

**BIJLAGE bij  
Examen  
Coördinerend Deskundige Stralingsbescherming**

---

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: 15 mei 2017  
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

**Instructie:**

- ❑ **Wanneer u andere gegevens gebruikt dan in deze bijlage zijn genoemd, vermeld dan de herkomst!**
- ❑ **Deze bijlage omvat 13 doorlopend genummerde pagina's. Controleer dit!**

## INHOUDSOPGAVE

### Pagina

- 3-5 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling-Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007), blz. 120, 122 en 124, gegevens van respectievelijk <sup>99</sup>Mo, <sup>99</sup>Tc en <sup>99m</sup>Tc
- 6 Verloop van <sup>131</sup>I-opname inclusief verval in twee organen na <sup>131</sup>I-ingestie bij de behandeling van metastases, berekend met het HARAS-model
- 7-8 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling-Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007), blz. 164 en 165, gegevens van <sup>131</sup>I
- 9-10 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling-Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007), blz. 66 en 67, gegevens van <sup>57</sup>Co
- 11-12 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2<sup>e</sup> druk, 2007), blz. 24-25: gegevens <sup>14</sup>C
- 13 Interactiecoëfficiënten voor fotonen in ijzer (ontleend aan Inleiding tot de Stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al, 2<sup>e</sup> druk, 2007, p.384)
- 13 Dosisconversiecoëfficiënten voor externe blootstelling aan fotonen (ontleend aan Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al, 2<sup>e</sup> druk, 2007, p. 386)

# <sup>99</sup>Mo

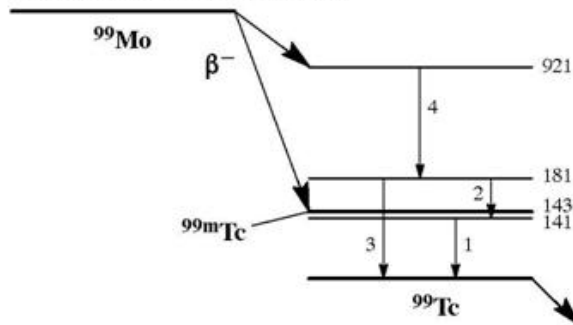
Z = 42

## Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 65,94 \text{ h} = 2,37 \times 10^5 \text{ s}$$

$$\lambda = 2,92 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

## Vervalschema (vereenvoudigd)



## Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
$\beta^-$	0,820	443   1214
$\beta^-$	0,166	133   436
$\gamma_1$	0,049	141
$\gamma_2$	0,012	41
$\gamma_3$	0,061	181
$\gamma_4$	0,122	740

Voor straling van dochters <sup>99</sup>Tc ( $y = 0,124$ ) en <sup>99m</sup>Tc ( $y = 0,876$ ): zie aldaar

## Bronconstanten

Kermatempo in lucht	$k = 0,022 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,026 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

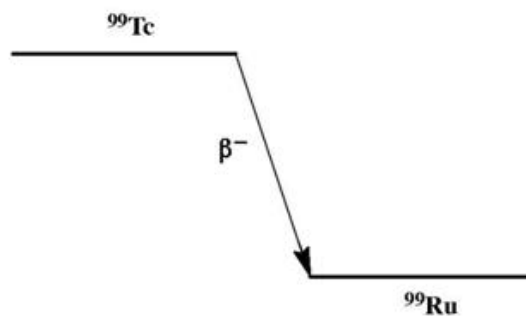
## Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 1,77 \times 10^{16} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 4 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 4,6 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq (incl. } ^{99m}\text{Tc)}$
Vervoer	$A_1 = 1 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,6 \text{ TBq}$

**$^{99}\text{Tc}$**  **$Z = 43$** **Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 2,13 \times 10^5 \text{ j} = 6,72 \times 10^{12} \text{ s}$$

$$\lambda = 1,03 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema****Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
$\beta^-$	1,000	101   294

**Diversen**

Specifieke activiteit	$A_{\text{sp}} = 6,27 \times 10^8 \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^4 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^7 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 3 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 1,8 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 40 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,9 \text{ TBq}$

**Productie en toepassingen**

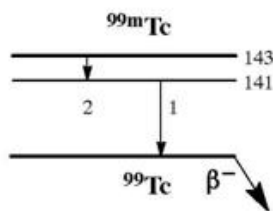
Het radionuclide  $^{99}\text{Tc}$  is een splijttingsproduct.

# $^{99m}\text{Tc}$

 $Z = 43$ **Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 6,006 \text{ h} = 2,17 \times 10^4 \text{ s}$$

$$\lambda = 3,21 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema (vereenvoudigd)****Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
$\gamma_1$	0,889	141
ce M $\gamma_2$	0,914	2
ce N $\gamma_2$	0,076	2
$K_{\alpha}$	0,062	18
LMX	0,102	2

**Bronconstanten**

Kermatempo in lucht	$k = 0,018 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosisequivalenttempo	$h = 0,023 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

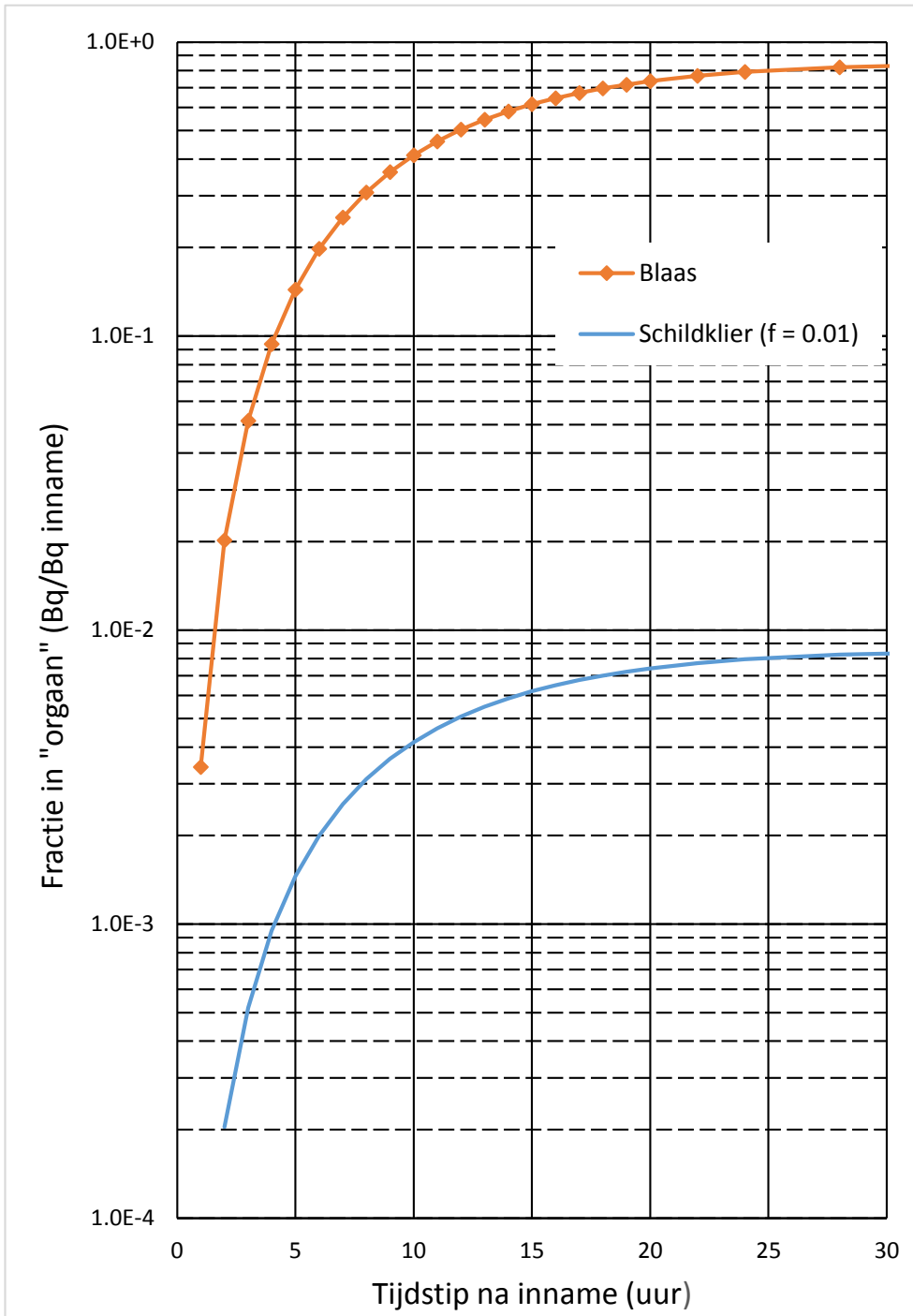
**Diversen**

Specifieke activiteit	$A_{\text{sp}} = 1,95 \times 10^{17} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^7 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-11} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 1,1 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 10 \text{ TBq}$
	$A_2 = 4 \text{ TBq}$

**Productie en toepassingen**

Het radionuclide  $^{99m}\text{Tc}$  is de dochter van  $^{99}\text{Mo}$ . Het wordt geproduceerd in een Mo/Tc-generator en op zeer grote schaal in de nucleaire geneeskunde gebruikt voor diagnostische doeleinden: voor afbeeldingen en functiestudies.

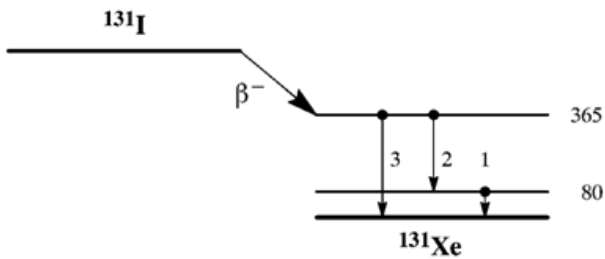
**Verloop van  $^{131}\text{I}$ -opname inclusief verval in twee organen na  $^{131}\text{I}$ -ingestie bij de behandeling van metastases, berekend met het HARAS-model.**



**$^{131}\text{I}$**  **$Z = 53$** **Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 8,021 \text{ d} = 6,93 \times 10^5 \text{ s}$$

$$\lambda = 1,00 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema (vereenvoudigd)****Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
$\beta^-$	0,894	192   606
$\gamma_1$	0,026	80
ce K $\gamma_1$	0,036	46
$\gamma_2$	0,061	284
$\gamma_3$	0,812	365

**Bronconstanten**

Kermatempo in lucht	$k = 0,052 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosisequivalenttempo	$h = 0,066 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

**Diversen**

Specifieke activiteit	$A_{\text{sp}} = 4,60 \times 10^{15} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 4 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 2,2 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 3 \text{ TBq}$
	$A_2 = 0,7 \text{ TBq}$

**Productie en toepassingen**

Het radionuclide  $^{131}\text{I}$  is een belangrijk splijttingsproduct. Het wordt veelvuldig toegepast in de diagnostische en therapeutische nucleaire geneeskunde.

**N = 78****131I****Metabool model**

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat jodium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 70% directe uitscheiding en 30% naar de schildklier. Jodium in de schildklier verblijft aldaar met een biologische halveringstijd van 80 dagen, van waaruit het in de vorm van organisch jodium homogeen over het lichaam wordt verdeeld. Het verblijft in andere organen/weefsels dan de schildklier geschiedt met een halveringstijd van 12 dagen. Een tiende van het organisch jodium wordt onmiddellijk uitgescheiden via de faeces, terwijl de rest (90%) terugkeert in het transfercompartiment. Zodoende wordt de biologische halveringstijd in de schildklier effectief gelijk aan 90 dagen.

N.B. Dit model geldt niet voor patiënten, zie pagina 14.

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

Alle verbindingen  $f_1 = 1$

**Inhalatie**

Damp (I <sub>2</sub> )	$f_1 = 1$	Klasse SR-1
Damp (CH <sub>3</sub> I)	$f_1 = 1$	Klasse SR-1 70% depositie
Overige verbindingen	$f_1 = 1$	Klasse F

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

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

**Gegevens voor schildkliertelling (na eenmalige inname)**

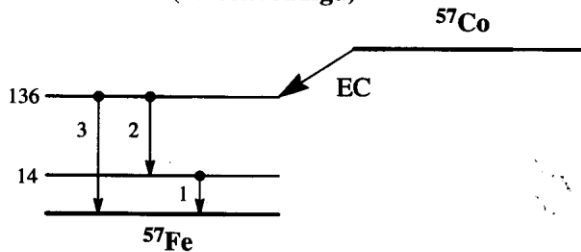
Tijd (d)	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)			
	$f_1 = 1$	F	I <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> I
0,25	$6,0 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$
1	$2,4 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$
2	$2,5 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$1,7 \times 10^{-1}$
3	$2,3 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-1}$
5	$1,9 \times 10^{-1}$	$9,0 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{-1}$
7	$1,6 \times 10^{-1}$	$7,5 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$



**$^{57}\text{Co}$**  **$Z = 27$** **Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 271,84 \text{ d} = 2,35 \times 10^7 \text{ s}$$

$$\lambda = 2,95 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema (vereenvoudigd)****Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$	Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
$\gamma_1$	0,092	14	ce K $\gamma_1$	0,713	7
$\gamma_2$	0,856	122	ce K $\gamma_2$	0,018	115
$\gamma_3$	0,106	136	ce K $\gamma_3$	0,014	129
$K_\alpha$	0,503	6			

**Bronconstanten**

Kermatempo in lucht  
Omgevingsdosistempo

$$k = 0,022 \mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$$

$$h = 0,023 \mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$$

**Diversen**

Specifieke activiteit  
Radiotoxiciteit  
Vrijstellingsgrenzen  
Huidbesmetting  
Wondbesmetting  
Vervoer

$$A_{\text{sp}} = 3,12 \times 10^{17} \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$$

Gemiddeld (3)

$$10^2 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1} \text{ en } 10^6 \text{ Bq}$$

$$H_{\text{huid}} = 1 \times 10^{-11} \text{ Sv}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{cm}^2$$

$$e(50) = 5,9 \times 10^{-10} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$$

$$A_1 = 8 \text{ TBq}$$

$$A_2 = 8 \text{ TBq}$$

**Productie en toepassingen**

Het radionuclide  $^{57}\text{Co}$  wordt geproduceerd met behulp van een cyclotron: protonen op ijzer. Het wordt toegepast in de geneeskunde (vitamine-B-stofwisseling, testbron voor gamma-camera, botdensitometrie). In de vaste-stoffysica vindt  $^{57}\text{Co}$  een speciale toepassing, namelijk als Mössbauer-bron.

**N = 30****<sup>57</sup>Co****Inwendige besmetting**

Metabolisch model.

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat kobalt zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 50% directe excretie, 5% naar lever en 45% naar de rest van het lichaam. Biologische halveringstijd: 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

**Dosisconversiecoëfficiënten na inwendige besmetting**

	Ingestie	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie
	$f_1 = 0,1$	$f_1 = 0,05$	M	S
$e(50)$ (Sv/Bq)	$2,1 \times 10^{-10}$	$1,9 \times 10^{-10}$	$3,9 \times 10^{-10}$	$6,0 \times 10^{-10}$
RE (Bq)	$5 \times 10^9$			$2 \times 10^9$

**Gegevens voor totale-lichaamstelling****Eenmalige inname**

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

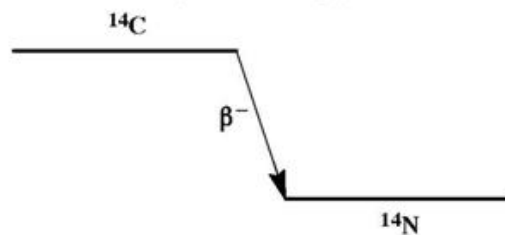
**Continue inname**

Bq/(Bq·d <sup>-1</sup> )	3,5	13	8,4	13
Sv·j <sup>-1</sup> ·Bq <sup>-1</sup>	$8,7 \times 10^{-9}$	$1,9 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$

**$^{14}\text{C}$**  **$Z = 6$** **Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 5730 \text{ j} = 1,81 \times 10^{11} \text{ s}$$

$$\lambda = 3,83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

**Vervalschema (vereenvoudigd)****Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
$\beta^-$	1,000	49   156

**Diversen**

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 1,65 \times 10^{11} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^8 \text{ Bq/g (CO)}$ $= 10^7 \text{ Bq/g (CO}_2)$ $= 10^4 \text{ Bq/g (overige)}$ $A_v = 10^{11} \text{ Bq (CO, CO}_2)$ $= 10^7 \text{ Bq (overige)}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-11} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 5,8 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 40 \text{ TBq}$ $A_2 = 3 \text{ TBq}$

**Productie en toepassingen**

Het radionuclide  $^{14}\text{C}$  wordt gevormd in de buitenste lagen van de atmosfeer, voornamelijk door de (exotherme) reactie  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ . De concentratie van  $^{14}\text{CO}_2$  in de biosfeer is hierdoor ongeveer 220 Bq/kg C. De stofwisseling van planten ( $\text{CO}_2$  in en  $\text{O}_2$  uit) maakt dat plantaardige stoffen dezelfde  $^{14}\text{C}$ -concentratie bevatten als in de atmosfeer. Na de dood van de plant neemt de  $^{14}\text{C}$ -concentratie af met de halveringstijd van 5730 jaar. Door meting van deze concentratie kan dus de ouderdom van plantaardige stoffen worden bepaald: de koolstofdateringsmethode. Door het verbranden van (zeer oude) fossiele brandstoffen neemt de  $^{14}\text{C}$ -concentratie de laatste jaren geleidelijk af. De mens bevat enig  $^{14}\text{C}$ : de referentiemens is opgebouwd uit 16 kg koolstof en bevat

N = 8

<sup>14</sup>C

zodoende 3500 Bq <sup>14</sup>C. Door bovengrondse kernproeven is sinds 1945 ongeveer 0,2 EBq in de atmosfeer terechtgekomen. Het radionuclide wordt verder gebruikt als merker van biologische verbindingen en als zeer stabiele lichtbron.

### Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat koolstof zich na ingestie en inhalatie momentaan en homogeen over het lichaam verdeelt. Er gelden verschillende biologische halveringstijden zoals aangegeven in onderstaande tabel.

### Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie		Biologische $T_{1/2}$
Alle verbindingen	$f_1 = 1$	40 d
Inhalatie		
Organische aerosolen	M	40 d
Organische dampen	SR-2	40 d
CO	SR-1, 40% dep.	200 min
CO <sub>2</sub>	SR-2	5 d (18%), 60 d (81%), 40 d (1%)

### Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent zowel voor werknemers als voor leden van de bevolking

	Ingestie $f_1 = 1$	Inhalatie M	Inhalatie Damp	Inhalatie CO	Inhalatie CO <sub>2</sub>	
$e(50)$	$5,8 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-9}$	$5,8 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-13}$	$6,2 \times 10^{-12}$	Sv/Bq
$A_{Re}$	$1,7 \times 10^9$	$5,0 \times 10^8$	$1,7 \times 10^9$	$1,3 \times 10^{12}$	$1,6 \times 10^{11}$	Bq

### Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname) met $F_u = 0,017$				
1	$1,2 \times 10^{-4}$	$9,3 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-4}$
2	$2,7 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$
3	$2,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-4}$	$3,5 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-4}$
5	$2,7 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-4}$	–	$2,0 \times 10^{-4}$
7	$2,6 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-4}$	–	$1,5 \times 10^{-4}$

**Interactiecoëfficiënten voor fotonen in ijzer**Inleiding tot de stralingshygiëne (Bos et al., 2<sup>e</sup> druk, 2007) blz. 384

Fotonenergie (MeV)	$\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )	$\mu_{\text{en}}/\rho$ ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )
0,02	25,7	22,1
0,03	8,18	7,2
0,04	3,63	3,18
0,05	1,96	1,63
0,06	1,20	0,944
0,08	0,595	0,411
0,10	0,372	0,219
0,15	0,196	0,080

**Dosisconversiecoëfficiënten voor externe blootstelling aan fotonen**Inleiding tot de stralingshygiëne (Bos et al., 2<sup>e</sup> druk, 2007) blz. 386

Fotonenergie (MeV)	$K_a/\Phi$ ( $\text{pGy cm}^2$ )	$H^*(10)/\Phi$ ( $\text{pSv cm}^2$ )
0,02	1,73	1,05
0,03	0,739	0,81
0,04	0,438	0,64
0,05	0,328	0,55
0,06	0,292	0,51
0,08	0,308	0,53
0,10	0,372	0,61
0,15	0,600	0,89