

**BIJLAGE bij  
Gecoördineerd examen stralingsbescherming  
Deskundigheidsniveau 3**

---

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave Nascholing/LUMC	BN/LUMC
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC
TU Eindhoven	TU/e

---

examendatum: 14 december 2015  
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

<b>Instructie:</b>
--------------------

- Wanneer u andere gegevens gebruikt dan in deze bijlage zijn genoemd, vermeld dan de herkomst!**
- Deze bijlage omvat 21 doorlopend genummerde pagina's. Controleer dit!**

## INHOUDSOPGAVE

Pagina	
3-4	Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2 <sup>e</sup> druk 2007), blz. 26-27: <sup>18</sup> F
5	Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al. (2e druk 2007), blz. 266, figuur 11.1: Halveringsdikte van verschillende afschermingsmaterialen voor smalle-bundel-fotonenstraling
6	Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al. (2e druk 2007), blz. 268, tabel 11.1: Build-up factoren voor een isotrope puntbron
7-8	Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2 <sup>e</sup> druk 2007), blz. 74-75: <sup>60</sup> Co
9	Bijlage 1.3 Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ
10	ICRP-33, blz 49, figuur 18: Transmissie van brede bundels gammastraling van radionucliden door beton
11	ICRP-33, blz. 47, figuur 16: Transmissie van brede bundels gammastraling van radionucliden door lood
12	ICRP-33, blz. 56, figuur 22: Verstrooiingsfractie van het kermatempo op een betonnen afscherming
13-14	Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2 <sup>e</sup> druk 2007), blz. 228-229: <sup>210</sup> Po
15	Figuur 3: Efficiencykalibratie voor de HPGe-detector in de gebruikte meetgeometrie
16-17	Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2 <sup>e</sup> druk 2007), blz. 232-233: <sup>232</sup> Th
18-19	Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2 <sup>e</sup> druk 2007), blz. 234-235: <sup>238</sup> U
20-21	Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2 <sup>e</sup> druk 2007), blz. 230-231: <sup>226</sup> Ra

**Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007),  
blz. 26-27: <sup>18</sup>F**

**<sup>18</sup>F**

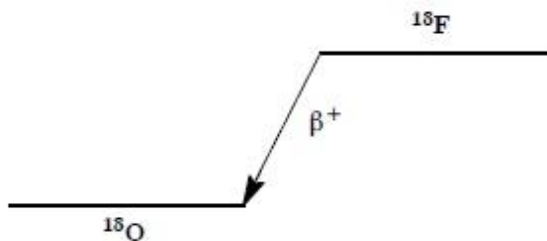
**Z = 9**

**Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 109,70 \text{ min} = 6,582 \times 10^3 \text{ s}$$

$$\lambda = 1,05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema**



**Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	y (Bq·s) <sup>-1</sup>	E (keV)
β <sup>+</sup>	1,000	250   634
γ <sup>±</sup>	2,000	511

**Bronconstanten**

Kermatempo in lucht	$k = 0,135 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosisequivalenttempo	$h = 0,166 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

**Diversen**

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 3,52 \times 10^{18} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^1 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{huid} = 5 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 1,4 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 1 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,6 \text{ TBq}$

**Productie en toepassingen**

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

N = 9

<sup>18</sup>F**Metabool model**

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat fluor na opname in het bloed volledig in het bot wordt opgenomen.

Gezien de korte fysische halveringstijd van <sup>18</sup>F (110 minuten) is de biologische halveringstijd van geen belang.

**Ingestie- en longzuiveringsklassen****Ingestie**

Alle verbindingen  $f_1 = 1$

**Inhalatie**

Afhankelijk	$f_1 = 1$	Klasse S
van	$f_1 = 1$	Klasse M
bindingskation	$f_1 = 1$	Klasse F

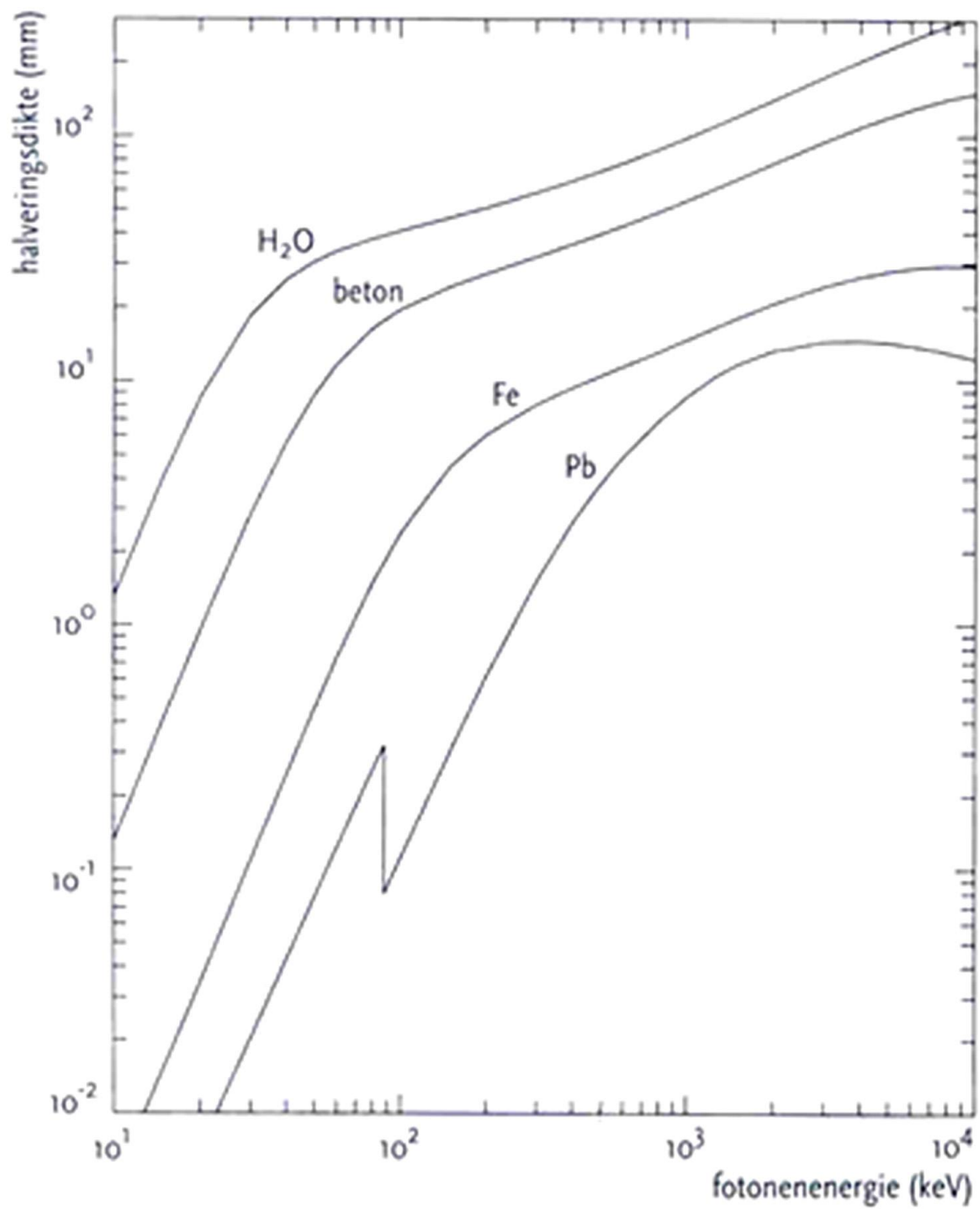
**Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)**

	Ingestie $f_1 = 1$	Inhalatie F	Inhalatie M	Inhalatie S	
$e(50)(w)$	$4,9 \times 10^{-11}$	$5,4 \times 10^{-11}$	$8,9 \times 10^{-11}$	$9,3 \times 10^{-11}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$2,0 \times 10^{10}$	$1,9 \times 10^{10}$	$1,1 \times 10^{10}$	$1,1 \times 10^{10}$	Bq
$e(50)(b)$	$4,9 \times 10^{-11}$	$3,0 \times 10^{-11}$	$5,7 \times 10^{-11}$	$6,0 \times 10^{-11}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$2,0 \times 10^{10}$	$3,3 \times 10^{10}$	$1,8 \times 10^{10}$	$1,7 \times 10^{10}$	Bq

**Gegevens voor totale-lichaamstelling**

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)			
0,25	$1,0 \times 10^{-1}$	$7,7 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-2}$
1	$1,1 \times 10^{-4}$	$6,8 \times 10^{-5}$	$6,8 \times 10^{-5}$	$6,8 \times 10^{-5}$



**Figuur 1:** Halveringsdikte van verschillende afschermings-materialen voor smalle-bundel fotonenstraling

Materiaal	Foton-energie E (MeV)	$\mu$ d						
		1	2	4	7	10	15	20
Water	0,255	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
Aluminium	3,0	1,69	2,42	3,91	6,23	8,63	12,8	17,0
	0,5	2,37	4,24	9,47	21,5	38,9	80,8	141
	1,0	2,02	3,31	6,57	13,1	21,2	37,9	58,5
	2,0	1,75	2,61	4,62	8,05	11,9	18,7	26,3
Ijzer	3,0	1,64	2,32	3,78	6,14	8,65	13,0	17,7
	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
Lood	3,0	1,55	2,15	3,51	5,85	8,51	13,5	19,1
	0,5	1,24	1,42	1,69	2,00	2,27	2,65	2,73
	1,0	1,37	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

**Figuur 2:** Build-up factoren voor een isotrope puntbron

**Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007), blz. 74-75: <sup>60</sup>Co**

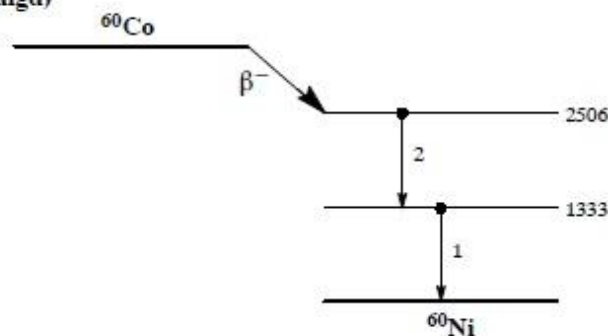


**Halveringstijd en vervalconstante**

$T_{1/2} = 5,272 \text{ j} = 1,66 \times 10^8 \text{ s}$

$\lambda = 4,17 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$

**Vervalschema (vereenvoudigd)**



**Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
$\beta^-$	0,999	96   318
$\gamma_1$	1,000	1333
$\gamma_2$	0,999	1173

**Bronconstanten**

Kermatempo in lucht	$k = 0,31 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosisequivalenttempo	$h = 0,36 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

**Diversen**

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 4,18 \times 10^{13} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^0 = 1 \text{ Bq/g !!}$
	$A_v = 10^5 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 3 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 1,9 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 0,4 \text{ TBq}$
	$A_2 = 0,4 \text{ TBq}$

**Productie en toepassingen**

Het radionuclide <sup>60</sup>Co is een activeringsproduct. Het komt voor als bijproduct in reactoren ten gevolge van de activering van staal. Daarnaast wordt het op velerlei terreinen toegepast. Voorbeelden zijn: radiotherapie, gammagrafie, doorstraling, ijking, demonstratie.

N = 33

 $^{60}\text{Co}$ **Metabool model**

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat kobalt zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 50% directe uitscheiding, 5% naar lever en 45% naar de rest van het lichaam, met een biologische halveringstijd van 0,5 dag.

De biologische halveringstijden voor de organen zijn:

Fractie	$T_{1/2}$
0,6	6 d
0,2	60 d
0,2	800 d

**Ingestie- en longzuiveringsklassen****Ingestie**

Oxide, hydroxide en anorganisch	$f_1 = 0,05$
Overige verbindingen	$f_1 = 0,1$

**Inhalatie**

Oxide, hydroxide, halogenide, nitraat	$f_1 = 0,05$	Klasse S
Overige	$f_1 = 0,1$	Klasse M

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

	Ingestie $f_1 = 0,05$	Ingestie $f_1 = 0,1$	Inhalatie M	Inhalatie S	
$e(50)(w)$	$2,5 \times 10^{-9}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$7,1 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$4,0 \times 10^8$	$2,9 \times 10^8$	$1,4 \times 10^8$	$5,9 \times 10^7$	Bq
$e(50)(b)$	$2,5 \times 10^{-9}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$9,6 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$4,0 \times 10^8$	$2,9 \times 10^8$	$1,0 \times 10^8$	$3,4 \times 10^7$	Bq

**Gegevens voor totale-lichaamstelling**

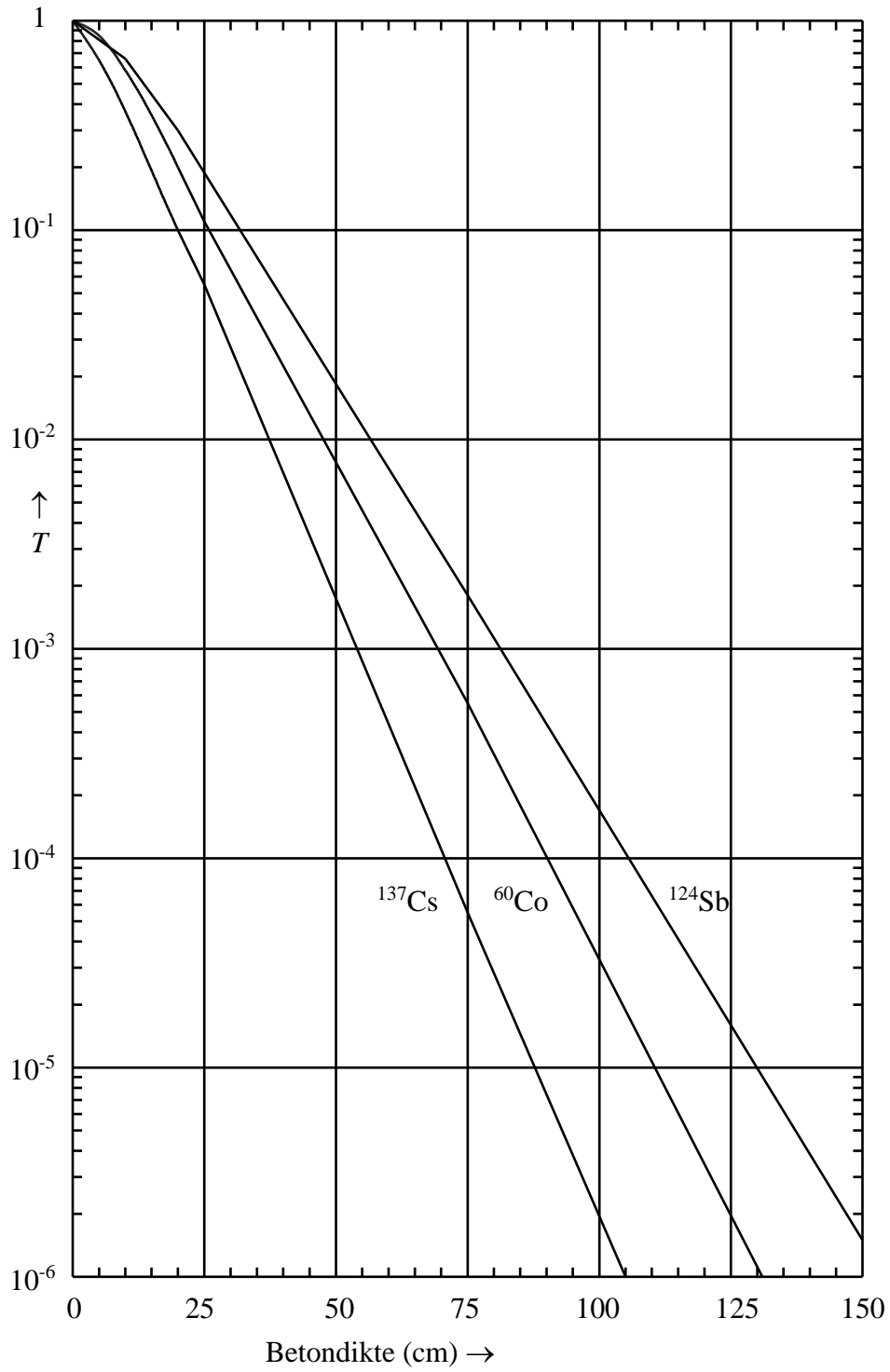
Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)			
0,25	$9,9 \times 10^{-1}$	$9,9 \times 10^{-1}$	$7,4 \times 10^{-1}$	$7,4 \times 10^{-1}$
1	$7,1 \times 10^{-1}$	$7,1 \times 10^{-1}$	$4,9 \times 10^{-1}$	$4,9 \times 10^{-1}$
2	$3,4 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-1}$
3	$1,5 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-1}$
5	$3,7 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-2}$
7	$2,0 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-2}$	$7,8 \times 10^{-2}$	$6,9 \times 10^{-2}$



### Bijlage 1.3 Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ

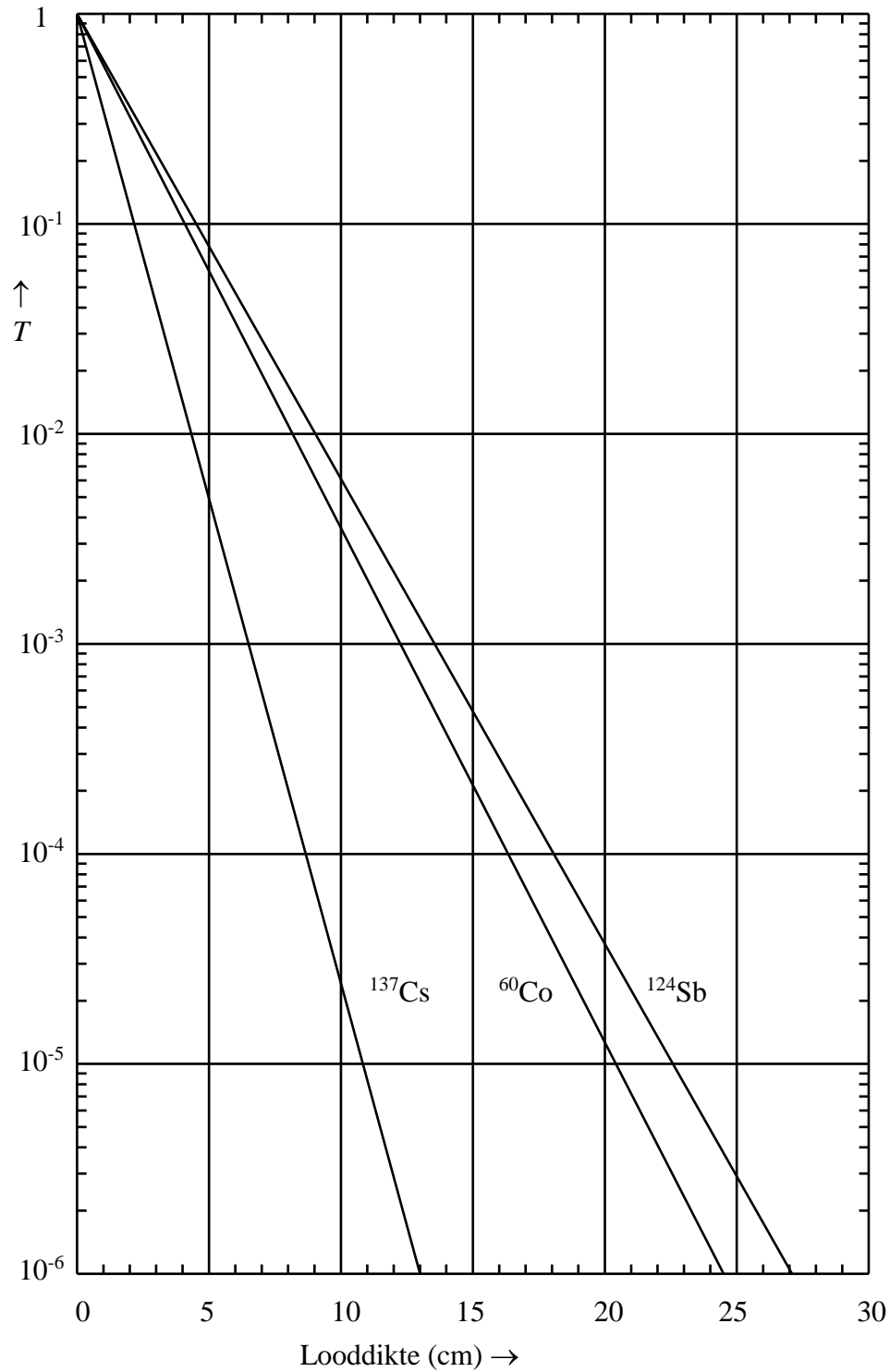
Element (Atoomnummer)	Radionuclide	Activiteitsniveau (Bq)
IJzer (26)	Fe-55	$4 \times 10^{11}$
Kobalt (27)	Co-60	$4 \times 10^9$
Seleen (34)	Se-75	$3 \times 10^{10}$
Krypton (36)	Kr-85	$1 \times 10^{11}$
Strontium (38)	Sr-90 a	$3 \times 10^9$
Palladium (46)	Pd-103 a	$4 \times 10^{11}$
Jood (53)	I-125	$2 \times 10^{11}$
Cesium (55)	Cs-137 a	$2 \times 10^{10}$
Promethium (61)	Pm-147	$4 \times 10^{11}$
Gadolinium (64)	Gd-153	$1 \times 10^{11}$
Thulium (69)	Tm-170	$3 \times 10^{10}$
Iridium (77)	Ir-192	$1 \times 10^{10}$
Thallium (81)	Tl-204	$1 \times 10^{11}$
Radium (88)	Ra-226 b	$2 \times 10^9$
Plutonium (94)	Pu-238 a	$1 \times 10^{11}$
Americium (95)	Am-241 b	$1 \times 10^{11}$
Californium (98)	Cf-252	$5 \times 10^8$
a In het activiteitsniveau zijn de bijdragen meegerekend van dochternucliden met een halveringstijd van minder dan tien dagen. b Met inbegrip van neutronenbronnen met beryllium.		

## Transmissie van brede bundel gammastraling door beton



Transmissie  $T$  van brede bundel gammastraling door beton  
 ( $\rho = 2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

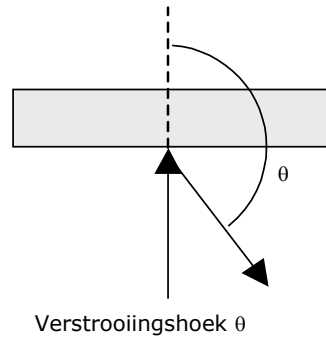
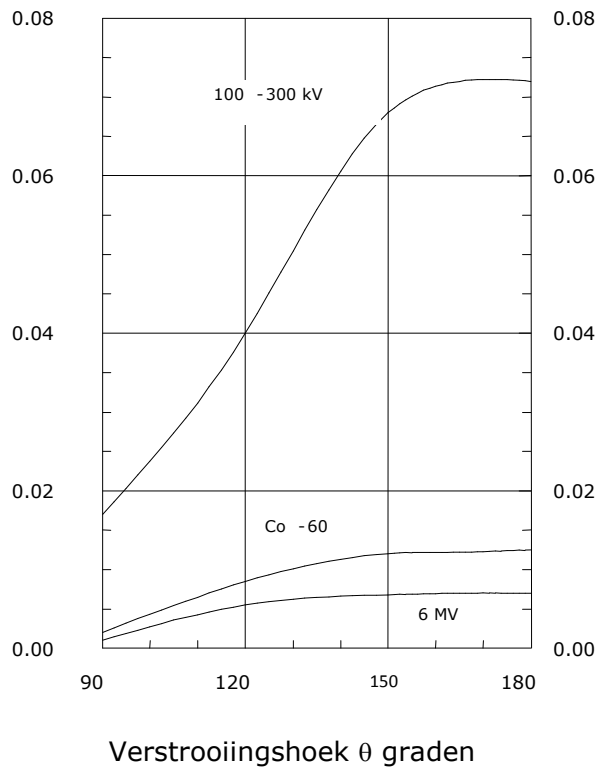
## Transmissie van brede bundel gammastraling door lood



Transmissie  $T$  van brede bundel gammastraling door lood  
( $\rho = 11350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

## Verstrooiingsfractie van kerma

Op 1 meter in procent per 100 cm<sup>2</sup> bestraald betonoppervlak



**Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007),  
blz. 228-229: <sup>210</sup>Po**

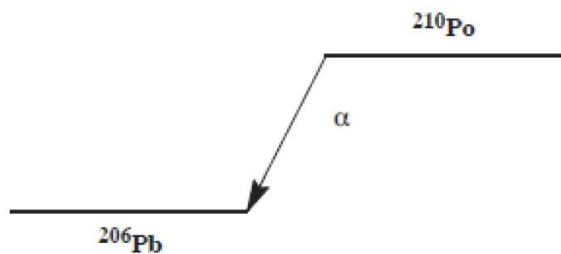
<sup>210</sup>Po
Z = 84

**Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 138,38 \text{ d} = 1,20 \times 10^7 \text{ s}$$

$$\lambda = 5,80 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema (vereenvoudigd)**



**Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
$\alpha_1$	1,000	5297
$\alpha$ terugstoot	1,000	103

**Diversen**

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 1,66 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^4 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} < 10^{-14} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 2,4 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 40 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,02 \text{ TBq}$

**Productie en toepassingen**

Het radionuclide <sup>210</sup>Po is een natuurproduct. Het komt voor in de uraniumvervalreeks. De vluchtigheid van polonium maakt dat het nuclide vrijkomt bij processen waarbij stoffen met (sporen) uranium verhit worden.

Grotere hoeveelheden <sup>210</sup>Po kunnen worden geproduceerd door bestraling van bismuth met neutronen. In 2006 is bekend geworden dat dit nuclide onder spionnen als effectieve gifstof toepassing vindt. Een inname van enkele microgrammen is al dodelijk (hoge specifieke activiteit, hoge radiotoxiciteit, opname in essentiële organen).

N = 126

 **$^{210}\text{Po}$** **Metabool model**

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat polonium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 30% naar lever, 10% naar nieren, 5% naar milt, 10% naar rood beenmerg en de rest naar de overige organen/weefsels.

De biologische halveringstijd voor alle organen/weefsels wordt gesteld op 50 dagen.

**Ingestie- en longzuiveringsklassen****Ingestie**

Alle verbindingen  $f_1 = 0,1$

**Inhalatie**

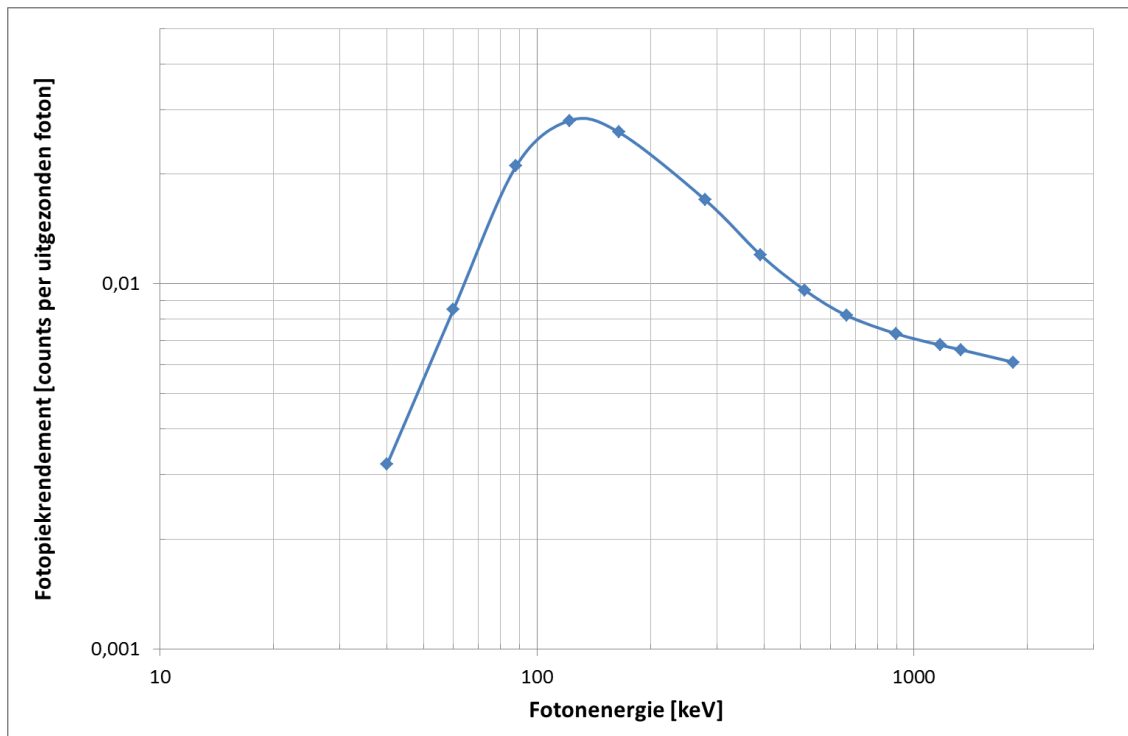
Als natuurlijke (rest)stof	$f_1 = 0,01$	Klasse S
Hydroxide, oxide, nitraat	$f_1 = 0,1$	Klasse M
Overige verbindingen	$f_1 = 0,1$	Klasse F

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

	Ingestie $f_1 = 0,1$	Inhalatie F	Inhalatie M	Inhalatie S	
$e(50)(w)$	$2,4 \times 10^{-7}$	$7,1 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$4,2 \times 10^6$	$1,4 \times 10^6$	$4,5 \times 10^5$	$3,1 \times 10^5$	Bq
$e(50)(b)$	$2,4 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$4,2 \times 10^6$	$1,7 \times 10^6$	$3,3 \times 10^5$	$2,3 \times 10^5$	Bq

**Gegevens voor urine-analyse****Na eenmalige inname**

Tijd (d)	Urineconcentratie (Bq/d per Bq inname)			
1	$1,9 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$8,3 \times 10^{-6}$
2	$4,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-5}$
3	$4,4 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-5}$
5	$4,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-5}$
7	$4,1 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-5}$



**Figuur 3** Efficiencykalibratie voor de HPGe-detector in de gebruikte meetomstandigheden (fotopiekrendement in counts per uitgezonden foton).

**Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007), blz. 232-233: <sup>232</sup>Th**

**<sup>232</sup>Th (+ dochters)**

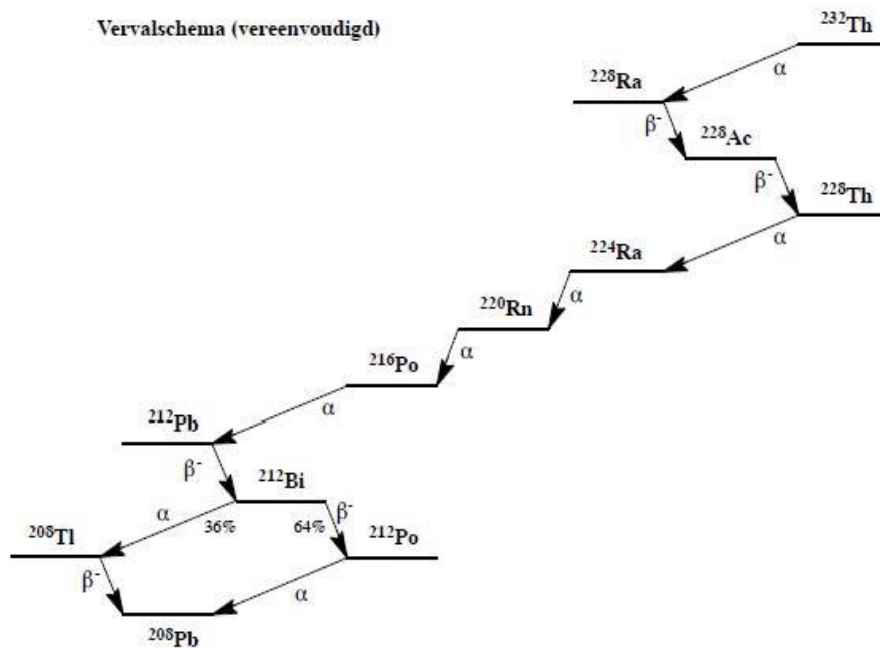
**Z = 90**

**Halveringstijd en vervalconstante**

$T_{1/2} = 1,405 \times 10^{10} \text{ j} = 4,43 \times 10^{17} \text{ s}$

$\lambda = 1,56 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$

**Vervalschema (vereenvoudigd)**



**Bronconstanten (inclusief dochters)**

Kernatempo in lucht

$k = 0,41 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$

Omgevingsdosisequivalenttempo

$h = 0,36 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

**Diversen**

Specifieke activiteit

$A_{sp} = 4,06 \times 10^3 \text{ Bq/g}$

Vrijstellingsgrenzen

$C_v = 10^1 \text{ Bq/g en } A_v = 10^4 \text{ Bq}$

in evenwicht met alle dochters

$C_v = 10^0 = 1 \text{ Bq/g en } A_v = 10^3 \text{ Bq}$

Huidbesmetting (incl. dochters)

$H_{\text{huid}} = 1,5 \times 10^{-9} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$

Wondbesmetting; Injectie

$e(50) = 2,6 \times 10^{-3} \text{ Sv/Bq (incl. dochters)}$

Vervoer

$A_1 = \text{onbeperkt}$

$A_2 = \text{onbeperkt}$



**N = 142** **$^{232}\text{Th}$** **Productie en toepassingen**

Het radionuclide  $^{232}\text{Th}$  is een natuurproduct. Het komt voor in ertsen. Het wordt gerekend tot de splijtstoffen, omdat het door neutronenvangst in het splijtbare U-233 wordt omgezet. Vanwege zijn grote lichtopbrengst bij verhitting, gekoppeld aan een hoog smeltpunt, vindt thorium toepassing als gaskousje.

**Halveringstijden en belangrijkste uitgezonden straling**

Radionuclide	$T_{1/2}$	$E_{\alpha}$ (keV)	$E_{\beta,\text{gem}}$ (keV)	$E_{\beta,\text{max}}$ (keV)	$E_{\gamma}$ (keV)
$^{232}\text{Th}$	$1,4 \times 10^{10}$ j	4010; 3952			
$^{228}\text{Ra}$	5,75 j		10	39	
$^{228}\text{Ac}$	6,13 h		386	1168	338
			611	1741	911
			748	2079	969
$^{228}\text{Th}$	1,91 j	5423; 5340			84
$^{224}\text{Ra}$	3,64 d	5686			241
$^{220}\text{Rn}$	55,6 s	6288			
$^{216}\text{Po}$	0,15 s	6779			
$^{212}\text{Pb}$	10,64 h		94	334	239
			173	573	
$^{212}\text{Bi}$	60,6 min	6051	832	2246	727
$^{212}\text{Po}$ (64%)	304 ns	8785			
$^{208}\text{Tl}$ (36%)	3,07 min		439	1284	2615
			532	1517	583
			647	1794	

**Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b) voor natuurlijk thorium in evenwicht met alle dochters**

	Ingestie	Inhalatie	
	$f_1 = 2 \times 10^{-4}$	S	
$e(50)(w)$	$9,0 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-5}$	Sv/Bq
$A_{\text{Re}}(w)$	$1,1 \times 10^6$	$1,7 \times 10^4$	Bq
$e(50)(b)$	$9,0 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-5}$	Sv/Bq
$A_{\text{Re}}(b)$	$1,1 \times 10^6$	$1,2 \times 10^4$	Bq

**Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007),  
blz. 234-235: <sup>238</sup>U**

**<sup>238</sup>U** (+ dochters)

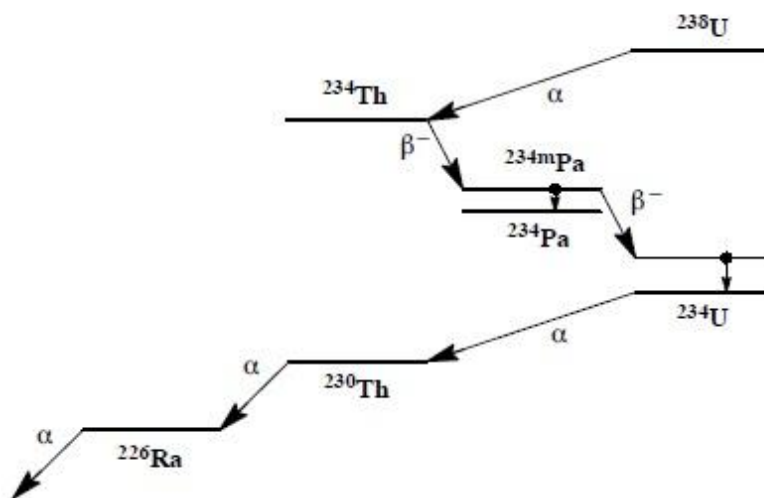
**Z = 92**

**Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 4,468 \times 10^9 \text{ j} = 1,41 \times 10^{17} \text{ s}$$

$$\lambda = 4,92 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema (vereenvoudigd)**



**Bronconstanten (inclusief dochters)**

Kermatempo in lucht	$k = 0,28 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosisequivalenttempo	$h = 0,26 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

**Diversen**

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 1,24 \times 10^4 \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^1 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^4 \text{ Bq}$
in evenwicht met alle dochters	$C_v = 10^0 = 1 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^3 \text{ Bq}$
Huidbesmetting (incl. dochters)	$H_{\text{huid}} = 7 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 4,1 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq (incl. dochters)}$
Vervoer	$A_1 = \text{onbeperkt}$
	$A_2 = \text{onbeperkt}$

**Productie en toepassingen**

Het radionuclide <sup>238</sup>U is een natuurproduct. Van alle uraniumisotopen is <sup>238</sup>U de meest voorkomende: 99,3%. De overige natuurlijke U-isotopen zijn <sup>235</sup>U (0,72 massaprocent) en <sup>234</sup>U (0,0055 massaprocent).

N = 146

 **$^{238}\text{U}$** **Halveringstijden en belangrijkste uitgezonden straling**

Radionuclide	$T_{1/2}$	$E_{\alpha}$ (keV)	$E_{\beta,\text{gem}}$ (keV)	$E_{\beta,\text{max}}$ (keV)	$E_{\gamma}$ (keV)
$^{238}\text{U}$	$4,47 \times 10^9$ j	4198			
$^{234}\text{Th}$	24,10 d		51	186	93
			25	96	
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1,17 min		825	2281	1001; 767
$^{234}\text{U}$	$2,45 \times 10^5$ j	4773; 4721			
$^{230}\text{Th}$	$7,7 \times 10^4$ j	4688; 4621			
$^{226}\text{Ra}$	1600 j	4784			

Zie verder  $^{226}\text{Ra}$ .

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

	Ingestie U-nat	Ingestie $^{238}\text{U}+$	Inhalatie U-nat	Inhalatie $^{238}\text{U}+$	
$e(50)(w)$	$1,6 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$4,2 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-5}$	Sv/Bq
$A_{\text{Re}}(w)$	$6,3 \times 10^5$	$2,5 \times 10^6$	$2,4 \times 10^4$	$3,8 \times 10^4$	Bq
$e(50)(b)$	$1,6 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-7}$	$5,7 \times 10^{-5}$	$3,7 \times 10^{-5}$	Sv/Bq
$A_{\text{Re}}(b)$	$6,3 \times 10^5$	$2,5 \times 10^6$	$1,8 \times 10^4$	$2,7 \times 10^4$	Bq

- U-nat      natuurlijk uranium met alle dochters in radiologisch evenwicht, plus  $^{235}\text{U}$  met dochters
- $^{238}\text{U}+$     uranium-238 met kortlevende dochters ( $^{234}\text{Th}$  en  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ), plus  $^{235}\text{U}$  en  $^{234}\text{U}$

Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007),  
blz. 230-231: <sup>226</sup>Ra

**<sup>226</sup>Ra** (+ dochters)

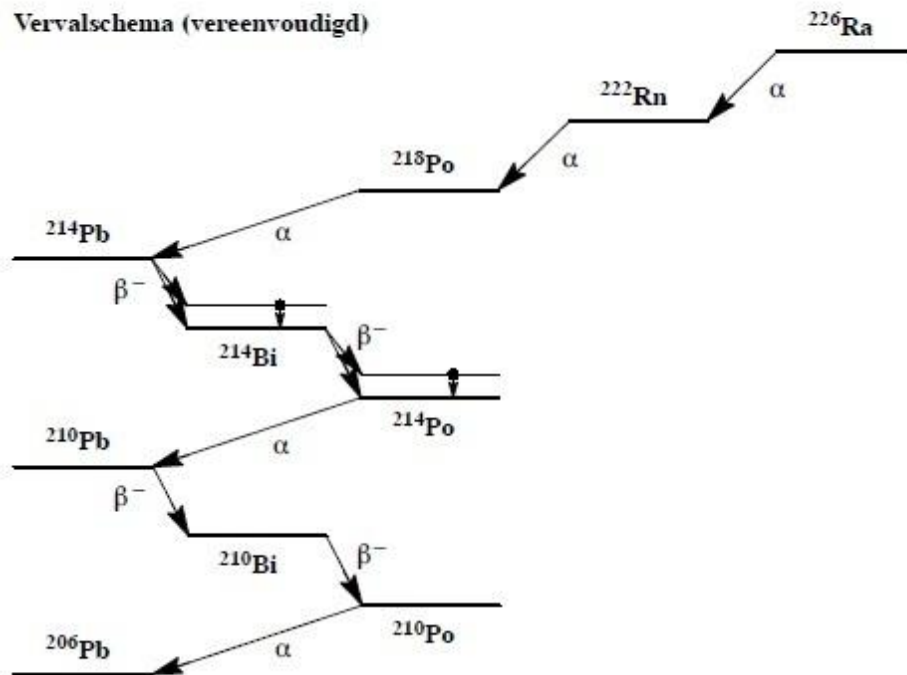
**Z = 88**

**Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 1,60 \times 10^3 \text{ j} = 5,05 \times 10^{10} \text{ s}$$

$$\lambda = 1,37 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema (vereenvoudigd)**



**Bronconstanten (inclusief dochters)**

Kermatempo in lucht  $k = 0,28 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$

Omgevingsdosis-equivalenttempo  $h = 0,26 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

**Diversen (inclusief dochters)**

Specifieke activiteit (alleen <sup>226</sup>Ra)  $A_{sp} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq/g (1 g Ra} \equiv 1 \text{ Ci !)}$

Vrijstellingsgrenzen  $C_v = 10^0 = 1 \text{ Bq/g en } A_v = 10^4 \text{ Bq}$

Huidbesmetting  $H_{\text{huid}} = 6 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$

Wondbesmetting; Injectie  $e(50) = 4,3 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq}$

Vervoer  $A_1 = 0,2 \text{ TBq en } A_2 = 0,003 \text{ TBq}$

**Productie en toepassingen**

Het radionuclide <sup>226</sup>Ra is een natuurproduct. Het komt voor in de uraniumvervalreeks. Er is een reeks van toepassingen geweest, toen het nuclide de enige radioactieve stof was

N = 138

 **$^{226}\text{Ra}$** 

met een aanzienlijke activiteit. Toepassingen waren: radiotherapie, lichtgevende verf, bliksemafleiders, medische kwakzalverij. Vanwege de hoge radiotoxiciteit is het langzamerhand verdrongen door minder toxische radionucliden.

**Halveringstijden en belangrijkste uitgezonden straling**

Radionuclide	$T_{1/2}$	$E_{\alpha}$ (keV)	$E_{\beta, \text{gem}}$ (keV)	$E_{\beta, \text{max}}$ (keV)	$E_{\gamma}$ (keV)
$^{226}\text{Ra}$	1600 j	4784			
$^{222}\text{Rn}$	3,82 d	5490			
$^{218}\text{Po}$	3,05 min	6003			
$^{214}\text{Pb}$	26,8 min		207	672	352
			227	729	295
$^{214}\text{Bi}$	19,9 min		525	1505	609
			539	1540	1120
			1269	3270	1765
$^{214}\text{Po}$	0,164 ms	7687			
$^{210}\text{Pb}^*$	22,3 j		4	16	46
			16	63	
$^{210}\text{Bi}$	5,01 d		389	1161	
$^{210}\text{Po}^*$	138,4 d	5297			

\* Deze radionucliden zijn tevens apart opgenomen (zie aldaar).

**Ingestie- en longzuiveringsklassen****Ingestie**

Alle verbindingen  $f_1 = 0,2$

**Inhalatie**

Als natuurlijke (rest)stof  $f_1 = 0,01$  Klasse S

Overige verbindingen  $f_1 = 0,2$  Klasse M

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

	Ingestie $f_1 = 0,2$	Inhalatie M*	Inhalatie S*	Inhalatie S**	
$e(50)(w)$	$2,8 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-5}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$3,6 \times 10^6$	$4,5 \times 10^5$	$1,3 \times 10^5$	$2,5 \times 10^4$	Bq
$e(50)(b)$	$2,8 \times 10^{-7}$	$3,5 \times 10^{-6}$	$9,5 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-5}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$3,6 \times 10^6$	$2,9 \times 10^5$	$1,1 \times 10^5$	$2,0 \times 10^4$	Bq

\* aangenomen dat dochter  $^{222}\text{Rn}$  grotendeels ontsnapt uit het ingeademde deeltje

\*\* aangenomen dat het  $^{222}\text{Rn}$  niet ontsnapt uit het ingeademde deeltje en met alle dochters in radiologisch evenwicht