

# Gefährdung durch Polonium-210 ( $^{210}_{84}\text{Po}$ )

**Peter Bützer**

## Inhalt

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Wie lässt sich die Gefährdung durch Polonium-210 abschätzen? ..... | 2  |
| 2   | Grundbegriffe .....  | 2  |
| 3   | Ein kurzer Steckbrief zu Polonium .....                            | 2  |
| 4   | Gewinnung .....  | 3  |
| 5   | Verwendung .....   | 3  |
| 6   | Toxikologie von $^{210}\text{Po}$ .....                            | 4  |
| 7   | Aufgaben .....   | 6  |
| 8   | Simulation .....   | 7  |
| 8.1 | Simulationsdiagramm (Typ 8) .....                                  | 7  |
| 8.2 | Zeitdiagramm .....   | 8  |
| 8.3 | Dokumentation (Gleichungen, Parameter).....                        | 8  |
| 8.4 | Antworten.....   | 10 |
| 9   | Folgerungen.....   | 10 |
| 10  | Antworten, Lösungen .....  | 11 |
| 11  | Eine wichtige Folgerung .....                                      | 11 |



Abbildung 1: Das neue Symbol für die Warnung vor Radioaktivität

## 1 Wie lässt sich die Gefährdung durch Polonium-210 abschätzen?

Voraussetzung sind die Kenntnisse der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften von  $^{210}\text{Po}$  (Po-210).

- Als physikalische Eigenschaft ist die Halbwertszeit von  $^{210}\text{Po}$ , und damit seine Radioaktivität wichtig.
- Chemisch ist von Bedeutung, wie sich das Element verbindet und wie sich diese Verbindungen im Wasser des Plasmas lösen und an Zelloberflächen binden.
- Biologisch ist bedeutsam, welche Schäden von den ionisierenden Strahlen zu erwarten sind.

## 2 Grundbegriffe

- Becquerel gibt die Anzahl Zerfälle pro Sekunde (Aktivität  $A$  in Bq).
- Gray ist die Einheit für die abgegebene Energie (Energiedosis Gy in J/kg)
- Sievert ist die Einheit für die biologisch wirksame Energie (Äquivalentdosis Sv in J/kg)
- Umrechnung von Energiedosis  $D$  in Äquivalentdosis  $H$  mit dem Strahlungswichtungsfaktor  $w_R$ :  $H = w_R \cdot D$  ( $w_R$ : dimensionslos)
- Mit dem Dosiskonversionsfaktor (DCF) ist eine Abschätzung der Äquivalentdosis  $H$  aus der Aktivität  $A$  möglich:  $H = \text{DCF} \cdot A$  (DCF in Sv/Bq)
- Umrechnung: Zerfallskonstante  $k = \ln(2)/\text{HWZ}$  (1/s)

## 3 Ein kurzer Steckbrief zu Polonium

Polonium wurde 1898 von Marie und Pierre Curie zuerst als Radium F entdeckt. Heute kennt man 25 Isotope von Polonium, wobei nur  $^{208}\text{Po}$ ,  $^{209}\text{Po}$  und  $^{210}\text{Po}$  bedeutsame Halbwertszeiten haben.



Polonium-210 ( $^{210}\text{Po}$ ) ist ein  $\alpha$ -Strahler<sup>1</sup> mit einer physikalischen Halbwertszeit von 138.376 Tagen und einer Energie von 5.407 MeV; es zerfällt direkt zum Tochterisotop  $^{206}\text{Pb}$ . Nur einer auf 100'000 Zerfälle führt zur Abgabe eines  $\gamma$ -Quants, weshalb der Nachweis im menschlichen Körper durch diese  $\gamma$ -Strahlen fast unmöglich ist. 1 Milligramm  $^{210}\text{Po}$  emittiert  $185 \cdot 10^9$   $\alpha$ -Teilchen pro Sekunde (Aktivität  $A$  in Bq) und produziert dabei 141 Milliwatt Wärme. (1 mg  $^{210}\text{Po}$  hat dieselbe Aktivität wie 5 g  $^{226}\text{Ra}$ , also  $5 \cdot 3.7 \cdot 10^{10}$  Bq).

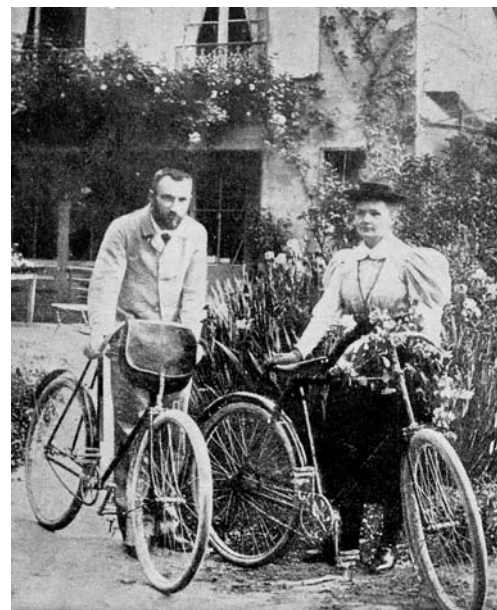


Abbildung 2: Pierre und Marie Curie  
(Bild: Eve Curie, Madame Curie,  
Windmill Press Kingswood, 1938, p. 185)

<sup>1</sup>  $\alpha$ -Strahler sendet Heliumkerne ( $^4_2\text{He}$ ) aus.

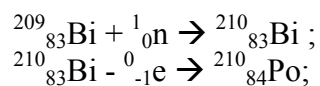
Die Menge von 1 Giga-Becquerel<sup>2</sup> (GBq)  $^{210}\text{Po}$  leuchtet blau indem es die umgebende Luft zum Leuchten bringt.

## 4 Gewinnung

Der natürliche Gehalt an Polonium in der Erdkruste beträgt nur ungefähr 100 Mikrogramm pro Tonne (0.1 ppb), Uranerze enthalten ca. 1 mg pro Tonne<sup>3</sup>. Das Meerwasser enthält ca.  $1.5 \cdot 10^{-14}$  Milligramm pro Liter.

Die Isolierung von Polonium aus Uranpechblende ist, wie Marie Curie 1904 beschrieben hat ausserordentlich aufwändig<sup>4</sup>: „Da die Zahl der auszuführenden Operationen sowieso schon beträchtlich ist, so bietet dieser Umstand eine enorme Schwierigkeit für den Fortschritt der Fraktionierung; dieser Übelstand ist umso schwerwiegender, als das Polonium eine Substanz ist, die, einmal aus der Pechblende entfernt, allmählich an Aktivität einbüsst. Dieses Nachlassen der Aktivität ist übrigens langsam; so hat z.B. eine Probe von Polonium-haltigem Wismutnitrat in 11 Monaten nur die Hälfte seiner Aktivität eingebüsst.“

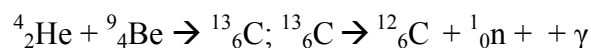
Die Herstellung von  $^{210}_{84}\text{Po}$  erfolgt seit 1934 im Kernreaktor durch Neutronenbeschuss ( $^1_0\text{n}$ ) und anschliessenden  $\beta$ -Zerfall:



Pro Jahr werden so ca. 100 g  $^{210}_{84}\text{Po}$  hergestellt.

## 5 Verwendung

Verwendung als  $\alpha$ -Strahler ( $^4_2\text{He}$ ) für Neutronenquellen mit Beryllium z.B. in Atombomben:



Zivil wird das Material eingesetzt um den Aufbau von statischer Elektrizität an Luft zu verhindern. Bedingt durch seine enorme Wärmeproduktion<sup>5</sup> und die geringe Strahlung bei Abschirmung wird es in Satelliten als Wärmequelle benutzt.

$^{210}\text{Po}$  wird beim Zerfall vom Edelgas  $^{222}\text{Rn}$  gebildet, weshalb es auch in der Luft vorhanden ist und über die Lunge in den menschlichen Körper kommt. Tabakpflanzen enthalten relativ viel  $^{210}\text{Po}$ . Daher ist die Belastung der Lungen von Rauchern durch diese Strahlung wesentlich erhöht.

<sup>2</sup> GBq: Giga-Becquerel =  $10^9$  Zerfälle pro Sekunde; 1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde ( $\text{s}^{-1}$ )

<sup>3</sup> Schnabel Jim, How scared should we be of polonium?, New Scientist, 9 Dezember 2006, p.8,9

<sup>4</sup> Curie S. Radioaktive Substanzen (übersetzt von W.Kaufmann), Verlag Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig 1904, S. 27

<sup>5</sup> 0.5 Gramm  $^{210}\text{Po}$  erreichen in einer Kapsel 500°C

## 6 Toxikologie von $^{210}\text{Po}$

Toxizität von  $^{210}\text{Po}$ : oral LD(50)<sup>6</sup> ca. 100 ng<sup>7</sup>/kg (also etwa 2 Millic KCN).

Die biologische Halbwertszeit HWZ von Polonium im menschliche Je 10% werden von der Milz, der Leber und der Niere aufgenommen verteilen sich über den ganzen Körper.



Entscheidend für die toxischen Wirkungen ist nicht die chemische, sondern die hohe Radiotoxizität. Das lässt sich wie folgt abschätzen:

Die LD(50) für akute Strahlenschäden ist etwa 4.5 Sv. Das effektive Dosisäquivalent für  $^{210}\text{Po}$  sind bei Ingestion 0.24  $\mu\text{Sv}^8/\text{Bq}$  (Dosiskonversionsfaktor, DCF), bei Inhalation 2.2  $\mu\text{Sv}/\text{Bq}^9$ .

Da  $^{210}\text{Po}$  eine Aktivität A von 185 kBq pro Nanogramm hat<sup>10</sup> (1 Nanogramm zeigt  $185 \times 10^3$  Zerfälle pro Sekunde), ist eine halbletale 4.5-Sv Dosis bei Ingestion von 18.8 MBq oder etwa 100 Nanogramm (ng), oder bei Inhalation von 2.0 MBq, respektive 10 ng, erreicht. Die Arbeit auch mit kleinsten Mengen von  $^{210}\text{Po}$  ist sehr gefährlich!!

Polonium ist löslich in den Körperflüssigkeiten und gelangt dadurch in jedes Gewebe und jede Zelle. Diese Tatsache wird dadurch belegt, dass Polonium im Blut und im Urin der Raucher gefunden werden kann. Das verteilte  $^{210}\text{Po}$  verursacht Zell- und genetische Schäden: Leber- und Blasenkrebs, Leukämie, Magengeschwüre, Leberzirrhose und Herzgefäß-Krankheiten.

In jeder Zigarette steckt eine Aktivität von durchschnittlichen 0.02 Becquereln. Polonium-210 ist der einzige Bestandteil des Zigarettenrauches, der bei Inhalation von Versuchstieren selbstständig Krebs verursacht hat - Tumore entstehen bereits bei fünf mal geringeren Poloniumgehalten als bei denen eines durchschnittlich schweren Rauchers. Ein grosser Anteil der Lungenkrebsfälle von Rauchern wird durch  $^{210}\text{Po}$  verursacht.

Irène Joliot-Curie, die Tochter der berühmten Physikerin und Polonium-Entdeckerin Marie Curie, starb nach Angaben von John Emsley durch Polonium-210. Die Substanz sei versehentlich in Curies Labor freigesetzt worden, doch Irène Joliot-Curie starb erst 1956 - rund ein Jahrzehnt nach dem Vorfall - an Leukämie.

Im November 2006 kam  $^{210}\text{Po}$  in die internationalen Schlagzeilen, weil der ehemalige russische Geheimdienstagent Alexander Walterowitsch Litvinenko durch diese Substanz in London umgebracht wurde. Er wurde mit einer Dosis etwa 5 Mikrogramm  $^{210}\text{Po}$  vergiftet (der 100 fachen halbletalen Dosis LD(50)).

<sup>6</sup> LD(50): Halbletale Dosis in Nanogramm pro Kilogramm Körpergewicht; ng/kg

<sup>7</sup> ng: Nanogramm =  $10^{-9}$  Gramm

<sup>8</sup> Sievert (Einheitenzeichen: Sv): Masseinheit der Äquivalentdosis für die angenommene biologische Wirkung bei ionisierenden Strahlen

<sup>9</sup> Po-210, Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 (Stand am 12. Juli 2005), 814.501, Anhang 3, S.84

<sup>10</sup> 1 mg Po-210 hat dieselbe Aktivität wie 5 g Ra-226  $\rightarrow$  1 mg haben  $5 \cdot 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 1.85 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$

Warum ist diese Substanz als Mordwaffe besonders perfid?

- Es braucht nur sehr wenig Substanz (ca. 1 Mikrogramm).
- Sie ist schwer nachzuweisen (zu wenig  $\gamma$ -Strahlung).
- Sie gibt ein unspezifisches Krankheitsbild (greift überall an).
- Sie verschwindet von selbst durch den Zerfall (Ausscheidungshalbwertszeit ca. 1 Monat ist meist weniger lang als die Krankheit).
- Wer vorsichtig damit umgeht hinterlässt praktisch keine Spuren!

## 7 Aufgaben

- Man ermittle mit einer Simulation die effektive Halbwertszeit ( $HWZ_{\text{eff}}$ ).
- Berechnen Sie die Dosis in Sievert zu jedem beliebigen Zeitpunkt durch Simulation.
- Die oben grob abgeschätzte halbletale Dosis LD(50) verwendet den Dosiskonversionsfaktor. Zeigen Sie, weshalb diese Grösse keine genau definierte physikalische Grösse ist.
- Welcher Teil von Polonium „verschwindet“ durch radioaktiven Zerfall, welcher Teil durch biologische Elimination?
- Mit welcher Massnahme könnte man die Strahlen-Dosis wirksam verringern? Wie viel?

## 8 Simulation

Annahmen:

Polonium-210 wird zerfällt mit einem physikalischen Prozess und  
Wird gleichzeitig biologisch aus dem Körper eliminiert.

### 8.1 Simulationsdiagramm<sup>11</sup> (Typ 8)<sup>12</sup>

Startmenge

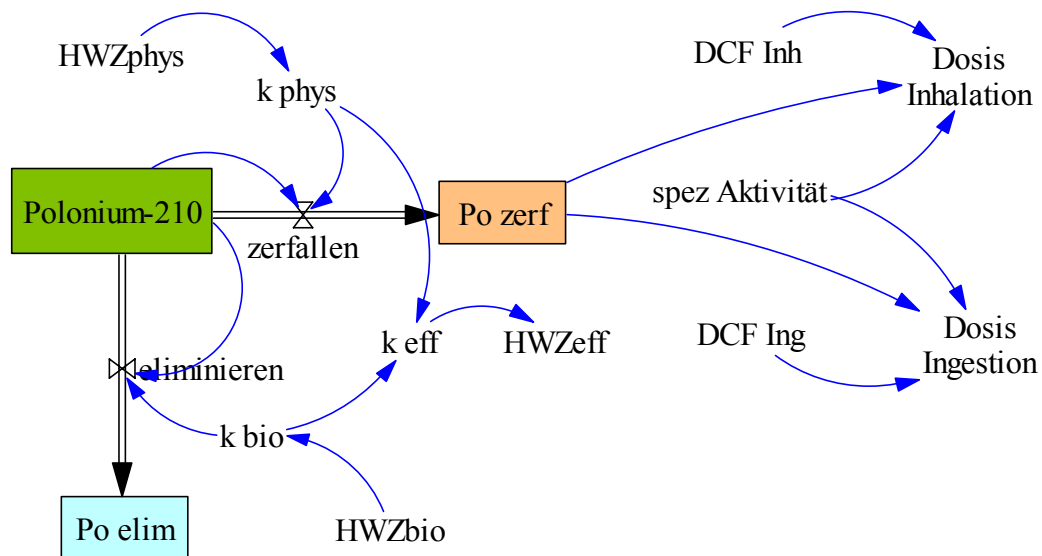


Abbildung 3: Simulationsdiagramm der Elimination von Polonium-210 aus dem Körper durch physikalischen Zerfall und biologische Ausscheidung

<sup>11</sup> Simulations-Software: Vensim® PLE, Ventana Systems, Inc., <http://www.vensim.com/>

<sup>12</sup> Bützer Peter, Roth Markus, Die Zeit im Griff, Systemdynamik in Chemie und Biochemie, verlag pestalozzianum, Zürich 2006, S. 87ff

## 8.2 Zeitdiagramm

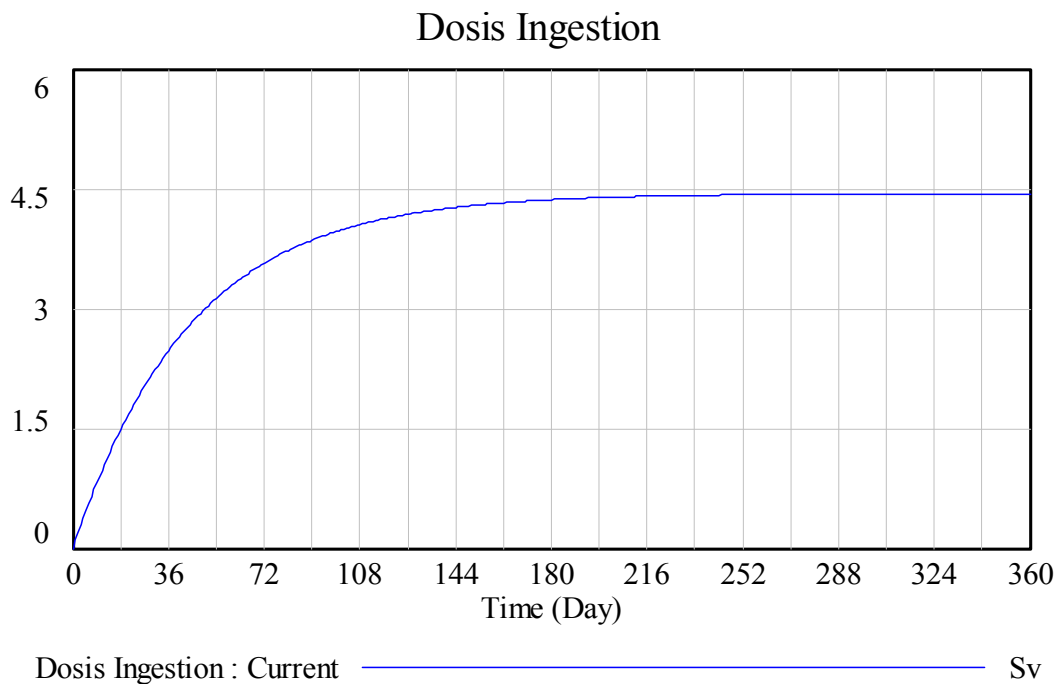


Abbildung 4: Dosis bei Ingestion von 100 ng und  $HWZ_{bio} = 40$  Tage

Mit  $100 \text{ ng } ^{210}\text{Po}$  Startmenge wird nach ca. 180 Tagen die halbletale Dosis LD(50) von 4.5 Sievert erreicht.

## 8.3 Dokumentation (Gleichungen, Parameter)

- (01)  $DCF_{Ing} = 2.4e-007$   
 Units: Sv/(Zerfälle/Second) [5.1e-007,5.1e-007]  
 Sv pro Bq: Dosisäquivalent bei Ingestion; Po-210,  
 Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 (Stand am 12.  
 Juli 2005), 814.501, Anhang 3, S.84
- (02)  $DCF_{Inh} = 2.2e-006$   
 Units: Sv/(Zerfälle/Second) [2.5e-006,2.5e-006]  
 Sv pro Bq: Dosisäquivalent bei Inhalation; Po-210,  
 Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 (Stand am 12.  
 Juli 2005), 814.501, Anhang 3, S.84
- (03)  $Dosis_{Ingestion} = Po_{zerf} * spez \text{ Aktivität} * DCF_{Ing} * 4.46$   
 Units: Sv  
 4.46: Faktor um den die Dosis erhöht werden muss, wenn bei einen  
 $HWZ_{bio}$  von 40 Tagen die Dosis nur aus den physikalischen  
 Zerfällen gerechnet wird. Die Abschätzung mit  $DCF_{ing}$  rechnet  
 die gesamte Aktivität der eingenommenen Menge Po in Dosis um.
- (04)  $Dosis_{Inhalation} = Po_{zerf} * spez \text{ Aktivität} * DCF_{Inh} * 4.46$   
 Units: Sv  
 4.46: Faktor um den die Dosis erhöht werden muss, wenn bei einen  
 $HWZ_{bio}$  von 40 Tagen die Dosis nur aus den physikalischen  
 Zerfällen gerechnet wird. Die Abschätzung mit  $DCF_{inh}$  rechnet  
 die gesamte Aktivität der eingenommenen Menge Po in Dosis um.

- (05) eliminieren=  $k_{\text{bio}} \cdot \text{"Polonium-210"}$   
Units: ng/Day
- (06) FINAL TIME = 360  
Units: Day  
The final time for the simulation.
- (07) HWZbio= 40  
Units: Day [30,50,1]
- (08) HWZeff=  $\ln(2)/k_{\text{eff}}$   
Units: Day
- (09) HWZphys=  $138.376 \cdot 1$   
Units: Day
- (10) INITIAL TIME = 0  
Units: Day  
The initial time for the simulation.
- (11)  $k_{\text{bio}} = \ln(2)/\text{HWZbio}$   
Units: 1/Day
- (12)  $k_{\text{eff}} = k_{\text{phys}} + k_{\text{bio}}$   
Units: 1/Day
- (13)  $k_{\text{phys}} = \ln(2)/\text{HWZphys}$   
Units: 1/Day
- (14) Po elim= INTEG (eliminieren, 0)  
Units: ng  
Polonium biologisch eliminiert, ca. 90% mit Kot, 10% mit Urin
- (15) Po zerf= INTEG (zerfallen, 0)  
Units: ng  
Polonium-210 physikalisch zu stabilem Blei-206 zerfallen
- (16) "Polonium-210"= INTEG (-eliminieren-zerfallen, Startmenge)  
Units: ng  
Aufgenommenes Polonium
- (17) SAVEPER = TIME STEP  
Units: Day [0,?]  
The frequency with which output is stored.
- (18) spez Aktivität= 185000  
Units: Zerfälle/Second/ng [1.66e+008,1.66e+008]  
Bq = Zerfälle/Second; 1 mg Po-210 hat dieselbe Aktivität wie 5 g Ra-226 ' 1 mg haben  $5 \cdot 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 1.85 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$
- (19) Startmenge= 100  
Units: ng [0,200]
- (20) TIME STEP = 1  
Units: Day [0,?]  
The time step for the simulation.
- (21) zerfallen=  $k_{\text{phys}} \cdot \text{"Polonium-210"}$   
Units: ng/Day

#### 8.4 Antworten

- Man ermittle mit einer Simulation die effektive Halbwertszeit.

Bei  $HWZ_{\text{bio}} = 30 \text{ d}$  ist  $HWZ_{\text{eff}} = 24.65 \text{ d}$ ;

Bei  $HWZ_{\text{bio}} = 40 \text{ d}$  ist  $HWZ_{\text{eff}} = 31.03 \text{ d}$ ;

Bei  $HWZ_{\text{bio}} = 50 \text{ d}$  ist  $HWZ_{\text{eff}} = 36.73 \text{ d}$ ;

Berechnen Sie die Dosis in Sievert zu jedem beliebigen Zeitpunkt durch Simulation.

→ Siehe Zeitdiagramm.

- Die oben grob abgeschätzte halbletale Dosis  $LD(50)$  verwendet den Dosiskonversionsfaktor. Zeigen Sie, weshalb diese Grösse keine genau definierte physikalische Grösse ist.

### 9 Folgerungen

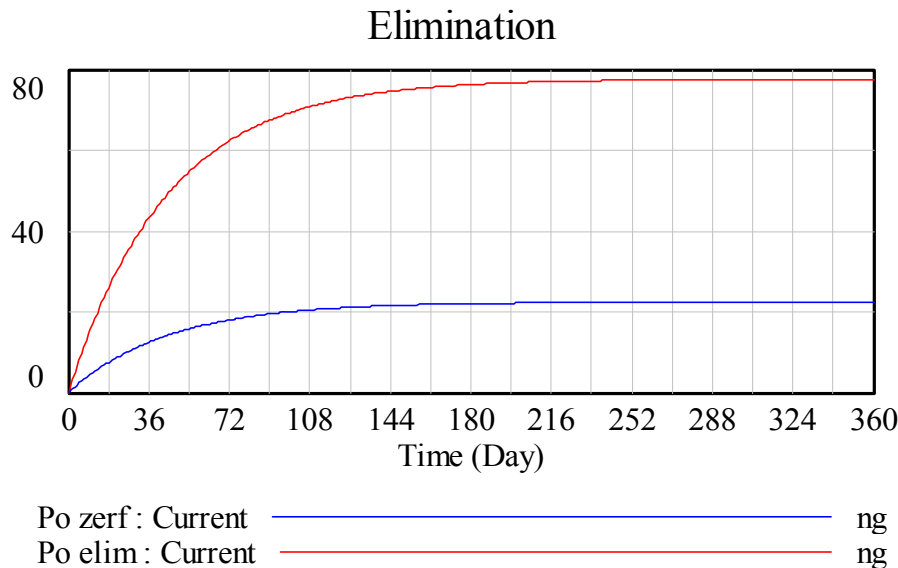
Die mit dem Dosiskonversionsfaktor (DCF) abgeschätzte Dosis muss auch die biologische Elimination berücksichtigen. Nur ein kleinerer Teil des Poloniums zerfällt im Körper, d.h. nicht alle Zerfälle sind wirksam. Alles Polonium das ausgeschieden wird, ist unwirksam. Die biologischen Prozesse der Elimination sind jedoch von der Physiologie abhängig, den Ausscheidungsprozessen. Diese wiederum sind von Mensch zu Mensch verschieden und z.B. auch von der Nahrung und der Flüssigkeitsaufnahme abhängig.

Beispiel:

Die Dosis bei  $HWZ_{\text{bio}} = 40 \text{ Tage}$  ist  $4.5 \text{ Sv}$ , bei  $30 \text{ Tagen}$   $3.5 \text{ Sv}$ , bei  $50 \text{ Tagen}$   $5.3 \text{ Sv}$ .

## 10 Antworten, Lösungen

- Welcher Teil von Polonium „verschwindet“ durch radioaktiven Zerfall, welcher Teil durch biologische Elimination?



**Abbildung 5: Zeitdiagramm der Elimination von Polonium-210 aus dem Körper durch physikalischen Zerfall im Vergleich zur gesamten Elimination (Physikalisch + biologisch)**

Folgerung: Durch die biologische Elimination wird ca 4 mal mehr Polonium-210 aus dem Körper entfernt (bei  $HWZ_{\text{bio}} = 40 \text{ d}$ ), als durch die Radioaktivität.

- Mit welcher Massnahme könnte man die Dosis wirksam verringern?

Indem man die biologische Halbwertszeit verringert. Das kann man machen durch Veränderung der chemischen Eigenschaften (Bindung, Komplexierung) und/oder durch Erhöhung der Ausscheidungen.

$HWZ_{\text{bio}} = 40 \text{ d} \rightarrow \text{Dosis (Ingestion)} = 4.5 \text{ Sv}$

$HWZ_{\text{bio}} = 10 \text{ d} \rightarrow \text{Dosis (Ingestion)} = 1.3 \text{ Sv}$

## 11 Eine wichtige Folgerung

Wer die Simulation der Abschätzung der Äquivalentdosis in Sievert aus der Zerfallsrate in Becquerel verstanden hat, ist in der Lage, die Belastung durch beliebige Strahlen abzuschätzen.