

**Verfahren zur Bestimmung der  
Aktivitätskonzentrationen von  
Blei-210 und Polonium-210  
in Trinkwasser und Grundwasser**

H-Pb-210/Po-210-TWASS-01

Bearbeiter:

M. Beyermann  
T. Bünger

Leitstelle für die Überwachung der Radioaktivität in Trinkwasser,  
Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Reststoffen und Abfällen

ISSN 1865-8725

Version Mai 2009

Messanleitungen für die „Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung“

# Verfahren zur Bestimmung der Aktivitätskonzentrationen von Blei-210 und Polonium-210 in Trinkwasser und Grundwasser

## 1 Anwendbarkeit

Das beschriebene Verfahren dient zur Bestimmung der Aktivitätskonzentrationen von Blei-210 (Pb-210) und Polonium-210 (Po-210) in Trinkwasser, Mineralwasser und Grundwasser. Mit diesem Verfahren können Aktivitätskonzentrationen von mehr als etwa  $0,005 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$  erfasst werden.

Mit der gleichzeitigen Bestimmung der beiden Radionuklide kann der analytische Aufwand reduziert werden, die Anwendbarkeit des Verfahrens wird jedoch durch die Messunsicherheit der zu ermittelnden Po-210-Aktivitätskonzentration begrenzt, die mit steigendem Aktivitätsverhältnis von Pb-210 und Po-210 größer wird (siehe Abschnitt 5). Bei Aktivitätsverhältnissen oberhalb von 10 müssen in Anlehnung an die vorliegende Messanleitung zeitlich voneinander getrennte Analysen durchgeführt werden. In diesen bei natürlichen Wässern selten auftretenden Fällen ist die Aktivitätskonzentration von Po-210 möglichst unmittelbar nach der Probeentnahme zu bestimmen (siehe Verfahren H-Po-210-TWASS-01), während die Bestimmung der Pb-210-Aktivitätskonzentration erst nach einer Wartezeit von 30 Tagen erfolgen kann.

## 2 Probeentnahme

Zur Probeentnahme von Trinkwasser wird auf das Verfahren H- $\gamma$ -SPEKT-TWASS-01 und auf die Hinweise in (1) verwiesen.

Zur Probeentnahme von bergbaulich beeinflussten Grundwässern wird auf die Verfahren K- $\gamma$ -SPEKT-TWASS-01 und K-VORBEMERK-GWASS-01 verwiesen.

Das erforderliche Probenvolumen wird anhand der Anforderungen an die Analyse, wie z. B. Nachweisgrenzen der Aktivitätskonzentration, aber auch Durchführung von Mehrfachbestimmungen oder Vorhaltung einer Rückstellprobe festgelegt.

## 3 Analyse

### 3.1 Prinzip des Verfahrens

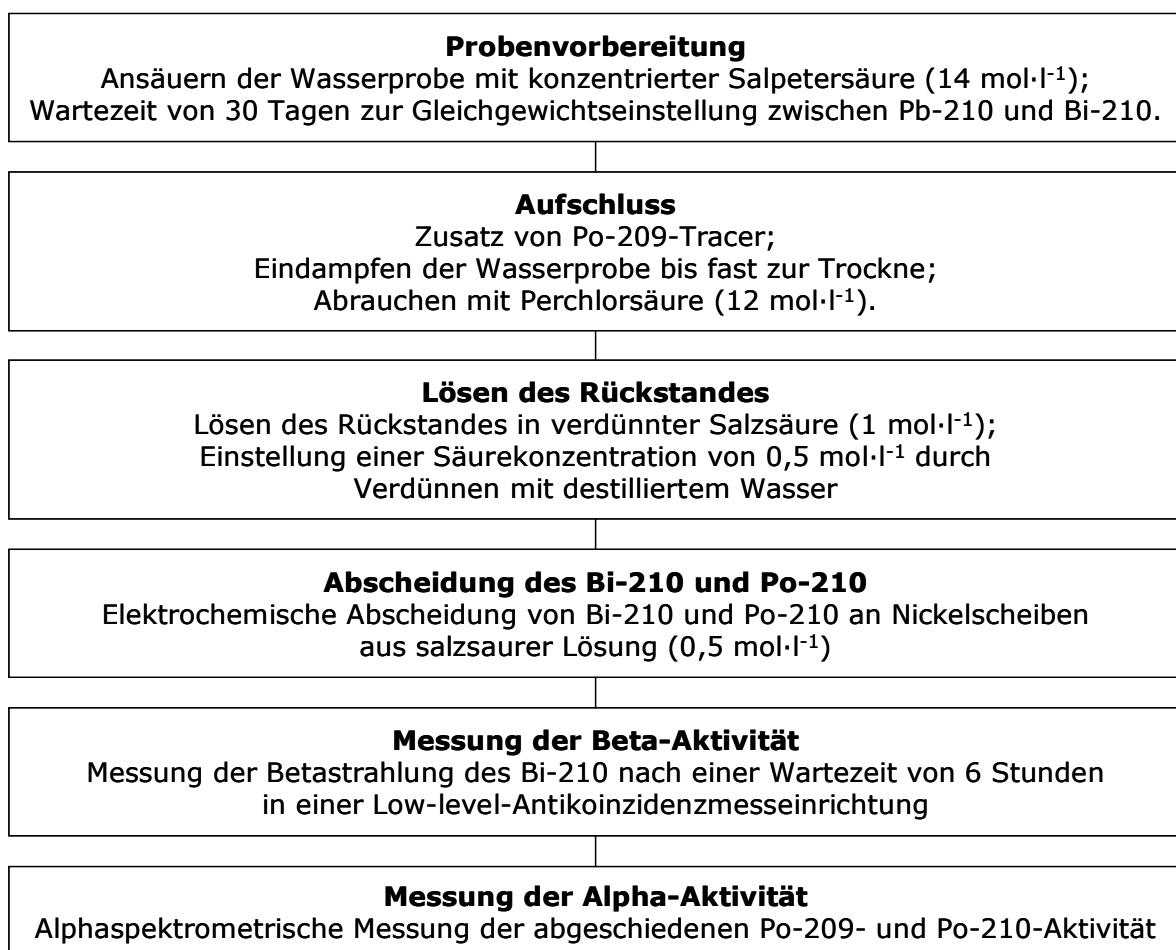
Die Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Pb-210 erfolgt über die Bestimmung der Aktivität des kurzlebigen Tochternuklids Bismut-210 (Bi-210). Das Prinzip des Verfahrens ist in Abbildung 1 dargestellt. Es beinhaltet den Aufschluss der Probe durch Behandlung mit Salpetersäure ( $14 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) und Perchlorsäure ( $12 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ). Nach einer Wartezeit von 30 Tagen zur Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts von Pb-210 und seinem Folgenuklid Bi-210 mit einer Halbwertszeit von etwa 5 Tagen erfolgt die gleichzeitige elektrochemische Abscheidung von Bi-210 und

Po-210 in elementarer Form aus salzsaurer Lösung auf Nickel. Zur Messung der beim Bi-210-Zerfall emittierten energiereichen Betastrahlung ( $E_{\beta\max} = 1162 \text{ keV}$ ) werden die Messpräparate mit einer Aluminiumfolie ( $7 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) abgedeckt, um die vom Po-210 emittierte Alphastrahlung vollständig zu absorbieren.

### 3.2 Probenvorbereitung

Grundwasserproben werden in der Regel filtriert, um eventuell vorhandene Verunreinigungen, die den Analysengang stören könnten, abzutrennen. Es wird davon ausgegangen, dass an Partikeln gebundene radioaktive Stoffe durch den Säurezusatz bei der Probeentnahme in Lösung gegangen sind.

Die Probe ist gemäß dem Verfahren H-Pb-210-AWASS-01 zu entgasen, da durch radioaktiven Zerfall von gelöstem Rn-222 als Folgeprodukt Pb-210 entsteht.



**Abb. 1:** Prinzip der Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Pb-210 und Po-210 in Wasserproben

### 3.3 Radiochemische Trennung

**3.3.1** Ein Liter bis vier Liter der angesäuerten Wasserprobe werden nach Zusatz des Po-209-Tracers in einem Becherglas unter ständigem Rühren auf einem Heiz-Magnetprüher bis zu einem Volumen von ca. 100 ml eingeengt. Das weitere Eindampfen des Wassers bis fast zur Trockne erfolgt auf dem Sandbad bei Temperaturen von etwa 160 °C.

**3.3.2** Der Eindampfrückstand wird mit 20 ml konzentrierter Perchlorsäure ( $12 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) versetzt und die Lösung vorsichtig auf dem Sandbad abgeraucht, um Nitrat zu entfernen. Dazu wird die Lösung in dem mit einem Uhrglas abgedeckten Becherglas zunächst für etwa 10 Minuten auf einem Heiz-Magnetprüher in der Wärme gerührt, um den Eindampfrückstand vollständig vom Becherglasboden abzulösen. Anschließend wird die Lösung für 6 Stunden bis 8 Stunden auf dem Sandbad bei einer Temperatur von ca. 150 °C unter gelegentlichem Umschwenken erhitzt. Danach wird das Uhrglas entfernt und die Lösung bis fast zur Trockne eingedampft.

**Anmerkung:**

Aufgrund der relativ niedrigen Siede- und Schmelztemperaturen seiner Verbindungen ist das Element Polonium bei hohen Temperaturen flüchtig. Polonium in Form des Chlorides sublimiert bei etwa 200 °C, das Oxid bei etwa 500 °C; bei organisch gebundenem Polonium ist bereits oberhalb von 100 °C mit Verlusten durch Sublimation zu rechnen.

**3.3.3** Nach Zugabe von 100 ml Salzsäure ( $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) wird der Eindampfrückstand unter Rühren in der Wärme (etwa 50 °C) gelöst und die Lösung unter mehrmaligem Nachwaschen mit destilliertem Wasser quantitativ in ein 250 ml-Becherglas überführt. Anschließend wird die Probenlösung mit destilliertem Wasser auf 200 ml aufgefüllt, um eine salzsaure Lösung ( $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) zu erhalten.

**3.3.4** Um störende  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen zu maskieren, wird in der Wärme unter Rühren portionsweise Ascorbinsäure (max. 100 mg) zugesetzt, bis eine helle, klare Lösung vorliegt.

**3.3.5** Aus dieser Lösung werden Bi-210, Po-209 und Po-210 bei 90 °C über einen Zeitraum von 20 Stunden elektrochemisch auf einem Nickelplättchen abgeschieden, das in einer speziellen Halterung aus Polytetrafluorethylen (PTFE) so befestigt wird, dass nur eine Seite beaufschlagt werden kann. Die Vorrichtung wird im Becherglas so positioniert, dass ein gleichmäßiges Rühren der Lösung gewährleistet ist. Durch eine Abdeckung des Becherglases wird erreicht, dass während der Abscheidung nur geringe Mengen an Wasser aus der Probenlösung verdampfen.

**Anmerkung:**

Das Nickelplättchen wird vor seinem Einsatz durch kurzzeitiges Eintauchen in heiße, konzentrierte Salpetersäure gereinigt. Danach wird sofort mit destilliertem Wasser abgespült. Durch Messung der Beta- und Alphaaktivität auf dem gereinigten und getrockneten Plättchen werden die Nulleffektzählraten bestimmt. Gebrauchte Nickelplättchen können nach einer Reinigung wieder verwendet werden, wenn die als Nulleffekte gemessenen Zählraten unterhalb vorgegebener Werte liegen.

**3.3.6** Nach dem Abscheiden wird die Vorrichtung mit dem Nickelplättchen aus der Lösung entfernt (Zeitpunkt  $t_2$  notieren). Das Nickelplättchen wird der Halterung entnommen, mit destilliertem Wasser gespült und an der Luft getrocknet.

## 4 Messung der Aktivität

### 4.1 Allgemeines

Die spontane Abscheidung von Bi-210 und Po-210 auf Nickel beruht auf der elektrochemischen Spannungsreihe der Elemente. Grundsätzlich werden neben Bismut alle diejenigen Elemente bzw. deren Isotope abgeschieden, die edler als Bismut sind.

Po-210 sowie andere abgeschiedene Radionuklide und deren Tochternuklide stören die Messung der Betaaktivität des Bi-210.

Als störende Radionuklide in natürlichen Wasserproben treten Bi-214, Bi-212 und deren Tochternuklide Po-212, Po-214 und Tl-208 aus der Th-232-Zerfallsreihe auf. Sie sind kurzlebig, so dass sie nach einer Abklingzeit von einigen Stunden soweit zerfallen sind, dass sie die Messung nicht mehr beeinflussen.

### 4.2 Messung

Nach Beendigung der Abscheidung und einer Wartezeit von mindestens 5 Stunden wird die Betaaktivität des mit einer Aluminiumfolie abgedeckten Nickelplättchens in einer Low-level-Antikoinzidenzmesseinrichtung gemessen. Die Messdauer beträgt etwa 60000 s. Als Bezugszeitpunkt für die Aktivität auf dem Messpräparat  $t_{3, \text{Bi-210}}$  wird der Zeitpunkt nach Ablauf der halben Messdauer festgelegt.

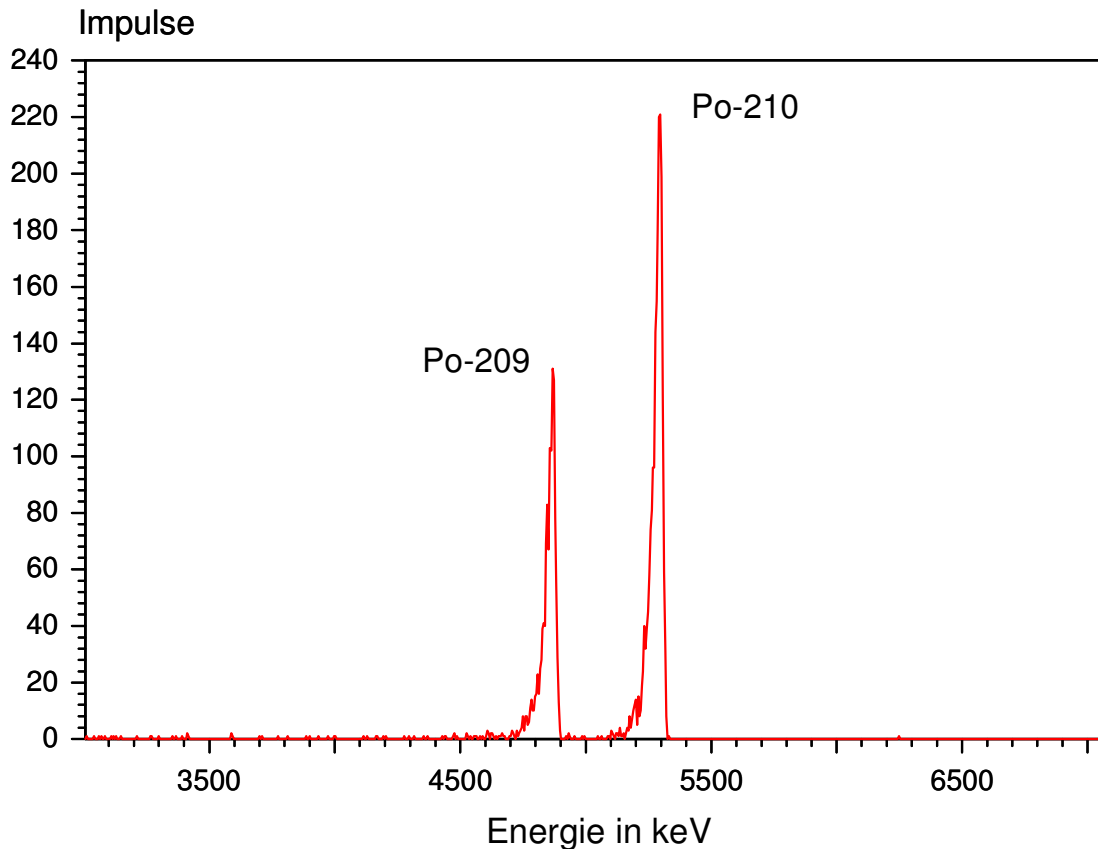
Die Alphastrahlung des Po-210 wird durch die Abdeckung des Nickelplättchens mit einer Aluminiumfolie unterdrückt. Die flächenbezogene Masse der Aluminiumfolie mit  $7 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$  wird so gewählt, dass niederenergetische Betastrahlung und Alphastrahlung bis etwa 5,5 MeV durch diese Folie absorbiert wird, die Schwächung der Betastrahlung des Bi-210 beträgt hingegen nur 9 %.

Im Anschluss an die Messung der Betaaktivität wird die Aluminiumfolie entfernt und die Aktivität des Po-210 sowie des Po-209 Tracers alphaspektrometrisch bestimmt. Zur Alphaaktivitätsmessung werden ionenimplantierte Halbleiterdetektoren eingesetzt. Die Messung wird in der gleichen geometrischen Anordnung durchgeführt wie die Kalibrierung. Im Allgemeinen beträgt die Messdauer 60000 s. Als Bezugszeitpunkt für die Aktivität auf dem Messpräparat  $t_{3, \text{Po-210}}$  wird der Zeitpunkt nach Ablauf der halben Messdauer festgelegt. In Abbildung 2 ist beispielhaft ein Alphaspektrum der auf einem Nickelplättchen abgeschiedenen Poloniumisotope dargestellt.

Grundlegende Ausführungen zur Alphaspektrometrie sind dem Kapitel IV dieser Messanleitungen zu entnehmen.

#### **Anmerkung:**

Alternativ zur alphaspektrometrischen Bestimmung der Aktivität können auch Methoden zur Gesamt-Alpha-Aktivitätsbestimmung eingesetzt werden, z. B. mit Szintillationssonden und ZnS(Ag)-Szintillatoren. In diesen Fällen ist jedoch eine Bestimmung der chemischen Ausbeute durch Verwendung von Po-209 als Tracer nicht möglich.



**Abb. 2:** Alphaspektrum des aus einer Wasserprobe abgeschiedenen Po-210 und des als Tracer zugegebenen Po-209

### 4.3 Kalibrierung

Zur Bestimmung des Nachweisvermögens der Messeinrichtung für die Betastrahlung des Bi-210 bzw. die Alphastrahlung des Po-210 werden aus zertifizierten Aktivitätsnormalen hergestellte Kalibrierpräparate verwendet. Die Geometrie der Kalibrierpräparate muss mit derjenigen der zu messenden Probe übereinstimmen. Bei der Kalibrierung mit Bi-210 ist insbesondere auf die Abdeckung des Nickelplättchens mit einer Aluminiumfolie zu achten. Das Nachweisvermögen wird nach Gleichung (1) berechnet:

$$\varepsilon_r = \frac{(R_{bK,r} - R_{0,r})}{A_{K,r}} \quad (1)$$

**Anmerkung:**

Die Absorption der zu messenden Betastrahlung durch die Aluminiumfolie mit einer flächenbezogenen Masse von  $7 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  beträgt 9 %. Diese Absorption muss bei der Berechnung der Aktivitätskonzentration des Pb-210 nicht berücksichtigt werden, wenn bei der Messung von Messpräparat und Kalibrierpräparat die gleiche Aluminiumfolie eingesetzt wird.

Nach Gleichung (2) wird die relative Standardmessunsicherheit des Nachweisvermögens berechnet:

$$\frac{s(\varepsilon_r)}{\varepsilon_r} = \sqrt{\frac{\frac{R_{bK,r}}{t_{mK}} + \frac{R_{0,r}}{t_0}}{(R_{bK,r} - R_{0,r})^2} + \left(\frac{s(A_{K,r})}{A_{K,r}}\right)^2} \quad (2)$$

In den Gleichungen (1) und (2) bedeuten:

- $\varepsilon_r$  Nachweisvermögen für das Radionuklid r in  $\text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $R_{bK,r}$  Bruttozählrate des jeweiligen Kalibrierpräparates in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $R_{0,r}$  Nulleffektzählrate im entsprechenden Messbereich in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $A_{K,r}$  Aktivität des jeweiligen Kalibrierpräparates in Bq;
- $t_{mK}$  Messdauer des jeweiligen Kalibrierpräparates in s;
- $t_0$  Messdauer der jeweiligen Nulleffektmessung in s;
- $s(A_{K,r})$  Standardmessunsicherheit der Aktivität des jeweiligen Kalibrierpräparates in Bq.

Die Messdauer zur Bestimmung des Nachweisvermögens richtet sich nach der Aktivität des verwendeten Kalibrierpräparates. Sie ist so zu wählen, dass der statistische Zählfehler der Messung einen Wert von 5 % nicht überschreitet.

## 5 Berechnung der Analyseergebnisse

### 5.1 Gleichungen zur Berechnung

Die Aktivitätskonzentration  $c_{r,t1}$  des zu bestimmenden Radionuklides r zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  wird mit Hilfe der ermittelten Aktivität zum Zeitpunkt der Abscheidung auf Nickel und unter Berücksichtigung der Zeitspanne zwischen Probeentnahme und Abscheidung berechnet.

Werden die Proben nicht länger als drei Monate aufbewahrt, ist für die Bestimmung der Aktivitätskonzentration des langlebigen Pb-210 (Halbwertszeit 22,3 a) eine Korrektur für den Zerfall in der Zeitspanne zwischen Probeentnahme  $t_1$  und Abscheidung  $t_2$  nicht erforderlich. Die Aktivitätsabnahme mit etwa 0,8 % innerhalb von 3 Monaten ist vernachlässigbar ( $c_{\text{Pb-210},t2} = c_{\text{Pb-210},t1}$ ).

Die Umrechnung der Aktivitätskonzentration des Po-210 (Halbwertszeit 138,4 d) auf das Bezugsdatum ( $t_1$ ) setzt die Kenntnis der Pb-210-Aktivitätskonzentration der Probe voraus. Liegt radioaktives Gleichgewicht zwischen Pb-210 und Po-210 vor, was bei natürlich vorkommenden Wässern jedoch nicht vorausgesetzt werden kann, entfällt eine Korrektur. Bei höherer (bzw. niedrigerer) Pb-210-Aktivitätskonzentration des Wassers ist die während der Wartezeit nachgebildete (bzw. abklingende) Po-210-Aktivität rechnerisch zu korrigieren.

### 5.1.1 Gleichungen zur Berechnung der Aktivitäten von Bi-210 und Po-210 im Messpräparat

Die Aktivität  $A_{r,t_2}$  des zu bestimmenden Radionuklids  $r$  zum Zeitpunkt der Abscheidung  $t_2$  wird nach Gleichung (3) berechnet:

$$A_{r,t_2} = \frac{(R_{b,r} - R_{0,r})}{\varepsilon_r \cdot \eta_r} \cdot f_{3,r} \quad (3)$$

Die Berechnung des Korrektionsfaktors  $f_{3,r}$  für den Zerfall des Bi-210 bzw. des Po-210 in der Zeit zwischen dem Ende der Abscheidung und der Mitte der Messung erfolgt nach Gleichung (4):

$$f_{3,r} = e^{-\frac{\ln 2 \cdot t_{A,r}}{t_r}} \quad (4)$$

In den Gleichungen (3) und (4) bedeuten:

- $A_{r,t_2}$  Aktivität des Bi-210 oder des Po-210 zum Zeitpunkt der Abscheidung in Bq;
- $R_{b,r}$  Bruttozählrate der Probe in  $s^{-1}$ ;
- $R_{0,r}$  Nulleffektzählrate in  $s^{-1}$ ;
- $\varepsilon_r$  Nachweisvermögen der jeweiligen Messung in  $Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ ;
- $\eta_r$  chemische Ausbeute der jeweiligen Radionuklidbestimmung;
- $f_{3,r}$  Korrektionsfaktor;
- $t_r$  Halbwertszeit von Bi-210 bzw. Po-210 in s;
- $t_{A,r}$  Zeitspanne zwischen Ende der Abscheidung ( $t_2$ ) von Bi-210 bzw. Po-210 und Mitte der Messung ( $t_{3,r}$ ) der Beta- bzw. Alphaaktivität des Bi-210 bzw. des Po-210 in s ( $t_{A,r} = t_{3,r} - t_2$ ).

Die chemische Ausbeute der Po-210-Analyse wird nach Gleichung (5) bestimmt.

$$\eta_{Po-210} = \frac{(R_{b,Tr} - R_{0,Tr})}{A_{Tr} \cdot \varepsilon_{Po-210}} \quad (5)$$

Neben den bereits verwendeten Größen bedeuten:

- $R_{b,Tr}$  Bruttozählrate des Tracers in  $s^{-1}$ ;
- $R_{0,Tr}$  Nulleffektzählrate im Energiebereich des Tracerpeaks in  $s^{-1}$ ;
- $A_{Tr}$  zugesetzte Po-209-Traceraktivität in Bq.

Da die chemische Ausbeute bei der Ermittlung der Pb-210-Aktivitätskonzentration durch Tracerzusatz nicht bestimmt werden kann, muss sie durch wiederholte Pb-210-Bestimmungen in Proben ähnlicher Matrixstruktur getrennt ermittelt werden. Eigene Untersuchungen zur Ausbeutebestimmung ergaben für dieses Verfahren unter den beschriebenen Abscheidebedingungen für Wasserproben (Trink- und Mineralwasser) eine mittlere chemische Ausbeute von  $(90 \pm 5) \%$ .

#### Anmerkung:

Größere Mengen von Bismut (einige zehn Milligramm) und der Elemente, die neben Bismut ebenfalls abgeschieden werden, stören bei der elektrochemischen Abscheidung und führen zu niedrigen Ausbeuten. Dies ist insbesondere zu beachten, wenn Ausbeuten mit Hilfe von



Pb-210/Bi-210-Lösungen bekannter Aktivität bestimmt werden sollen, da die kommerziell angebotenen Aktivitätsnormale zum Teil erhebliche Mengen der entsprechenden Elemente als Träger enthalten.

Die relative Standardmessunsicherheit der Aktivität des Radionuklids  $r$  wird nach Gleichung (6) berechnet:

$$\frac{s(A_{r,t_2})}{A_{r,t_2}} = \sqrt{\frac{R_{0,r}}{t_0} + \frac{R_{b,r}}{t_m} + \left(\frac{s(\varepsilon_r)}{\varepsilon_r}\right)^2 + \left(\frac{s(\eta_r)}{\eta_r}\right)^2} \quad (6)$$

### 5.1.2 Gleichungen zur Berechnung der Aktivitätskonzentrationen von Pb-210 und Po-210

#### 5.1.2.1 Gleichung zur Berechnung der Aktivitätskonzentration von Pb-210

Die Aktivitätskonzentration von Pb-210 in der Wasserprobe zum Zeitpunkt der Probeentnahme wird unter Verwendung der Gleichung (3) nach Gleichung (7) berechnet:

$$c_{\text{Pb-210},t_1} = \frac{A_{\text{Bi-210},t_2}}{V} \quad (7)$$

Dabei bedeuten:

$c_{\text{Pb-210},t_1}$  Aktivitätskonzentration des Pb-210 zum Zeitpunkt der Probeentnahme in  $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ ;

$V$  eingesetztes Volumen der Probe in l.

Die relative Standardmessunsicherheit der ermittelten Aktivitätskonzentration des Pb-210 zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  wird gemäß Kapitel IV.5 dieser Messanleitungen nach Gleichung (8) berechnet:

$$\frac{s(c_{\text{Pb-210},t_1})}{c_{\text{Pb-210},t_1}} = \frac{s(A_{\text{Pb-210},t_2})}{A_{\text{Pb-210},t_2}} \quad (8)$$

Die relative Standardmessunsicherheit der chemischen Ausbeute  $s_{\text{Bi-210}}(\eta) \cdot \eta^{-1}$  der spontanen Bi-210-Abscheidung wurde durch wiederholte Bestimmungen bekannter Pb-Aktivitätskonzentrationen experimentell ermittelt. Bei der Analyse von salzarmen Wässern mit Trinkwasserqualität beträgt sie erfahrungsgemäß etwa 5 %. Die relative Standardmessunsicherheit des Volumens ist im Vergleich zu den anderen Beiträgen vernachlässigbar klein.

#### 5.1.2.2 Gleichung zur Berechnung der Aktivitätskonzentration von Po-210

Die exakte Berechnung der Aktivitätskonzentration von Po-210 zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  erfolgt über in der Literatur beschriebene Gleichungen (Bateman-Gleichungen) (3). Eine Anwendung dieser komplex aufgebauten Differentialgleichungen ist nicht unbedingt erforderlich, wenn kombinierte Standardmessunsicherheiten von 20 % bis 30 % toleriert werden. Zur Berechnung der Aktivitätskonzentration von Po-210 kann unter dieser Voraussetzung die empirisch abgeleitete

Näherung in Form der vereinfachten Gleichung (12) unter Einbeziehung der Gleichungen (3) bis (5) und (9) bis (11) herangezogen werden.

$$C_{Po-210,t_1} = \frac{(A_{Po-210,t_2} - A_{Pb-210,t_1} \cdot f_5) \cdot f_4}{V} \quad (9)$$

mit

$$f_4 = e^{\frac{\ln 2 \cdot t_B}{t_{Po-210}}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f_5 = & \frac{t_{Pb-210}}{t_{Pb-210} - t_{Bi-210}} \cdot \frac{t_{Pb-210}}{t_{Pb-210} - t_{Po-210}} \cdot e^{\frac{-\ln 2 \cdot t_B}{t_{Pb-210}}} + \\ & + \frac{t_{Pb-210}}{t_{Bi-210} - t_{Pb-210}} \cdot \frac{t_{Bi-210}}{t_{Bi-210} - t_{Po-210}} \cdot e^{\frac{-\ln 2 \cdot t_B}{t_{Bi-210}}} + \\ & + \frac{t_{Po-210}}{t_{Po-210} - t_{Bi-210}} \cdot \frac{t_{Pb-210}}{t_{Po-210} - t_{Pb-210}} \cdot e^{\frac{-\ln 2 \cdot t_B}{t_{Po-210}}} + \\ & + \frac{A_{Bi-210,t_1}}{A_{Pb-210,t_1}} \cdot \left[ \frac{t_{Bi-210}}{t_{Bi-210} - t_{Po-210}} \cdot \left( e^{\frac{-\ln 2 \cdot t_B}{t_{Bi-210}}} - e^{\frac{-\ln 2 \cdot t_B}{t_{Po-210}}} \right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Mit folgenden Annahmen bzw. Näherungen:

$$A_{Pb-210,t_1} = A_{Pb-210,t_2} \quad \text{und} \quad \frac{A_{Bi-210,t_1}}{A_{Pb-210,t_1}} = 1$$

sowie

$$\frac{t_{Pb-210}}{t_{Pb-210} - t_{Po-210}} = 1,017 \approx 1 \quad \text{und} \quad e^{\frac{-\ln 2 \cdot t_B}{t_{Pb-210}}} \approx 1$$

ergibt sich die vereinfachte Gleichung (11).

$$C_{Po-210,t_1} = \frac{A_{Pb-210,t_2} \cdot (1 - f_4) + A_{Po-210,t_2} \cdot f_4}{V} \quad (12)$$

In den Gleichungen (9) bis (12) bedeuten:

- $C_{\text{Po-210},t_1}$  Aktivitätskonzentration des Po-210 zum Zeitpunkt der Probeentnahme in  $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ ;  
 $t_B$  Zeitspanne zwischen Probeentnahme und Ende der Abscheidung in s;  
 $t_{\text{Po-210}}$  Halbwertszeit von Po-210 in s;  
 $t_{\text{Bi-210}}$  Halbwertszeit von Bi-210 in s;  
 $t_{\text{Pb-210}}$  Halbwertszeit von Pb-210 in s;  
 $A_{\text{Bi-210},t_1}$  angenommene Bi-210-Aktivität zum Zeitpunkt der Probeentnahme in Bq;  
 $A_{\text{Pb-210},t_1}$  ermittelte Pb-210-Aktivität zum Zeitpunkt der Probeentnahme in Bq.

Die relative Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration des Po-210 zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  wird nach den Gleichungen (6) und (13) berechnet. Dabei werden sowohl die Standardmessunsicherheiten der zum Zeitpunkt der Abscheidung  $t_2$  ermittelten Pb-210- und Po-210-Aktivitäten berücksichtigt als auch das Verhältnis  $C_{\text{Pb-210},t_1} \cdot C_{\text{Po-210},t_1}^{-1}$  zum Zeitpunkt  $t_1$ . Darüber hinaus werden Zerfalls- und Aufbaukorrekturen für die Zeitspanne  $t_B$  zwischen Probeentnahme und Abscheidung im Faktor  $f_4$  und weiterhin eine 5 %ige Standardunsicherheit infolge des unbekanntes Aktivitätsverhältnisses von Pb-210 und Bi-210 zum Zeitpunkt  $t_1$  berücksichtigt.

$$\frac{s(C_{\text{Po-210},t_1})}{C_{\text{Po-210},t_1}} = \sqrt{(1 - f_4)^2 \cdot \left(\frac{A_{\text{Pb-210}}}{A_{\text{Po-210},t_1}}\right)^2 \cdot \left(\frac{s(A_{\text{Pb-210}})}{A_{\text{Pb-210}}}\right)^2 + 0,05^2 + f_4^2 \cdot \left(\frac{A_{\text{Po-210},t_2}}{A_{\text{Po-210},t_1}}\right)^2 \cdot \left(\frac{s(A_{\text{Po-210},t_2})}{A_{\text{Po-210},t_2}}\right)^2} \quad (13)$$

Die relative Standardmessunsicherheit der berechneten Po-210-Aktivitätskonzentration zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  wird größer mit steigendem Verhältnis  $C_{\text{Pb-210},t_1} \cdot C_{\text{Po-210},t_1}^{-1}$  und zunehmender Wartezeit  $t_B$  nach der Probeentnahme (vgl. Tabelle 1 und Abbildung 2).

## 5.2 Rechenbeispiele

Nachfolgend wird je ein Rechenbeispiel für die Kalibrierung der Low-level-Antikoinzidenzmesseinrichtung sowie für die Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Pb-210 und der Po-210-Aktivitätskonzentration zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  aufgeführt.

### 5.2.1 Kalibrierung

Nach einer gemäß Abschnitt 4.2 erfolgten Kalibrierung liegen folgende Daten vor:

$$\begin{aligned} R_{\text{bK}} &= 1,600 \text{ s}^{-1}; & R_0 &= 0,004 \text{ s}^{-1}; \\ A_{\text{K}} &= 5,083 \text{ Bq}; & t_{\text{mK}} &= 60000 \text{ s}. \end{aligned}$$

Für das Nachweisvermögen ergibt sich nach Gleichung (1):

$$\varepsilon_{\text{Bi-210}} = \frac{1,600 - 0,004}{5,083} \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 0,314 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Die relative Standardmessunsicherheit  $s(A_K) \cdot A_K^{-1}$  des aus zertifizierten Aktivitätsnormalen hergestellten Kalibrierpräparates wurde zu 0,05 abgeschätzt. Für die relative Standardmessunsicherheit des Nachweisvermögens ergibt sich damit nach Gleichung (2):

$$\frac{s(\varepsilon_{\text{Bi-210}})}{\varepsilon_{\text{Bi-210}}} = \sqrt{\frac{\frac{1,600}{60000} + \frac{0,004}{60000}}{(1,600 - 0,004)^2} + (0,05)^2} = 0,05$$

### 5.2.2 Ermittlung der Aktivitätskonzentration von Pb-210

Für das vorliegende Rechenbeispiel wurden folgende Zahlenwerte zu Grunde gelegt:

$$\begin{aligned} t_{A,\text{Bi-210}} &= 5,04 \cdot 10^4 \text{ s (14 h);} & V &= 1,0 \text{ l;} \\ t_{\text{Bi-210}} &= 4,33 \cdot 10^5 \text{ s (5,01 d);} & \eta_{\text{Bi-210}} &= 0,92; \\ f_{3,\text{Bi-210}} &= 1,084; & \varepsilon_{\text{Bi-210}} &= 0,314 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; \\ R_{b,\text{Bi-210}} &= 0,011 \text{ s}^{-1}; & t_m &= 60000 \text{ s;} \\ R_{0,\text{Bi-210}} &= 0,004 \text{ s}^{-1}; & t_0 &= 60000 \text{ s.} \end{aligned}$$

Nach Gleichung (3) ergibt sich folgende Aktivitätskonzentration für Pb-210:

$$c_{\text{Pb-210}} = \frac{(0,011 - 0,004) \cdot 1,084}{1,0 \cdot 0,314 \cdot 0,92} \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1} = 0,026 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

Mit den obigen Werten beträgt nach Gleichung (8) die relative Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration von Pb-210:

$$\frac{s(c_{\text{Pb-210}})}{c_{\text{Pb-210}}} = \sqrt{\frac{\frac{0,004}{60000} + \frac{0,011}{60000}}{(0,011 - 0,004)^2} + (0,05)^2 + (0,07)^2} = 0,11$$

### 5.2.3 Ermittlung der auf das Datum der Probeentnahme bezogenen Po-210-Aktivitätskonzentration

Die Po-210-Aktivität der Probe zum Zeitpunkt der Abscheidung  $t_2$  wird mit folgenden Werten nach Gleichungen (3) und (4) berechnet:

$$\begin{aligned} A_{\text{Po-209}} &= 0,08 \text{ Bq;} & t_m &= 100000 \text{ s;} \\ V &= 1,0 \text{ l;} & t_0 &= 300000 \text{ s;} \\ t_{\text{Po-210}} &= 1,196 \cdot 10^7 \text{ s (138,4 d);} & R_{0,\text{Po-210}} &= 6,67 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}; \\ t_{A,\text{Po-210}} &= 1,296 \cdot 10^5 \text{ s (36 h);} & R_{b,\text{Po-210}} &= 3,03 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}; \\ f_{3,\text{Po-210}} &= 1,008; & R_{0,\text{Po-209}} &= 4,67 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}; \\ \varepsilon_{\text{Po-210}} &= 0,26 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; & R_{b,\text{Po-209}} &= 2,06 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}; \\ \eta_{\text{Po-210}} &= 0,92. \end{aligned}$$

$$A_{\text{Po-210},t_2} = \frac{(3,03 \cdot 10^{-3} - 6,67 \cdot 10^{-6}) \cdot 1,008}{0,92 \cdot 0,26} \text{ Bq} = 0,013 \text{ Bq}$$

Es wird eine Wartezeit  $t_B$  von 60 Tagen, ein Verhältnis  $A_{\text{Pb-210},t_2} \cdot A_{\text{Po-210},t_2}^{-1}$  von 2 und eine Pb-210-Aktivität  $A_{\text{Pb-210},t_2}$  von 0,026 Bq zugrunde gelegt. Mit diesen Werten wird die Po-210-Aktivitätskonzentration in der Probe nach Gleichungen (10) und (12) berechnet.

$$f_4 = e^{\frac{\ln 2 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{138,4 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}} = 1,35$$

$$C_{\text{Po-210},t_1} = \frac{0,026 \cdot (1 - 1,35) + (0,013 \cdot 1,35)}{1,0} \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1} = 0,0084 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

Die relative kombinierte Standardmessunsicherheit der auf den Probeentnahmezeitpunkt bezogenen Po-210-Aktivitätskonzentration wird mit den in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 angegebenen Größen nach Gleichung (13) berechnet.

$$\frac{s(C_{\text{Po-210},t_1})}{C_{\text{Po-210},t_1}} = \sqrt{(1 - 1,35)^2 \cdot 3,1^2 \cdot 0,11^2 + 0,05^2 + 1,35^2 \cdot 1,55^2 \cdot 0,09^2} = 0,23$$

### 5.3 Unsicherheiten der Analyseergebnisse

Verfahrensbezogene Beiträge zur kombinierten Standardmessunsicherheit, die insbesondere bei der Po-210-Bestimmung zu beachten sind, werden im Folgenden erläutert.

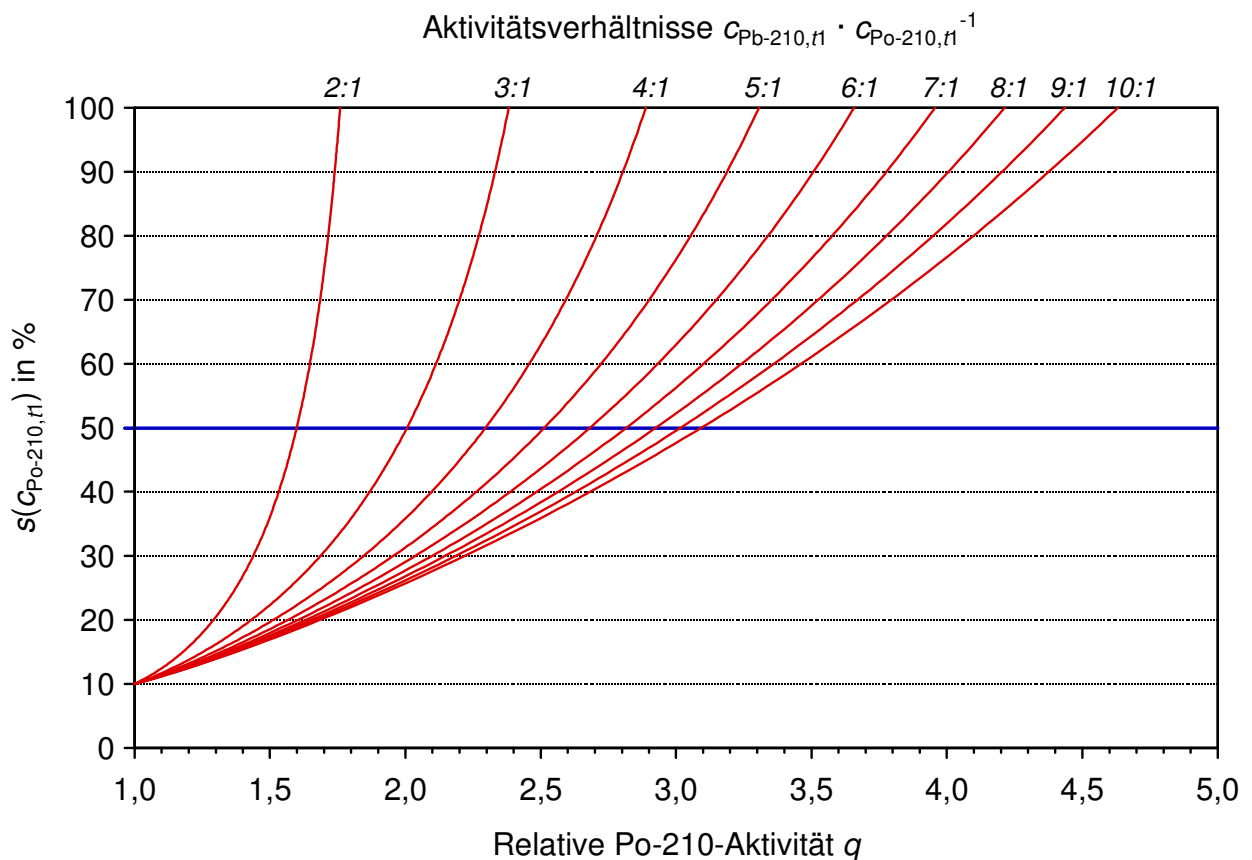
Die kombinierte Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration von Pb-210 wird von der zählstatistischen Messunsicherheit, von der Messunsicherheit der Kalibrierung und der Messunsicherheit der Ausbeute bestimmt und liegt erfahrungsgemäß im Bereich von etwa 10 % bis 20 %.

Die kombinierte Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration von Po-210 am Zeitpunkt der Probeentnahme wird zusätzlich zu den oben genannten Einflussgrößen maßgeblich durch die vorhandene Pb-210-Aktivität und außerdem (bei vorhandener Pb-210-Aktivität) durch einen Beitrag infolge der unbekanntenen Bi-210-Aktivitätskonzentration zum Zeitpunkt der Probeentnahme bestimmt. Bei Einhaltung der Rahmenbedingungen des Verfahrens (Verhältnisse  $C_{\text{Pb-210},t_1} \cdot C_{\text{Po-210},t_1}^{-1}$  kleiner als 10, Wartezeiten  $t_B$  zwischen Probenentnahme und Abscheidung kleiner als 90 Tage) kann dieser letztgenannte Beitrag mit etwa 5 % geschätzt werden (vgl. Abbildung 3).

Während bei Verhältnissen  $C_{\text{Pb-210},t_1} \cdot C_{\text{Po-210},t_1}^{-1}$  kleiner als 1 die relativen Standardmessunsicherheiten der Messgrößen  $C_{\text{Pb-210}}$  und  $C_{\text{Po-210},t_2}$  maßgebend für die resultierende Messunsicherheit der Po-210-Aktivitätskonzentration sind, nimmt der Einfluss der Wartezeit  $t_B$  mit zunehmenden Werten des Aktivitätsverhältnisses zu.

In Abbildung 3 ist die Abhängigkeit der kombinierten Standardmessunsicherheit der Po-210-Aktivitätskonzentration zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  vom Verhältnis  $C_{\text{Pb-210},t_1} \cdot C_{\text{Po-210},t_1}^{-1}$  und von der nach unterschiedlichen Wartezeiten  $t_B$  gemessene

nen Po-210-Aktivität beispielhaft dargestellt. Die relativen Standardmessunsicherheiten der ermittelten Pb-210- und Po-210-Aktivitäten zum Zeitpunkt der Abscheidung  $t_2$  wurden dabei mit jeweils 0,10 angenommen.



**Abb. 3:** Schematische Darstellung der kombinierten Standardmessunsicherheit der auf den Probeentnahmezeitpunkt bezogenen Po-210-Aktivitätskonzentration; die relative Po-210-Aktivität  $q$  ist das Verhältnis der gemessenen Po-210-Aktivität zum Zeitpunkt der Abscheidung  $t_2$  zur Aktivität von Po-210 in der Probe zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$ .

Aus Abbildung 3 ist ersichtlich, dass sich z. B. bei einem Verhältnis  $C_{Pb-210,t_1} \cdot C_{Po-210,t_1}^{-1}$  von 5 eine Standardmessunsicherheit der Po-210-Aktivitätskonzentration zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  von etwa 30 % ergibt, wenn die relative Po-210-Aktivität (Verhältnis der gemessenen Po-210-Aktivität zum Zeitpunkt der Abscheidung  $t_2$  zur Aktivität von Po-210 in der Probe zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$ ) einen Wert von 1,9 erreicht. Dieser Wert entspricht einer Wartezeit  $t_B$  von etwa 50 Tagen.

Für ausgewählte Aktivitätsverhältnisse und angenommene relative Standardmessunsicherheiten der ermittelten Pb-210- und Po-210-Aktivitätskonzentrationen  $s(C_{r,t_2}) \cdot C_{r,t_2}^{-1}$  zum Zeitpunkt der Abscheidung  $t_2$  sind nachstehend die resultierenden kombinierten Messunsicherheiten der Po-210-Aktivitätskonzentration am Bezugsdatum  $t_1$  in Abhängigkeit von der Wartezeit  $t_B$  angegeben.

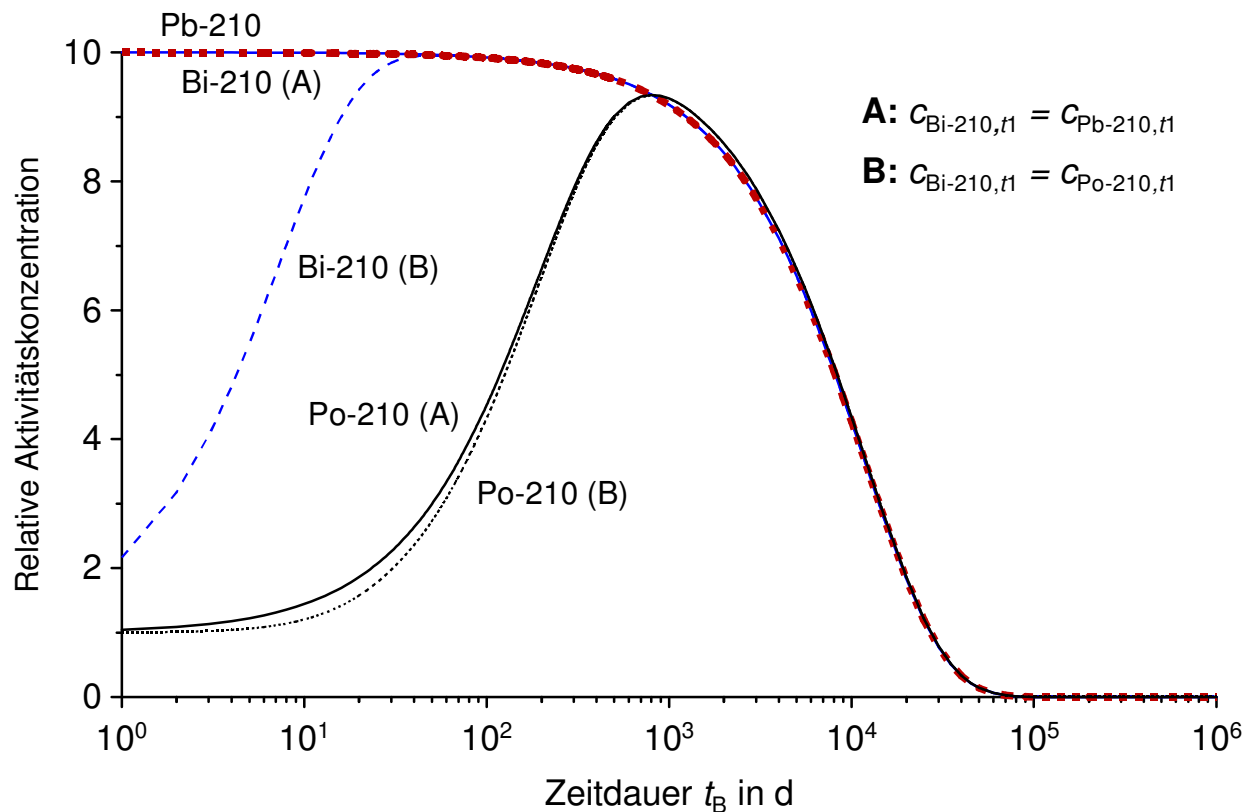
**Tab. 1:** Kombinierte Standardmessunsicherheit der Po-210-Aktivitätskonzentration in Abhängigkeit vom Verhältnis  $C_{Pb-210,t1} \cdot C_{Po-210,t1}^{-1}$  und der Wartezeit  $t_B$ 

$\frac{C_{Pb-210}}{C_{Po-210,t1}}$	$\frac{s(C_{r,t_2})}{C_{r,t_2}}$ in %	$\frac{s(C_{Po-210,t_1})}{C_{Po-210,t_1}}$ in % nach n Tagen Wartezeit			
		n = 30	n = 45	n = 60	n = 90
0,5	10	11	11	14	17
	30	33	34	36	39
	10	15	17	19	25
2	20	28	32	37	49
	30	41	48	≥ 50	
5	10	20	26	33	48
	20	40	≥ 50		
10	10	31	44	≥ 50	
	20	≥ 50			

Um z. B. eine noch akzeptable Standardmessunsicherheit der Po-210-Aktivitätskonzentration bei Verhältnissen  $C_{Pb-210,t1} \cdot C_{Po-210,t1}^{-1}$  mit Werten oberhalb von 5 und Wartezeiten  $t_B$  von mehr als 30 Tagen zu erhalten, dürfen die in Spalte 2 angegebenen relativen Standardmessunsicherheiten nur etwa 10 % betragen. Aus den Werten in Tabelle 1 geht ebenfalls hervor, dass die Anwendbarkeit des Verfahrens durch sehr lange Wartezeiten  $t_B$  eingeschränkt wird.

Der Einfluss des unbekanntes Aktivitätsverhältnisses von Pb-210 und Bi-210 zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_1$  ist in Abbildung 4 an einem Beispiel veranschaulicht. Die Einstellung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Pb-210, Bi-210 und Po-210 wird an zwei Grenzfällen betrachtet, wobei ein Wert des Verhältnisses  $C_{Pb-210,t1} \cdot C_{Po-210,t1}^{-1}$  von 10 angenommen wird. Die Bi-210-Aktivitätskonzentration entspricht im Fall A derjenigen von Pb-210, im Fall B der Po-210-Aktivitätskonzentration. Damit werden die maximal und minimal auftretenden Bi-210-Aktivitätskonzentrationen zum Zeitpunkt der Probeentnahme betrachtet.

Bei Wartezeiten  $t_B$  von mindestens 30 Tagen und bei den in natürlichen Wässern zu erwartenden Werten des Verhältnisses  $C_{Pb-210,t1} \cdot C_{Po-210,t1}^{-1}$  kleiner als 8 (2) ergeben sich Abweichungen der nach Fall A ( $C_{Bi-210,t1} = C_{Pb-210,t1}$ ) bzw. Fall B ( $C_{Bi-210,t1} = C_{Po-210,t1}$ ) berechneten Po-210-Aktivitätskonzentrationen von etwa 5 %.



**Abb. 4:** Gleichgewichtseinstellung zwischen den Aktivitätskonzentrationen von Pb-210, Bi-210 und Po-210; hierbei ist die relative Aktivitätskonzentration das Verhältnis der zeitabhängigen Aktivitätskonzentration der oben genannten Radionuklide zur Aktivitätskonzentration von Po-210 zum Zeitpunkt der Probeentnahme

## 6 Nachweisgrenzen des Verfahrens

### 6.1 Gleichungen zur Berechnung

#### 6.1.1 Gleichung zur Berechnung der Nachweisgrenze der Pb-210-Aktivitätskonzentration

Für die Berechnung der Nachweisgrenze wird gemäß Kapitel IV.5 dieser Messanleitungen verfahren.

Die Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration  $g$  des Pb-210 wird bei gleicher Messdauer der Probe  $t_m$  und des Nulleffektes  $t_0$  nach Gleichung (14) berechnet:

$$g_{\text{Pb-210}} = \frac{k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}}{V \cdot \varepsilon_{\text{Bi-210}} \cdot \eta_{\text{Bi-210}}} \cdot f_{3,\text{Bi-210}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_{0,\text{Bi-210}}}{t_0}} \quad (14)$$



Neben den bereits definierten Größen sind:

- $g_{\text{Pb-210}}$  Nachweisgrenze der Pb-210-Aktivitätskonzentration in  $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ ;  
 $k_{1-\alpha}, k_{1-\beta}$  Quantile der Standardnormalverteilung zur Berücksichtigung der Fehler 1. und 2. Art.

### 6.1.2 Gleichungen zur Berechnung der Nachweisgrenze der Po-210-Aktivitätskonzentration

Die Berechnung der Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration von Po-210 in Wässern mit unterschiedlichen Aktivitätskonzentrationen von Pb-210 und Po-210 erfolgt bei Zeitvorwahl, kleinen Impulszahlen des Untergrundes und unterschiedlicher Messdauer der Probenmesspräparate und der Nulleffekte näherungsweise nach Gleichung (15) unter Einbeziehung von Gleichung (16).

$$g_{\text{Po-210}} = \frac{f_{3,\text{Po-210}} \cdot f_4}{\eta_{\text{Po-210}} \cdot V \cdot \varepsilon_{\text{Po-210}}} \cdot \left[ (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \cdot \sqrt{(R_0 + f_6) \cdot \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_m} \right) + s^2(f_6) + 0,25 \cdot (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})^2 \cdot \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_m} \right)} \right] \quad (15)$$

Mit dem Korrektionsfaktor  $f_6$  wird das bei vorhandener Pb-210-Aktivität in der Wartezeit  $t_B$  nachgebildete Po-210 berücksichtigt; dabei wird rechnerisch für jede Messung eine probenspezifische Nulleffektzählrate gebildet. Dieser mit zunehmender Wartezeit ansteigende Korrektionsfaktor  $f_6$  wird nach Gleichung (16) berechnet. Die Unsicherheit des Korrektionsfaktors  $f_6$  wird mit dem Term  $s^2(f_6)$  berücksichtigt; sie ist nach Gleichung (17) zu berechnen.

$$f_6 = \frac{A_{\text{Pb-210},t_2} \cdot f_5}{V} \cdot \frac{\eta_{\text{Po-210}} \cdot V \cdot \varepsilon_{\text{Po-210}}}{f_{3,\text{Po-210}}} \quad (16)$$

$$s^2(f_6) = f_6^2 \cdot \left( \left( \frac{s(\varepsilon_{\text{Po-210}})}{\varepsilon_{\text{Po-210}}} \right)^2 + \left( \frac{s(\eta_{\text{Po-210}})}{\eta_{\text{Po-210}}} \right)^2 + \left( \frac{s(A_{\text{Pb-210},t_1})}{A_{\text{Pb-210},t_1}} \right)^2 \right) \quad (17)$$

## 6.2 Rechenbeispiele

### 6.2.1 Beispiel zur Berechnung der Nachweisgrenze der Pb-210-Aktivitätskonzentration

Für eine Messdauer der Probe von 60000 Sekunden,  $k_{1-\alpha} = 3,0$ ,  $k_{1-\beta} = 1,645$  erhält man mit den unter Abschnitt 5.2 aufgeführten Werten für die Nachweiswahrscheinlichkeit, die Nulleffektzählrate, das Volumen der Probe, die chemische Ausbeute und den Korrektionsfaktor für den Zerfall des Bi-210 nach Gleichung (16) nachstehende Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration von Pb-210:

$$g_{\text{Pb-210}} = \frac{3,0 + 1,645}{1,0 \cdot 0,314 \cdot 0,92} \cdot 1,084 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,004}{60000}} \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

### 6.2.2 Beispiel zur Berechnung der Nachweisgrenze der Po-210-Aktivitätskonzentration

Mit den Analysendaten:

$$\begin{aligned} V &= 1,0 \text{ l}; & \eta_{\text{Po-210}} &= 0,9; \\ t_{\text{A,Po-210}} &= 1,296 \cdot 10^5 \text{ s (36 h)}; & t_0 &= 300000 \text{ s}; \\ t_{\text{B}} &= 60 \text{ d}; & t_{\text{m}} &= 100000 \text{ s}; \\ \varepsilon_{\text{Po-210}} &= 0,26 \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; & R_{0 \text{ Po-210}} &= 6,67 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}; \\ A_{\text{Pb-210}, t_2} &= 0,026 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}. \end{aligned}$$

und den mit einem Wert von 3 % geschätzten relativen Standardmessunsicherheiten des Nachweisvermögens  $s(\varepsilon_{\text{Po-210}}) \cdot \varepsilon_{\text{Po-210}}^{-1}$  und der chemischen Ausbeute  $s(\eta_{\text{Po-210}}) \cdot \eta_{\text{Po-210}}^{-1}$  ergibt sich nach den Gleichungen (15), (16) und (17) folgende Nachweisgrenze der Po-210-Aktivitätskonzentration bezogen auf das Probeentnahmedatum:

$$f_6 = \frac{0,026 \cdot 0,259}{1,0} \cdot \frac{0,92 \cdot 1,0 \cdot 0,26}{1,008} \text{ s}^{-1} = 1,60 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$s^2(f_6) = (1,6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (0,03^2 + 0,03^2 + 0,11^2) \text{ s}^{-2} = 3,56 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-2}$$

$$g = \frac{1,008 \cdot 1,35}{0,9 \cdot 1,0 \cdot 0,26} \cdot$$

$$\cdot \left[ 4,645 \cdot \sqrt{(6,67 \cdot 10^{-6} + 1,6 \cdot 10^{-3}) \cdot \left( \frac{1}{3 \cdot 10^5} + \frac{1}{10^5} \right) + 3,56 \cdot 10^{-8}} + 0,25 \cdot (4,645)^2 \cdot \left( \frac{1}{3 \cdot 10^5} + \frac{1}{10^5} \right) \right] \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1} =$$

$$= 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

## 7 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte

### 7.1 Chemikalien

Die verwendeten Chemikalien sollten analysenrein sein.

- Ascorbinsäure;
- Perchlorsäure, HClO<sub>4</sub>: 12 mol·l<sup>-1</sup>;
- Salpetersäure, HNO<sub>3</sub>: 14 mol·l<sup>-1</sup>;
- Salzsäure, HCl: 1 mol·l<sup>-1</sup>.

### 7.2 Geräte

- Low-level-Antikoinzidenzmesseinrichtung;
- Alphaspektrometriemessplatz;
- Magnetheizrührer;
- Sandbad;
- Nickelplättchen zur Abscheidung;
- Haltevorrichtung für Nickelplättchen aus PTFE ([www.tracerlab.com](http://www.tracerlab.com));
- Wasserbad mit Thermostat;
- Aluminiumfolie (flächenbezogene Masse etwa 7 mg·cm<sup>-2</sup>);

### Literatur

- (1) Norm DIN 38402 Teil 14 Deutsche Einheitsverfahren für Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Allgemeine Angaben (Gruppe A); Probenahme von Rohwasser und Trinkwasser (A14). 1986-03
- (2) <http://www.bfs.de/de/ion/nahrungsmittel/trinkwasser.html>
- (3) H. Bateman: The solution of a system of differential equations occurring in the series of radioactive transformations. In: Proc. Cambridge Phil. Soc. 15 (1919), pp. 423-427
- (4) C.-K. Kim, P. Martin, A. Fajgelj: Quantification of measurement uncertainty in the sequential determination of <sup>210</sup>Pb and <sup>210</sup>Po by liquid scintillation counting and alpha-particle spectrometry. Accred Qual Assur 13 (2008), 691-702
- (5) N. Vajda, J. LaRosa, R. Zeisler, P. Danesi, G. Kis-Benedek: A novel technique for the simultaneous determination of Pb-210 and Po-210 using a crown ether. In: Journal of Environmental Radioactivity, 37 (1997), 355-372