

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:
11 december 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 16 doorlopend genummerde pagina's. Controleer dit!

INHOUDSOPGAVE

Pagina

- 3-4 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2007), blz. 230-231, gegevens ²²⁶Ra
- 5 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2007), blz. 26, gegevens ¹⁸F
- 6 NIST Standard Reference Database 126: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption
- 7 ANS-6.4.3, D.K. Trubey (September 1988), appendix II table 3, Exposure build-up factors for concrete, blz. 44
- 8 Brede bundel transmissie van röntgenstraling door lood volgens ICRP-33, blz. 38, fig. 7
- 9 Conversiecoëfficiënten van kerma in lucht naar omgevingsdosis-equivalent en naar effectieve dosis (ontleend aan ICRP-74)
- 10 Verstrooiingscoëfficiënten voor röntgenstraling (ontleend aan ICRP-33)
- 11 Uitvoeringsbesluit stralingsbescherming EZ – artikel 4.10 lid 1, Artikel 4.10 Eisen aan toestellen
- 12 Figuur 1: Meetresultaten en spectrum van het vloeibaar afvalmonster
- 13 Figuur 2: Meetresultaten en spectrum van een zuiver ³²P-monster
- 14 Figuur 3: Meetresultaten en spectrum van een zuiver ³⁵S-monster
- 15 Fysische halveringstijd ($T_{1/2}$), radiotoxiciteitsequivalent voor ingestie (Re_{ing}) en maximale bèta-energie
- 16 Uitvoeringsregeling EZ, Bijlage 1.5 Rekenregels AGIS, paragraaf 4.4, lozingen in water

Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2007), blz. 230-231, gegevens ²²⁶Ra

²²⁶Ra (+ dochters)

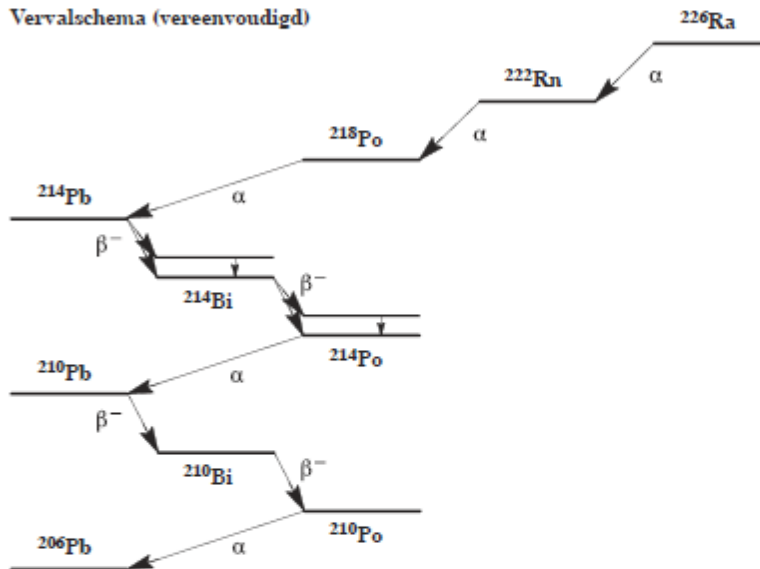
Z = 88

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 ²²⁶ 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 ²²⁶Ra 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}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_{α} (keV)	$E_{\beta, \text{gem}}$ (keV)	$E_{\beta, \text{max}}$ (keV)	E_{γ} (keV)
^{226}Ra	1600 j	4784			
^{222}Rn	3,82 d	5490			
^{218}Po	3,05 min	6003			
^{214}Pb	26,8 min		207	672	352
			227	729	295
^{214}Bi	19,9 min		525	1505	609
			539	1540	1120
			1269	3270	1765
^{214}Po	0,164 ms	7687			
$^{210}\text{Pb}^*$	22,3 j		4	16	46
			16	63	
^{210}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

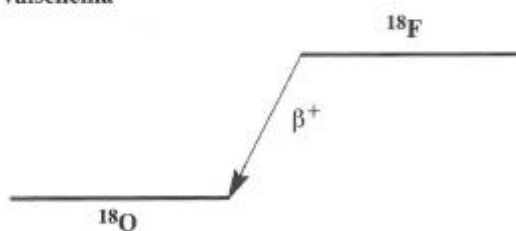
* aangenomen dat dochter ^{222}Rn grotendeels ontsnapt uit het ingeademde deeltje

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

Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (3^e druk 2007), blz. 26, 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	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
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).

NIST Standard Reference Database 126: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption.

	Concrete $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$	
Energy MeV	μ/ρ (cm^2/g)	μ_{en}/ρ (cm^2/g)
0.01	20.45	19.37
0.015	6.351	5.855
0.02	2.806	2.462
0.03	0.9601	0.7157
0.04	0.5058	0.2995
0.05	0.3412	0.1563
0.06	0.266	0.09554
0.08	0.2014	0.0505
0.1	0.1738	0.03649
0.15	0.1436	0.02897
0.2	0.1282	0.02868
0.3	0.1097	0.02969
0.4	0.09783	0.03024
0.5	0.08915	0.03033
0.6	0.08236	0.03015
0.8	0.07227	0.0294
1	0.06495	0.02843
1.25	0.05807	0.02716
1.5	0.05288	0.02595
2	0.04557	0.02395
3	0.03701	0.0212
4	0.03217	0.01951
5	0.02908	0.0184
6	0.02697	0.01763
8	0.02432	0.01669
10	0.02278	0.01617
15	0.02096	0.01559
20	0.0203	0.01539

Massieke verzwakkings- en energie-absorptiedoorsneden in beton in $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$.
Dichtheid beton $2,35 \text{ g/cm}^3$.

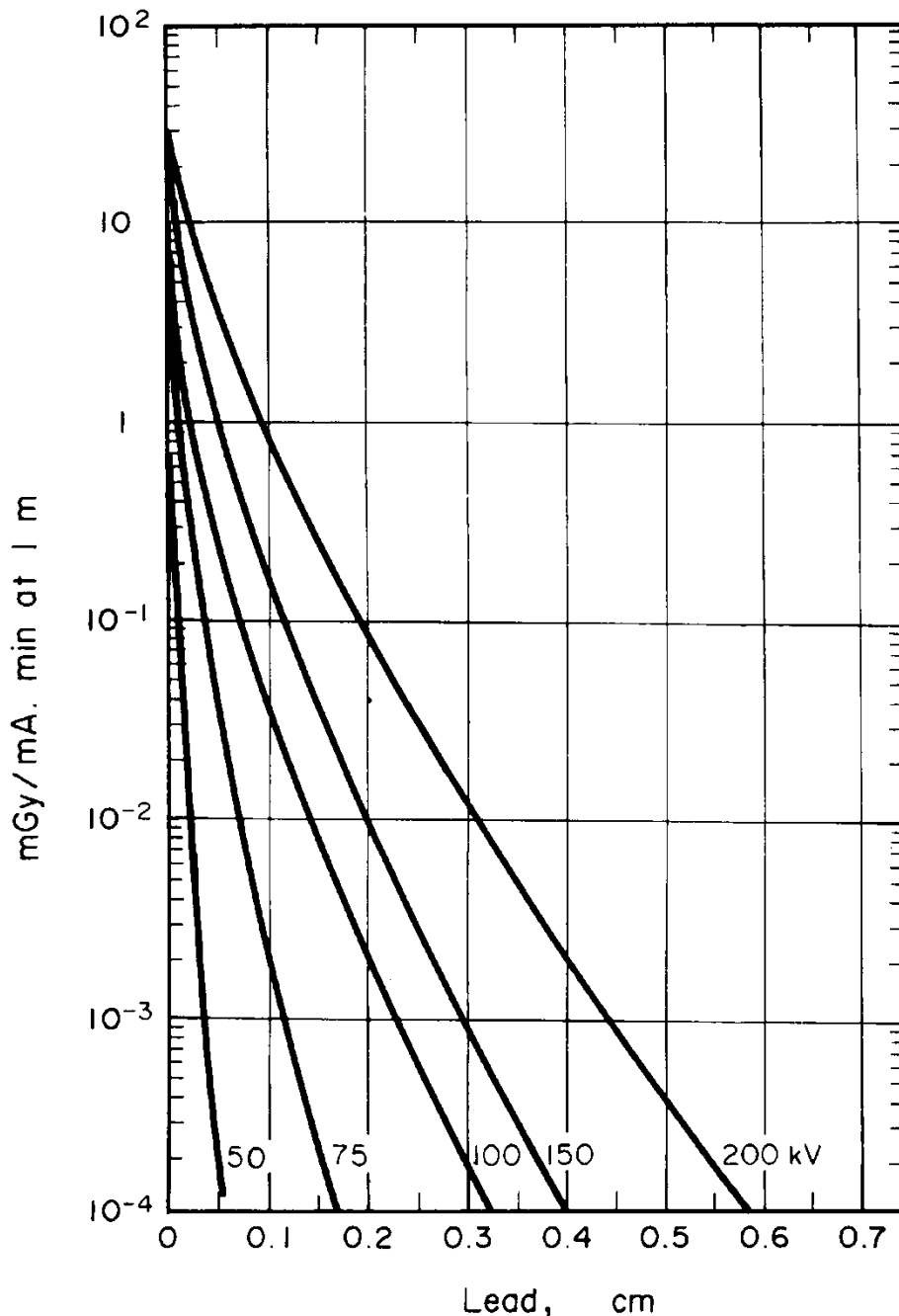
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/concrete.html>

ANS-6.4.3, D.K. Trubey (September 1988), appendix II table 3, Exposure build-up factors for concrete, blz. 44.

ANSI ANS 6.4 3-1991 table E3 Build-up concrete											
$\mu \cdot d$	Photon energy (MeV)										
	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	15
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.5	1.30	1.68	1.84	1.89	1.78	1.57	1.45	1.37	1.27	1.19	1.15
1	1.46	2.15	2.58	2.78	2.72	2.27	1.98	1.77	1.53	1.35	1.26
2	1.69	2.89	3.96	4.63	5.05	4.03	3.24	2.65	2.04	1.64	1.46
3	1.87	3.54	5.31	6.63	8.00	6.26	4.72	3.60	2.53	1.93	1.66
4	2.01	4.17	6.69	8.8	11.6	8.97	6.42	4.61	3.03	2.22	1.86
5	2.14	4.77	8.09	11.1	15.9	12.2	8.33	5.68	3.54	2.51	2.07
6	2.25	5.34	9.52	13.6	20.9	15.9	10.4	6.80	4.05	2.80	2.28
7	2.35	5.90	11.0	16.3	26.7	20.2	12.7	7.97	4.57	3.10	2.50
8	2.45	6.44	12.5	19.2	33.4	25.0	15.2	9.18	5.09	3.40	2.71
10	2.62	7.52	15.7	25.6	49.6	36.4	20.7	11.7	6.15	4.01	3.16
15	2.98	10.2	24.3	44.9	109	75.6	37.2	18.6	8.85	5.57	4.34
20	3.27	12.7	33.8	69.1	201	131	57.1	26.0	11.6	7.19	5.59
25	3.51	15.2	44.3	97.9	331	203	80.1	33.9	14.4	8.86	6.91
30	3.73	18.2	55.4	131	507	292	106	42.2	17.3	10.6	8.27
35	3.91	21.9	66.8	170	734	399	134	50.9	20.5	12.3	9.63
40	4.03	26.5	78.1	214	1020	523	164	59.8	24.8	14.5	10.9
μ/ρ (cm ² /g)	0.6122	0.2957	0.2125	0.1783	0.1270	0.08768	0.06382	0.04482	0.02895	0.02311	0.02153

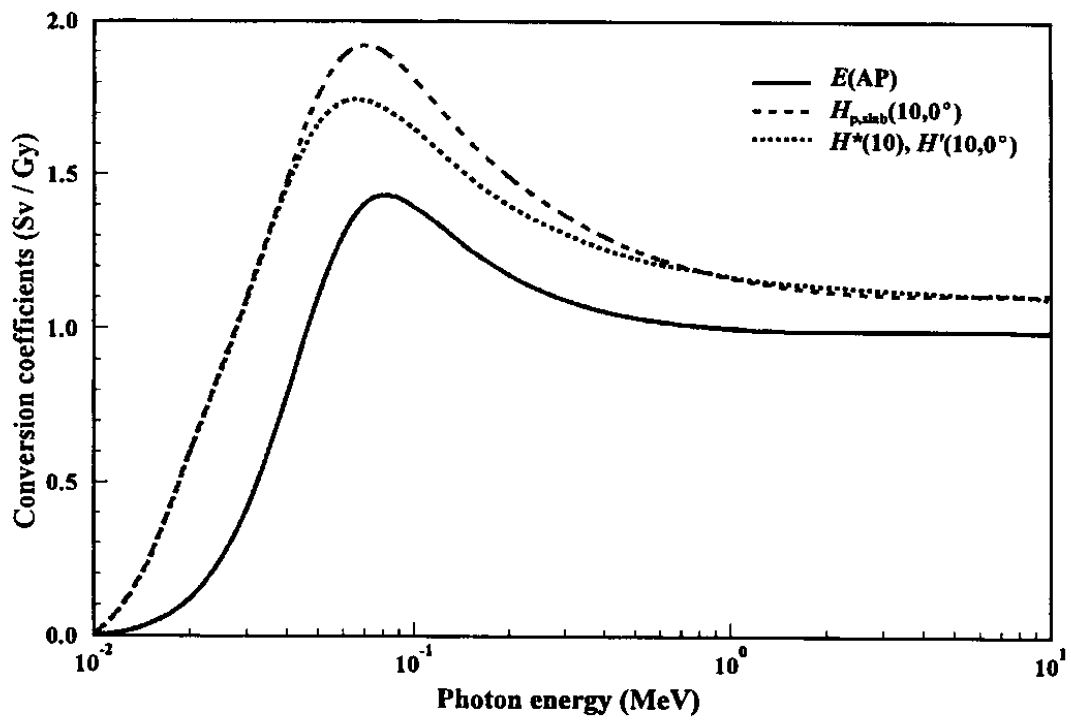
Opbouwfactoren in beton voor isotrope puntbron (ANSI).

Brede bundel transmissie van röntgenstraling door lood volgens ICRP-33, blz. 38, fig. 7



Transmissie door lood van röntgenstraling geproduceerd met een röntgengenerator met diverse gelijkspanningen, anode van wolfram en filter van 2 mm aluminium; het kermatempo per eenheid van buisstroom (in mGy/mA.min) bij 0 cm lood op 1 meter afstand van het target bedraagt 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.

Conversiecoëfficiënten van luchtkerma naar omgevingsdosisequivalent en naar effectieve dosis (ontleend aan ICRP-74)



Conversiecoëfficiënten van luchtkerma K_a naar omgevingsdosisequivalent $H^*(10)$ en naar effectieve dosis $E(AP)$.

Verstrooiingscoëfficiënten voor röntgenstraling (ontleend aan ICRP-33)

Verstrooiingshoek	100 kV	200 kV	300 kV
30°	0,02	0,24	0,34
45°	0,03	0,23	0,26
60°	0,04	0,19	0,22
90°	0,05	0,14	0,19
120°	0,12	0,23	0,25
135°	0,17	0,30	0,33
150°	0,21	0,37	0,48

Percentage van de invallende röntgenstraling dat wordt verstrooid, gemeten op 1 m van het verstrooiend object bij een veldgrootte van 400 cm², als functie van de buisspanning en de verstrooiingshoek.

Uitvoeringsbesluit stralingsbescherming EZ – artikel 4.10 lid 1

Artikel 4.10. Eisen aan toestellen

1. De ondernemer zorgt ervoor dat met betrekking tot inherent veilige toestellen:

a. het toestel zodanig in een apparaat is ingebouwd dat het niet in werking kan zijn of treden wanneer het apparaat geopend is. De omkasting van het toestel is daartoe, indien mogelijk, met schakelaars welke mechanisch gedwongen verbreken beveiligd;

b. het toestel uitsluitend gebruikt wordt wanneer de beveiligingen die op het apparaat zijn aangebracht ter beperking van de stralingsniveaus buiten het apparaat, in goede staat functioneren;

c. op geen enkel punt op 0,1 meter afstand van een bereikbare buitenzijde van het apparaat een dosisequivalenttempo gemeten kan worden van meer dan 1 microsievert per uur;

d. de bediening van het toestel geschiedt op een plaats waar de effectieve dosis minder bedraagt dan 1 millisievert per jaar;

e. het apparaat is voorzien van een waarschuwingsteken.

Figuur 1: Meetresultaten en spectrum van het vloeibaar afvalmonster.

11/7/2017 9:04:37 AM	QuantaSmart (TM)
----------------------	------------------

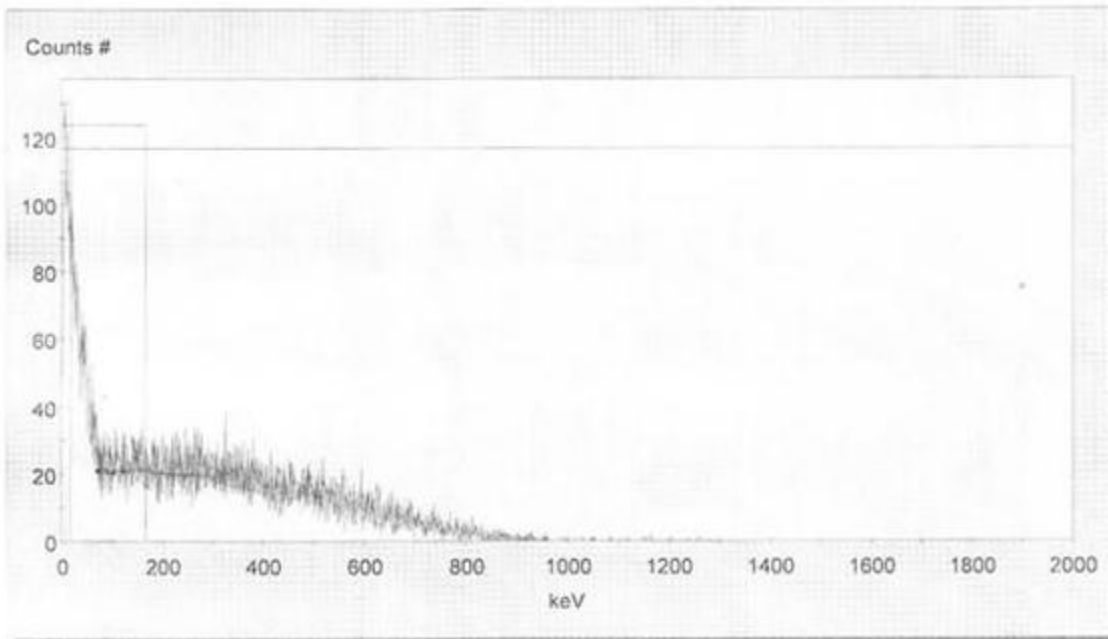
Protocol # 5

Spectraview - Afvalmonster.lsa

Sample #: 1

Count Time: 0.50

REGION	LL	UL	CPM
A	0.0	18.6	72868.0
B	0.0	167.0	272400.0
C	0.0	1711.0	639540.0



Figuur 2: Meetresultaten en spectrum van een zuiver ^{32}P -monster.

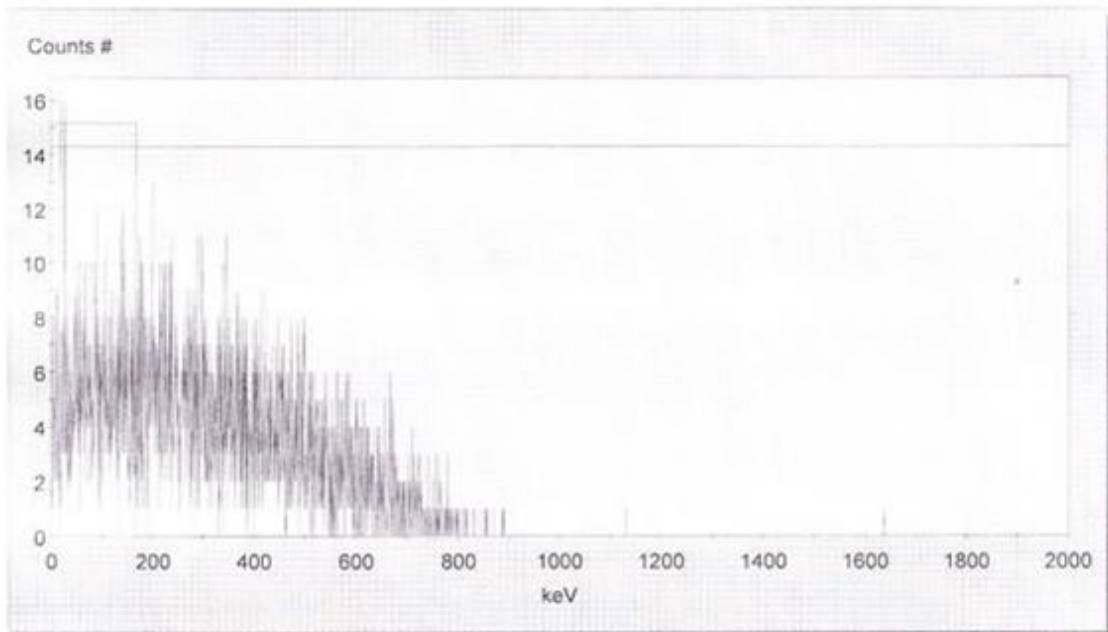
11/7/2017 9:33:20 AM QuantaSmart (TM)

Protocol # 5

Spectraview - Afvalmonster.lsa

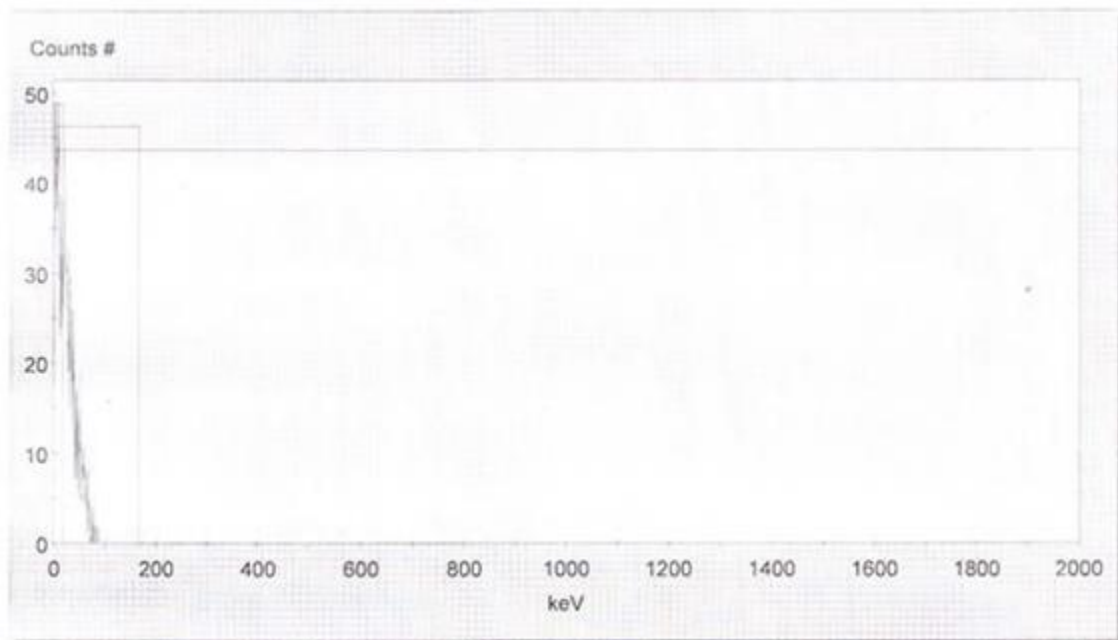
Sample #: 2
 Count Time: 0.50

REGION	LL	UL	CPM
A	0.0	18.6	338.4
B	0.0	167.0	3524.0
C	0.0	1711.0	11576.0



Figuur 3: Meetresultaten en spectrum van een zuiver ³⁵S-monster.

11/7/2017 9:37:49 AM		QuantaSmart (TM)	
Protocol # 5			
Spectraview - Afvalmonster.lsa			
Sample #:	3		
Count Time:	0.50		
REGION	LL	UL	CPM
A	0.0	18.6	4037.5
B	0.0	167.0	9331.3
C	0.0	1711.0	9331.3



Fysische halveringstijd ($T_{1/2}$), radiotoxiciteitsequivalent voor ingestie (Re_{ing}) en maximale bèta-energie.

Nuclide	^3H	^{35}S	^{32}P
$T_{1/2}$	12,35 jaar	87,44 dagen	14,29 dagen
Re_{ing}	$5,6 \cdot 10^{10}$ Bq	$7,1 \cdot 10^9$ Bq	$4,2 \cdot 10^8$ Bq
$E_{\beta, \max}$	18,6 keV	167 keV	1711 keV

Uitvoeringsregeling EZ, Bijlage 1.5 Rekenregels AGIS, paragraaf 4.4, lozingen in water

Correctiefactor CR_W

Om rekening te houden met het radioactief verval en de cumulatie in het milieu wordt een correctiefactor (CR_W) gebruikt afhankelijk van de fysische halveringstijd van het betrokken radionuclide (zie tabel 4.9). Hiermee wordt de lozing van langlevende nucliden zwaarder gerekend dan de lozing van kort levende. In tabel 4.9 worden de waarden van $CR_{W,i}$ gegeven die gebruik dienen te worden.

Tabel 4.9 Correctiefactor (CR_W) voor lozingen in water, afhankelijk van de fysische halveringstijd ($T_{1/2, fys}$) van het geloosde nuclide

Fysische halveringstijd $T_{1/2, fys}$	Correctiefactor voor lozingen in water CR_W
$T_{1/2, fys} \leq 5$ dagen	0,001
$T_{1/2, fys} \leq 7,5$ dagen	0,01
$T_{1/2, fys} \leq 15$ dagen	0,1
$T_{1/2, fys} \leq 25$ jaar	1
$T_{1/2, fys} \leq 250$ jaar	10
$T_{1/2, fys} > 250$ jaar	100

4.4.3 Berekening van de maximale jaarlijkse emissie vanuit een locatie (W_{max})

De verhouding tussen $A_{W,i}$ en $Re_{ing,i}$ geeft, voor ieder radionuclide, het maximale (theoretisch mogelijk) aantal radiotoxiciteitsequivalenten dat in een jaar in water wordt geloosd.

De maximale (theoretisch mogelijk) emissie in water vanuit een locatie (W_{max}), uitgedrukt in aantal radiotoxiciteitsequivalenten wordt verkregen na sommatie over alle radionucliden volgens

$$W_{max} = \sum_{\text{nuclide } i} \frac{A_{W,i}}{Re_{ing,i}} \quad 4.8$$

waarin:

- W_{max} = maximale jaarlijkse emissie in water, vanuit een locatie (uitgedrukt in aantal Re_{ing}) gesommeerd over alle geloosde nucliden
- $A_{W,i}$ = maximale (theoretisch mogelijke) lozing van radionuclide i in een jaar in water [Bq]
- $Re_{ing,i}$ = radiotoxiciteitsequivalent van radionuclide i voor ingestie [Bq]

4.4.4 Afgeleid toetsingsniveau voor lozingen in water (W_{SN})

De op het riool geloosde radioactiviteit zal niet direct de bevolking bereiken, maar pas na (langdurig) verblijf en verspreiding in het milieu. Op basis van een conservatieve benadering resulteert dit in een verdunding met tenminste een factor 10^8 .

Het afgeleide **toetsingsniveau** (W_{SN}) wordt gedefinieerd als de lozing, uitgedrukt in Re_{ing} , die, volgens deze benadering, een ingestiedosis ter grootte van het SN ($1 \mu\text{Sv}$) veroorzaakt. Aangezien de ingestiedosis die het gevolg is van een lozing in water homogeen verdeeld wordt verondersteld over een groot gebied, is W_{SN} niet afhankelijk van de afstand tussen lozingspunt en terreingrens (dit in tegenstelling met hetgeen van toepassing is voor lozingen in lucht en L_{SN}).

De waarde van het afgeleide toetsingsniveau voor lozingen in water (W_{SN}), uitgedrukt in Re_{ing} , is gelijk aan:

$$W_{SN} = 100 \quad 4.9$$