

**BIJLAGE bij Examen
Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van
coördinerend deskundige**

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC

examendatum:

13 mei 2024

examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

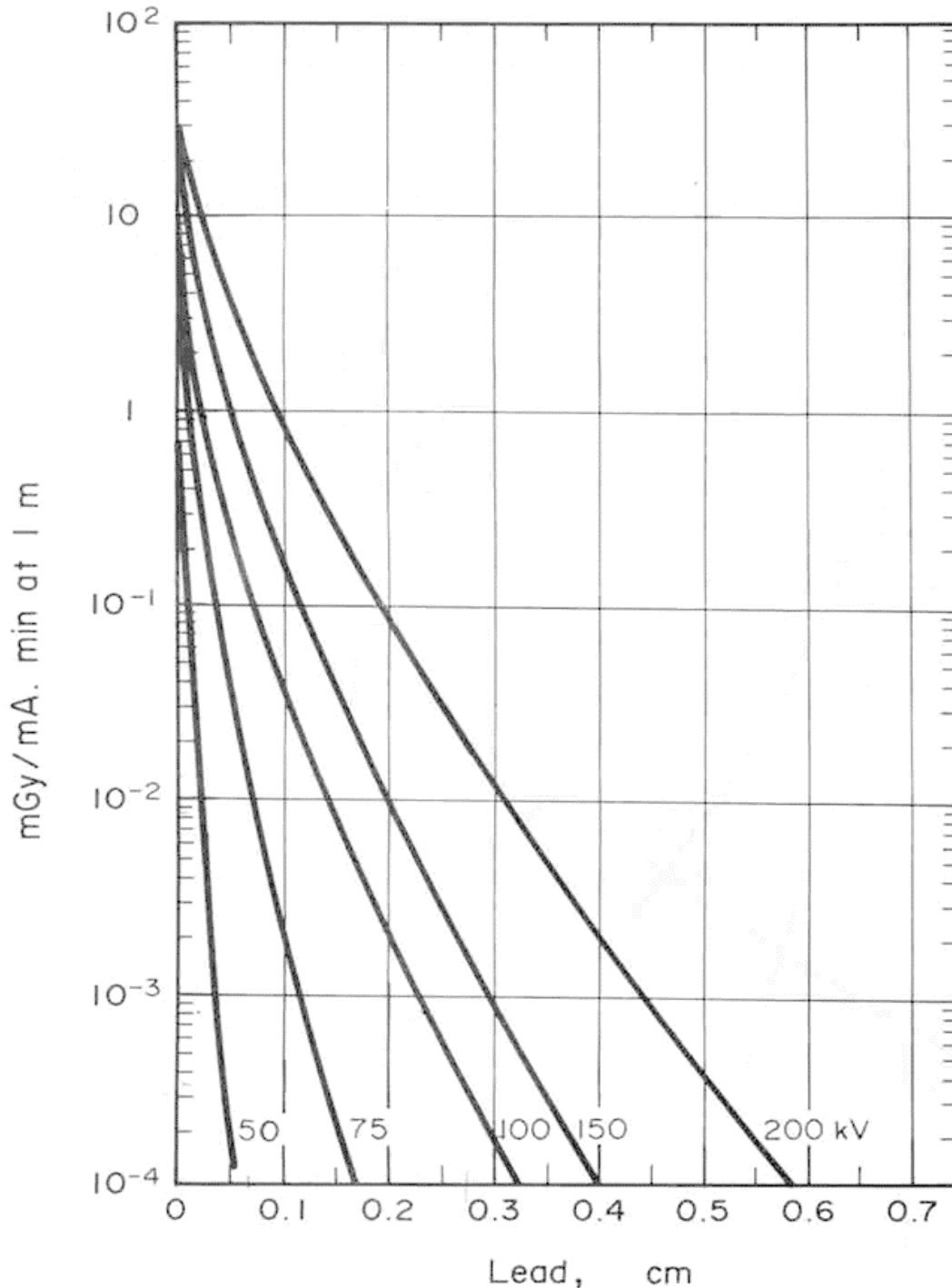
- ❑ Wanneer u andere gegevens gebruikt dan in deze bijlage zijn genoemd, vermeld dan de herkomst!
- ❑ Deze bijlage omvat 11 doorlopend genummerde pagina's. Controleer dit!

INHOUDSOPGAVE

Bladzijde

- 3 Output- en transmissiegegevens van brede bundels röntgenstraling door lood, voor de gebruikte röntgenbuis
- 4 Uitsnede nuclidenkaart
- 5 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 64, gegevens ⁵⁵Fe
- 6-7 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 26+27, gegevens ¹⁸F
- 8 Meetrendement van NaI-putkristal voor ¹⁸F
- 9 PSMA-uitscheiding in urine
- 10 Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al. (2^e druk 2007), appendix D interactiecoëfficiënten voor fotonen, blz. 382
- 11 Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al. (2^e druk 2007), tabel 11.1 exposie-opbouwfactor voor isotrope puntbron, blz. 268

Output- en transmissiegegevens van brede bundels röntgenstraling door lood voor de gebruikte röntgenbuis



Output- en transmissiegegevens van brede bundels röntgenstraling door lood voor de gebruikte röntgenbuis. Dichtheid lood = 11350 kg m^{-3} . Verticaal is uitgezet het luchtkermatempo (in mGy/min) per mA op 1 m. Constante potentiaal röntgenbuis; wolfram reflectietarget; 2 mm aluminium filtratie; Snijpunten met de verticale as: 28,7 bij 200 kV, 18,3 bij 150 kV, 9,6 bij 100 kV, 6,1 bij 75 kV en 2,6 bij 50 kV. (Ontleend aan ICRP-33)

Uitsnede nuclidenkaart

Zn 58 84 ms β^+ 203, 848 p?	Zn 59 182.0 ms β^+ 8.1... γ 491, 914 β 1.78, 2.09 1.82, 1.38...	Zn 60 2.38 m β^+ 2.5, 3.1... γ 670, 61, 273 334...	Zn 61 89.1 s β^+ 4.6... γ 475, 1660 970...	Zn 62 9.193 h β^+ 0.6 γ 597, 41, 548 508...	Zn 63 38.1 m β^+ 2.3... γ 670, 962 1412...	Zn 64 49.17 σ 0.74 $\sigma_{n,\alpha}$ 1.1E-5 $\sigma_{n,p}$ < 1.2E-5	Zn 65 243.93 d ϵ , β^+ 0.3 γ 1115... σ 66, $\sigma_{n,\alpha}$ 2.0	Zn 66 27.73 σ 0.9 $\sigma_{n,\alpha}$ < 2E-5	Zn 67 4.04 σ 6.9 $\sigma_{n,\alpha}$ 0.0004
Cu 57 199 ms β^+ 7.7... γ 1112	Cu 58 3.20 s β^+ 7.5... γ 1454, 1448 40...	Cu 59 82 s β^+ 3.8... γ 1302, 878 339, 465...	Cu 60 23.7 m β^+ 2.9, 3.8... γ 1332, 1792 826...	Cu 61 3.339 h β^+ 1.2... γ 283, 656, 67 1185...	Cu 62 9.67 m β^+ 2.9... γ (1173...)	Cu 63 69.15 σ 4.5	Cu 64 12.7004 h ϵ γ (1346) β^- 0.6, β^+ 0.7 σ ~270	Cu 65 30.85 σ 2.17	Cu 66 5.1 m β^- 2.6... γ 1039, (834...) σ 140
Ni 56 6.075 d β^+ no β^+ γ 158, 812, 750 480, 270...	Ni 57 36 h ϵ β^+ 0.8... γ 1378, 1920 127...	Ni 58 68.0769 σ 4.6 $\sigma_{n,\alpha}$ < 3E-5	Ni 59 7.5·10 ⁴ a ϵ , β^+ ..., no γ σ 77.7, $\sigma_{n,\alpha}$ 14 $\sigma_{n,p}$ 2, σ_{abs} 92	Ni 60 26.2231 σ 2.9	Ni 61 1.1399 σ 2.5 $\sigma_{n,\alpha}$ 3E-5	Ni 62 3.6345 σ 15	Ni 63 100 a β^- 0.07 no γ σ 20	Ni 64 0.9256 σ 1.6	Ni 65 2.52 h β^- 2.1... γ 1482, 1115 366... σ 22
Co 55 17.54 h β^+ 1.5... γ 847, 1238 2598, 1771 1038...	Co 56 77.236 d ϵ , β^+ 1.5... γ 847, 1238 2598, 1771 1038...	Co 57 271.80 d ϵ γ 122, 136, 14... e^-	Co 58 9.10 h 70.86 d β^+ 0.5, 1.3 γ (25), e^- σ 140000	Co 59 100 σ 20.7 + 16.5	Co 60 5.2712 a 10.467 m β^- 0.3 IT 59, e^- 1.5... γ 1332 γ (1332...) 1173... σ 2.0	Co 61 1.649 h β^- 1.3... γ 67, 918...	Co 62 13.86 m 1.54 m β^- 3.0... γ 1173 β^- 4.1... γ 1173 2302 2004... IT?	Co 63 27.5 s β^- 3.6... γ 87, 982...	Co 64 0.3 s β^- 7.0... γ 1346, 931
Fe 54 5.845 σ 2.3 $\sigma_{n,\alpha}$ 1E-5	Fe 55 2.73 a ϵ no γ σ 13 $\sigma_{n,\alpha}$ 0.01	Fe 56 91.754 σ 2.8	Fe 57 2.119 σ 1.4	Fe 58 0.282 σ 1.3	Fe 59 44.494 d β^- 0.5, 1.6... γ 1099, 1292... σ < 10	Fe 60 2.62·10 ⁶ a β^- 0.2 m	Fe 61 5.98 m β^- 2.8, 4.0... γ 1205, 1027 298...	Fe 62 68 s β^- 2.0 γ 506 g	Fe 63 6.1 s β^- 6.7... γ 995, 1427 1299...
Mn 53 3.7·10 ⁶ a ϵ no γ σ 70	Mn 54 312.2 d ϵ γ 835 β^- ..., β^+ ... σ < 10	Mn 55 100 σ 13.3	Mn 56 2.5789 h β^- 2.9... γ 847, 1811 2113...	Mn 57 1.5 m β^- 2.6... γ 14, 122, 692...	Mn 58 3.0 s 65.4 s β^- 4.2... γ 814 1323... IT 72, e^- 2433...	Mn 59 4.6 s β^- 4.4, 4.8... γ 726, 473 571...	Mn 60 0.28 s 1.77 s β^- 5.9 6.6... β^- 8.4... γ 824 1150 1968... IT 272 1532	Mn 61 0.709 s β^- 6.5, 7.2... γ 629, 207... β ?	Mn 62 92 ms 671 ms β^- γ 877 1299 1299 β^- γ 815, 877 β ?
Cr 52 83.789 σ 18	Cr 53 9.501 σ 18	Cr 54 2.365 σ 0.36	Cr 55 3.50 m β^- 2.6 γ (1528...)	Cr 56 5.94 m β^- 1.5 γ 83, 850, 1752 1535...	Cr 57 21.1 s β^- 5.1... γ 83, 850, 1752 1535...	Cr 58 7.0 s β^- γ 683, 126, 290 520... m	Cr 59 1.05 s β^- γ 1238, 1900 112, 663...	Cr 60 0.49 s β^- 6.5... γ 349, 410, 758 9, β ?	Cr 61 237 ms β^- γ 1142, 1861 355, 2378...

Handboek Radionucliden, A.S Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 64, gegevens ⁵⁵Fe

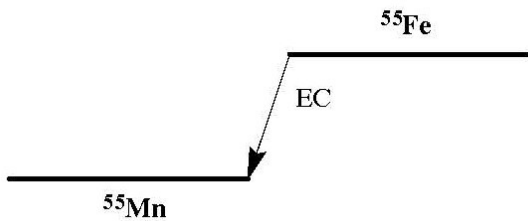
⁵⁵Fe
Z = 26

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 985,4 \text{ d} = 8,51 \times 10^7 \text{ s}$$

$$\lambda = 8,14 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
K α	0,250	6
K β	0,033	6
KLL	0,495	5
KLX	0,112	6

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	$k = 0,000 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,000 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 8,91 \times 10^{13} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^4 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 1 \times 10^{-12} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 3,0 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 40 \text{ TBq}$ $A_2 = 40 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ⁵⁵Fe is een activeringsproduct dat ontstaat uit de reactie: ⁵⁴Fe(n, γ)⁵⁵Fe. Het nuclide zendt alleen karakteristieke röntgenstraling uit. Daarom is voor detectie een speciale detector ontwikkeld (zgn. Fe-55-detector). Het nuclide wordt gebruikt in een electroncapture-detector en bij röntgen-fluorescentie.

Handboek Radionucliden, A.S Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 26+27, gegevens ¹⁸F

¹⁸F

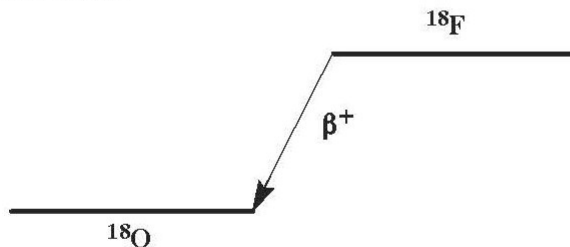
Z = 9

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) ⁻¹	E (keV)
β ⁺	1,000	250 634
γ [±]	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	$H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
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 ¹⁸F 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

¹⁸F

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 ¹⁸F (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

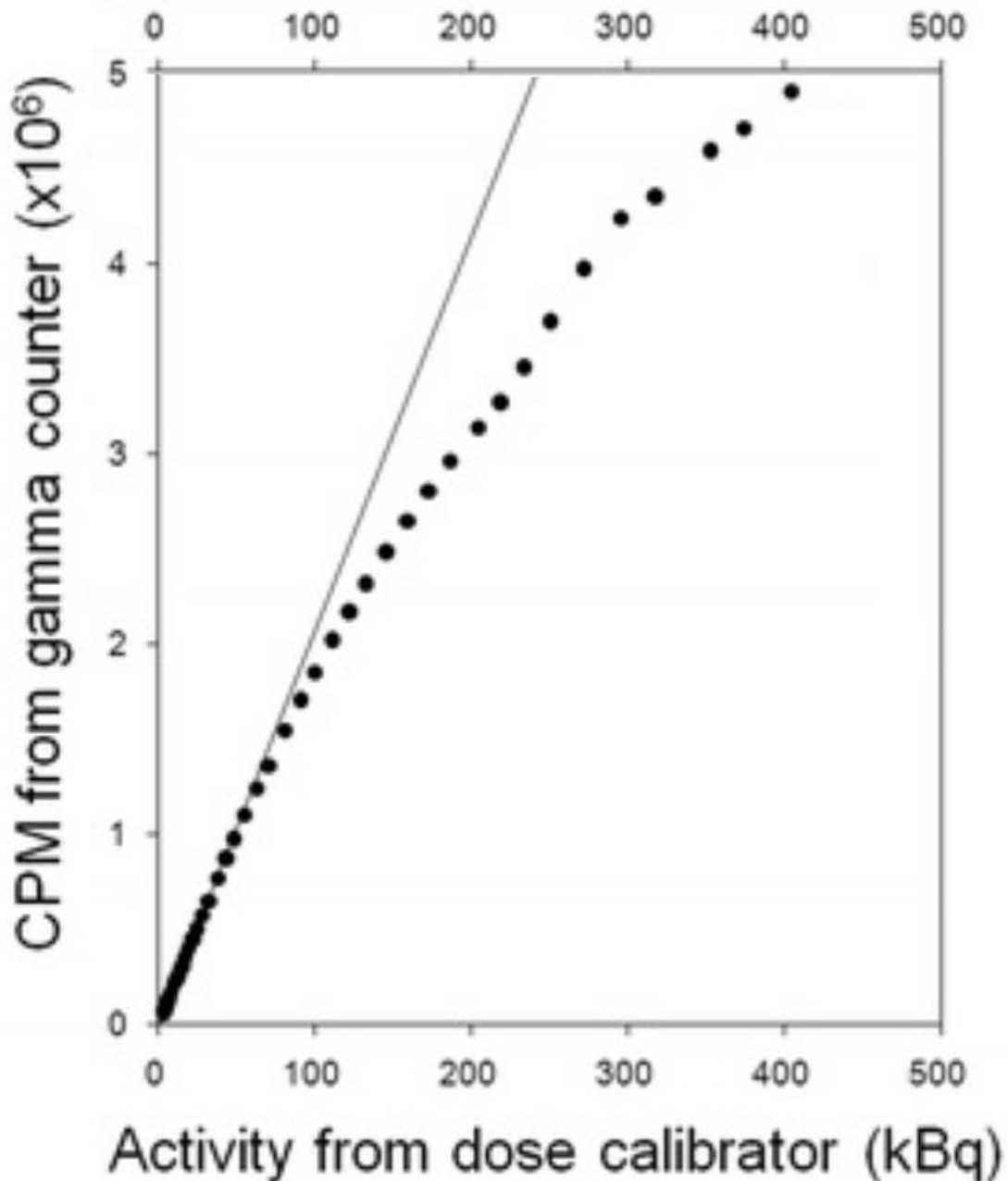
Tijd (d) Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)

0,25	$1,0 \times 10^{-1}$	$7,7 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-2}$
1	$1,1 \times 10^{-4}$	$6,8 \times 10^{-5}$	$6,8 \times 10^{-5}$	$6,8 \times 10^{-5}$

Meetrendement van NaI-putkristal voor ^{18}F

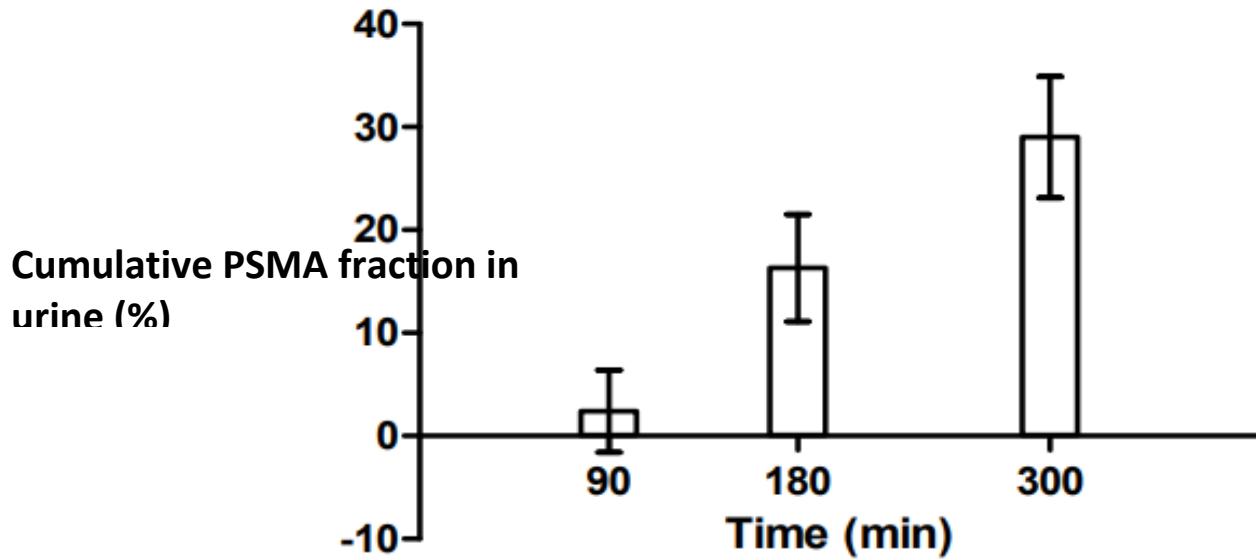
De doorgetrokken lijn is de raaklijn aan de gestippelde curve bij een activiteit kleiner dan 50 kBq

Bron: Performance assessment of a NaI(Tl) gamma counter for PET applications with methods for improved quantitative accuracy and greater standardization, Martin A Lodge e.a., EJNMMI Phys. 2015 Dec; 2: 11



PSMA-uitscheiding in urine

Bron: Radiation dosimetry and biodistribution of ^{18}F -PSMA-11 for PET imaging of prostate cancer, Sarah Piron e.a., Journal of Nuclear Medicine, April 26, 2019



De gemiddelde cumulatieve hoeveelheid PSMA, uitgedrukt als het percentage van de totale geïnjecteerde hoeveelheid PSMA, is 2,4% ($\pm 4,0\%$), 16,3% ($\pm 5,2\%$) en 29,0% ($\pm 5,9\%$) bij respectievelijk het 90, 180 en 300 minuten tijdinterval.

**Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al.
(2^e druk 2007), appendix D interactiecoëfficiënten voor
fotonen, blz. 382**

Fotonen- energie (MeV)	Tin $\rho = 7,30 \text{ g/cm}^3$			Fotonen- energie (MeV)	Lood $\rho = 11,34 \text{ g/cm}^3$		
	μ/ρ (cm^2/g)	μ_{tr}/ρ (cm^2/g)	μ_{en}/ρ (cm^2/g)		μ/ρ (cm^2/g)	μ_{tr}/ρ (cm^2/g)	μ_{en}/ρ (cm^2/g)
				0,5	0,1614	0,0984	0,0951
0,4	0,1163	0,0536	0,0530	0,6	0,1249	0,0737	0,0710
0,5	0,0948	0,0423	0,0416	0,8	0,0886	0,0503	0,0481
0,6	0,0811	0,0358	0,0353				
0,8	0,0667	0,0301	0,0294	1,0	0,0708	0,0396	0,0377
				1,5	0,0518	0,0288	0,0271
1,0	0,0578	0,0270	0,0264	2	0,0455	0,0259	0,0240
1,5	0,0462	0,0233	0,0226	3	0,0417	0,0260	0,0234
2,0	0,0410	0,0220	0,0210				
3,0	0,0366	0,0219	0,0205	4	0,0415	0,0281	0,0245
				5	0,0424	0,0306	0,0259
4	0,0355	0,0232	0,0212	6	0,0436	0,0331	0,0272
5	0,0353	0,0247	0,0221	8	0,0467	0,0378	0,0294
6	0,0357	0,0262	0,0230				
8	0,0370	0,0292	0,0245	10	0,0496	0,0419	0,0310
10	0,0387	0,0319	0,0258				

Tabel: interactiecoëfficiënten voor fotonen in tin en lood

**Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al.
(2^e druk 2007), tabel 11.1 exposie-opbouwfactor voor
isotrope puntbron, blz. 268**

materiaal	fotonenergie E [MeV]	μ 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
	3,0	1,69	2,42	3,91	6,23	8,63	12,8	17,0
aluminium	0,5	2,37	4,24	9,47	21,3	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
	3,0	1,64	2,32	3,78	6,14	8,75	13,0	17,7
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
lood	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

Tabel: exposie-opbouwfactor voor fotonen in water, aluminium, ijzer en lood