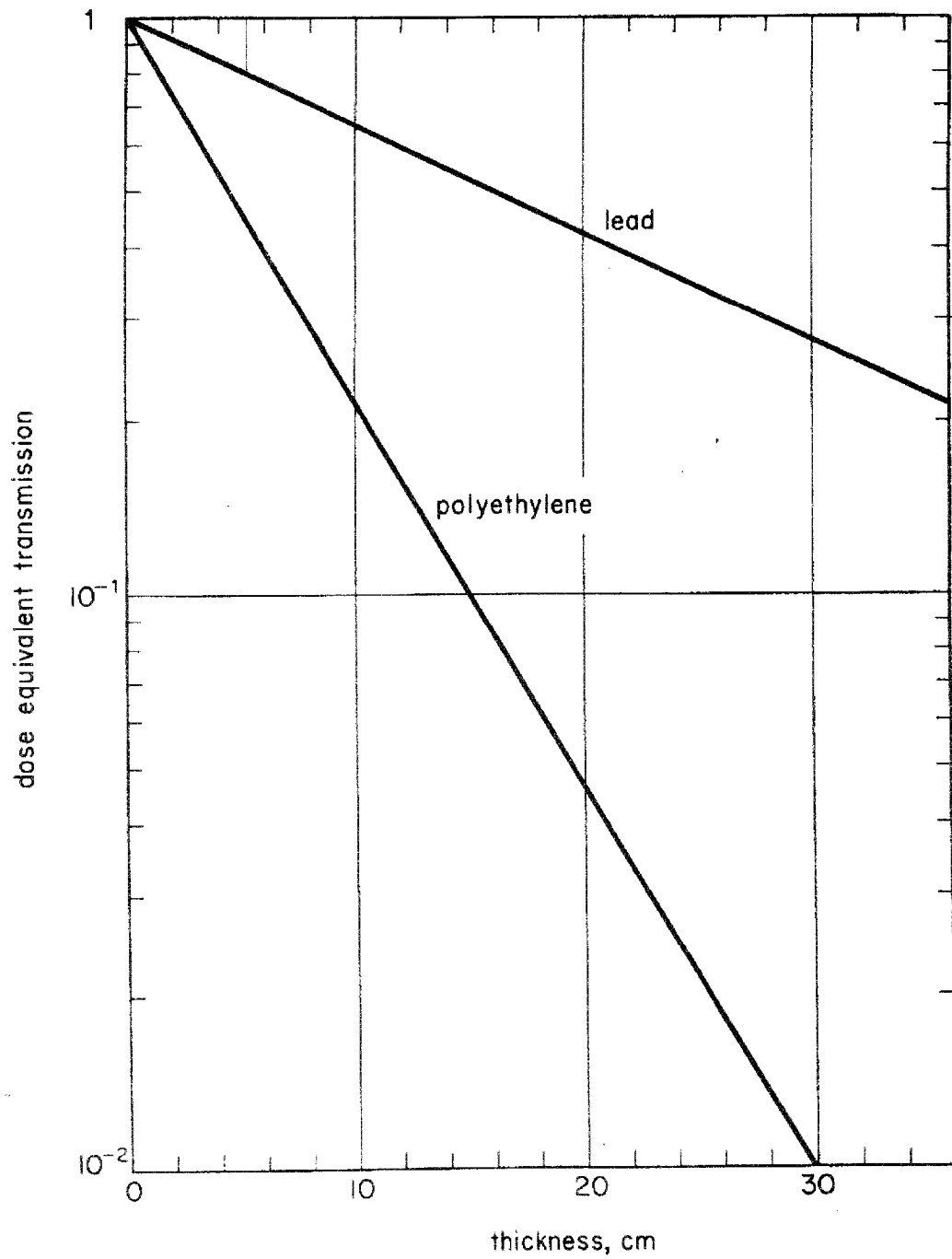
A11 Transmissie van brede bundels  $\gamma$ -straling door lood

<i>materiaal</i>	<i>E</i> (MeV)	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>μd</i> <i>7</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>20</i>
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	3,91	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
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
	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

*A12 Dosisopbouwfactor voor water, beton, ijzer en lood als functie van de dikte en de fotonenergie*



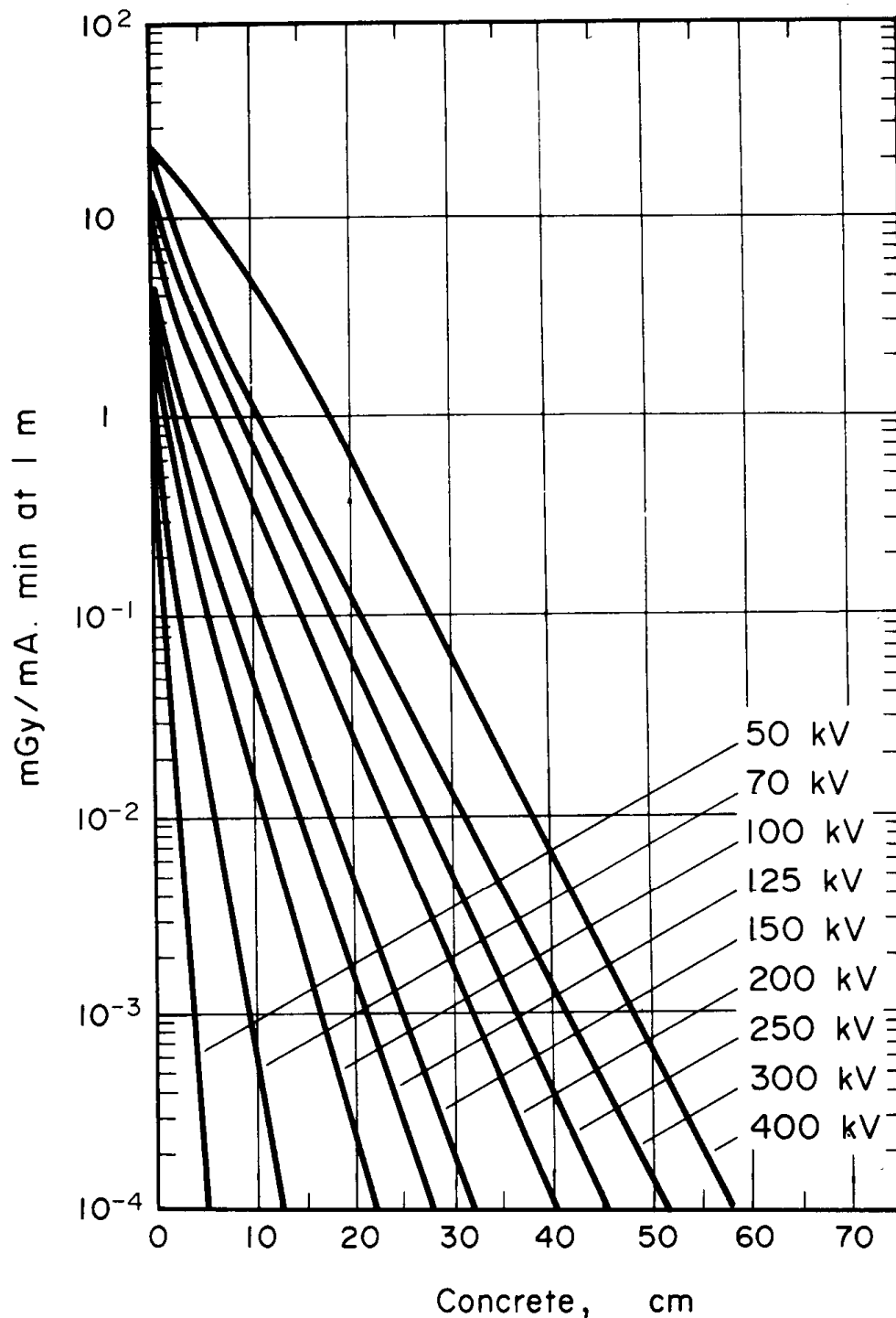
A13 Transmissie van brede bundels  $\gamma$ -straling van  $^{252}\text{Cf}$  door beton, staal en lood



A14 Transmissie van brede bundels neutronen van <sup>252</sup>Cf door polyethyleen (= polyetheen) en lood

<i>p</i>	<i>handelingen</i>
-4	werken met gas / poeder in open systeem verhitten van vloeistof tegen het kookpunt sterk spattende bewerking
-3	werken met vluchtige nucliden: <sup>3</sup> H in damp, jodium werken met poeder in gesloten systeem koken in gesloten systeem schudden, vortexen, centrifugeren opslag van edelgas in gesloten systeem
-2	eenvoudige chemische bewerking (RIA) labeling met niet vluchtig nuclide
-1	kortdurend zeer eenvoudig nat werk: pipetteren van niet vluchtig nuclide bewerking in gesloten systeem: elutie van technetiumgenerator optrekken van injectiespuit labeling in gesloten systeem metingen aan gesloten ampul opslag van radioactief afval in werkruimte
<i>q</i>	<i>laboratorium</i>
0	werkruimte buiten laboratoriumbeheer
1	D-laboratorium nevenruimte bij D-laboratorium
2	C-laboratorium
3	B-laboratorium
<i>r</i>	<i>werkplek</i>
0	tafel zonder lokale afzuiging
1	tafel met lokale afzuiging zuurkast niet volgens norm NEN-EN 14175
2	zuurkast volgens norm NEN-EN 14175 laminaie air-flow isolator (klasse 2)
3	handschoenenkast gesloten laminaie air-flow isolator (klasse 3)

A15 De p-, q- en r-waarden volgens de richtlijn radionuclidenlaboratoria



A16 *Transmissie van brede bundels 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 lood 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)*