STRALINGSHYGIËNE OEFENINGEN

voor stralingsbeschermingsdeskundigen
op het niveau van coördinerend deskundige

Frits Pleiter
Hielke Freerk Boersma

editie 2025

INHOUD

1 Wiskunde 3
2 Compartimentensystemen 8
3 Statistiek 13
4 Atoom- en kernbouw 19
5 Radioactiviteit 21
6 Wisselwerking van straling met materie 27
7 Basale dosimetrie 31
8 Biologische gevolgen van straling 32
9 Operationele dosimetrie 33
10 Dosimetrie van inwendige besmetting 35
11 Detectie van straling 38
12 Afscherming van uitwendige straling 42
13 Aanbevelingen van de ICRP 46
14 Wet- en regelgeving 47
15 Toestellen 52
16 Ingekapselde bronnen 54
17 Open bronnen 56
18 APPENDIX 58

Figuur 1 Enkel-logaritmisch grafiekpapier 58
Figuur 2 Eenzijdige overschrijdingskans P(k) voor een normaalverdeling 59
Figuur 3 Kans op K-röntgenfluorescentie 59
Figuur 4 Massieke verzwakkings-, energieoverdracht- en energieabsorptiecoëfficiënten 59
Figuur 5 Massieke verzwakkingscoëfficiënten van lood 60
Figuur 6 Verhouding van E en H*(10) 61
Figuur 7 Ka, H*(10) en E(AP) per eenheid van Φ als functie van Eγ 61
Figuur 8 Ka, H*(10) en E(AP) per eenheid van Φ als functie van $E_{neutron}$ 62
Figuur 9 Longdepositie voor een volwassen man (neusademer) 62
Figuur 10 Transmissie van brede bundels γ-straling door beton 63
Figuur 11 Transmissie van brede bundels γ-straling door lood 64
Figuur 12 Dosisopbouwfactor voor water, beton, ijzer en lood 65
Figuur 13 Transmissie van brede bundels γ-straling van ^{252}Cf door beton, staal en lood 66
Figuur 14 Transmissie van brede bundels neutronen van ^{252}Cf door polyethyleen (= polyetheen) en lood 67
Figuur 15 De p-, q- en r-waarden volgens de voormalige richtlijn radionuclidenlaboratoria 68
Figuur 16 Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton 69

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 deelexamen stralingsbescherming.

Hoofdstuknummers in dit boek met oefeningen verwijzen naar de hoofdstukken uit het boek 'STRALINGSHYGIËNE voor stralingsbeschermingsdeskundigen op het niveau van coördinerend deskundige' van Frits Pleiter en Hielke Freerk Boersma (GARP, Groningen, 2024) ISBN 978 94 034 3067 6.

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:

hoofdstuk	*titel*	*oefeningen*
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

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

1 Wiskunde

1 Bereken de waarde van x.
a $2^x = 2^3 \times 2^5$
b $2^x = (2^3)^5$
c $x^2 = 3^2 \times 5^2$

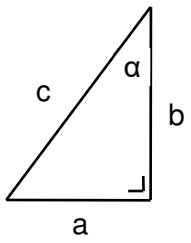
2 Druk onderstaande expressies uit in $^{10}\log(5)$ en $^{10}\log(3)$:
a $^{10}\log(15) - {}^{10}\log(3)$
b $^{10}\log(60)$

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 $x = {}^{10}\log(2^3)$
b $x = {}^{10}\log(3^2)$
c $x = {}^{10}\log(2 \times 3)$
d $x = {}^{10}\log(2 / 3)$
e $x = {}^{10}\log(2 + 3)$
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 α geldt: $\alpha = 5°$ en $a = 10$ m.
a bereken de hoek α 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 wandelaren. 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 λ een constante is die het ventilatievoud wordt genoemd. In een slecht geventileerde ruimte bedraagt $\lambda = 0{,}5\ h^{-1}$. 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 $y = y_o + a\,x$, waarbij y_o het saldo op 1 januari 2010 is, *x* het aantal maanden en *a* het bedrag dat maandelijks wordt gestort.
a bepaal *a* en y_o algebraïsch
b bepaal *a* en y_o 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 $2^x = (2^3)^5 = 2^{3\times5} = 2^{15}$ $x = 15$
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 $\boldsymbol{x^y}$ $x = 1{,}234^{5{,}678} = 3{,}300$
met behulp van de knoppen **log** en $\mathbf{10^x}$ $\log(x) = 5{,}678 \times \log(1{,}234)$
$= 5{,}678 \times 0{,}091\,32 = 0{,}5185$
$x = 10^{0{,}5185} = 3{,}300$
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 $\alpha = 5^\circ \times (\pi \text{ rad} / 180^\circ) = 0{,}0873$ rad
b $b = a / \tan(\alpha) = 10 / 0{,}087\,49 = 114{,}3$ m
$c = a / \sin(\alpha) = 10 / 0{,}087\,16 = 114{,}7$ m

7 a $5x + y = 6$
$5x - y = 4$ +
$10x = 10$ $x = 1$
$y = 6 - 5x = 6 - (5 \times 1) = 1$
b $5x + 7y = 18$
$5x + 3y = 12$ -
$4y = 6$ $y = 6 / 4 = 1{,}5$
$5x = 18 - 7y = 18 - (7 \times 1{,}5) = 7{,}5$ $x = 7{,}5 / 5 = 1{,}5$
c $1{,}2x + 1{,}5y = 2{,}5$ | × 2 | $2{,}4x + 3{,}0y = 5{,}0$
$-2{,}3x + 3{,}0y = 0{,}3$ | × 1 | $-2{,}3x + 3{,}0y = 0{,}3$ -
$4{,}7x = 4{,}7$
$x = 4{,}7 / 4{,}7 = 1{,}0$
$3{,}0y = 0{,}3 + 2{,}3x = 0{,}3 + (2{,}3 \times 1{,}0) = 2{,}6$ $y = 2{,}6 / 3{,}0 = 0{,}867$

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 onmoeten 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
$x = 2{,}5y$
$\underline{x = \quad y + 3}$ -
$0 = 1{,}5y - 3$ $\quad y = 3 / 1{,}5 = 2$ ton
$x = 2{,}5y = 2{,}5 \times 2 = 5$ ton

10 a stel het huidig vermogen van Jan op x en dat van Piet op y
$x - 3 = 2{,}5(y - 6)$ $\quad x - 2{,}5y = -12$
$x \quad = 2y$ $\quad \underline{x - \quad 2y = \quad 0}$ -
$-0{,}5y = -12$ $\quad y = -12 / -0{,}5 = 24$ ton
$x = 2y = 2 \times 24 = 48$ ton

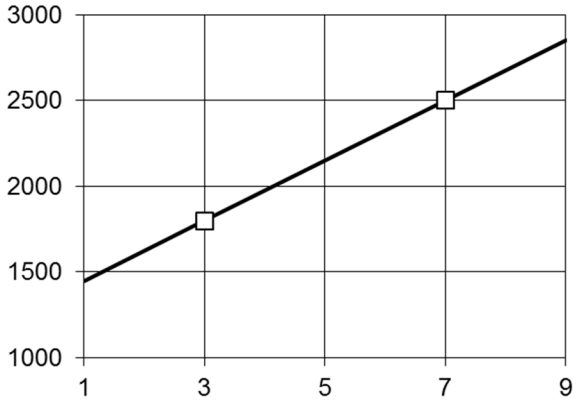
11 de wortelformule luidt $x_{1,2} = \{-b \pm \sqrt{(b^2 - 4ac)}\} / 2a$

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 $\lambda t_{½} = \ln\{C(0) / C(t_{½})\} = \ln(2) = 0{,}69315$
$t_{½} = 0{,}69315 / \lambda = 0{,}69315 / 0{,}5 = 1{,}39$ 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% afname per uur
c $C(8) = 10\, e^{-0{,}5 \times 8} = 10\, e^{-4} = 0{,}183$

13 a op 1 juli $\quad 2500 = y_0 + 6a$
op 1 maart $\quad \underline{1800 = y_0 + 2a}$
$700 = \quad 4a$
$a = 700 / 4 = €\ 175$
$y_0 = 2500 - 6a$
$= 2500 - 1050 = €\ 1450$

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 ${}_a\int^b e^{-\mu t}\,dt = (e^{-\mu b} - e^{-\mu a}) / (-\mu)$

invullen van de coëfficiënten geeft:

a ${}_0\int^1 e^{-0{,}1t}\,dt = (e^{-0{,}1\times 1} - e^{-0{,}1\times 0}) / (-0{,}1)$

$= 10 \times (1 - e^{-0{,}1}) = 10 \times (1 - 0{,}905) = 0{,}95$

b ${}_0\int^1 e^{-1t}\,dt = (e^{-1\times 1} - e^{-1\times 0}) / (-1)$

$= (1 - e^{-1}) = 1 - 0{,}368 = 0{,}632$

c ${}_0\int^{10} e^{-0{,}1t}\,dt = (e^{-0{,}1\times 10} - e^{-0{,}1\times 0}) / (-0{,}1)$

$= 10 \times (1 - e^{-1}) = 10 \times (1 - 0{,}368) = 6{,}32$

d ${}_0\int^{\infty} e^{-0{,}1t}\,dt = (e^{-0{,}1\times \infty} - e^{-0{,}1\times 0}) / (-0{,}1)$

$= 10 \times (1 - e^{-\infty}) = 10 \times (1 - 0) = 10$

2 Compartimentensystemen

1 Los de volgende differentiaalvergelijken op:
- a $y\,(\mathrm{d}y/\mathrm{d}x) = x$
- b $\mathrm{d}y/\mathrm{d}x = 3x + 1$
- c $\mathrm{d}y/\mathrm{d}x = e^{-x}$
- d $y' - xy - y = 0$
- e $y' + 3y = 0$

2 Los de differentiaalvergelijking op met als beginvoorwaarde $y = 4$ als $x = 0$:
- a $\mathrm{d}y/\mathrm{d}x = -2y$

3 De druk P in een gascylinder (in atmosfeer) als functie van de tijd t (in uren) voldoet aan de differentiaalvergelijking $\mathrm{d}P/\mathrm{d}t + 0{,}7P = 0{,}7$. Op tijdstip $t = 0$ bedraagt de druk in de gascylinder $P(0) = 21$ atmosfeer.
- a bereken de functie $P(t)$ die op ieder tijdstip de druk in de cylinder weergeeft
- b bereken de druk in de cylinder 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 m^3 in totaal 1500 gram chloor. De MAC-waarde van chloor is 1 ppm of 3 $mg \cdot m^{-3}$.
- a stel de differentiaalvergelijking voor de concentratie aan chloor op
- b geef de functie die op elk moment de concentratie in $g \cdot m^{-3}$ 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 dm^2 en van het tweede 1 dm^2. De uitstroomsnelheid is evenredig met de hoogte van de waterspiegel in het vat en kan geschreven worden als $0{,}2\ h_1(t)$ $l \cdot min^{-1}$ (met h_1 in dm). Men giet op tijdstip $t = 0$ ineens 25 l water in het eerste vat.
- a stel de diffentiaalvergelijking 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 figuur 1 van de appendix van dit oefenboek)
- c op welk tijdstip bedraagt de hoogte van het water in het eerste vat 1 dm ?

6 Er zijn drie cylindrische 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 dm^2, van het tweede vat 1 dm^2 en van het derde vat 10 dm^2. De uitstroomsnelheid is evenredig met de hoogte van de waterspiegel in het vat en bedraagt voor het eerste vat 0,2 $h_1(t)$ $l \cdot min^{-1}$ (met h_1 in dm) en voor het tweede vat 1,0 $h_2(t)$ $l \cdot min^{-1}$ (met h_2 in dm). De vaten zijn aanvankelijk leeg. Op tijdstip t = 0 giet men ineens 25 l water in het eerste vat.

a bereken de waterhoogten in de drie vaten als functie van de tijd
b zet deze functies uit op enkel-logaritmisch grafiekpapier (zie figuur 1 van de appendix van dit oefenboek)

7 Een geheel met water gevuld overloopvat met een volume van 20 l wordt met een constante snelheid van 0,50 $l \cdot min^{-1}$ bijgevuld met een oplossing van keukenzout in water met een concentratie van 1,0 $g \cdot cm^{-3}$. Op tijdstip t = 0 is het overloopvat geheel gevuld met water met een zoutconcentratie nul.

a bereken de concentratie van keukenzout in de vloeistof in dit vat als functie van de tijd t

8 In een ruimte van 50 m^3 is 50 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 ppm = 0,12 $mg \cdot m^{-3}$ als uurgemiddelde.

a wat is de effectieve halveringstijd van het ozon?
b wat is de ozonconcentratie als functie van de tijd?
c wordt in deze ruimte de MAC-waarde overschreden?
d hoeveel ozon wordt er in het eerste uur geloosd?

Antwoorden

1 a $y\,dy = x\,dx$ $\quad 0{,}5\,y^2 = 0{,}5\,x^2 + c$ $\quad y^2 - x^2 = c'$

b $dy = (3x+1)\,dx$ $\quad y = 1{,}5\,x^2 + x + c$

c $dy/dx = e^{-x}$ $\quad dy = e^{-x}\,dx$ $\quad y = -e^{-x} + c$

d $dy/x = (x+1)\,y$ $\quad dy/y = (x+1)\,dx$ $\quad \ln(y) = 0{,}5\,x^2 + x + c$

e $dy/dx = -3y$ $\quad dy/y = -3\,dx$ $\quad \ln(y) = -3x + c$ $\quad y = c'\,e^{-3x}$

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 $y = (k/a) + c\,e^{-a\,x}$

$P(t) = 1 + c\,e^{-0{,}7t}$ atm

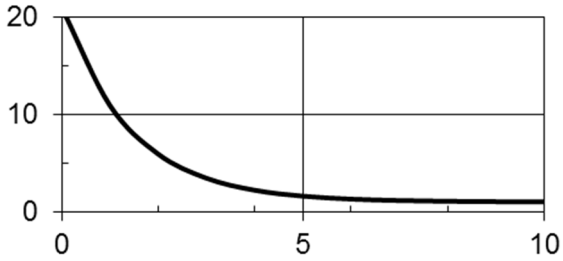
invullen beginvoorwaarde $21 \text{ atm} = P(0) = 1 + c\,e^0 = 1 + c \quad \rightarrow \quad c = 20$ atm

$P(t) = 1 + 20\,e^{-0{,}7t}$ atm

b $P(\infty) = 1 + 20\,e^{-\infty}$

$= 1 + 0 = 1$ atm

c zie grafiek



4 a $d(C_1V_1)/dt = -k_{12}\,C_1V_1$

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 $C_1(t) = C_1(0)\,e^{-8t}$

$C_1(0) = 1500 / 75 = 20$ g·m^{-3} $\quad \rightarrow \quad C_1(t) = 20\,e^{-8t}$ g·m^{-3}

c MAC-waarde = 3 mg·m^{-3} = 0,003 g·m^{-3}

$0{,}003 = 20\,e^{-8t}$

$\ln(0{,}003 / 20) = \ln(1{,}5 \times 10^{-4}) = -8{,}8 = -8t \quad \rightarrow \quad t = 1{,}1$ uur

5 stel A_i = oppervlak van de bodem van vat i

a vat 1: $dV_1/dt = A_1 \times dh_1/dt = -k_{12} = -0{,}2\,h_1$

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

$dh_1/dt + 0{,}04\,h_1 = 0$

b vat 1: $h_1(t) = c\,e^{-0{,}04t}$

$h_1(0) = 25$ dm^3 / 5 dm^2

$= 5$ dm

$h_1(t) = 5\,e^{-0{,}04t}$

vat 2: $V_1 + V_2 = D = 25$ l

$V_1 = h_1 \times A_1$

$= 5\,e^{-0{,}04t} \times 5 = 25\,e^{-0{,}04t}$

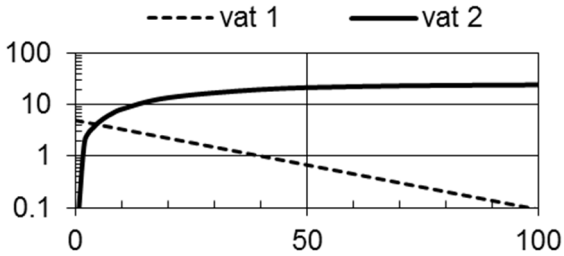
$V_2 = 25\,(1 - e^{-0{,}04t})$

$h_2(t) = V_2 / A_2$

$= 25\,(1 - e^{-0{,}04t}) / 1$

$= 25\,(1 - e^{-0{,}04t})$

zie grafiek



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

6 stel A_i = oppervlak van de bodem van vat i

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

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

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

$dh_1/dt + 0{,}04\ h_1 = 0$

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

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

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: $V_1 + V_2 + V_3 = D = 25\ dm^3$

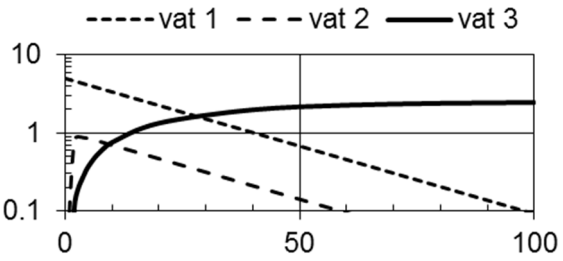
$h_3(t) = V_3 / A_3 = (D - A_1\ h_1 - A_2\ h_2) / A_3$

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

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

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

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

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

afvoer $C_2\ dV_2/dt$

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

$V_2\ (dC_2/dt) =$ aanvoer - 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 differentiaalvergelijking 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 $D = 2^{-t/T_{½}} = e^{-\lambda t}$

$T_{½}$ = 10 min = 0,167 uur $\rightarrow$ $\lambda_{dis} = \ln(2) / T_{½} = 4{,}16$ per uur

met ventilatie $dD/dt = -\lambda_{dis} D(t) - \lambda_{vent} D(t)$

$= -(4{,}16 + 2) D(t) = -6{,}16 D(t) = -\lambda_{eff} D(t)$

$T_{½,eff} = 0{,}693 / \lambda_{eff}$

$= 0{,}693 / 6{,}16$ per uur = 0,112 uur = 6,8 min

b $D(t) = D(0)\, e^{-6{,}16t}$

concentratie $C(t) = D(t) / V$

$C(0) = 50$ mg / 50 m^3 = 1 mg·m^{-3}

$C(t) = e^{-6{,}16t}$ 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 mg·m^{-3} in het eerste uur

$\rightarrow$ overschrijding van de MAC-waarde

d ten gevolge van ventilatie wordt er per tijdseenheid $dD_{lozing}(t)/dt = \lambda_{vent} D(t)$ geloosd

$dD_{lozing}(t)/dt = 2 \times 50$ m$^3 \times C(t) = 100\, e^{-6{,}16t}$

integreren van 0 tot t levert

$D_{lozing}(t) = (100 / 6{,}16)(1 - e^{-6{,}16t}) = 16{,}2\,(1 - e^{-6{,}16t})$

$\rightarrow$ geloosde hoeveelheid ozon na één uur is $D_{lozing}(1) = 16{,}2$ 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 $\sum x_i^2 = 3\,494\,679\,543$

a maak een histogram met intervallen 5700-5749, 5750-5799, enzovoorts
b bereken het gemiddelde $\bar{x}$ van deze meetwaarden
c bereken de standaarddeviatie σ van het aantal tellingen in 1 minuut
d bepaal uit het histogram het percentage van de metingen die kleiner zijn dan $\bar{x}$-σ en het percentage van de metingen die groter zijn dan $\bar{x}$+σ; vergelijk de waarden met wat men verwacht bij een normaalverdeling
e 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
f herhaal de vragen d en e voor het interval $[\bar{x}+2\sigma;\ \bar{x}-2\sigma]$
g bereken de standaarddeviatie van het gemiddelde van de meetwaarden
h 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.

a hoe lang moet geteld worden om een nauwkeurigheid van 3% te bereiken bij een betrouwbaarheidsinterval van 67% ?
b hoe lang moet geteld worden om een nauwkeurigheid van 1% te bereiken bij een betrouwbaarheidsinterval van 67% ?
c 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.
- a bereken het bruto-teltempo en de standaarddeviatie hiervan in telpulsen per minuut (tpm); geef de uitkomst in de vorm $T \pm \sigma$ tpm
- b herhaal de berekening van vraag a voor de meting van het nuleffect
- c herhaal de berekening van vraag a voor de meting van het netto-teltempo
- d geef de relatieve fout in het netto-teltempo
- e 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.
- a 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
- b herhaal vraag a voor meting B; geef de uitkomst in de vorm $T_B \pm \sigma_B$ tpm
- c bereken het netto-teltempo en de standaarddeviatie hiervan; geef de uitkomst in de vorm $T \pm \sigma$ tpm
- d wat zou de relatieve fout in het netto-teltempo zijn geweest als beide metingen 60 minuten hadden geduurd?
- e 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 afschermende 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).
- a schrijf het netto-teltempo zonder absorber in de vorm $T_A \pm \sigma_A$ tpm
- b schrijf het netto-teltempo met absorber in de vorm $T_B \pm \sigma_B$ tpm
- c 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.
- a bepaal de kans dat het voorwerp niet besmet is
  aanwijzing: maak gebruik van de eenzijdige overschrijdingskans P(k) die gegeven is in figuur 2 van de appendix van dit oefenboek

7 Voer de volgende berekeningen uit, schrijf het resultaat op in wetenschappelijke notatie en laat daarbij alle niet significante cijfers weg.
- a 5,31 - 2,3
- b 0,3010 + 0,4771
- c $1{,}25\times10^2 \times 2$
- d 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.

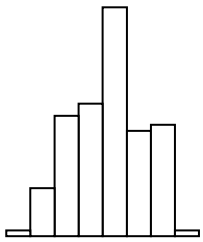
meetserie 1	*meetserie 2*
98	103
100	100
114	105
120	107
85	101
97	103
111	106
119	108
89	102
107	105

a bereken voor elk van de beide meetseries de gemidelde waarde $\bar{x}$
b bereken voor elk van de beide meetseries de standaarddeviatie σ 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 $\sigma_x = \sqrt{[\{\sum (x_i - \bar{x})^2\} / (n - 1)]}$
$= \sqrt{[\{\sum (x_i)^2 - \sum (2x_i\bar{x}) + \sum (\bar{x})^2\} / (n - 1)]} = \sqrt{[\{\sum (x_i)^2 - 2\bar{x}\sum x_i + \sum (\bar{x})^2\} / (n - 1)]}$
$= \sqrt{[\{\sum (x_i)^2 - 2\bar{x}\ (n\bar{x}) + n(\bar{x})^2\} / (n - 1)]} = \sqrt{[\{\sum (x_i)^2 - n(\bar{x})^2\} / (n - 1)]}$
$= \sqrt{[(3\,494\,679\,543 - 100 \times 5911{,}13^2) / 99]} = 73{,}4$ tpm

d de 1σ-grenzen zijn 5837,7 en 5984,5
er zijn 18 uitschieters groter (18%) en 18 uitschieters kleiner (18%)

e in het 1σ-interval liggen 64 van de 100 meetwaarden; bij een normaalverdeling is dat 68%

f de 2σ-grenzen zijn 5764,3 en 6057,9
in het 2σ-interval liggen 97 van de 100 meetwaarden; bij een normaalverdeling is dat 95%

g $\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} = 73{,}4 / \sqrt{100} = 7{,}3$ 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 tpm = 3,7 min

b voor een relatieve fout van 1% zijn $(1 / 0{,}01)^2 = 10\,000$ telpulsen nodig
tijd = 10 000 / 300 tpm = 33,3 min

c een betrouwbaarheidsinterval van 95% correspondeert met 2σ-grenzen, dus σ_{rel} is 1,5%
voor een relatieve fout van 1,5% zijn $(1 / 0{,}015)^2 = 4444$ telpulsen nodig
t = 4444 / 300 tpm = 14,8 min

3 a $T_1 = 244 / 10 = 24{,}4$ tpm $\qquad \sigma_1 = \sqrt{244} / 10 = 15{,}6 / 10 = 1{,}6$ tpm
$T_1 \pm \sigma_1 = 24{,}4 \pm 1{,}6$ tpm

b $T_2 = 184 / 10 = 18{,}4$ tpm $\qquad \sigma_2 = \sqrt{184} / 10 = 13{,}6 / 10 = 1{,}4$ tpm
$T_2 \pm \sigma_2 = 18{,}4 \pm 1{,}4$ tpm

c $T = T_1 - T_2 = 24{,}4 - 18{,}4 = 6{,}0$ tpm
$\sigma = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} = \sqrt{(1{,}6^2 + 1{,}4^2)} = \sqrt{(2{,}56 + 1{,}96)} = \sqrt{4{,}5} = 2{,}1$ tpm
$T \pm \sigma = 6{,}0 \pm 2{,}1$ tpm

d de relatieve fout is 2,1 / 6,0 = 35%

e een betrouwbaarheidsinterval van 95% correspondeert met $2\sigma = 4{,}2$ tpm
het interval is dus [6,0-4,2; 6,0+4,2] = [1,8; 10,2] tpm

4 a $T_A = 100 / 24 = 4{,}17$ tpm $\quad \sigma_A = \sqrt{100} / 24 = 10 / 24 = 0{,}42$ tpm
$T_A \pm \sigma_A = 4{,}17 \pm 0{,}42$ tpm

b $T_B = 100 / 50 = 2{,}00$ tpm $\quad \sigma_B = \sqrt{100} / 50 = 10 / 50 = 0{,}20$ 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 $\sigma_{brutto} = \sqrt{(24 / 60)} \times 0{,}42 = 0{,}27$ tpm
$\sigma_{nul} = \sqrt{(50 / 60)} \times 0{,}20 = 0{,}18$ tpm
$\sigma_{netto} = \sqrt{(\sigma_{bruto}^2 + \sigma_{nul}^2)} = \sqrt{(0{,}0729 + 0{,}0324)} = \sqrt{0{,}1053} = 0{,}32$ tpm
de relatieve fout is $0{,}32 / 2{,}17 = 15\%$

e $\sigma_{nul} = \sqrt{(50 / 200)} \times 0{,}20 = 0{,}10$ tpm
een betrouwbaarheidsinterval van 95% correspondeert met 2σ
geëist wordt een relatieve fout van 10%, dus $2\sigma_{netto} = 0{,}1 \times 2{,}17 = 0{,}217$ tpm
dus $\sigma_{netto} = 0{,}1085$ tpm
$\sigma_{bruto} = \sqrt{(\sigma_{netto}^2 - \sigma_{nul}^2)} = \sqrt{(0{,}1085^2 - 0{,}10^2)} = \sqrt{0{,}0018} = 0{,}042$ tpm
de teltijd moet dus $(0{,}42 / 0{,}042)^2 \times 24 = 2400$ min = 40 uur bedragen

5 a $T_A = T_{A,bruto} - T_C = (1600 / 20) - (80 / 50) = 80{,}0 - 1{,}6 = 78{,}4$ tpm
$\sigma_{A,bruto} = \sqrt{1600} / 20 = 2{,}0$ tpm
$\sigma_C = \sqrt{80} / 50 = 0{,}18$ tpm
$\sigma_A = \sqrt{(\sigma_{A,bruto}^2 + \sigma_C^2)} = \sqrt{(4{,}00 + 0{,}03)} = \sqrt{4{,}03} = 2{,}0$ tpm
$T_A \pm \sigma_A = 78{,}4 \pm 2{,}0$ tpm

b $T_B = T_{B,bruto} - T_C = (480 / 20) - (80 / 50) = 24{,}0 - 1{,}6 = 22{,}4$ tpm
$\sigma_{B,bruto} = \sqrt{480} / 20 = 1{,}1$ tpm
$\sigma_C = \sqrt{80} / 50 = 0{,}18$ tpm
$\sigma_B = \sqrt{(\sigma_{B,bruto}^2 + \sigma_C^2)} = \sqrt{(1{,}21 + 0{,}03)} = \sqrt{1{,}24} = 1{,}1$ 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
$\sigma_F / F = \sqrt{[(\sigma_A / T_A)^2 + (\sigma_B / T_B)^2]}$
$= \sqrt{[(2{,}0 / 78{,}1)^2 + (1{,}1 / 22{,}4)^2]}$
$= \sqrt{(0{,}000\,65 + 0{,}002\,41)} = \sqrt{0{,}003\,06} = 0{,}055$

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 $3{,}01 \rightarrow 3{,}0\times10^{0}$
b $0{,}7781 \rightarrow 7{,}781\times10^{-1}$
c $2{,}50\times10^{2} \rightarrow 3\times10^{2}$
d $0{,}865\,694\,85 \rightarrow 8{,}66\times10^{-1}$

8
- a
  - serie 1 $\bar{x}$ = 104,0
  - serie 2 $\bar{x}$ = 104,0
- b
  - serie 1 σ = 12,1
  - serie 2 σ = 2,6
- c
  - serie 1 σ = 10,2
  - serie 2 σ = 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 $^{1}_{1}\mathrm{H}$
b $^{3}_{1}\mathrm{H}$
c $^{6}_{3}\mathrm{Li}$
d $^{60}_{27}\mathrm{Co}$
e $^{137}_{55}\mathrm{Cs}$
f $^{241}_{95}\mathrm{Am}$

2 Het atoomgewicht van natrium en chloor bedraagt 22,99 respectievelijk 35,45. De constante van Avogadro is $6{,}02\times10^{23}$ mol^{-1}.

a bereken het aantal moleculen in 1 gram keukenzout (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:

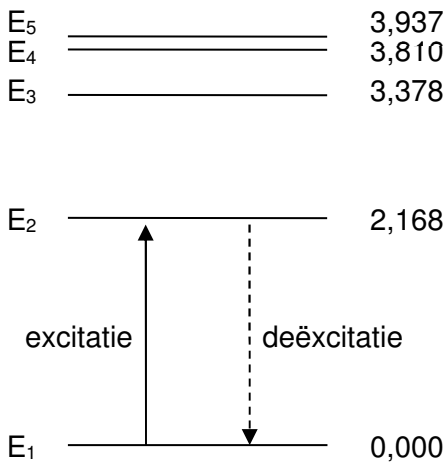
a karakteristieke K-röntgenfotonen van lood
b karakteristieke L-röntgenfotonen van lood
c karakteristieke M-röntgenfotonen van lood
d karakteristieke N-röntgenfotonen van lood

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_{Auger} ten gevolge van een gat in de K-schil van een ijzeratoom (Z = 26)
aanwijzing: gebruik de gegevens in figuur 3 van de appendix van dit oefenboek

5 In nevenstaande figuur zijn de energietoestanden (in MeV) van het nuclide ^{38}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 $(1 / 58{,}44) \times 6{,}02\times10^{23} = 1{,}0\times10^{22}$

3 a $E_{K\text{-}X}$ = 88,01 - 15,86 = 72,15 keV
b $E_{L\text{-}X}$ = 15,86 - 3,85 = 12,01 keV
c $E_{M\text{-}X}$ = 3,85 - 0,90 = 2,95 keV
d $E_{N\text{-}X}$ = 0,90 - 0,0 = 0,90 keV

4 a aflezen van figuur 3 van de appendix van dit oefenboek geeft voor de K-fluorescentie-opbrengst = ω = 0,29
N_X / N_{Auger} = ω / (1 - ω) = 0,29 / 0,71 = 0,41

5 a $E3 - E1$ = 3,378 - 0 = 3,378 MeV
$E2 - E1$ = 2,168 - 0 = 2,168 MeV
$E3 - E2$ = 3,378 - 2,168 = 1,210 MeV

5 Radioactiviteit

1 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.
- a bereken de halveringstijd
- b bereken het netto teltempo om 12:00 uur
- c controleer het onder b gevonden antwoord grafisch

2 Een geijkte hoeveelheid ^{133}Xe ($T_{½}$ = 5,25 d) heeft op maandagmorgen 9:00 uur een activiteit van 100 MBq.
- a bepaal door berekening op welk tijdstip de activiteit is gedaald tot 75 MBq
- b bepaal grafisch op welk tijdstip de activiteit is gedaald tot 75 MBq
- c bepaal volgens beide methoden de activiteit op de voorafgaande vrijdag om 15:00 uur

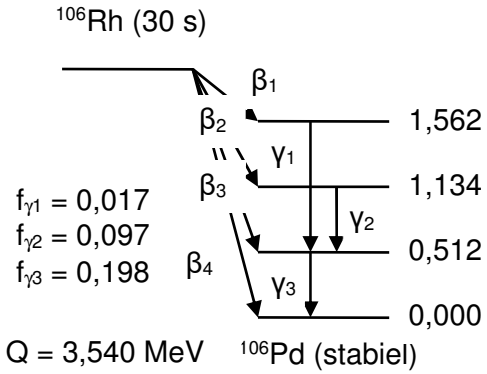
3 Een dragervrije bron van NaI met een sterkte van 37 kBq bevat als jodiumatomen uitsluitend het radionuclide ^{131}I ($T_{½}$ = 8,05 d). Het massagetal van natrium is A = 23. De constante van Avogadro is $6{,}02\times10^{23}$ mol^{-1}.
- a bereken de massa van deze radioactieve stof

4 De oude eenheid van activiteit is de curie. Deze is gedefinieerd als de activiteit van 1 gram radium.
- a bereken de activiteit (in Bq) van 1,0 gram ^{226}Ra ($T_{½}$ = 1600 j)

5 Tritium (^{3}H) is radioactief en vervalt door uitzending van een β^--deeltje naar de grondtoestand van een stabiel helium-isotoop. De maximale β^--energie is 18,6 keV. De halveringstijd is 12,33 jaar.
- a hoe groot is het energieverschil tussen begin- en eindtoestand?
- b teken het vervalschema met alle gegevens

6 Het radionuclide ^{13}N vervalt door uitzending van een positron naar de grondtoestand van het stabiele nuclide ^{13}C. De maximale β^+-energie is 1,19 MeV. De halveringstijd bedraagt 10,0 minuten.
- a hoe groot is het energieverschil tussen begin- en eindtoestand?
- b teken het vervalschema met alle gegevens

7 Gegeven is het vervalschema van het radionuclide ^{106}Rh. Er is geen interne conversie.
- a geef voor elke β-overgang de maximale energie
- b geef de emissiewaarschijnlijkheid van alle β-overgangen
- c hoeveel β-deeltjes worden per seconde door 1,0 kBq ^{106}Rh uitgezonden?
- d hoeveel γ-fotonen worden per seconde door 1,0 kBq ^{106}Rh uitgezonden?



8 Het radionuclide ^{125}I vervalt voor 100% naar een isomeer niveau van ^{125}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 α_{tot}, α_K, α_L, α_M en α_N

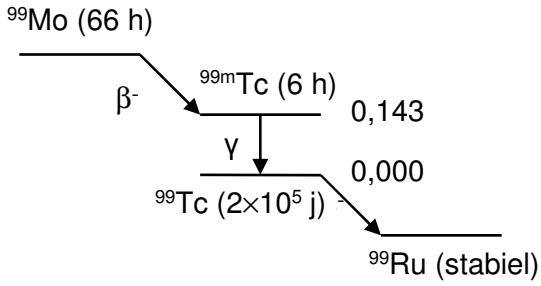
9 Het radionuclide ^{137}Cs vervalt met een emissiewaarschijnlijkheid $f_{\beta 1}$ = 0,944 naar ^{137m}Ba onder uitzending van een β^--deeltje met $E_{\beta 1,max}$ = 0,514 MeV, en in de overige gevallen vervalt het rechtstreeks naar de grondtoestand van ^{137}Ba. De energie van het isomere niveau ^{137m}Ba is 662 keV, en de conversiecoëfficiënt van de isomere overgang is α = 0,110.
a bereken de energie $E_{\beta 2,\,max}$ van de β^--overgang naar de grondtoestand van ^{137}Ba
b bereken de emissiewaarschijnlijkheid van het γ-foton
c teken het vervalschema met alle gegevens

10 Om 9:00 uur wordt een hoeveelheid ^{99m}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).

tijdstip t *(uur)*	*activiteit A* *(Bq)*
10:00	$2{,}00\times10^6$
11:00	$1{,}78\times10^6$
12:00	$1{,}59\times10^6$
13:00	$1{,}42\times10^6$
14:00	$1{,}26\times10^6$
15:00	$1{,}13\times10^6$
16:00	$1{,}00\times10^6$
17:00	$0{,}89\times10^6$

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



a wat zijn de activiteiten van ^{99}Mo en ^{99m}Tc op tijdstip $t = 6$ h ?

b wat zijn de activiteiten van ^{99}Mo en ^{99m}Tc op tijdstip $t = 66$ h ?

c wat is de activiteit van ^{99}Tc op tijdstip $t = 660$ h ?

d wat is de activiteit van ^{99}Tc op tijdstip $t = 2\times10^5$ j ?

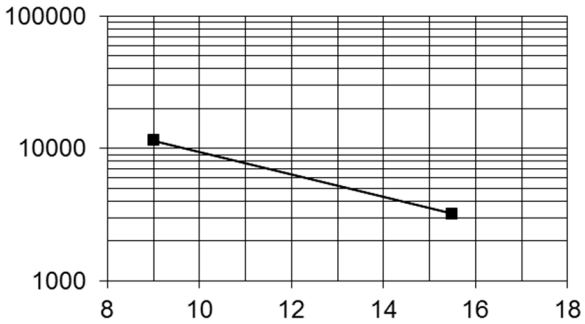
Antwoorden

1 $N(t) = N(0)\, e^{-0{,}693\, t/T_{½}}$ met $N(0) = 11\,500$

a tussen 9:00 en 15:30 liggen 6,5 uren
$N(6{,}5) = 11\,500\, e^{-0{,}693\times 6{,}5/T_{½}} = 3200$
$0{,}693 \times 6{,}5 / T_{½} = \ln(11\,500 / 3200)$
$= \ln(3{,}59) = 1{,}28$
$T_{½} = 0{,}693 \times 6{,}5 / 1{,}28 = 3{,}52$ 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

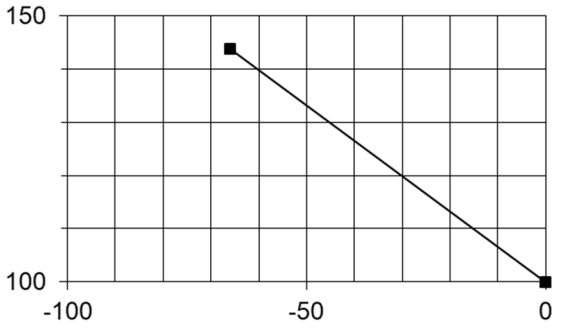


2 $T_{½} = 5{,}25 \times 24 = 126$ uur

a $e^{-0{,}693\, t/126} = 75 / 100 = 0{,}75$
$-0{,}693t / 126 = \ln(0{,}75) = -0{,}288$
$t = 0{,}288 \times 126 / 0{,}693 = 52{,}4$ 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

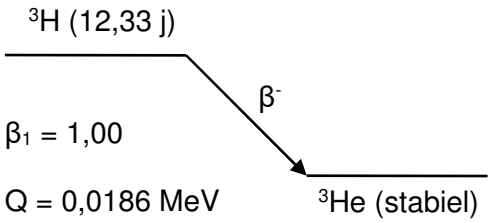


3 a $\lambda(^{131}I) = \ln(2) / (8{,}05 \times 24 \times 3600)\ s^{-1} = 9{,}97\times10^{-7}\ s^{-1}$
aantal atomen ^{131}I is $N = A / \lambda = 37\times10^{3} / 9{,}97\times10^{-7} = 3{,}7\times10^{10}$
aantal gramatomen is $N / N_{Avo} = 3{,}7\times10^{10} / 6{,}02\times10^{23} = 6{,}1\times10^{-14}$
de massa van het $Na^{131}I$ is $6{,}1\times10^{-14} \times (23 + 131) = 9{,}4\times10^{-12}$ g = 9,4 pg

4 a 1 gram ^{226}Ra = 1 / 226 mol bevat $6{,}02\times10^{23} / 226 = 2{,}664\times10^{21}$ atomen
$\lambda(^{226}Ra) = 0{,}693 / (1600 \times 365 \times 24 \times 3600) = 1{,}373\times10^{-11}\ s^{-1}$
$A = \lambda N = 2{,}664\times10^{21} \times 1{,}373\times10^{-11} = 3{,}66\times10^{10}$ Bq = 1,0 Ci

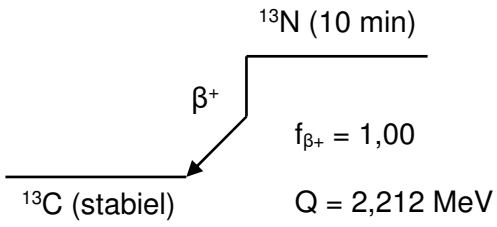
5 a $Q = E_{\beta,max} = 18{,}6$ keV = 0,0186 MeV

b zie figuur



6 a $Q = E_{\beta,\,max} + 1{,}022 = 1{,}19 + 1{,}022$
$= 2{,}212$ MeV

b zie figuur



7 a $E_{\beta 1,max}$ = 3,540 - 1,562 = 1,978 MeV
$E_{\beta 2,max}$ = 3,540 - 1,134 = 2,406 MeV
$E_{\beta 3,max}$ = 3,540 - 0,512 = 3,028 MeV
$E_{\beta 4,max}$ = 3,540 - 0,000 = 3,540 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 β-deeltje uitgezonden; bij 1 kBq geeft dit 1000 β-deeltjes per seconde

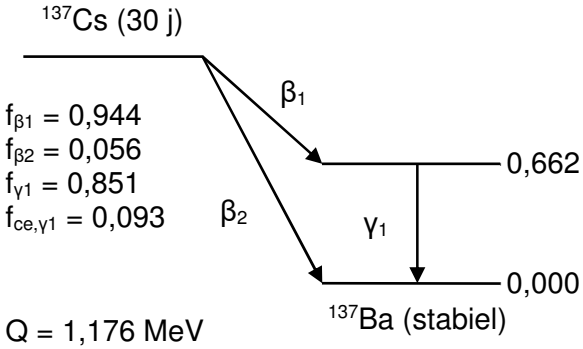
d aantal γ-fotonen is 1000 × ($f_{\gamma 1} + f_{\gamma 2} + f_{\gamma 3}$) = 1000 × (0,017 + 0,097 + 0,198) = 312 per seconde

8 a f_γ = 100% - 93,33% = 6,67%
$\alpha = N_{ce} / N_\gamma$
$\alpha_{tot} = N_{ce,tot} / N_\gamma$ = 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 MeV = Q

b $f_{\gamma 1} = f_{\beta 1} \times N_{\gamma 1} / (N_{\gamma 1} + N_{ce,\gamma 1})$
$= f_{\beta 1} / (1 + N_{ce,\gamma 1} / N_{\gamma 1})$
$= f_{\beta 1} / (1 + \alpha)$
= 0,944 / 1,110 = 0,85

c $f_{\beta 2} = 1 - f_{\beta 1} = 1 - 0,944 = 0,056$
$f_{ce,\gamma 1} = \alpha \times f_{\gamma 1} = 0,110 \times 0,85$
= 0,0935

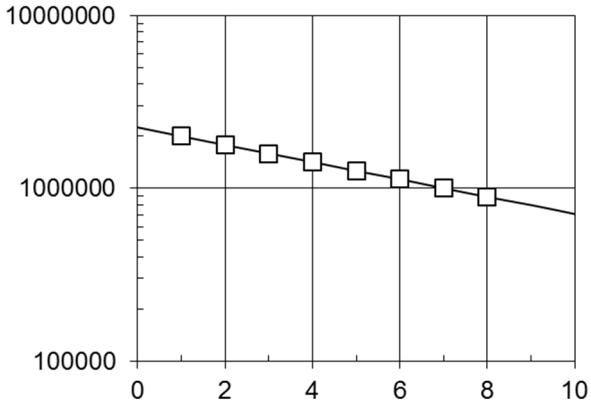


10 a zie grafiek

b extrapoleer grafiek naar 9:00 uur en lees af: 2,25×10⁶ 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 enkellogaritmisch grafiekpapier kan beschreven worden door middel van en exponentiële functie:
$A(t) = A(0)e^{-\lambda t}$
waarbij $A(0)$ en λ constantes zijn
$t = 0 \rightarrow A(0) = 2,25 \times 10^6$ s^{-1}
$t = 6 \rightarrow A = 0,5\,A(0)$
invullen van deze gegevens levert dan λ = 0,115 per uur (de tijdas is immers in uren gegeven)



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

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

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

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

invullen van $A(0)$ en λ $N = 3{,}47\times10^{10}$ desintegraties

f N als functie van t wordt verkregen door als onder- en bovengrens van de integraal 0 respectievelijk t te nemen:

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

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):

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

invullen van $A(0)$ en λ $N = 7{,}04\times10^{10}$ desintegraties
alternatief: $A = \lambda \times N$
$N = \lambda / A = 2{,}25\times10^{6}\ \mathrm{s^{-1}} \times 3600\ \mathrm{s\cdot h^{-1}} / 0{,}115\ \mathrm{h^{-1}} = 7{,}04\times10^{10}$

11 ^{99}Mo vervalt met $T_{½}$ = 66 h
^{99m}Tc groeit eerst in met $T_{½}$ = 6 h en vervalt vervolgens samen met ^{99}Mo met $T_{½}$ = 66 h
^{99}Tc groeit eerst in met $T_{½}$ = 66 h en vervalt vervolgens met $T_{½} = 2\times10^{5}$ 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}Mo is een beetje vervallen en ^{99m}Tc is voor de helft ingegroeid
$A(^{99}\mathrm{Mo}, t{=}6\ \mathrm{h}) = \mathrm{e}^{-0{,}693\times6/66} \times A(^{99}\mathrm{Mo}, t{=}0) = 0{,}9 \times 1{,}0\ \mathrm{GBq} = 0{,}9\ \mathrm{GBq}$
$A(^{99m}\mathrm{Tc}, t{=}6\ \mathrm{h}) \approx 0{,}5 \times A(^{99}\mathrm{Mo}, t{=}6\ \mathrm{h}) = 0{,}45\ \mathrm{GBq}$

b ^{99}Mo is voor de helft vervallen en ^{99m}Tc is hiermee in evenwicht
$A(^{99}\mathrm{Mo}, t{=}66\ \mathrm{h}) = 0{,}5 \times A(^{99}\mathrm{Mo}, t{=}0) = 0{,}5 \times 1{,}0\ \mathrm{GBq} = 0{,}5\ \mathrm{GBq}$
$A(^{99m}\mathrm{Tc}, t{=}66\ \mathrm{h}) \approx A(^{99}\mathrm{Mo}, t{=}66\ \mathrm{h}) = 0{,}5\ \mathrm{GBq}$

c ^{99}Mo en ^{99m}Tc zijn nagenoeg geheel vervallen en er zijn evenveel ^{99}Tc-atomen als er ^{99}Mo-atomen waren op tijdstip $t = 0$
bedenk dat $A = \lambda N = 0{,}693 \times N / T_{½}$
$A(^{99}\mathrm{Tc}, t{=}660\ \mathrm{h}) / A(^{99}\mathrm{Mo}, t{=}0) = T_{½}(^{99}\mathrm{Mo}) / T_{½}(^{99}\mathrm{Tc}) = 66\ \mathrm{h} / 2\times10^{5}\ \mathrm{j} = 4\times10^{-8}$
$A(^{99}\mathrm{Tc}, t{=}660\ \mathrm{h}) = 4\times10^{-8} \times A(^{99}\mathrm{Mo}, t{=}0) = 4\times10^{-8} \times 1{,}0\ \mathrm{GBq} = 40\ \mathrm{Bq}$

d van ^{99}Mo en ^{99m}Tc is geen spoor meer te bekennen en het gevormde ^{99}Tc is voor de helft vervallen:
$A(^{99}\mathrm{Tc}, t{=}2\times10^{5}\ \mathrm{j}) = 0{,}5 \times A(^{99}\mathrm{Tc}, t{=}660\ \mathrm{h}) = 0{,}5 \times 40\ \mathrm{Bq} = 20\ \mathrm{Bq}$

6 Wisselwerking van straling met materie

1 Een radioactieve puntbron van 1 MBq zendt 1 γ-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:
a $^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow\ ?\ + \mathrm{n}$
b $^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{12}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N} + \ ?$
c $^{6}_{3}\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow\ ?\ + \alpha$
d $^{9}_{4}\mathrm{Be} + \gamma \rightarrow\ ?\ + 2\alpha$

3 Gegeven is de volgende formule voor de massieke dracht van een α-deeltje:

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

Hierin is E (in MeV) de energie van het α-deeltje, A het (effectieve) massagetal van de materie en $R_{\alpha,\mathrm{L}}$ (in cm) de lineïeke dracht in lucht.
a bereken de lineïeke dracht in water van α-deeltjes met een energie van 5 MeV
aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel $R_{\alpha,L} = 0{,}3\ E^{3/2}$

4 Men wil een bolvormige, met lucht gevulde ionisatiekamer construeren. In het centrum zal een radioactieve bron worden geplaatst, die α-deeltjes met een energie van 8 MeV uitzendt.
a hoe groot moet de straal minimaal zijn, opdat de α-deeltjes al hun energie aan de lucht in de ionisatiekamer afgeven?
aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel $R_{\alpha,L} = 0{,}3\ E^{3/2}$

5 Een α-detector bestaat uit een ZnS-scintillator met fotomultiplicatorbuis. De scintillator is afgedekt met een aluminiumfolie met een dikte van 1,5 mg·cm^{-2}. Tussen folie en bron bevindt zich 0,5 cm lucht. Het atoomgewicht van aluminium is A = 27, de dichtheid van aluminium is ρ_{Al} = 2,7 g·cm^{-3}, en de dichtheid van lucht is ρ_{lucht} = 1,2 mg·cm^{-3}.
a bereken de energie die de α-deeltjes tenminste moeten bezitten opdat deze de ZnS-scintillator kunnen bereiken
aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel $R_{\alpha,L} = 0{,}3\ E^{3/2}$

6 In het centrum van een bolvormige ionisatiekamer met een straal van 5 cm wordt een β-bron geplaatst. Het telgas is argon waarvan de soortelijke massa ρ_{Ar} = 1,784 mg·cm^{-3} bedraagt bij 0° C en 1 atm. Hoe groot moet de druk in de ionisatiekamer minimaal zijn opdat de volledige β-energie wordt afgegeven aan het telgas in het geval van
a $^{3}\mathrm{H}$ ($E_{\beta,\mathrm{max}}$ = 18 keV)
b $^{63}\mathrm{Ni}$ ($E_{\beta,\mathrm{max}}$ = 67 keV)
c $^{14}\mathrm{C}$ ($E_{\beta,\mathrm{max}}$ = 156 keV)
aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel $R_{\beta,max}\ \rho = 0{,}5\ E_{\beta,max}$

7 Bereken de omzettingsfactor g voor remstraling in het geval dat de β-straling van het radionuclide ^{32}P ($E_{\beta,max}$ = 1,71 MeV) gestopt wordt in
a aluminium (Z = 13)
b koper (Z = 29)
c lood (Z = 82)

8 Een van de natuurlijk voorkomende radionucliden is ^{208}Tl dat een γ-foton met een energie van 2,6 MeV uitzendt.
a bereken de relatieve bijdragen van foto-effect, Compton-effect en paarvorming tot de verzwakking van deze γ-straling in lood
aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in figuur 5 van de appendix van dit oefenboek

9 Een foton met een energie van 10 MeV wordt over een hoek θ verstrooid.
a bereken de de energie van het verstrooide foton als θ = 10°
b bereken de de energie van het verstrooide foton als θ = 90°
c bereken de de energie van het verstrooide foton als θ = 180°

10 Voor de productie van ^{60}Co bestraalt men 10 g kobalt met thermische neutronen. De neutronenfluxdichtheid is $\varphi = 2\times10^{14}$ cm^{-2}·s^{-1} en de werkzame doorsnede voor neutronactivering ist σ = 38 b. De constante van Avogadro is $6{,}02\times10^{23}$ mol^{-1}. De halveringstijd van ^{60}Co is $T_{½}$ = 5,27 j. Natuurlijk kobalt bestaat voor 100% uit het isotoop ^{59}Co.
a bereken de gevormde activiteit na 1 dag
b bereken de gevormde activiteit na 1 maand
c bereken de gevormde activiteit na 1 jaar

Antwoorden

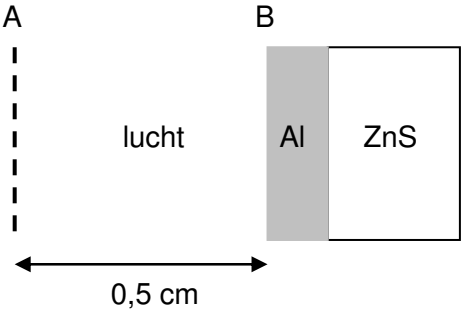
1 a $\varphi = A f_\gamma / (4\pi r^2) = 1\times10^6 \times 1 / (4\pi \times 1^2) = 8{,}0\times10^4\ m^{-2}\cdot s^{-1}$

2 a $^{12}_{6}C$
b n
c $^{3}_{1}H$
d n

3 a $1 / \sqrt{A_{eff}} = (2/18) / \sqrt{1} + (16/18)/ \sqrt{16} = 0{,}11 + 0{,}22 = 0{,}33$
$A_{eff} = (1 / 0{,}33)^2 = 9{,}2$
$R_{\alpha,L} = 0{,}3\ E^{3/2} = 0{,}3 \times 5^{3/2} = 3{,}35$ cm
$R_\alpha\ \rho = 3{,}2\times10^{-4} \times \sqrt{9{,}2} \times 3{,}35 = 3{,}3\times10^{-3}\ g\cdot cm^{-1}$
$R_\alpha = 3{,}3\times10^{-3}\ g\cdot cm^{-1} / 1\ g\cdot cm^{-3} = 3{,}3\times10^{-3}$ cm $= 33\ \mu m$

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

5 a dikte aluminium $1{,}5\times10^{-3}\ g\cdot cm^{-2} / 2{,}7\ g\cdot cm^{-3}$
$= 0{,}56\times10^{-3}$ cm
in punt B moet de dracht in aluminium minimaal $0{,}56\times10^{-3}$ cm bedragen
$R_{\alpha,Al} = 3{,}2\times10^{-4}\ (\sqrt{A} / \rho)\ R_L$ (zie oefening 3)
$= 3{,}2\times10^{-4} \times (\sqrt{27} / 2{,}7)\ R_L$
$= 6{,}16\times10^{-4}\ R_L$
$= 0{,}56\times10^{-3}$ cm
$R_{\alpha,L} = 0{,}56\times10^{-3} / 6{,}16\times10^{-4} = 0{,}9$ cm
in punt A moet de dracht in lucht minimaal 0,5 + 0,9 = 1,4 cm bedragen
$E_\alpha = (1{,}4 / 0{,}3)^{2/3} = 2{,}8$ MeV



6 massieke straal ionisatiekamer $R\rho = 5\ cm \times 1{,}784\ mg\cdot cm^{-3} = 8{,}9\ mg\cdot cm^{-2}$ (0° C, 1 atm)
a $R\rho = 0{,}5 \times 0{,}018 = 9\times10^{-3}\ g\cdot cm^{-2} = 9\ mg\cdot cm^{-2}$
minimale druk = 1 atm × (9 mg·cm⁻² / 8,9 mg·cm⁻²) = 1,0 atm bij 0° C
b $R\rho = 0{,}5 \times 0{,}067 = 34\times10^{-3}\ g\cdot cm^{-2} = 34\ mg\cdot cm^{-2}$
minimale druk = 1 atm × (34 mg·cm⁻² / 8,9 mg·cm⁻²) = 3,8 atm bij 0° C
c $R\rho = 0{,}5 \times 0{,}156 = 78\times10^{-3}\ g\cdot cm^{-2} = 78\ mg\cdot cm^{-2}$
minimale druk = 1 atm × (78 mg·cm⁻² / 8,9 mg·cm⁻²) = 8,8 atm bij 0° C

7 $g = 2\times10^{-4}\ ZE_{max}$
a $2\times10^{-4} \times 13 \times 1{,}71 = 0{,}004$
b $2\times10^{-4} \times 29 \times 1{,}71 = 0{,}010$
c $2\times10^{-4} \times 82 \times 1{,}71 = 0{,}028$

8 a volgens formule (6.11) van de syllabus is de verzwakking (= aantal wisselwerkingen) evenredig met μ
aflezen van figuur 5 van de appendix van dit oefenboek geeft:

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

9 de Compton-formule luidt

$$E'_{\mathrm{f}} = \frac{E_{\mathrm{f}}}{1 + \frac{E_{\mathrm{f}}}{0{,}511}[1 - \cos(\theta)]}$$

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

b $\theta = 90°$ $\cos(90°) = 0$
$E' = 10 \text{ MeV} / [1 + (10 / 0{,}511)(1 - 0)] = 0{,}49 \text{ MeV}$

c $\theta = 180°$ $\cos(180°) = -1$
$E' = 10 \text{ MeV} / [1 + (10 / 0{,}511)(1 + 1)] = 0{,}25 \text{ MeV}$

10 activiteit $A = \sigma\, n\, \varphi\, (1 - e^{-\lambda t}) \approx \sigma\, n\, \varphi\, \lambda\, t$
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 $g \cdot cm^{-3}$.
   a bereken het exposietempo, uitgaande van de omrekeningsfactor:
      $1\ R \rightarrow 2{,}58 \times 10^{-4}\ C \cdot kg^{-1}$
   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:
   $1\ R \rightarrow 2{,}58 \times 10^{-4}\ C \cdot kg^{-1}$
   $1\ R \rightarrow 8{,}695\ mGy$
   $1\ Ci = 3{,}7 \times 10^{10}\ Bq$
   a druk $1\ R \cdot m^2 \cdot Ci^{-1} \cdot h^{-1}$ uit in de eenheid $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot h^{-1}$
   b druk $1\ Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot h^{-1}$ uit in de eenheid $A \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot kg^{-1}$

4 In een fotonenveld (E = 0,5 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 figuur 4 van de appendix van dit oefenboek

5 Een radioactieve bron zendt een γ-foton uit met een energie van 2,6 MeV en een emissiewaarschijnlijkheid van 100%.
   a maak een schatting van de bronconstante (in $\mu Gy \cdot h^{-1} \cdot MBq^{-1} \cdot m^2$)
   aanwijzing: maak gebruik van de vuistregel $d_\gamma = E_\gamma / 7$

Antwoorden

1 a 1 R / elektronlading = $2{,}58\times10^{-4}$ C·kg^{-1} / $1{,}6\times10^{-19}$ C = $1{,}6125\times10^{15}$ ionen per kg
energie per massa E / m = $1{,}6125\times10^{15}$ kg^{-1} × 33,7 eV × $1{,}6\times10^{-19}$ J·eV^{-1}
= $8{,}695\times10^{-3}$ J·kg^{-1} = 8,695 mGy.

2 a lading per tijd $\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$ = 10 pA = 10×10^{-12} C s^{-1}
massa m = 500 ml × 0,0012 g·ml^{-1} = 0,6 g = $0{,}6\times10^{-3}$ kg
exposietempo $\mathrm{d}X/\mathrm{d}t = \mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$ / m
= 10×10^{-12} C·s^{-1} / [$0{,}6\times10^{-3}$ kg × $2{,}58\times10^{-4}$ C·kg^{-1} per R]
= $6{,}46\times10^{-5}$ R·s^{-1} = 0,23 R·h^{-1}

b lading per tijd 10 pA = 10×10^{-12} C·s^{-1}
ionen per tijd 10×10^{-12} C·s^{-1} / $1{,}6\times10^{-19}$ C = $6{,}25\times10^{7}$ s^{-1}
energie per tijd $\mathrm{d}E/\mathrm{d}t$ = $6{,}25\times10^{7}$ s^{-1} × 33,7 eV × $1{,}6\times10^{-19}$ J·eV^{-1}
= $3{,}37\times10^{-10}$ J·s^{-1}
massa m = 500 ml × 0,0012 g·ml^{-1} = 0,6 g = $0{,}6\times10^{-3}$ kg
geabsorbeerde dosistempo $\mathrm{d}D/\mathrm{d}t = \mathrm{d}E/\mathrm{d}t$ / m
= $3{,}37\times10^{-10}$ J·s^{-1} / $0{,}6\times10^{-3}$ kg
= $5{,}62\times10^{-7}$ Gy·s^{-1} = 2,0 mGy·h^{-1}
dus $6{,}46\times10^{-5}$ R·s^{-1} komt overeen met $5{,}62\times10^{-7}$ Gy·s^{-1}, ofwel 1 R correspondeert met 8,7 mGy

3 a 1 R·m^2·Ci^{-1}·h^{-1} = 1 R·m^2·Ci^{-1}·h^{-1} × 0,008695 Gy·R^{-1} × 1 Sv·Gy^{-1} / $3{,}7\times10^{10}$ Bq·Ci^{-1}
= $2{,}35\times10^{-13}$ Sv·m^2·Bq^{-1}·h^{-1}

b 1 Sv·m^2·Bq^{-1}·h^{-1} = 1 Sv·m^2·Bq^{-1}·h^{-1} × 1 Gy·Sv^{-1} / (0,008695 Gy·R^{-1} × 3600 s·h^{-1})
= 0,03195 R·s^{-1}·m^2·Bq^{-1}
= 0,03195 R·s^{-1}·m^2·Bq^{-1} × $2{,}58\times10^{-4}$ C·kg^{-1} per R
= $8{,}24\times10^{-6}$ C·kg^{-1}·s^{-1} m^2·Bq^{-1}
= $8{,}24\times10^{-6}$ A·m^2·Bq^{-1}·kg^{-1}

4 kerma is evenredig met μ_{tr}/ρ
geabsorbeerde dosis is evenredig met μ_{en}/ρ
a geabsorbeerde dosis in lucht = 1,0 mGy × (0,0296 / 0,0296) = 1,0 mGy
b kerma in spierweefsel = 1,0 mGy × (0,0328 / 0,0296) = 1,11 mGy
c geabsorbeerde dosis in bot = 1,0 mGy × (0,0317 / 0,0296) = 1,07 mGy

5 a d_γ = 2,6 / 7 = 0,36 µGy·h^{-1}·MBq^{-1}·m^2

8 Biologische gevolgen van straling

9 Operationele dosimetrie

1 In een gemengd stralingsveld loopt een werknemer een exposie op van 70 mR ten gevolge van γ-fotonen en een geabsorbeerde dosis van 0,5 mGy ten gevolge van neutronen. De stralingsweegfactor van de neutronen is $w_{\text{neutron}} = 8\ \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$. Ga er vanuit dat het gehele lichaam gelijkmatig is bestraald. Gebruik de omrekeningsfactor

1 R → 0,01 Gy.

a bereken de effectieve dosis

2 De bijdrage tot de effectieve dosis ten gevolge van bestraling van de longen door de α-emitter radon bedraagt 0,90 mSv per jaar. De stralingsweegfactor voor α-straling is 20 en de weefselweegfactor 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 figuur 6 van de appendix van dit oefenboek

4 In een veld van 20 keV fotonen bedraagt het fluentietempo $\varphi = 1{,}0\times10^{9}\ \text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. 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 figuur 7 van de appendix dit oefenboek

5 In een veld van thermische neutronen met energie $E_n = 25$ 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 figuur 8 van de appendix dit oefenboek

Antwoorden

1 omdat het hele lichaam gelijkmatig is bestraald, is equivalente dosis = effectieve dosis

a bijdrage gammastraling

stralingsweegfactor	$w_{\gamma\text{-straling}} = 1\ \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$
effectieve dosis	$1\ \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1} \times 70\ \text{mR} \times 0{,}01\ \text{Gy}\cdot\text{R}^{-1} = 0{,}70\ \text{mSv}$

bijdrage neutronenstraling

stralingsweegfactor	$w_{\text{neutron}} = 8\ \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$
effectieve dosis	$8\ \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1} \times 0{,}5\ \text{mGy} = 4{,}0\ \text{mSv}$
totale effectieve dosis	$E = 0{,}7\ \text{mSv} + 4{,}0\ \text{mSv} = 4{,}7\ \text{mSv}$

2 a equivalente longdosis $H_{\text{long}} = E / w_{\text{long}} = 0{,}90\ \text{mSv}\cdot\text{j}^{-1} / 0{,}12 = 7{,}5\ \text{mSv}\cdot\text{j}^{-1}$

b stralingsweegfactor α-straling $w_{\alpha\text{-straling}} = 20\ \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1}$

geabsorbeerde jaardosis $D_{\text{long}} = H_{\text{long}} / w_{\alpha\text{-straling}} = 7{,}5\ \text{mSv}\cdot\text{j}^{-1} / 20\ \text{Sv}\cdot\text{Gy}^{-1} = 0{,}38\ \text{mGy}$

3 aflezen van figuur 6 van de appendix 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 figuur 7 van de appendix van dit oefenboek bij 0,02 MeV geeft

a $K_a = 1{,}3\ \text{pGy}\cdot\text{cm}^2 \times \varphi = 1{,}3\times10^{-12}\ \text{Gy}\cdot\text{cm}^2 \times 1{,}0\times10^{9}\ \text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 1{,}3\times10^{-3}\ \text{Gy}\cdot\text{s}^{-1} = 1{,}3\ \text{mGy}\cdot\text{s}^{-1}$

b $H^*(10) = 1{,}0\ \text{pSv}\cdot\text{cm}^2 \times \varphi = 1{,}0\times10^{-12}\ \text{Sv}\cdot\text{cm}^2 \times 1{,}0\times10^{9}\ \text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 1{,}0\times10^{-3}\ \text{Sv}\cdot\text{s}^{-1} = 1{,}0\ \text{mSv}\cdot\text{s}^{-1}$

c $E(\text{AP}) = 0{,}2\ \text{pSv}\cdot\text{cm}^2 \times \varphi = 0{,}2\times10^{-12}\ \text{Sv}\cdot\text{cm}^2 \times 1{,}0\times10^{9}\ \text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 0{,}2\times10^{-3}\ \text{Sv}\cdot\text{s}^{-1} = 0{,}2\ \text{mSv}\cdot\text{s}^{-1}$

5 aflezen van figuur 8 van de appendix van dit oefenboek bij 0,025 eV geeft $K_a = 0{,}2\ \text{pGy}\cdot\text{cm}^2$

a $H^*(10) = 10\ \text{pSv}\cdot\text{cm}^2 \rightarrow H^* = (10\ \text{pSv}\cdot\text{cm}^2 / 0{,}2\ \text{pGy}\cdot\text{cm}^2) \times 1\ \text{mGy} = 50\ \text{mSv}$

b $E(\text{AP}) = 7\ \text{pSv cm}^2 \rightarrow H^* = (7\ \text{pSv}\cdot\text{cm}^2 / 0{,}2\ \text{pGy}\cdot\text{cm}^2) \times 1\ \text{mGy} = 35\ \text{mSv}$

10 Dosimetrie van inwendige besmetting

1 Een laborant raakt via ingestie besmet met ^{111}In ($T_{½}$ = 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 vervalt. De dosisconversiecoëfficiënt van ^{111}In voor ingestie is $e(50)_{\text{ingestie}} = 2{,}9\times10^{-10}$ Sv·Bq^{-1}.

a bereken de ingenomen activiteit
b bereken de effectieve volgdosis
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}Cl ($T_{½}$ = 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}Cl te bedragen. De meting werd 60 min na het incident verricht. De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie van ^{38}Cl is $e(50)_{\text{inhalatie}} = 4{,}6\times10^{-11}$ Sv·Bq^{-1}.

a bereken de effectieve volgdosis voor het geval dat AMAD = 0,1 µm
b bereken de effectieve volgdosis voor het geval dat AMAD = 1 µm
c bereken de effectieve volgdosis voor het geval dat AMAD = 10 µm
aanwijzing: gebruik de gegevens in figuur 9 van de appendix 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}Co gemeten. De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie is $e(50)_{\text{inhalatie}} = 1{,}7\times10^{-8}$ 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 volgdosis 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}Pu in de urine van de vorige dag aangetroffen. De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie is $e(50)_{\text{inhalatie}} = 8{,}3\times10^{-6}$ Sv·Bq^{-1}. Volgens de gegevens van de ICRP wordt gedurende de eerste dag na inname $1{,}7\times10^{-5}$ Bq uitgescheiden met de urine, per becquerel ingeademde activiteit.

a bereken de activiteit die de werknemer heeft ingeademd
b bereken de effectieve volgdosis
c hoe groot is de kans dat deze werknemer zal overlijden ten gevolge van botkanker?

5 Het radionuclide ^{85}Kr is een splijtingsproduct dat in de atmosfeer voorkomt met een concentratie van 1 $Bq \cdot m^{-3}$. De dosisconversiecoëfficiënt van ^{85}Kr voor submersie is $e = 2{,}2 \times 10^{-11}$ $Sv \cdot d^{-1}$ per $Bq \cdot m^{-3}$.
   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 $1 - f_1 = 1 - 0{,}02 = 0{,}98$ uitgescheiden met de ontlasting
na verval resteert een fractie $e^{-0{,}693t/T_{½}} = e^{-0{,}693\times1{,}0/2{,}8} = 0{,}78$ van de activiteit
ingestie $A_{ingestie} = 80\ kBq / (0{,}98 \times 0{,}78) = 105\ kBq = 105\times10^3\ Bq$

b effectieve volgdosis $E(50) = e(50)_{ingestie} \times A_{ingestie}$
$= 2{,}9\times10^{-10}\ Sv\cdot Bq^{-1} \times 105\times10^3\ Bq = 3{,}0\times10^{-5}\ Sv = 30\ \mu Sv$

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 µm
gedeponeerde fractie $ET_1 = 0{,}03$
vervalcorrectie $e^{-0{,}693t/T_{½}} = e^{-0{,}693\times60/37{,}2} = 0{,}33$
inhalatie $A_{inhalatie} = 40\ kBq / (0{,}03 \times 0{,}33) = 4{,}0\times10^3\ kB = 4{,}0\times10^6\ Bq$
effectieve volgdosis $E(50) = e(50)_{inhalatie} \times A_{inhalatie}$
$= 4{,}6\times10^{-11}\ Sv\cdot Bq^{-1} \times 4{,}0\times10^6\ Bq$
$= 0{,}18\times10^{-3}\ Sv = 180\ \mu Sv$

b AMAD = 1 µm
gedeponeerde fractie $ET_1 = 0{,}17$
inhalatie $A_{inhalatie} = 40\ kBq / (0{,}17 \times 0{,}33) = 0{,}71\times10^3\ kB = 0{,}71\times10^6\ Bq$
effectieve volgdosis $E(50) = e(50)_{inhalatie} \times A_{inhalatie}$
$= 4{,}6\times10^{-11}\ Sv\cdot Bq^{-1} \times 0{,}71\times10^6\ Bq$
$= 3{,}3\times10^{-5}\ Sv = 33\ \mu Sv$

c AMAD = 10 µm
gedeponeerde fractie $ET_1 = 0{,}35$
inhalatie $A_{inhalatie} = 40\ kBq / (0{,}35 \times 0{,}33) = 0{,}35\times10^3\ kB = 0{,}35\times10^6\ Bq$
effectieve volgdosis $E(50) = e(50)_{inhalatie} \times A_{inhalatie}$
$= 4{,}6\times10^{-11}\ Sv\cdot Bq^{-1} \times 0{,}35\times10^6\ Bq$
$= 1{,}6\times10^{-5}\ Sv = 16\ \mu Sv$

3 a na 6 uur resteert 74% van de ingenomen activiteit.
inhalatie $A_{inhalatie} = 1{,}0\ kBq / 0{,}74 = 1{,}4\ kBq = 1{,}4\times10^3\ Bq$

b effectieve volgdosis $E(50) = e(50)_{inhalatie} \times A_{inhalatie}$
$= 1{,}7\times10^{-8}\ Sv\cdot Bq^{-1} \times 1{,}4\times10^3\ Bq$
$= 2{,}4\times10^{-5}\ Sv = 24\ \mu Sv$

4 a ingeademde activiteit $A_{inhalatie} = 10\ Bq\cdot d^{-1} / 1{,}7\times10^{-5}\ Bq\cdot d^{-1}\ per\ Bq = 6\times10^5\ Bq$

b effectieve volgdosis $E(50) = e(50)_{inhalatie} \times A_{inhalatie}$
$= 8{,}3\times10^{-6}\ Sv\cdot Bq^{-1} \times 6\times10^5\ Bq = 5\ Sv$

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 $5\ Sv \times 5\%\ per\ Sv = 25\%$

5 a $dE/dt = 2{,}2\times10^{-11}\ Sv\cdot d^{-1}\ per\ Bq\cdot m^{13} \times 1\ Bq\cdot m^{-3} = 2{,}2\times10^{-11}\ Sv\cdot d^{-1}$
$= 2{,}2\times10^{-11}\ Sv\cdot d^{-1} / 24\ h\cdot d^{-1} = 9{,}2\times10^{-13}\ Sv\cdot h^{-1}$

b $E = 2{,}2\times10^{-11}\ Sv\cdot d^{-1} \times 365\ d\cdot j^{-1} = 8{,}0\times10^{-9}\ Sv\cdot j^{-1} = 8{,}0\ nSv\cdot j^{-1}$

11 Detectie van straling

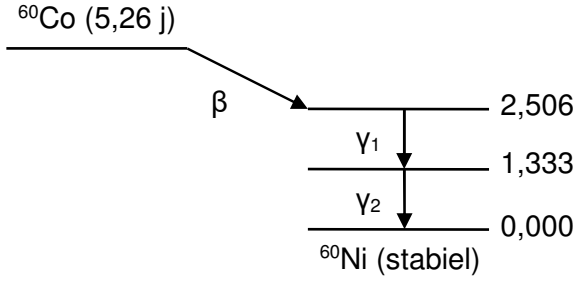
1 Door homogene bestraling van het telgas in een ionisatiekamer met γ-straling worden er per minuut $3{,}6\times10^4$ ionen gevormd. Per ionisatie wordt een energie van 33,7 eV afgegeven. De massa van het telgas bedraagt 120 mg.
- a hoe groot is de gevormde negatieve lading in coulomb per minuut?
- b hoe groot is de gevormde positieve lading in coulomb per minuut?
- c hoe groot is de stroom (in ampère) door de ionisatiekamer?

2 Men monteert een bron van de α-emitter ^{210}Po met een activiteit van 10 kBq in een ionisatiekamer. De α-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.
- a bereken het aantal ionen dat per seconde wordt gevormd
- b bereken de stroom die door de kamer loopt als deze in het ionisatiegebied werkt
- c 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 β-preparaat wordt een GM-telbuis gebruikt. De teller geeft een teltempo van $6{,}0\times10^4$ telpulsen per minuut (tpm) aan.
- a bereken het ware teltempo als de dode tijd van de teller 180 μs is
- b wat zou het ware teltempo geweest zijn als de meting was verricht met een proportionele telbuis met een dode tijd van 15 μs ?

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 mg·cm^{-3}. De massaverzwakkings-coëfficiënt van argon voor de K_α-lijn van koper (8 keV) en de K_α-lijn van molybdeen (13 keV) is 112 cm^2·g^{-1} respectievelijk 27,5 cm^2·g^{-1}.
- a bereken het detectorrendement bij 8 keV
- b bereken het detectorrendement bij 13 keV

5 Gegeven is het vervalschema van het nuclide ^{60}Co. Op 65 cm van een puntvormige ^{60}Co-bron is de fotonenfluxdichtheid 1400 cm^{-2}·s^{-1}.
- a bereken de activiteit van deze bron



6 Het radionuclide ^{32}P emitteert per desintegratie één β-deeltje van hoge energie. Zelfabsorptie in de bron en absorptie in lucht mogen worden verwaarloosd.
- a bereken de fluxdichtheid op 50 cm van een bron van 37 MBq ^{32}P
- b bereken het teltempo (in tps) als men op 50 cm afstand van de bron een detector opstelt met een venster van 1 cm^2 loodrecht op de stralingsrichting
  aanwijzing: neem aan dat het telrendement van de detector 100% bedraagt

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 cm² loodrecht op de stralingsrichting meet men op een afstand van 100 cm van een ^{42}K-bron een netto-teltempo van 175 telpulsen per minuut. Het radionuclide ^{42}K emitteert in 82% van de gevallen een β-deeltje met $E_{\beta 1,\max}$ = 3,5 MeV en in 18% van de gevallen een β-deeltje met $E_{\beta 2,\max}$ = 2,0 MeV. Er is geen absorptie.

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

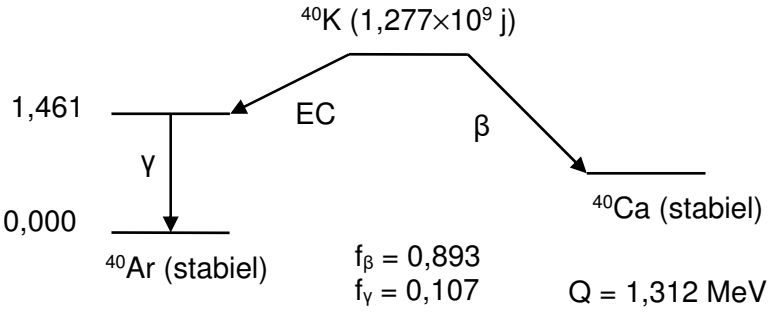
b bereken de activiteit van de bron

9 Een zeer uitgebreide uniforme oppervlaktebesmetting van 5 Bq·cm^{-2} ^{14}C wordt gemeten met een GM-telbuis met een venster van 7 cm² en een nuleffect van 20 telpulsen per minuut, en eveneens met een proportionele telbuis met een gevoelig oppervlak van 10 cm × 10 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 2,30×10^{-2} telpulsen per seconde, gemeten in 65 uur,. Het rendement voor een β-emitter met eindpuntsenergie $E_{\beta,\max}$ = 1,35 MeV en emissierendement f_β =1 is $f_{\text{geo}} \times f_{\text{det}}$ = 0,28. De monitor is ongevoelig voor γ-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}K-activiteit die overeenkomt met de bovengrens van het bij b gevonden interval

Antwoorden

1 a negatieve lading $3{,}6\times10^{4}\ \text{min}^{-1} \times 1{,}6022\times10^{-19}\ \text{C} = 5{,}76\times10^{-15}\ \text{C}\cdot\text{min}^{-1}$
b positieve lading eveneens $5{,}76\times10^{-15}\ \text{C}\cdot\text{min}^{-1}$
c stroom $5{,}76\times10^{-15}\ \text{C}\cdot\text{min}^{-1} = 0{,}96\times10^{-16}\ \text{C s}^{-1} = 0{,}96\times10^{-16}\ \text{A}$

2 a afgegeven energie $10^{4}\ \text{Bq} \times 5{,}5\times10^{6}\ \text{eV per Bq}\cdot\text{s} = 5{,}5\times10^{10}\ \text{eV}\cdot\text{s}^{-1}$
aantal ionen $5{,}5\times10^{10}\ \text{eV}\cdot\text{s}^{-1} / 33{,}7\ \text{eV} = 1{,}63\times10^{9}\ \text{s}^{-1}$
b geen gasversterking $I = 1{,}63\times10^{9}\ \text{s}^{-1} \times 1{,}6022\times10^{-19}\ \text{C}$
$= 2{,}6\times10^{-10}\ \text{C}\cdot\text{s}^{-1} = 0{,}26\ \text{nA}$
c 16 maal zo groot als bij vraag b, dus $16 \times 0{,}26\ \text{nA} = 4{,}2\ \text{nA}$

3 a gemeten teltempo $= 6\times10^{4}\ \text{tpm} / 60\ \text{s}\cdot\text{min}^{-1} = 1\times10^{3}\ \text{tps}$
$T_W = 1\times10^{3} / (1 - 180\times10^{-6}\ \text{s} \times 1{,}0\times10^{3}\ \text{s}^{-1})$
$= 1\times10^{3} / (1 - 0{,}18) = 1\times10^{3} / 0{,}82 = 1{,}22\times10^{3}\ \text{tps}$
b $T_W = 1\times10^{3} / (1 - 15\times10^{-6}\ \text{s} \times 1{,}0\times10^{3}\ \text{s}^{-1})$
$= 1\times10^{3} / (1 - 0{,}015) = 1\times10^{3} / 0{,}985 = 1{,}02\times10^{3}\ \text{tps}$

4 de massieke laagdikte is $d\rho = 3{,}5\ \text{cm} \times 1{,}66\times10^{-3}\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3} = 0{,}0058\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
a transmissie bij 8 keV $T = e^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = e^{-112\times0{,}0058} = 0{,}52$
detectorefficiëntie $f_{det} = 1 - T = 1 - 0{,}52 = 0{,}48$
b transmissie bij 13 keV $T = e^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = e^{-27{,}5\times0{,}0058} = 0{,}85$
detectorefficiëntie $f_{det} = 1 - T = 1 - 0{,}85 = 0{,}15$

5 a $\Phi(R)$ = (aantal fotonen) / (oppervlak bol met straal R)
fotonen per verval 2
fluxdichtheid $\Phi = 2 \times A$ / (oppervlak bol met straal 65 cm)
$= 2 \times A / (4\pi \times 65^2) = 3{,}77\times10^{-5}\ A$
$= 1400\ \text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
activiteit $A = 1400 / 3{,}77\times10^{-5} = 3{,}7\times10^{7}\ \text{Bq} = 37\ \text{MBq}$

6 a $\Phi(R)$ = (aantal fotonen) / (oppervlak bol met straal R)
deeltjes per verval 1
fluxdichtheid $\Phi = 1 \times 37\times10^{6} / (4\pi \times 50^2) = 1{,}18\times10^{3}\ \text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
b oppervlak venster $1\ \text{cm}^2$
teltempo $1\ \text{cm}^2 \times 1{,}18\times10^{3}\ \text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 1{,}18\times10^{3}\ \text{tps}$

7 a straal venster $r = 40\ \text{mm} / 2 = 20\ \text{mm} = 2\ \text{cm}$
afstand bron-venster $h = 6\ \text{cm}$
openingshoek $\tan(\alpha) = 2 / 6 = 0{,}33 \quad \rightarrow \quad \alpha = 18{,}43°$
$f_{geo} = 0{,}5 \times [1 - \cos(18{,}43°)] = 0{,}5 \times (1 - 0{,}949) = 0{,}0255$
b straal bol $R^2 = h^2 + r^2 = 6^2 + 2^2 = 40\ \text{cm}^2$
$f_{geo} = (\pi r^2) / (4\pi R^2) = 2^2 / [4 \times 40] = 1 / 40 = 0{,}0250$

8 a $N = A \times f_{em} \times f_{geo} \times t$
emissierendement $f_{em} = 82\% + 18\% = 1$
geometriefactor f_{geo} = (oppervlak venster) / (oppervlak bol met r = 100 cm)
$= 3\ \text{cm}^2 / [4\pi \times (100\ \text{cm})^2] = 2{,}39\times10^{-5}$
b aantal telpulsen $N = A \times 1 \times 2{,}39\times10^{-5} \times 60\ \text{s} = 1{,}43\times10^{-3}\ A = 175$
activiteit $A = 175 / 1{,}43\times10^{-3} = 1{,}22\times10^{5}\ \text{Bq} = 122\ \text{kBq}$

9 $N = A \times f_{em} \times f_{geo} \times t$

emissierendement $f_{em} = 1$

geometriefactor $f_{geo} = 0{,}5$ (2π-geometrie)

a GM-telbuis

activiteit onder monitor A = oppervlaktebesmetting × (oppervlak detectorvenster)
= 5 Bq·cm^{-2} × 7 cm^2 = 35 Bq

tijd $t = 1$ min = 60 s

teltempo $N = 35$ Bq × 1 × 0,5 × 1 min × 60 s·min^{-1} = 1050 tpm

proportonele telbuis

activiteit onder monitor A = oppervlaktebesmetting × (oppervlak detectorvenster)
= 5 Bq·cm^{-2} × 100 cm^2 = 500 Bq

tijd $t = 1$ s

teltempo $N = 500$ Bq × 1 × 0,5 = 250 tps

b bruto-teltempo = 3 × nuleffect

dus netto-teltempo = 2 × nuleffect

GM-telbuis

netto-teltempo $2 \times N_{nul} = 2 \times 20 = 40$ tpm

$A_{min} = 5$ Bq·cm^{-2} × (40 tpm / 1050 tpm) = 0,19 Bq·cm^{-2}

proportionele telbuis

netto-teltempo $2 \times N_{nul} = 2 \times 4 = 8$ tps

$A_{min} = 5$ Bq·cm^{-2} × (8 tps / 250 tps) = 0,16 Bq·cm^{-2}

10 a nul-effect $N_{nul} = 2{,}30 \times 10^{-2}$ tps × 500 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 $N_{nul} \pm 2\sigma_{nul} = [11{,}5\text{-}6{,}8;\ 11{,}5\text{+}6{,}8] = [4{,}7;\ 18{,}3]$

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 $N = A \times 0{,}893 \times 0{,}28 \times 500$ s = 125 A
= 18,3 (bovengrens)

maximale activiteit $A_{max} = 18{,}3 / 125 = 0{,}15$ 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 $\rho = 1{,}19$ g·cm^{-3}. De bril heeft een dikte van 2 mm en wordt gebruikt om de ooglens te beschermen tegen β-straling. Bepaal de transmissie van de bril voor β-deeltjes met een maximale energie van
   a 0,5 MeV
   b 1,0 MeV
   c 2,0 MeV
   aanwijzing: maak gebruik van de vuistregels $R_{\beta,max}\,\rho = 0{,}5\,E_{\beta,max}$ *en* $d_{½} = 0{,}1\,R_{\beta,max}$

2 Een radioactieve bron bevat een nuclide dat slechts één γ-overgang bezit. Met een γ-detector in een smalle bundel van deze γ-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 γ-straling

3 Een smalle bundel mono-energetische γ-straling valt op een absorber bestaande uit water, lood of een combinatie van beide materialen. De halveringsdikte van water is $d_{½,water} = 5{,}5$ cm; van lood is deze $d_{½,lood} = 0{,}08$ 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 μ/ρ van aluminium voor γ-straling wordt een serie metingen verricht met een bron die γ-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:

absorberdikte	0	1	2	4	8	16	32	64	128
teltempo	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 $\rho_{Al} = 2{,}7$ g·cm^{-3}.
   a zet de transmissie uit tegen de dikte op enkel-logaritmisch papier
   b bepaal de halveringsdikte $d_{½}$ van aluminium voor deze γ-energie
   c bepaal de massaverzwakkingscoëfficiënt μ/ρ van aluminium voor deze γ-energie

5 Men wil de intensiteit van de γ-straling van ^{137}Cs met behulp van beton respectievelijk lood reduceren met een factor 1000. De γ-energie bedraagt E_γ = 0,66 MeV. De massaverzwakkingscoëfficiënten van beton en lood voor deze γ-energie zijn $(\mu/\rho)_{beton}$ = 0,0772 $cm^2 \cdot g^{-1}$ respectievelijk $(\mu/\rho)_{lood}$ = 0,100 $cm^2 \cdot g^{-1}$. Verder is ρ_{beton} = 2,35 $g \cdot cm^{-3}$ en ρ_{lood} = 11,35 $g \cdot cm^{-3}$.

a bepaal de benodigde diktes met behulp van transmissiefiguren
aanwijzing: maak gebruik van de transmissies in figuren 10 en 11 van de appendix van dit oefenboek

b bereken de benodigde diktes met behulp van de massaverzwakkingscoëfficiënten en de buildup-factoren
aanwijzing: bepaal eerst de noodzakelijke waarde van μd, en zoek dan de daarbij horende build-up-factor B in figuur 12 van de appendix 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}Cf-bron. Voor de plaats waar deze bron opgeslagen wordt, moet een afscherming worden ontworpen. Bij het verval van ^{252}Cf komt α-, β-, γ- en neutronenstraling vrij.

Gegeven:

- *de verzwakking van γ- en neutronenstraling door de bronhouder mag worden verwaarloosd*
- *de bron mag als puntbron worden beschouwd*
- *de bijdragen van de dochternucliden mogen worden verwaarloosd*
- *^{252}Cf vervalt voor 96,9% door α-verval en voor 3,1% door spontane splijting*
- *de halveringstijd van ^{252}Cf is $T_{½}$ = 2,646 jaar*
- *de dosisconversiefactor voor ^{252}Cf-neutronen is $h = 5{,}3 \times 10^{-10}$ $Sv \cdot cm^2$*
- *de transmissie van γ-straling en neutronen van ^{252}Cf (zie figuren 13 en 14 van de appendix van dit oefenboek); aangenomen mag worden dat de grafieken als een rechte geëxtrapoleerd mogen worden*
- de activiteit van de ^{252}Cf-bron is $A_n = 2{,}36 \times 10^8$ neutronen per seconde

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

Om de γ-straling tegen te houden wordt bovendien een loden afscherming aangebracht. Een conservatieve benadering voor de afscherming van een brede bundel γ-straling van ^{252}Cf met polyetheen is de aanname dat de halveringsdikte $d_{½}$ = 17 cm en de dosisopbouwfactor B = 2.

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

Het geabsorbeerde dosistempo ten gevolge van de γ-straling op r = 1 m van de ^{252}Cf-bron, achter een 45 cm dikke polyetheenplaat is D_γ(0 cm lood) = 10 μGy·h^{-1}.

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

(1996-2-3)

Antwoorden

1 dikte bril d = 2 mm = 0,2 cm

a $R_{\beta,max}$ = 0,5 × 0,5 / 1,19 g·cm^{-3} = 0,21 cm
d / $R_{\beta,max}$ = 0,2 cm / 0,21 cm = 1
T = 0 want $d \approx R_{\beta,max}$

b $R_{\beta,max}$ = 0,5 × 1,0 / 1,19 g·cm^{-3} = 0,42 cm
$d_{½}$ = 0,1 × 0,42 cm = 0,04 cm
T = e$^{-0,693\times0,2/0,04}$ = e$^{-3,5}$ = 0,03

c $R_{\beta,max}$ = 0,5 × 2,0 / 1,19 g·cm^{-3} = 0,84 cm
$d_{½}$ = 0,1 × 0,84 cm = 0,08 cm
T = e$^{-0,693\times0,2/0,08}$ = e$^{-1,7}$ = 0,2

2 a T = e$^{-\mu d}$ = e$^{-\mu\times3}$
= 1200 tpm / 4500 tpm = 0,27
μ = -ln(0,27) / 3 mm = 0,44 mm^{-1}
$d_{½}$ = 0,693 / μ = 0,693 / 0,44 mm^{-1} = 1,6 mm lood

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

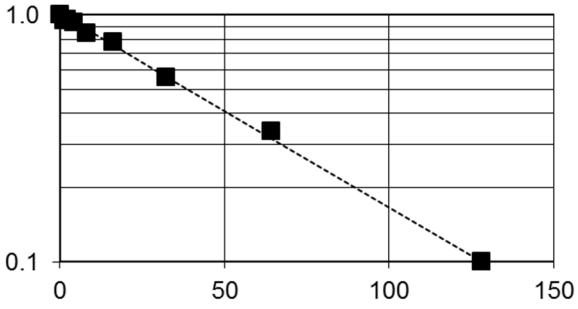
b T(0,2 cm lood) = 2$^{-0,2/0,08}$ = 0,18

c T = 0,88 × 0,18 = 0,16

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

b aflezen grafiek bij d = 50 mm = 5 cm:
T = 0,40
= e$^{-\mu d}$ = e$^{-\mu\times5}$
μ = -ln(0,40) / 5 cm
= 0,916 / 5 cm = 0,183 cm^{-1}
$d_{½}$ = 0,693 / 0,183 cm^{-1}
= 3,8 cm aluminium

c μ/ρ = 0,183 cm^{-1} / 2,7 g·cm^{-3}
= 0,068 cm^2·g^{-1}



5 a aflezen figuren 10 en 11 van de appendix van dit oefenboek bij T = 0,001:
beton 53 cm
lood 6,5 cm

b $T = B$ e$^{-\mu d}$ = 0,001
μ_{beton} = 0,0772 cm^2·g^{-1} × 2,35 g·cm^{-3} = 0,181 cm^{-1}
μ_{lood} = 0,100 cm^2·g^{-1} × 11,35 g·cm^{-3} = 1,135 cm^{-1}
bepaal in elke stap B door middel van lineaire interpolatie naar E_γ en μd

beton	neem eerst B = 1	μd = -ln(0,001 / 1) = 6,91	→	$B \approx$ 13,5
	neem nu B = 13,5	μd = -ln(0,001 / 13,5) = 9,51	→	$B \approx$ 21,8
	neem nu B = 21,8	μd = -ln(0,001 / 21,8) = 10,0	→	B ≈ 23,4
	neem nu B = 23,4	μd = -ln(0,001 / 23,4) = 10,1	→	$B \approx$ 23,8
	d = 10,1 / 0,181 cm^{-1} = 56 cm			
lood	neem eerst B = 1	μd = -ln(0,001 / 1) = 6,91	→	$B \approx$ 2,51
	neem nu B = 2,3	μd = -ln(0,001 / 2,51) = 7,83	→	$B \approx$ 2,68
	neem nu B = 2,5	μd = -ln(0,001 / 2,68) = 7,89	→	$B \approx$ 2,70
	neem nu B = 2,5	μd = -ln(0,001 / 2,70) = 7,90	→	$B \approx$ 2,70
	d = 7,90 / 1,135 cm^{-1} = 7,0 cm			

6 a aflezen figuur 14 van de appendix van dit oefenboek bij $d_{polyetheen}$ = 30 cm

$T = e^{-\mu \times 30} = 0{,}01$

extrapoleren naar d = 45 cm geeft transmissie

$T = e^{-\mu \times 45} = (e^{-\mu \times 30})^{45/30} = 0{,}01^{1{,}5} = 0{,}001$

$H^*_{neutronen} = h_n \times (A_n / 4\pi r^2) \times T$

$= 5{,}3 \times 10^{-10}$ Sv·cm² × [$2{,}36 \times 10^8$ s^{-1} / ($4\pi \times 100^2$ cm²)] × 0,001

$= 1{,}0 \times 10^{-9}$ Sv·s^{-1} = $3{,}6 \times 10^{-6}$ Sv·h^{-1} = 3,6 µSv·h^{-1}

b $T = T_{polyetheen} \times T_{lood} = B \times 2^{-45/d_{½}} \times T_{lood} = 2 \times 2^{-45/17} \times T_{lood}$ =0,32 T_{lood}

= 0,01

T_{lood} = 0,01 / 0,32 = 0,031

aflezen figuur 13 van de appendix van dit oefenboek bij T_{lood} = 0,031

d_{lood} = 5,5 cm

c H^*_{γ}(5,5 cm lood) = D_{γ}(0 cm lood) × w_R × T_{lood}

= 10 µGy·h^{-1} × 1 Sv·Gy^{-1} × 0,031 = 0,31 µSv·h^{-1}

d aflezen figuur 14 van de appendix van dit oefenboek bij 5,5 cm lood

T_{lood}(voor neutronen) = 0,8

$H^*_{neutronen}$(0 cm lood) = 3,6 µSv·h^{-1} (zie antwoord a)

$H^*_{neutronen}$(5,5 cm lood) = $H^*_{neutronen}$(0 cm lood) × T_{lood}(voor neutronen)

= 3,6 µSv·h^{-1} × 0,8 = 2,9 µSv·h^{-1}

$H^*_{totaal} = H^*_{\gamma}$(5,5 cm lood) + $H^*_{neutronen}$(5,5 cm lood)

= 0,31 + 2,9 = 3,2 µSv·h^{-1}

13 Aanbevelingen van de ICRP

14 Wet- en regelgeving

1 De overheid heeft dosislimieten vastgesteld om het risico van kansgebonden effecten tot een aanvaardbare waarde te beperken. 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 ongeboren kind

2 De overheid heeft dosislimieten vastgesteld ter voorkoming van weefselreacties. Hoe groot is de limiet voor
- a de ooglens van een niet blootgestelde werknemer
- b de ooglens 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}Co groter of kleiner dan die van ^{90}Sr/^{90}Y ?
- b is de radiotoxiciteit van ^{60}Co is groter of kleiner dan die van ^{125}I ?
  aanwijzing: maak gebruik van onderstaande dosisconversiecoëfficiënten

^{60}Co	$e(50)_{inhalatie} = 2{,}9\times10^{-8}$ Sv·Bq^{-1}	$e(50)_{ingestie} = 3{,}4\times10^{-9}$ Sv·Bq^{-1}
$^{90}Sr/^{90}Y$	$e(50)_{inhalatie} = 1{,}5\times10^{-7}$ Sv·Bq^{-1}	$e(50)_{ingestie} = 2{,}8\times10^{-8}$ Sv·Bq^{-1}
^{125}I	$e(50)_{inhalatie} = 5{,}3\times10^{-9}$ Sv·Bq^{-1}	$e(50)_{ingestie} = 1{,}5\times10^{-8}$ 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 $TBq \cdot g^{-1}$.
   a moet voor het in bezit hebben van een dergelijke vluchtwegmarkering een kernenergiewetvergunning 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 $C_v = 1 \times 10^6$ $Bq \cdot g^{-1}$

8 Een bepaald type rookmelder bevat 36 kBq ^{241}Am. De massieke activiteit van zuiver ^{241}Am bedraagt 127 $GBq \cdot g^{-1}$.
   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 $C_v = 1 \times 10^0$ $Bq \cdot g^{-1}$

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 met een inhoud van 10 l is gevuld met zand dat verontreinigd is met 37 MBq ^{226}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
   c zou het bedrijf een vergunning voor de container moeten hebben?
   aanwijzing: de grenswaardes voor ^{226}Ra zijn $A_1 = 0{,}3$ TBq en $A_2 = 0{,}02$ TBq; de vrijstellingswaardes voor ^{226}Ra zijn $A_v = 1 \times 10^4$ Bq en $C_v = 1 \times 10^1$ $Bq \cdot g^{-1}$; voor de dichtheid van zand mag 2 $g \cdot cm^{-3}$ genomen worden

12 De stralingsbeschermingsdeskundige wil een flesje met 5 ml ^{111}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 ^{111}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.
a hoe groot is de limiet in geval van een diagnostisch toestel?
b hoe groot is de limiet in geval van een therapeutisch toestel?

14 De stralingsbeschermingsdeskundige veegt een ingekapselde γ-bron en stelt door middel van een meting vast dat de afgewreven activiteit 50 Bq bedraagt.
a moet deze bron als "lek" worden beschouwd?
b beantwoord vraag a als niet de bron zelf, maar de bronhouder was geveegd
c beantwoord vraag a als het een α-bron betreft

15 In een C-laboratorium wordt regelmatig een met ^{125}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 niet langer dan 4 uur. De dosisconversiecoëfficiënt voor inhalatie is $e(50)_{inhalatie} = 7{,}3\times10^{-9}$ Sv·Bq^{-1}. Er worden geen andersoortige experimenten in het C-laboratorium verricht.
a bepaal het maximale aantal experimenten dat per week in het C-laboratorium mag worden uitgevoerd
aanwijzing: maak gebruik van de gegevens in figuur 15 van de appendix 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}P. De verbinding wordt hierbij in een kogelmolen tot poeder fijngemalen. De $e(50)_{inhalatie}$ van ^{32}P voor de betreffende verbinding bedraagt $2{,}9\times10^{-9}$ Sv·Bq^{-1}. Er worden geen andere experimenten in het B-laboratorium uitgevoerd.
a bereken de maximale hoeveelheid activiteit waarmee per experiment gewerkt mag worden
b bereken de effectieve volgdosis die een laborant maximaal kan oplopen indien hij ten gevolge van slordige werken telkens 0,01% van de activiteit inademt
c 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 figuur 15 van de appendix van dit oefenboek

17 Bij een besmettingscontrole wordt vastgesteld dat een gebied van 10 cm × 10 cm op één van de tafels in een radionuclidenlaboratorium besmet is met 1 kBq ^{45}Ca. Nadat de besmetting zo goed mogelijk is schoongemaakt, blijkt er nog steeds 90% van de activiteit op de tafel te zijn achtergebleven.
a 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 mSv / 0,25 = 0,4 mSv

4 a 10 µSv
door toepassing van de factor 0,25 bij het vaststellen van de Multifunctionele Individuele Dosis wordt de effectieve waarde 10 µSv / 0,25 = 40 µSv
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 $TBq \cdot g^{-1}$) zijn beide groter dan de vrijstellingswaarde (1 GBq respectievelijk 10^{-6} $TBq \cdot g^{-1}$)
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 $GBq \cdot g^{-1}$) zijn beide groter dan de vrijstellingswaarde (10 kBq respectievelijk 1 $Bq \cdot g^{-1}$); 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}Ra is A_1 = 0,3 TBq
in een vrijgesteld collo mag maximaal $10^{-3} \times A_1$ = 0,3 GBq = 300 MBq worden verstuurd; de verzendingswijze is dus toegestaan
b 5 $\mu Sv \cdot h^{-1}$

c 10 l zand weegt 10 000 cm^3 × 2 $g \cdot cm^{-3}$ = 20 000 g
de activiteitsconcentratie is C = 3 700 000 Bq / 20 000 g = 185 $Bq \cdot g^{-1}$ > 10 $Bq \cdot g^{-1}$
de activiteit is A = 37 MBq > 10^4 Bq
beide vrijstellingsgrenzen worden overschreden: vergunning nodig

12 a grenswaarde voor ^{111}In is A_1 = 2 TBq
in een vrijgesteld collo mag maximaal $10^{-3} \times A_1$ = 2 GBq worden verstuurd
b 5 $\mu Sv \cdot h^{-1}$

13 a 1 $mSv \cdot h^{-1}$ op 1 m van de focus
b 10 $mSv \cdot h^{-1}$ op 1 m van de focus

14 a het criterium is 185 Bq, dus niet lek
b het criterium is 18,5 Bq, dus wel lek volgens de concept-richtlijn ingekapselde bronnen
opmerking: dit onderdeel is niet opgenomen in de regelgeving
c het criterium is 18,5 Bq, dus wel lek; zie opmerking bij b

15 a voor de omschreven handeling $p = -3$, $q = 2$, $r = 2$
radiotoxiciteitsequivalent $Re_{inhalatie} = 1\ Sv / e(50)_{inhalatie}$
$= 1\ Sv / 7{,}3\times10^{-9}\ Sv \cdot Bq^{-1} = 1{,}37\times10^{8}$ Bq
maximale activiteit $A_{max} = 0{,}02 \times Re_{inhalatie} \times 10^{p+q+r}$
$= 0{,}02 \times 1{,}37\times10^{8}$ Bq $\times\ 10^{-3+2+2}$
$= 2{,}7\times10^{7}$ Bq = 27 MBq
belastingfactor per experiment $B = (4\ h / 40\ h) \times (10\ MBq / 27\ MBq) = 1 / 27$
maximale aantal experimenten per week = $1 / B$ = 27

16 a voor de omschreven handeling $p = -4$, $q = 3$, $r = 2$
radiotoxiciteitsequivalent $Re_{inhalatie} = 1\ Sv / e(50)_{inhalatie}$
$= 1\ Sv / 2{,}9\times10^{-9}\ Sv \cdot Bq^{-1} = 3{,}45\times10^{8}$ Bq
maximale activiteit $A_{max} = 0{,}02 \times Re_{inhalatie} \times 10^{p+q+r}$
$= 0{,}02 \times 3{,}45\times10^{8}$ Bq $\times\ 10^{-4+3+2}$
$= 6{,}9\times10^{7}$ Bq
b aantal experimenten 2 per dag × 5 $d \cdot wk^{-1}$ × 50 $wk \cdot j^{-1}$ = 500 per jaar
maximale activiteit A = 500 per jaar × $6{,}9\times10^{7}$ Bq = $3{,}5\times10^{10}$ Bq per jaar
maximale inhalatie $A_{inhalatie} = 0{,}01\times10^{-2} \times A$
$= 0{,}01\times10^{-2} \times 3{,}5\times10^{10} = 3{,}5\times10^{6}$ Bq
maximale volgdosis $E(50) = e(50)_{inhalatie} \times A_{inhalatie}$
$= 2{,}9\times10^{-9}\ Sv \cdot Bq^{-1} \times 3{,}5\times10^{6}$ Bq
$= 1{,}0\times10^{-2}$ Sv = 10 mSv
c de blootstelling is meer dan 1 mSv
de laborant is dus een blootgestelde weknemer
de blootstelling is meer dan 6 mSv
de laborant wordt dus ingedeeld als blootgestelde werknemer categorie-A
opmerking: er is geen rekening gehouden met potentiële blootstellingen

17 a oorspronkelijke besmetting was 10^3 Bq / (10 cm × 10 cm) = 10 $Bq \cdot cm^{-2}$
na het schoonmaken is 90% achtergebleven, dus 10% afgewreven
de afwrijfbare activiteit was dus 0,1 × 10 $Bq \cdot cm^{-2}$ = 1 $Bq \cdot cm^{-2}$
norm in de richtlijn radionuclidenlaboratoria is 4 $Bq \cdot cm^{-2}$; 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 een patiënt die met een röntgentoestel wordt bestraald, en ontvangt ten gevolge van de strooistraling een effectieve dosis van 10 μSv.
   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 Gy per week. De dichtheid van beton bedraagt $\rho = 2{,}35\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ en de massaverzwakkingscoëfficiënt is $\mu/\rho = 0{,}041\ \mathrm{cm^2 \cdot g^{-1}}$. 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 kV gebruikt om materiaal te bestralen met een geabsorbeerde dosis van 100 Gy. Het materiaal bevindt zich op 50 cm van het focus. Er wordt maximaal 1 bestraling per dag uitgevoerd. In het verlengde van de bundel, op 5 m van het focus, bevindt zich een kantoorruimte. Bestralingsruimte en kantoor zijn gescheiden door een betonnen muur.
   a bereken de gebruikte mAs-waarde per bestraling (in 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 figuur 16 van de appendix 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 $1\ \text{mSv·j}^{-1} / 500\ \text{h·j}^{-1} = 0{,}002\ \text{mSv·h}^{-1} = 2\ \mu\text{Sv·h}^{-1}$

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 $1\ \text{mSv·j}^{-1} / 2000\ \text{h·j}^{-1} = 0{,}0005\ \text{mSv·h}^{-1} = 0{,}5\ \mu\text{Sv·h}^{-1}$

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 $E = 10\ \mu\text{Sv} \times (r_1 / r_2)^2 = 10\ \mu\text{Sv} / 9 = 1{,}1\ \mu\text{Sv}$

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 $E = 10\ \mu\text{Sv} \times (r_1 / r_2)^2 = 10\ \mu\text{Sv} \times 4 = 40\ \mu\text{Sv}$

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 $H^*(d) = 100\ \mu\text{Sv·j}^{-1} = 1{\times}10^{-4}\ \text{Sv·j}^{-1}$
benodigde transmissie $T(d) = H^*(d) / H^*(0)$
$= 1{\times}10^{-4}\ \text{Sv·j}^{-1} / 50\ \text{Sv·j}^{-1} = 2{,}0{\times}10^{-6}$
$= \text{Be}^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = 10 \times \text{e}^{-0{,}041 \times d \times 2{,}35} = 10\ \text{e}^{-0{,}096 \times d}$
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 figuur 16 van de appendix van dit oefenboek bij 400 kV
$\text{d}D(1\ \text{m})/\text{d}t = 23{,}5\ \text{mGy per mA·min}$ op 1 m van focus
op 50 cm van focus $\text{d}D(50\ \text{cm})/\text{d}t = 23{,}5\ (\text{mGy}) \times (1\ \text{m} / 0{,}5\ \text{m})^2$
$= 94\ \text{mGy per mA·min}$
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 $\text{d}D(5\ \text{m})/\text{d}t = \text{d}D(50\ \text{cm})/\text{d}t \times (0{,}5\ \text{m} / 5\ \text{m})^2$
$= 1{\times}10^5\ (\text{mGy}) / 100$
$= 1000\ \text{mGy per bestraling}$
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 van figuur 16 van de appendix 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}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}Sr/^{90}Y-bron komt in totaal 50 MBq op de werktafel terecht. De radionucliden ^{90}Sr en ^{90}Y zenden uitsluitend β-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 volgdosis als 1% van deze activiteit zou worden ingeslikt
aanwijzing: maak gebruik van de volgende gegevens

bronconstante voor β-straling	$d_\beta = 9\ \mu Gy \cdot h^{-1} \cdot MBq^{-1} \cdot m^2$
bronconstante voor γ-straling (E_γ in MeV)	$d_\gamma = E_\gamma / 7\ \mu Gy \cdot h^{-1} \cdot MBq^{-1} \cdot m^2$
dosisconversiecoëfficiënt voor ^{90}Sr	$e(50)_{ingestie} = 2{,}7\ mSv \cdot MBq^{-1}$
dosisconversiecoëfficiënt voor ^{90}Y	$e(50)_{ingestie} = 2{,}7\ mSv \cdot MBq^{-1}$

3 Een bron van ^{60}Co en een bron van ^{90}Sr/^{90}Y bevatten elk een activiteit van 1 MBq. Het radionuclide ^{60}Co zendt achtereenvolgens twee γ-fotonen uit met energieën van 1,17 MeV respectievelijk 1,33 MeV. De radionucliden ^{90}Sr en ^{90}Y zijn zuivere β-emitters.

a bereken het omgevingsdosisequivalenttempo $\mathrm{d}H^*/\mathrm{d}t$ op 50 cm afstand van de ^{60}Co-bron

b bereken het equivalente dosistempo $\mathrm{d}H_\beta/\mathrm{d}t$ op 50 cm afstand van de ^{90}Sr/^{90}Y-bron met behulp van de vuistregel

c bereken de verhouding van de onder a en b berekende waarden van $\mathrm{d}H^*/\mathrm{d}t$ en $\mathrm{d}H_\beta/\mathrm{d}t$

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 β-energieën zijn zo groot dat absorptie in lucht geen rol van betekenis speelt
de radionucliden ^{90}Sr en ^{90}Y zenden elk 1 β-deeltje uit, dus samen 2 β-deeltjes
$\mathrm{d}H_\beta/\mathrm{d}t = 9\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}m^2} \times 1\ \mathrm{Sv{\cdot}Gy^{-1}} \times 2 \times 50\ \mathrm{MBq} / (0{,}1\ \mathrm{m})^2$
$= 9{\times}10^4\ \mu\mathrm{Sv{\cdot}h^{-1}} = 90\ \mathrm{mSv{\cdot}h^{-1}}$

b omdat ^{90}Y en ^{90}Sr met elkaar in evenwicht zijn, bestaat de activiteit op tafel uit 25 MBq ^{90}Y en 25 MBq ^{90}Sr
ingeslikte activiteit $A_{\text{ingestie}} = 25\ \mathrm{MBq} \times 10^{-2} = 0{,}50\ \mathrm{MBq}$ ^{90}Y; dus ook 0,25 MBq ^{90}Sr
effectieve volgdosis $E(50) = \sum e(50)_{\text{ingestie}} \times A_{\text{ingestie}}$
$= 2{,}7\ \mathrm{mSv{\cdot}MBq^{-1}} \times 0{,}25\ \mathrm{MBq} + 2{,}7\ \mathrm{mSv{\cdot}MBq^{-1}} \times 0{,}25\ \mathrm{MBq}$
$= 1{,}35\ \mathrm{mSv}$

3 a de totale γ-energie is 1,17 + 1,33 = 2,50 MeV
de bronconstante is $d_\gamma = 2{,}50 / 7 = 0{,}36\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}m^2}$
$\mathrm{d}H_\gamma/\mathrm{d}t = 0{,}36\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}m^2} \times 1\ \mathrm{Sv{\cdot}Gy^{-1}} \times 1\ \mathrm{MBq} / (0{,}5\ \mathrm{m})^2 = 1{,}4\ \mu\mathrm{Sv{\cdot}h^{-1}}$

b de radionucliden ^{90}Sr en ^{90}Y zenden elk 1 β-deeltje uit, dus samen 2 β-deeltjes
$\mathrm{d}H_\beta/\mathrm{d}t = 2 \times 9\ \mu\mathrm{Gy{\cdot}h^{-1}{\cdot}MBq^{-1}{\cdot}m^2} \times 1\ \mathrm{Sv{\cdot}Gy^{-1}} \times 1\ \mathrm{MBq} / (0{,}5\ \mathrm{m})^2 = 72\ \mu\mathrm{Sv{\cdot}h^{-1}}$

c $\mathrm{d}H_\beta/\mathrm{d}t\ /\ \mathrm{d}H_\gamma/\mathrm{d}t = 72\ \mu\mathrm{Sv{\cdot}h^{-1}} / 1{,}4\ \mu\mathrm{Sv{\cdot}h^{-1}} = 51$

d de β-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 het enige orgaan is dat wordt bestraald
$\mathrm{d}E_\beta/\mathrm{d}t\ /\ \mathrm{d}E_\gamma/\mathrm{d}t = (w_{\text{huid}} \times \mathrm{d}H_\beta/\mathrm{d}t) / (\mathrm{d}H_\gamma/\mathrm{d}t) = 0{,}01 \times 51 \approx 0{,}5$

17 Open bronnen

1 Een blootgestelde werknemer inhaleert 0,26 MBq ^{131}I de vorm van jodiumdamp.
- a bereken de effectieve volgdosis
- b bereken de equivalente dosis van de schildklier; ga er hierbij vanuit dat dit het enige orgaan is dat bijdraagt tot de effectieve volgdosis
  aanwijzing: maak gebruik van de volgende gegevens

dosisconversiecoëfficiënt voor ^{131}I	$e(50)_{inhalatie} = 2{,}0\times10^{-8}\ Sv\cdot Bq^{-1}$
weefselweegfactor van de schildklier	$w_{schildklier} = 0{,}04$

2 Een vat bevat 40 l waterig ^{14}C-houdend afval. De activiteitsconcentratie bedraagt 100 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: maak gebruik van de volgende gegevens

dosisconversiecoëfficiënt voor ^{14}C	$e(50)_{ingestie} = 5{,}8\times10^{-10}\ Sv\cdot Bq^{-1}$
secundair niveau voor lozing in water	$w_{SN} = 100\ Re_{ingestie}$
correctiefactor	$R_w = 100$ *(want* $T_{½} > 250$ *jaar)*

Antwoorden

1 a inhalatie $A_{inhalatie} = 2{,}6\ MBq = 0{,}26\times10^{6}\ Bq$

effectieve volgdosis $E(50) = e(50)_{inhalatie} \times A_{inhalatie}$
$= 2{,}0\times10^{-8}\ Sv\cdot Bq^{-1} \times 0{,}26\times10^{6}\ Bq$
$= 0{,}0052\ Sv = 5{,}2\ mSv$

b equivalente orgaandosis $H_{schildklier} = E(50) / w_{schildklier}$
$= 5{,}2\ mSv / 0{,}04 = 130\ mSv$

2 a radiotoxiciteitseenheid $1\ Re_{ingestie} = 1\ Sv / e(50)_{ingestie}$
$= 1\ Sv / 5{,}8\times10^{-10}\ Sv\cdot Bq^{-1} = 1{,}7\times10^{9}\ Bq$

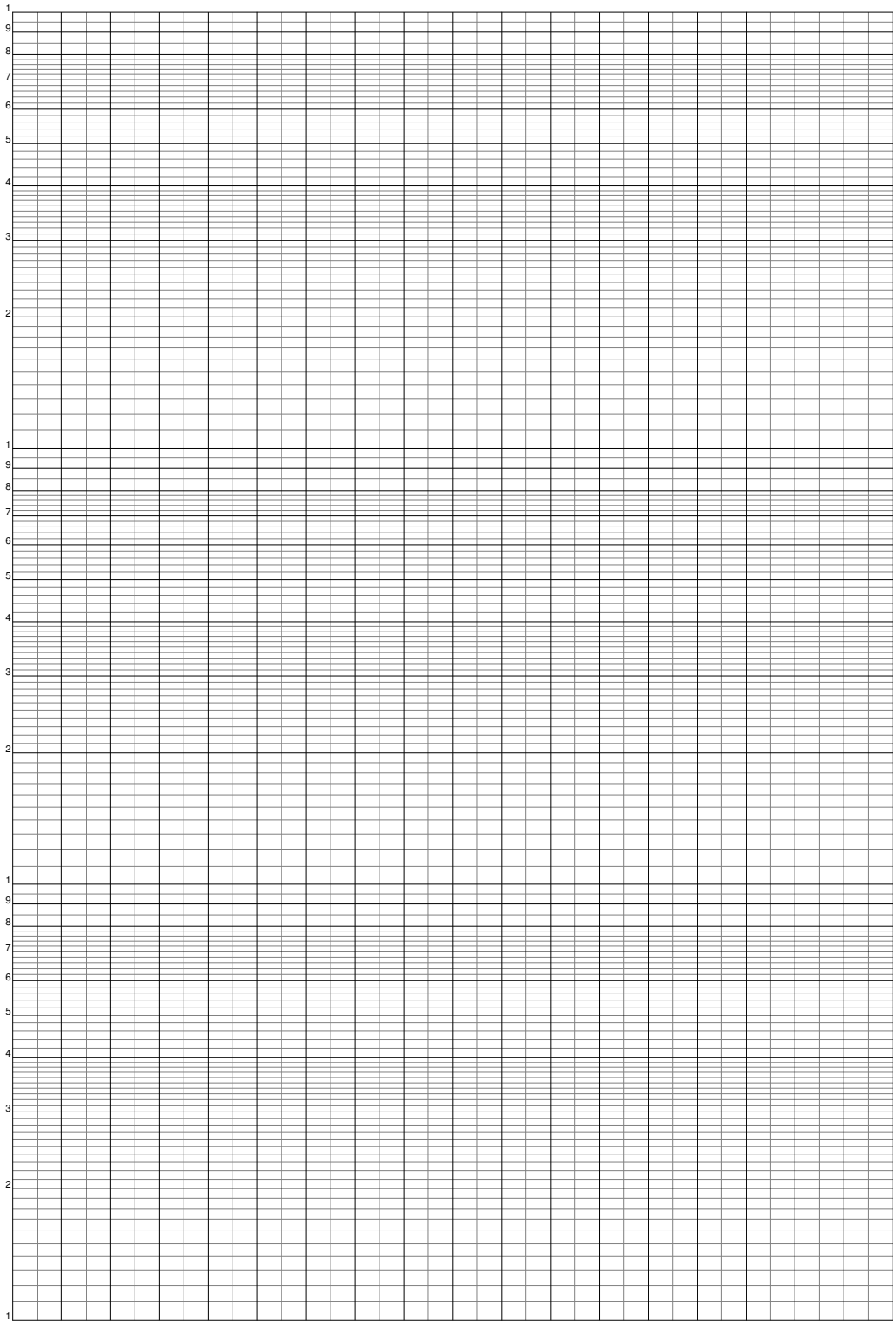
lozingslimiet $w_{SN} / R_w = 100\ Re_{ingestie} / 100 = 1\ Re_{ingestie} = 1{,}7\times10^{9}\ Bq$

totale activiteit $A = 40\ l \times 10^{3}\ ml\cdot l^{-1} \times 100\times10^{3}\ Bq\cdot ml^{-1} = 4\times10^{9}\ Bq$
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 $T_{½} > 250$ jaar >> 2 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

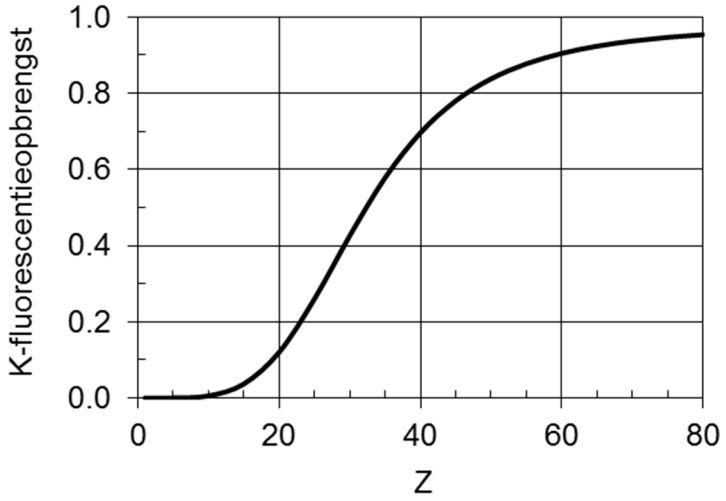
18 APPENDIX



Figuur 1 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

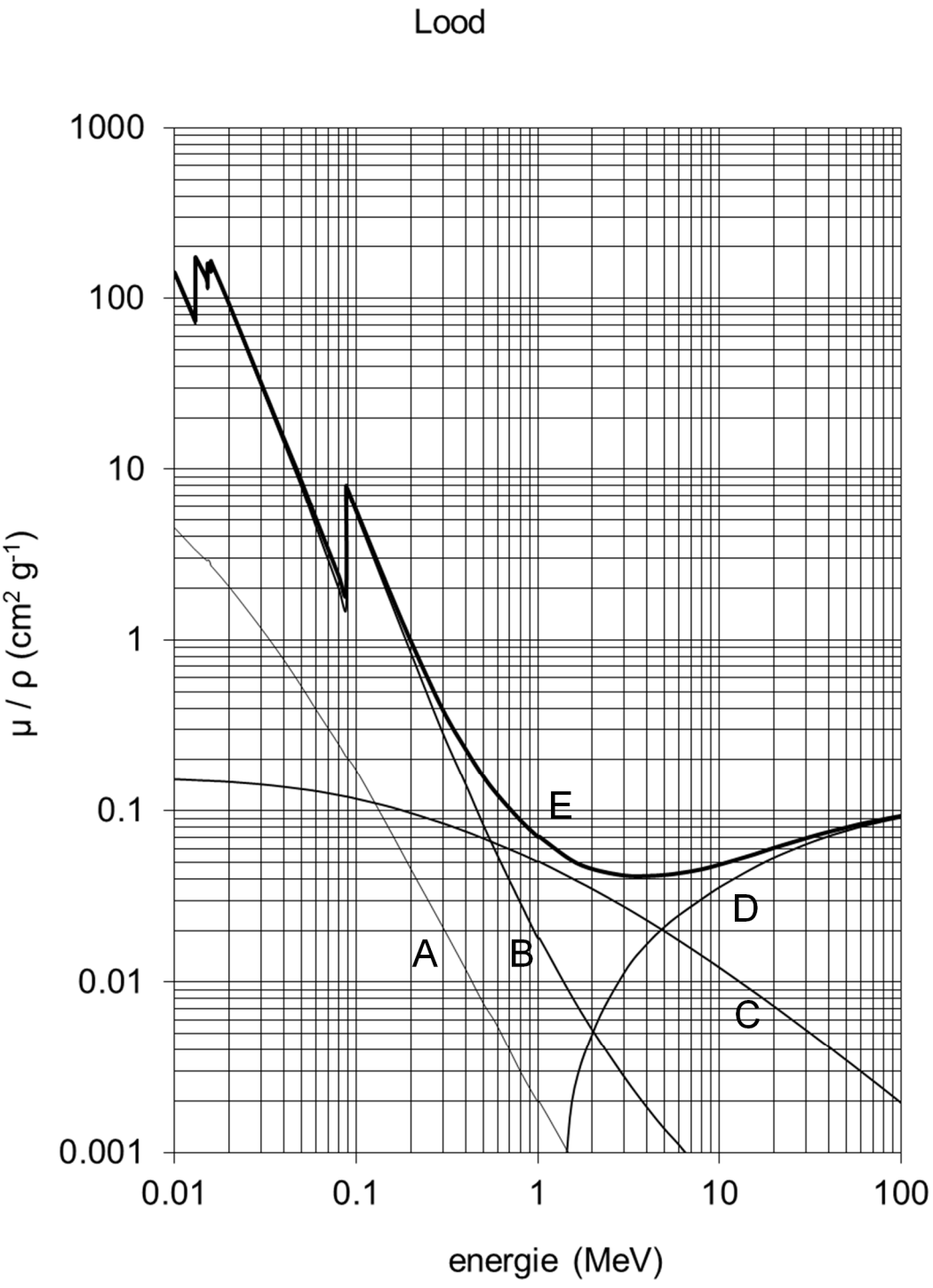
Figuur 2 *Eenzijdige overschrijdingskans P(k) voor een normaalverdeling*



Figuur 3 *Kans op K-röntgenfluorescentie*

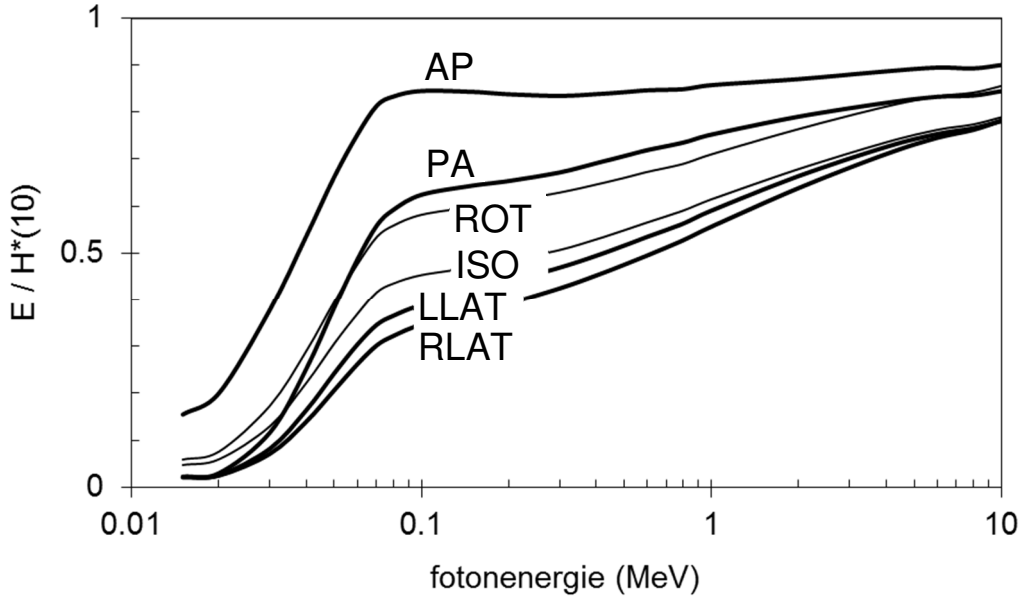
materiaal	*μ/ρ ($cm^2 \cdot g^{-1}$)*	*μ_{tr}/ρ ($cm^2 \cdot g^{-1}$)*	*μ_{en}/ρ ($cm^2 \cdot g^{-1}$)*
water	0,0966	0,0330	0,0330
spier	0,0958	0,0328	0,0328
bot	0,0926	0,0317	0,0317
lucht	0,0868	0,0296	0,0296
lood	0,0886	0,0503	0,0481

Figuur 4 *Massieke verzwakkings-, energieoverdracht- en energieabsorptie-coëfficiënten voor enkele materialen en een fotonenergie van 0,5 MeV*

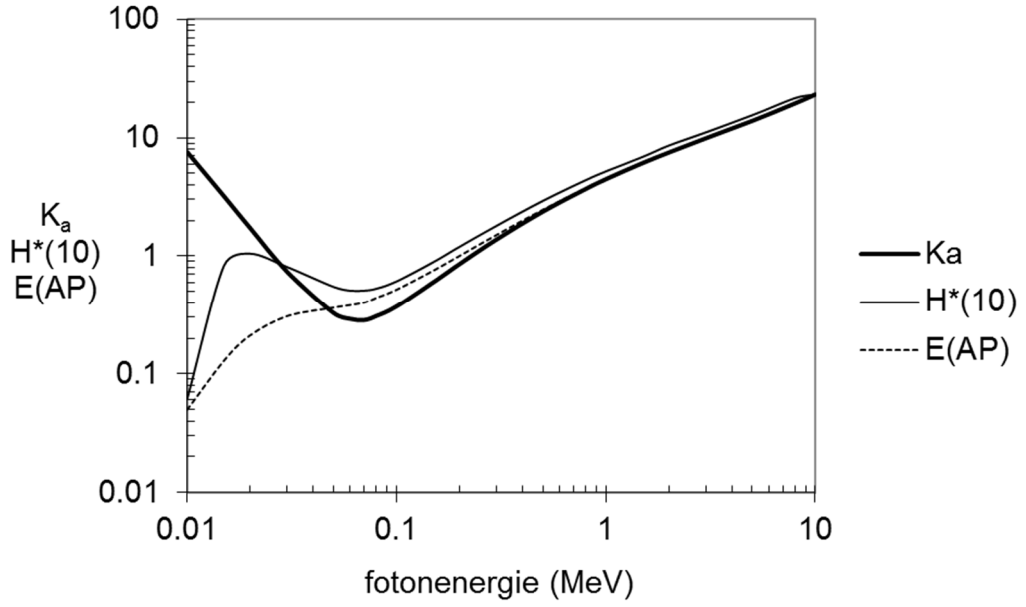


(A) Rayleigh-verstrooiing, (B) foto-elektrisch effect, (C) Compton-effect, (D) paarvorming en (E) de totale massieke verzwakkingscoëfficiënt μ/ρ

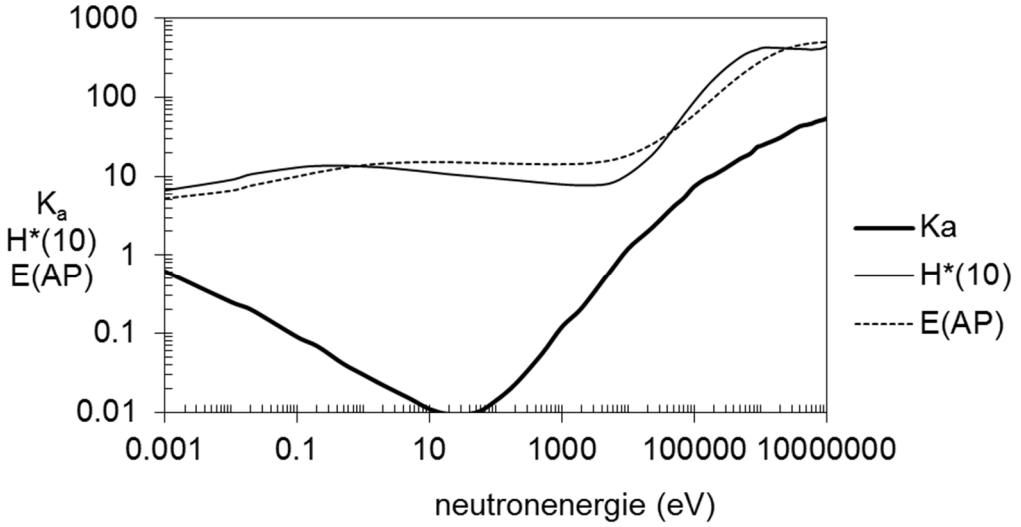
Figuur 5 Massieke verzwakkingscoëfficiënten van lood



Figuur 6 *Verhouding van E en H*(10) voor verschillende geometrieën, als functie van E_γ*



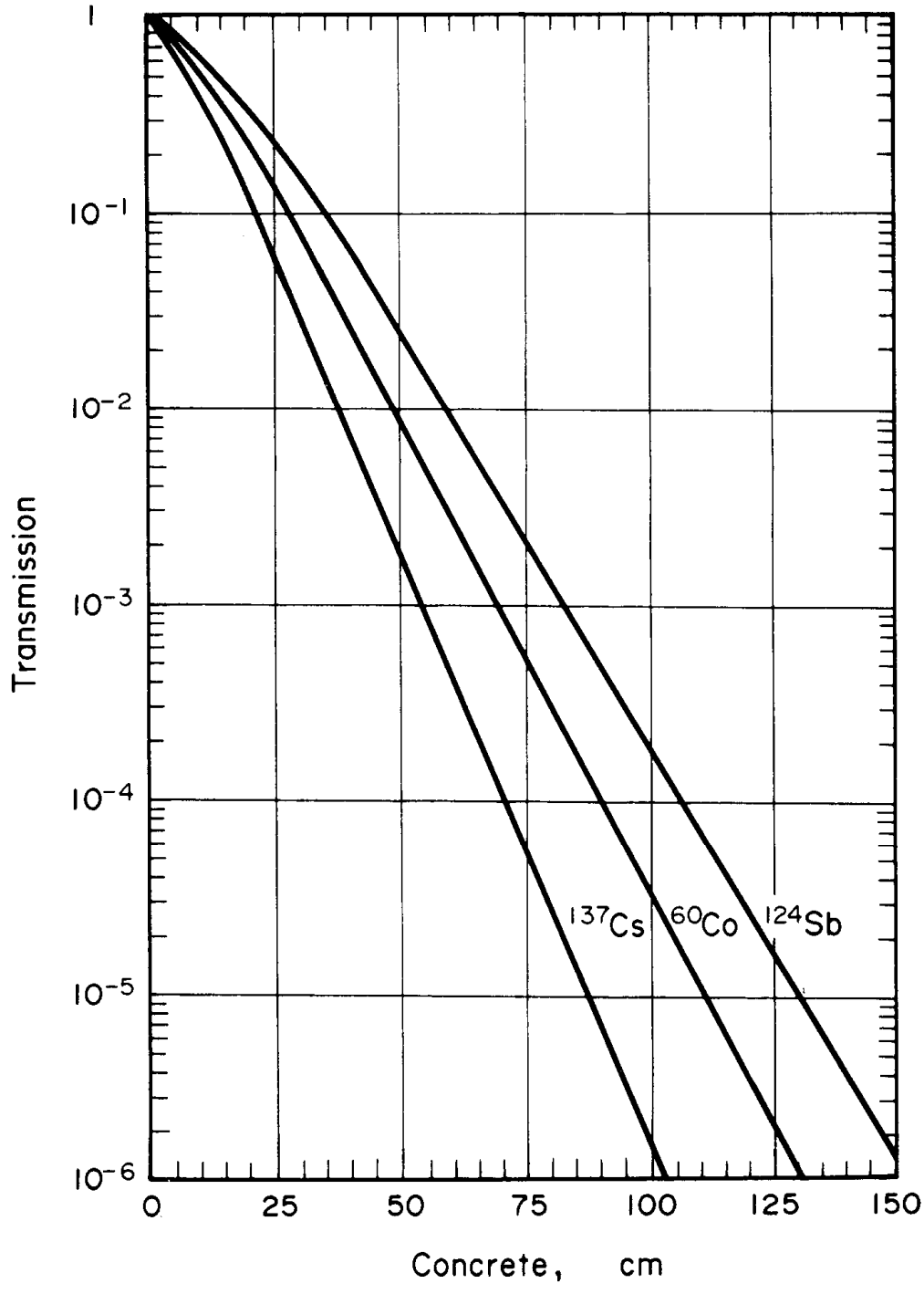
Figuur 7 *Ka, H*(10) en E(AP) per eenheid van Φ als functie van Eγ (K_a in pGy·cm², en H*(10) en E(AP) in pSv·cm²)*



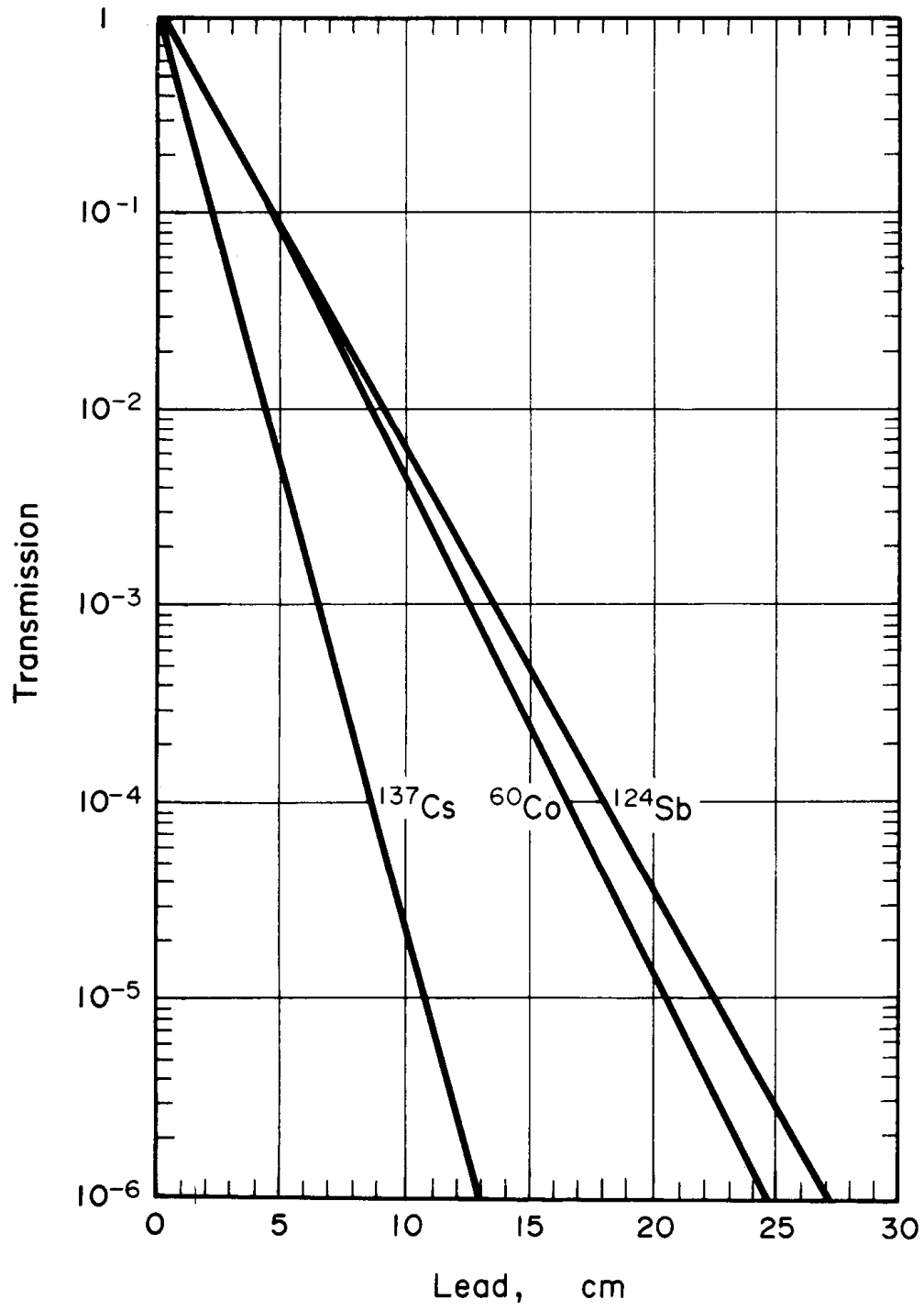
Figuur 8 *Ka, H*(10) en E(AP) per eenheid van Φ als functie van $E_{neutron}$ (K_a in pGy·cm², H*(10) en E(AP) in pSv·cm²)*

AMAD (μm)	*ET_1*	*ET_2*	*BB*	*bb*	*AI*	*totaal*
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

Figuur 9 *Longdepositie voor een volwassen man (neusademer) (ICRP-66)*



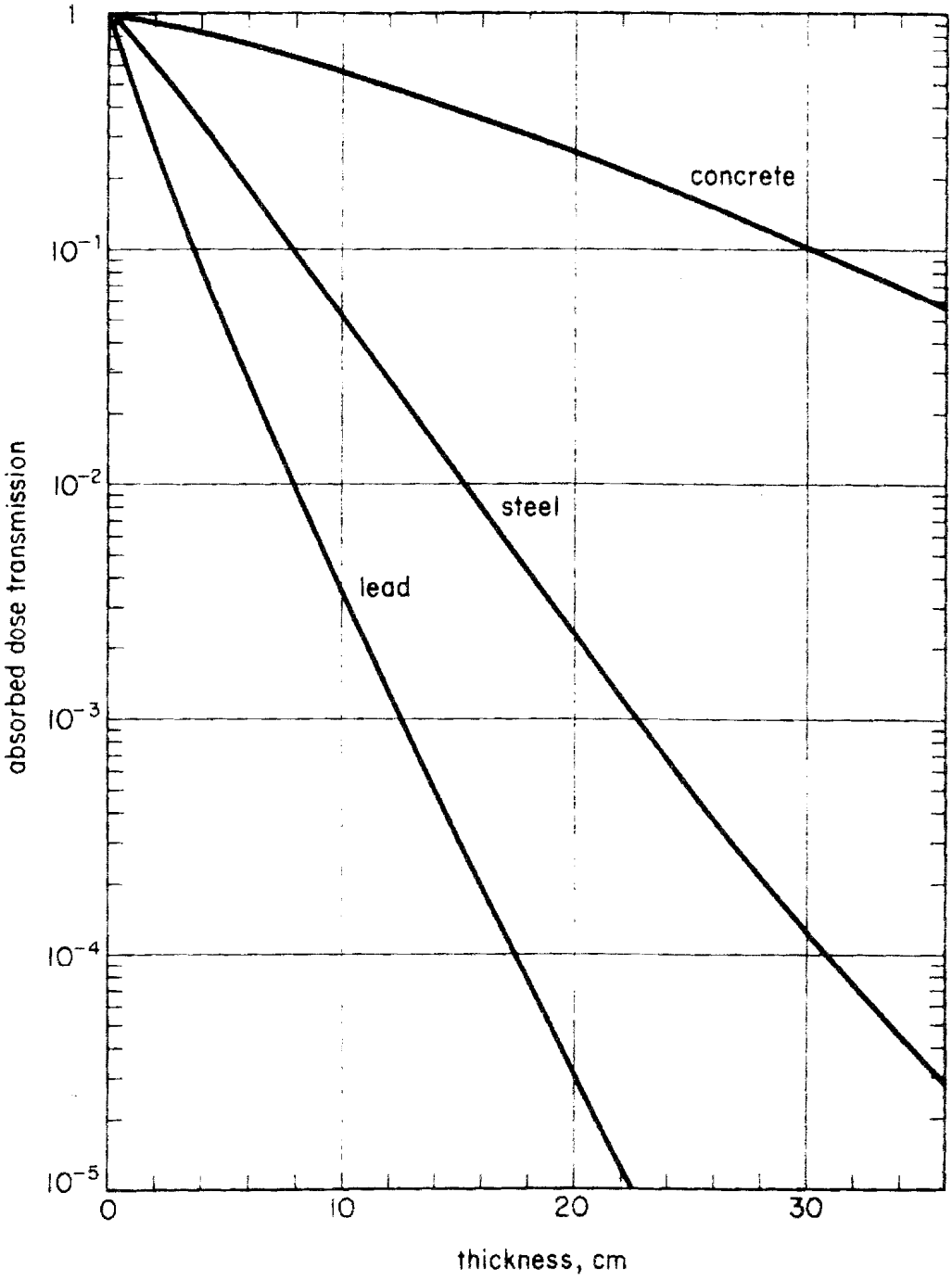
Figuur 10 Transmissie van brede bundels γ-straling door beton (ICRP-57)



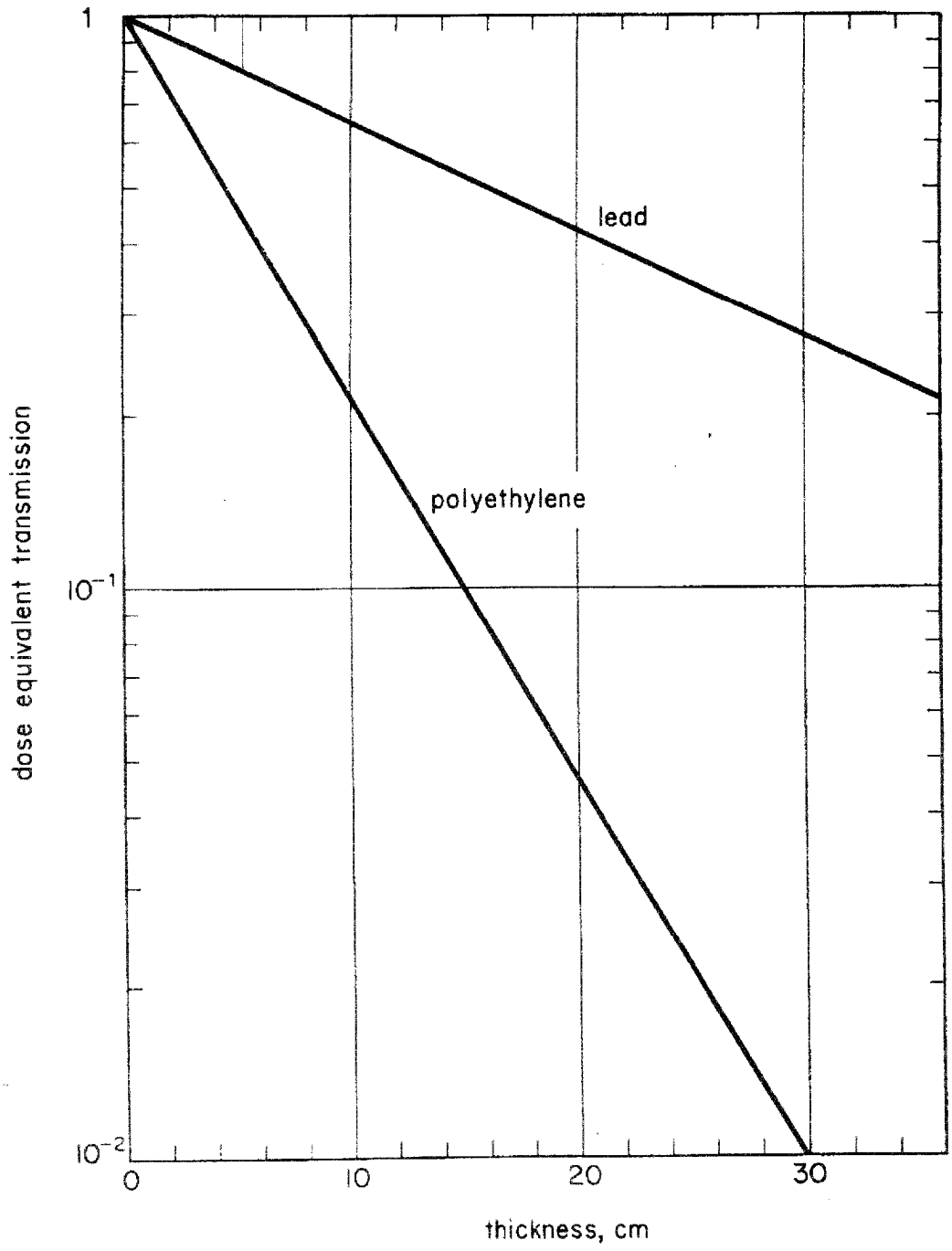
Figuur 11 Transmissie van brede bundels γ-straling door lood (ICRP-57)

materiaal	*E*				*μd*			
	(MeV)	*1*	*2*	*4*	*7*	*10*	*15*	*20*
water	0,25	3,09	7,14	23,0	72,9	166	456	982
	0,5	2,52	5,14	14,3	38,8	77,6	178	334
	1,0	2,13	3,71	7,68	16,2	27,1	50,4	82,2
	2,0	1,83	2,77	4,88	8,46	12,4	19,5	27,7
	3,0	1,69	2,42	3,91	6,23	8,63	12,8	17,0
	4,0	1,58	2,17	3,91	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	55,6
	1,0	1,87	2,89	5,39	10,2	16,2	28,3	42,7
	2,0	1,76	2,43	4,13	7,25	10,9	17,6	25,1
	3,0	1,55	2,15	3,51	5,85	8,51	13,5	19,1
	4,0	1,45	1,94	3,03	4,91	7,11	11,2	16,0
	6,0	1,34	1,72	2,58	4,14	6,02	9,89	14,7
	8,0	1,27	1,56	2,23	3,49	5,07	8,50	13,0
lood	0,5	1,24	1,42	1,69	2,00	2,27	2,65	2,73
	1,0	1,36	1,69	2,26	3,02	3,74	4,81	5,86
	2,0	1,39	1,76	2,51	3,66	4,84	6,87	9,00
	3,0	1,34	1,68	2,43	3,75	5,30	8,44	12,3
	4,0	1,27	1,56	2,25	3,61	5,44	9,80	16,3
	6,0	1,18	1,40	1,97	3,34	5,69	13,8	32,7
	8,0	1,14	1,30	1,74	2,89	5,07	14,1	44,6

Figuur 12 *Dosisopbouwfactor voor water, beton, ijzer en lood als functie van de dikte en de fotonenergie*



Figuur 13 *Transmissie van brede bundels γ-straling van ^{252}Cf door beton, staal en lood (ICRP-21)*



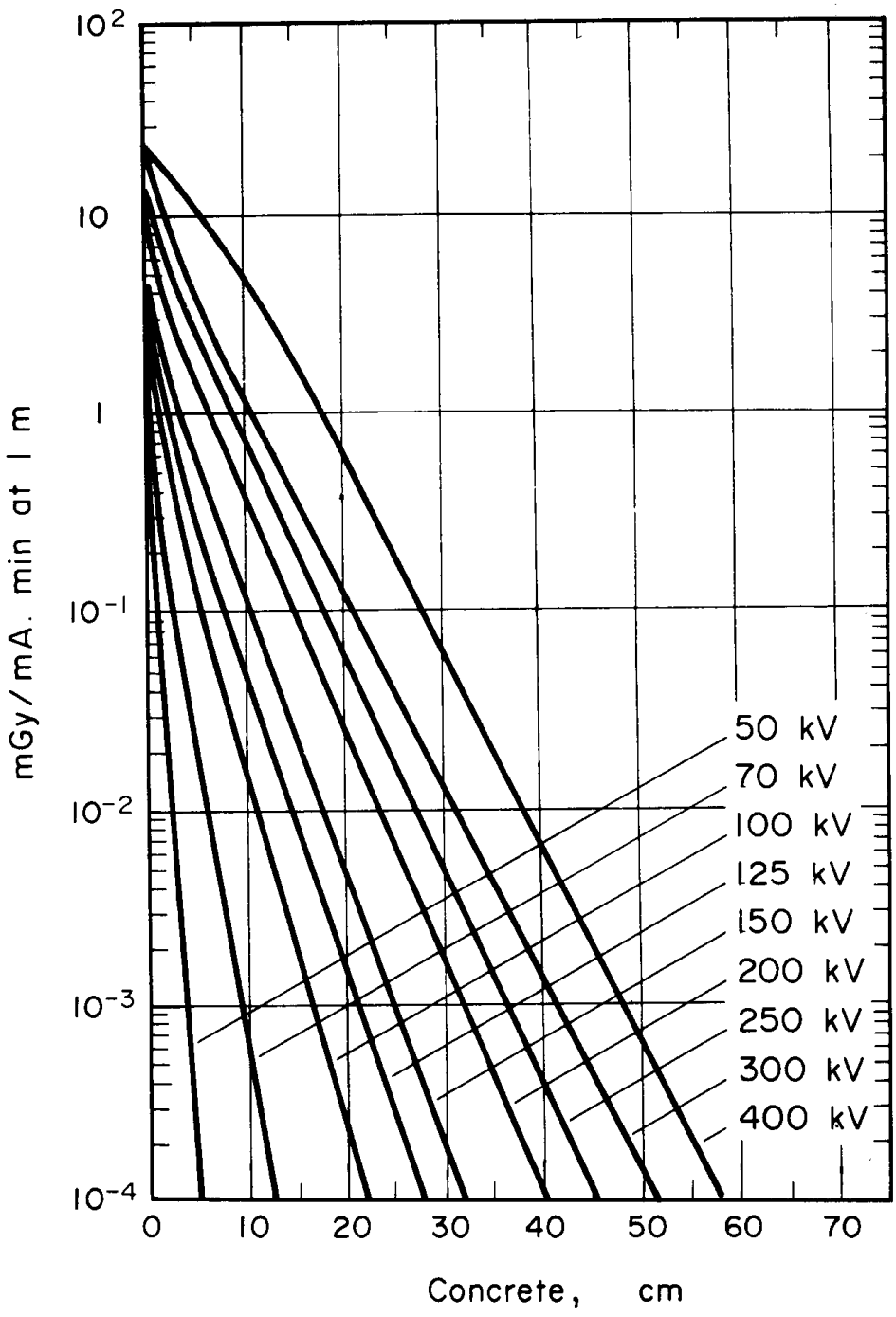
Figuur 14 *Transmissie van brede bundels neutronen van ^{252}Cf door polyethyleen (= polyetheen) en lood (ICRP-21)*

p	*handelingen*
-4	werken met gas / poeder in open systeem verhitten van vloeistof tegen het kookpunt sterk spattende bewerking
-3	werken met vluchtige nucliden: ^{3}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

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

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

Figuur 15 *De p-, q- en r-waarden volgens de voormalige richtlijn radionuclidenlaboratoria*



50 - 300 kV: halve-sinusspanning, anode van wolfraam en filter van 1 mm aluminium bij 50 kV, 1,5 mm aluminium bij 70 kV, 2 mm aluminium bij 100 kV, en 3 mm aluminium bij 125 - 300 kV
400 kV: gelijkspanning, anode van goud en filter van 3 mm koper

intensiteit bij 0 cm beton: 23,5 bij 400 kV, 20,9 bij 300 kV, 13,9 bij 250 kV, 8,9 bij 200 kV, 5,2 bij 150 kV, 3,9 bij 125 kV, 2,8 bij 100 kV, 2,1 bij 70 kV, en 1,7 bij 50 kV

Figuur 16 Transmissie van brede bundels röntgenstraling door beton (ICRP-57)