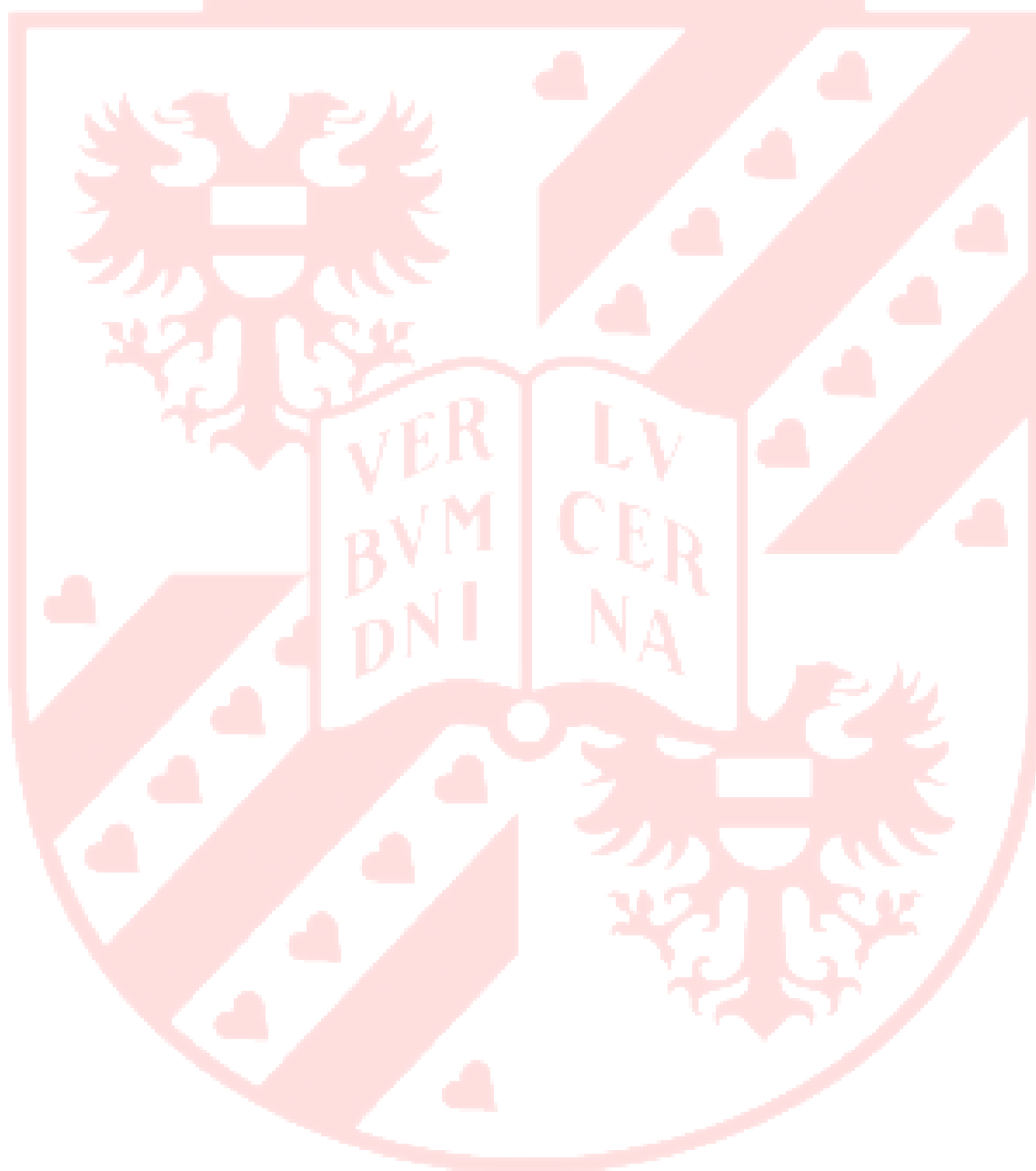


**Vraagstukken bij de  
Nascholingsmiddag Stralingsdeskundigen RUG/SBE 2016  
1 december 2016**

---

**Vraagstuk 1 is ontleend aan:  
examen deskundigheidsniveau 3, 14 december 2015**

**Vraagstuk 2 is ontleend aan:  
examen coördinerend deskundige, 23 mei 2016**



## Vraagstuk 1 Inwendige besmetting met $^{210}\text{Po}$

Enkele jaren geleden werd de Russische oud-spion en dissident Alexander Litvinenko vermoord door hem vergiftigde thee te serveren. De thee bevatte het radioactieve isotoop  $^{210}\text{Po}$ . U wilt met uw stralingshygiënische kennis een uitspraak doen over de hoeveelheid  $^{210}\text{Po}$  die hiervoor minimaal gebruikt moet zijn.

### Gegevens:

- **Bijlage, blz. 6:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2<sup>e</sup> druk 2007), blz. 228-229, gegevens  $^{210}\text{Po}$ ;
- **Tabel 1:** massa, weefselweegfactor en  $\text{LD}_{50}$  voor  $\alpha$ -straling van diverse organen;
- Onder het kritieke orgaan wordt in deze opgave verstaan: het orgaan waarvoor geldt dat voor het bereiken van de  $\text{LD}_{50}$  de laagste toegediende activiteit nodig is;
- De geabsorbeerde dosis in de lever en het rode beenmerg na ingestie van 1 Bq  $^{210}\text{Po}$  bedraagt  $6,7 \cdot 10^{-8}$  Gy respectievelijk  $2,7 \cdot 10^{-8}$  Gy.

**Tabel 1.** Massa  $m_T$ , weefselweegfactor  $w_T$  (ontleend aan ICRP-60) en  $\text{LD}_{50}$  voor  $\alpha$ -straling.

orgaan	$m_T$ (g)	$w_T$ (ICRP-60)	$\text{LD}_{50}$ (Gy)
lever	1800	0,05	8
nieren*	310	0,025	6
rood beenmerg	1500	0,12	3–4

\* *Behoort tot de 10 overige organen met samen een weegfactor van 0,05. In het geval dat één van deze organen een hogere equivalente dosis oploopt dan enig ander orgaan met een eigen weefselweegfactor wordt voor dat orgaan een  $w_T = 0,025$  gehanteerd. Dat is hier het geval voor de nieren.*

### Vraag 1

Toon aan dat de effectieve halveringstijd van  $^{210}\text{Po}$  in de genoemde organen 37 dagen bedraagt.

### Vraag 2

Verifieer door berekening dat ingestie van 1 Bq  $^{210}\text{Po}$  leidt tot een geabsorbeerde dosis van  $1,3 \cdot 10^{-7}$  Gy in de nieren.

### Vraag 3

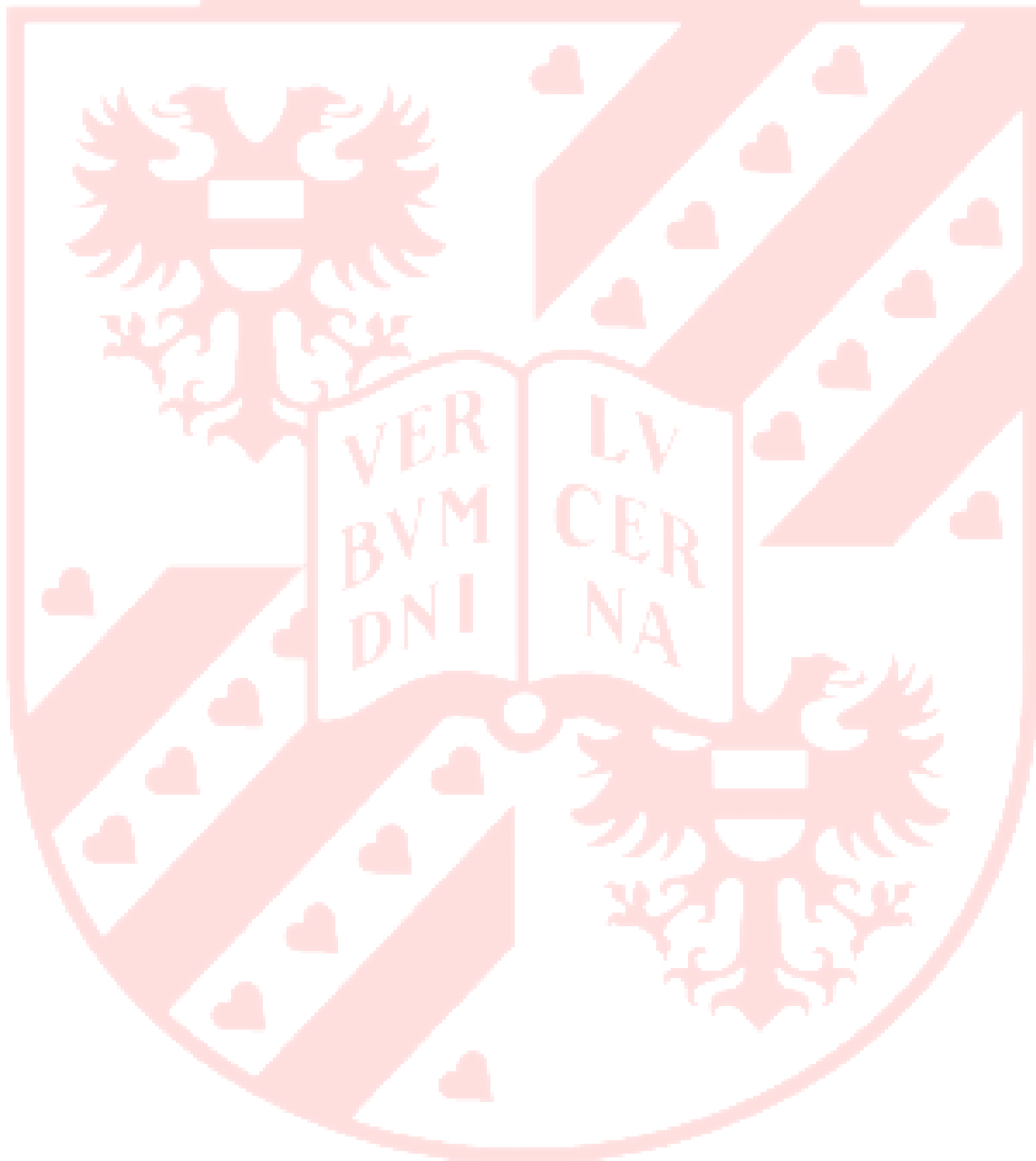
Geef voor elk van de in tabel 1 genoemde organen aan welke activiteit bij ingestie leidt tot een geabsorbeerde dosis gelijk aan de  $\text{LD}_{50}$ . Bepaal op grond van de uitkomsten welk van de drie genoemde organen als het kritieke orgaan moet worden aangemerkt.

U veronderstelt dat de moordenaars van Litvinenko zeker hebben willen stellen dat betrokkene het niet zou overleven. U neemt daarom aan dat hij vergiftigd is met een activiteit van tweemaal de bij de vraag 3 berekende activiteit voor het kritieke orgaan. Na zijn vergiftiging liet Litvinenko een spoor van  $^{210}\text{Po}$  achter waardoor derden besmet raakten. U veronderstelt dat de meest besmette persoon 0,01% van de oorspronkelijke activiteit via ingestie heeft binnengekregen.

**Vraag 4**

Bereken voor deze persoon de effectieve volg dosis ten gevolge van ingestie.

*Indien u geen antwoord heeft gevonden bij vraag 3 kunt u de waarde  $1 \cdot 10^8$  Bq gebruiken.*



## Vraagstuk 2 Blootstelling in een cyclotronhal

Op het moment dat een cyclotron in bedrijf is, wordt door activering van de lucht een aantal relatief kortlevende radionucliden gevormd, die vervolgens via het ventilatiesysteem naar buiten worden afgevoerd. In dit vraagstuk wordt onderzocht wat de stralingshygiënische gevolgen zijn voor werknemers die zich in de cyclotronhal of in één van de bestralingsruimtes bevinden.

### Gegevens:

- **Tabel 1:** Een overzicht van de jaarlijkse activiteitslozing per nuclide.
- De activiteitsconcentratie in de geloosde lucht is constant gedurende de uren dat het cyclotron in bedrijf is.
- Gedurende de uren dat het cyclotron in bedrijf is, mag de gemiddelde activiteitsconcentratie in de geloosde lucht gelijk worden verondersteld aan die in de cyclotronhal.
- De activiteitsconcentratie van  $^{15}\text{O}$  is bepalend voor de totale activiteitsconcentratie.
- Het debiet van de ventilatie in de cyclotronhal bedraagt  $24.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .
- Het cyclotron is 24 uur per dag, 5 dagen per week, en 50 weken per jaar in bedrijf.
- De volledige werktijd van een werknemer bedraagt 2000 h per jaar.
- Volgens het submersiemodel wordt de geabsorbeerde dosis  $D_T$  (in Gy) in orgaan T gegeven door de uitdrukking

$$D_T = 2,5 \cdot 10^{-10} (\text{J} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{h}^{-1}) \sum_i g_{T,i} \times C_i \times E_i \times t \text{ (Gy)}$$

Hierin is  $g_T$  de afschermingsfactor voor orgaan T,  $C$  de activiteitsconcentratie (in  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) in de lucht,  $E$  de energie (in MeV per Bq·s) die per desintegratie vrijkomt, en  $t$  de verblijfstijd (in h). De sommatie vindt plaats over alle nucliden ( $i$ ).

- De bijdrage door inhalatie aan de stralingsbelasting voor werknemers tijdens submersie mag bij de vragen 2 en 3 verwaarloosd worden.

### Tabel 1. Jaarlijkse activiteitslozing per nuclide;

- $T_{1/2}$  = halveringstijd,
- $\langle E_\beta \rangle$  = gemiddelde bèta-energie,
- $E_\gamma$  = energie van gamma- of annihilatiestraling per desintegratie,
- $A$  = jaarlijks geloosde activiteit van het betreffende nuclide.

nuclide	$T_{1/2}$ (min)	$\langle E_\beta \rangle$ (MeV/Bq·s)	$E_\gamma$ (MeV/Bq·s)	$A$ (GBq·j <sup>-1</sup> )
$^{11}\text{C}$	20	0,39	1,02*	180
$^{15}\text{O}$	2	0,74	1,02*	1600
$^{13}\text{N}$	10	0,49	1,02*	160
$^{41}\text{Ar}$	110	0,46	1,28	50

\* Hierbij is rekening gehouden met twee annihilatiefotonen van 0,511 MeV.

### Vraag 1

Bepaal de activiteitsconcentratie (in  $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) van  $^{15}\text{O}$ .

### Vraag 2

Bereken de effectieve jaardosis door submersie in lucht met  $^{15}\text{O}$  voor een werknemer die zijn volledige werktijd doorbrengt in de cyclotronhal terwijl het cyclotron in bedrijf is. Ga ervan uit dat alléén fotonenstraling bijdraagt aan de effectieve dosis en dat afscherming van dieper gelegen organen in het lichaam mag worden verwaarloosd (voor  $g_T$  mag dus voor alle organen 1 worden genomen).

*Indien u het antwoord op vraag 1 schuldig bent gebleven kunt u uitgaan van een activiteitsconcentratie van  $^{15}\text{O}$  van  $10 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ .*

Men kan aantonen dat de dosisconsequenties vrijwel volledig worden bepaald door  $^{15}\text{O}$ . De overige nucliden blijven daarom verder buiten beschouwing.

Naast de cyclotronhal bevindt zich een aantal bestralingsruimtes. In deze ruimtes is de ventilatie slechter dan in de hal, waardoor de activiteitsconcentratie in de lucht er veel hoger is. Uit metingen is gebleken dat het omgevingsdosisequivalenttempo veroorzaakt door  $^{15}\text{O}$  direct na het uitschakelen van de bundel in de bestralingsruimtes waardes kan aannemen tot maximaal  $100 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ .

### Vraag 3

Bereken de maximale activiteitsconcentratie  $^{15}\text{O}$  in de lucht binnen de bestralingsruimtes. U mag er hierbij van uitgaan dat het omgevingsdosisequivalent een goede schatter is van de effectieve dosis door submersie.

Tegen de voorschriften in, betreedt een werknemer een bestralingsruimte onmiddellijk na het uitschakelen van de cyclotronbundel.

#### Aanvullende gegevens:

- Als de werknemer de bestralingsruimte betreedt, is  $\dot{H}^*(10) = 100 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ .
- Volgens ICRP-80 geldt voor *injecties* met  $^{15}\text{O}$  een dosisconversiecoëfficiënt van  $e(50)_{\text{injectie}} = 9,3\cdot 10^{-13} \text{ Sv Bq}^{-1}$ .
- Ongeveer 20% van de ingeademde zuurstof wordt via de longen in het transfercompartiment opgenomen. Dit percentage mag in deze opgave als geïnjecteerde activiteit worden beschouwd.
- De werknemer heeft een ademvolumetempo van  $1,4 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ .
- De verwijdering van activiteit uit de bestralingsruimte door ventilatie mag bij deze vraag verwaarloosd worden.

U gaat nu een schatting maken zowel van de effectieve volgdosis door inhalatie van  $^{15}\text{O}$  als van de effectieve dosis door uitwendige bestraling door  $^{15}\text{O}$ .

### Vraag 4

Toon door berekening aan dat de maximale effectieve volgdosis door inhalatie van  $^{15}\text{O}$  ten gevolge van het voortijdig betreden van de bestralingsruimte verwaarloosbaar is ten opzichte van de effectieve dosis door uitwendige bestraling door dit radio-nuclide.

*Indien u het antwoord op vraag 3 schuldig bent gebleven, kunt u uitgaan van een maximale activiteitsconcentratie van  $^{15}\text{O}$  van  $500 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ .*

# 210Po

Z = 84

N = 126

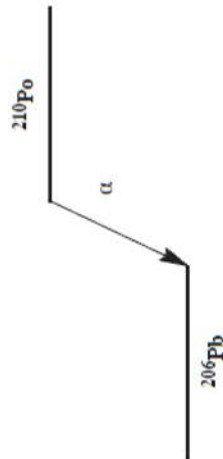
# 210Po

## 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	$\gamma$ (Bq s) <sup>-1</sup>	E (keV)
$\alpha_1$	1,000	5297
$\alpha$ tengevoel	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  $^{210}\text{Po}$  is een natuurproduct. Het komt voor in de uraniumvervaltreeks. De vluchtigheid van polonium maakt dat het nuclide vrijkomt bij processen waarbij stoffen met (sporen) uranium verhit worden.

Grotere hoeveelheden  $^{210}\text{Po}$  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 innames van enkele microgrammen is al dodelijk (hoge specifieke activiteit, hoge radiotoxiciteit, opname in essentiële organen).

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

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

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

## Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige innames	
Tijd (d)	Urineconcentratie (Bq/d per Bq innames)
1	$1,9 \times 10^{-4}$
2	$4,3 \times 10^{-4}$
3	$4,4 \times 10^{-4}$
5	$4,3 \times 10^{-4}$
7	$4,1 \times 10^{-4}$