

Verfahren zur Bestimmung der mittleren Radon-222-Aktivitätskonzentration mit Kernspurdetektoren

K-Rn-222-LUFT-01

Bearbeiter:

T. Beck

Leitstelle für Fragen der Radioaktivitätsüberwachung
bei erhöhter natürlicher Radioaktivität (ENORM)

Verfahren zur Bestimmung der mittleren Radon-222-Aktivitätskonzentration mit Kernspurdetektoren

1 Anwendbarkeit

Dieses Verfahren ist für die Überwachung der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration im Freien oder in der Raumluft mittels integrierender Langzeitmessungen geeignet. Für Messungen im Freien werden in der Regel Expositionszeiten von 6 Monaten gewählt. Dabei können Rn-222-Aktivitätskonzentrationen oberhalb von $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ nachgewiesen werden. Darüber hinaus können in der Raumluft bei typischen Expositionszeiten von 3 Monaten Rn-222-Aktivitätskonzentrationen oberhalb von $20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ erfasst werden. Dieses Verfahren erfüllt die Anforderungen der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung bei bergbaulichen Tätigkeiten (REI Bergbau).

2 Probeentnahme

2.1 Aufbau der Probeentnahmeeinrichtung

Die Probeentnahmeeinrichtung besteht aus einer Kammer (ein typisches Kammer-volumen liegt im Bereich von 10 cm^3 bis 250 cm^3), in welcher ein Kernspurdetektor enthalten ist. Der Aufbau einer Probeentnahmeeinrichtung zur Bestimmung der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration mit Kernspurdetektoren ist in Abbildung 1 dargestellt.

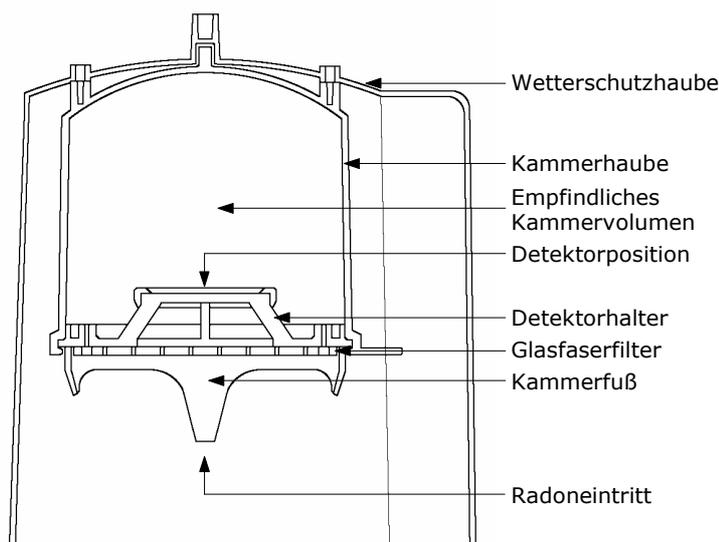


Abb. 1: Aufbau einer Probeentnahmeeinrichtung zur Bestimmung der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration mit Kernspurdetektor

Das Messvolumen der Probeentnahmeeinrichtung wird entweder vollständig von einer permeablen Kammerwand oder von der Kammerwand und einem Filter umschlossen.

2.2 Anforderung an die Probeentnahmeeinrichtung

Die Probeentnahmeeinrichtung muss so beschaffen sein, dass Rn-222 in das Messvolumen eindringen kann, während die in der umgebenden Atmosphäre befindlichen Radon-Zerfallsprodukte außerhalb der Kammer verbleiben. Durch hinreichend große Diffusionszeiten von mehr als 3 Minuten oder andere messtechnische Vorkehrungen muss sichergestellt werden, dass der Messeffekt durch das ebenfalls aus der umgebenden Atmosphäre in das Messvolumen diffundierende Rn-220 vernachlässigbar ist.

Durch Verwendung einer Wetterschutzhaube entsprechend Abbildung 1 (z. B. bei Messungen im Freien) wird die Probeentnahmeeinrichtung sowohl vor extremen klimatischen Einflüssen, wie z. B. Temperatur und Nässe, als auch vor mechanischer Beschädigung geschützt. Der Einsatz von hydrophobem Kammer- bzw. Filtermaterial reduziert zusätzlich den Einfluss von Feuchtigkeit auf die Probeentnahme.

Lokale elektrostatische Oberflächenpotentiale dürfen nicht das Depositionsverhalten der im empfindlichen Messvolumen gebildeten Radon-Zerfallsprodukte auf die inneren Oberflächen (Kammerwand und Kernspurdetektor) beeinflussen. Durch anti-statische Maßnahmen, wie z. B. Verwendung von Materialien mit geringem Oberflächenwiderstand für die Kammerwand und Abdeckung des Kernspurdetektors mit dünnen metallisierten Folien, oder anderer messtechnischer Vorkehrungen ist der Einfluss von elektrostatischen Effekten auf die Probeentnahme auszuschließen.

Es sind nur Probeentnahmeeinrichtungen zu verwenden, die die für den Messzweck erforderlichen physikalisch-technischen Eigenschaften besitzen und regelmäßigen anerkannten Vergleichsprüfungen unterliegen.

2.3 Standort der Probeentnahmeeinrichtung

Die radondicht verpackten und gekennzeichneten Probeentnahmeeinrichtungen werden am Probeentnahmeort aus der Verpackung entnommen und aufgestellt. Für die Probeentnahme zur Messung der bodennahen Rn-222-Aktivitätskonzentration beträgt die Aufstellhöhe ca. 1,5 m über dem Erdboden. Bei Probeentnahmen im Freien ist darauf zu achten, dass die Probeentnahmeeinrichtungen sowohl vor Nässe und Schmutz als auch vor starker Sonnenbestrahlung geschützt sind. Bei Probeentnahmen in Räumen sollten die Probeentnahmeeinrichtungen frei im Raum aufgestellt werden, ohne dabei von anderen Gegenständen verdeckt zu werden. Dazu sollte der Aufstellort der Probeentnahmeeinrichtungen so gewählt werden, dass ein Mindestabstand von 30 cm zu der nächstgelegenen Oberfläche (Wand, Boden, Decke) eingehalten wird und keine unmittelbare Nähe zu Türen, Fenstern oder Heizungen besteht. Nach dem Ende der Probeentnahme sind die Probeentnahmeeinrichtungen zu verpacken und unverzüglich einer Analysestelle zu übergeben.

Die Dokumentation zur Probeentnahme muss die Kennzeichnung der Probeentnahmeeinrichtung, eine Bezeichnung des Probeentnahmeortes sowie die Zeitpunkte des Beginns und des Endes der Probeentnahme enthalten.

3 Analyse

3.1 Prinzip des Verfahrens

Rn-222 diffundiert durch die permeable Kammerwand oder das Filter aus der umgebenden Atmosphäre in das empfindliche Volumen der Probeentnahmeeinrichtung. Dort zerfallen Rn-222 und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte.

Die infolge des Zerfalls von Rn-222 und seiner kurzlebigen Zerfallsprodukte in den Kernspurdetektor eindringenden Alphateilchen erzeugen durch kontinuierliche Energieübertragung latente Spuren im Detektormaterial (Beta- und Gammastrahlung erzeugen keine Spuren). Die latenten Spuren der Alphateilchen werden durch einen Ätzprozess so weit vergrößert, dass sie mit einem lichtoptischen Verfahren gezählt werden können. Die innerhalb einer ausgewerteten Fläche gemessene Spuranzahl ist dem Produkt aus der Rn-222-Aktivitätskonzentration und der Expositionsdauer proportional.

3.2 Probenvorbereitung

Nach der Probeentnahme sind die Probeentnahmeeinrichtungen auf eventuelle Beschädigungen zu kontrollieren, die Kernspurdetektoren zu entnehmen und diese bis zur Ätzung radondicht, z. B. durch Einschweißen in Aluminium-Polyethylen-Verbundfolie, zu lagern.

Tab. 1: Typische Ätzbedingungen für verschiedene Detektormaterialien

Detektormaterial	Ätzlösung	Konzentration in mol·l ⁻¹	Anteil in %	Ätzzeit in h	Temperatur in °C	Bemerkung
CR-39	NaOH	7,5		6	60	Chemische Ätzung
Kodak LR115	NaOH	2,5		1,5	60	Chemische Ätzung
MAKROFOL DE1-4	KOH Ethanol	6,45 absolut	40 60	4,25	37	Elektrochemisches Ätzverfahren

Als Kernspurdetektoren eignen sich verschiedene Folien, z. B. aus Polycarbonat, die sich hinsichtlich ihrer chemischen Ätzung und ihren Nachweiseigenschaften unterscheiden. In der Tabelle 1 sind typische Detektorfolien mit ihren Handelsnamen angegeben und ihre Standardätzbedingungen aufgeführt. Für die Ätzung werden die Kernspurdetektoren einer temperierten Alkalilauge (bei bestimmten Detektormaterialien mit Zusatz von Ethanol) während einer bestimmten Zeitdauer ausgesetzt. Dabei ist auf Temperaturkonstanz und eine homogene Temperaturverteilung im Ätzbad zu achten. Zu diesem Zweck kann die Ätzlösung durch eine Rührvor-

richtung bewegt werden. Neben der reinen chemischen Ätzung kann zur zusätzlichen Aufweitung der Spuren ein elektrochemisches Ätzverfahren eingesetzt werden. Dazu befindet sich der Kernspurdetektor in einer Ätzbox, an die über spezielle Elektroden ein elektrisches Wechselfeld von ca. 1000 V und ca. 3000 Hz angelegt wird. Beim Einsatz von MAKROFOL-Kernspurdetektoren werden die Spuren erst durch das elektrochemische Ätzverfahren so weit vergrößert, dass die Ätzspuren mit einem lichtoptischen Verfahren gezählt werden können. Nach der Ätzung werden die Kernspurdetektoren unter fließendem Wasser ausreichend gespült und in einer 5%igen Essigsäurelösung neutralisiert. Durch den Einsatz eines Ultraschallbades wird der Effekt des Reinigungsvorganges erhöht.

Abbildung 2 zeigt entsprechend den Ätzbedingungen gemäß Tabelle 1 angeätzt Alphateilchenspuren auf der Oberfläche von verschiedenen Kernspurdetektoren.

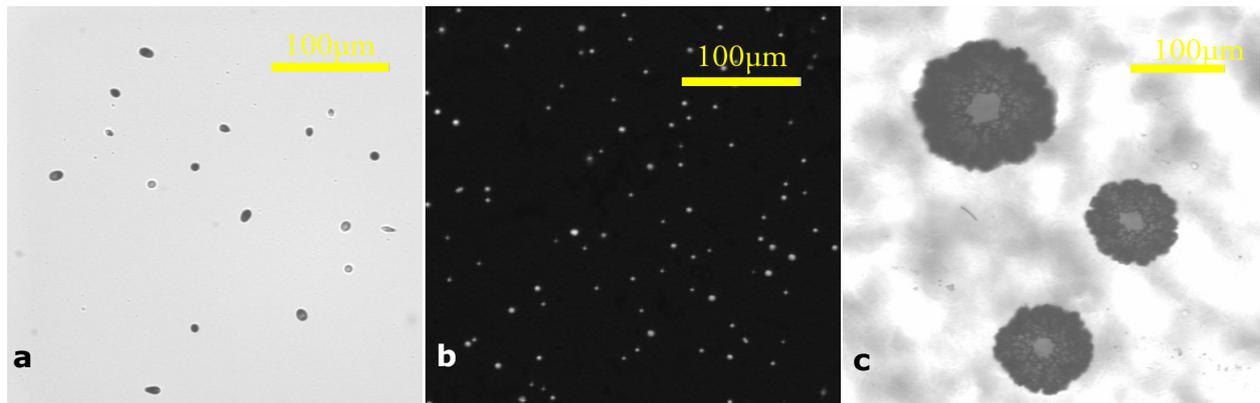


Abb. 2: Ätzspuren von Alphateilchen auf der Oberfläche von Kernspurdetektoren: a) CR39, b) Kodak LR115 und c) MAKROFOL

3.3 Radiochemische Trennung

Eine radiochemische Trennung ist bei diesem Verfahren nicht erforderlich.

4 Messung der Aktivität

4.1 Prinzip des Messverfahrens

Mit einem lichtoptischen Verfahren, wie z. B. mit einem Lichtmikroskop, wird die Anzahl der angeätzten Alphateilchenspuren auf einer Teilfläche des Kernspurdetektors bestimmt.

4.2 Kalibrierung

Die Kalibrierung beinhaltet die Ermittlung der Spuranzahl auf einer Teilfläche bei verschiedenen Kernspurdetektoren in Abhängigkeit von bekannten Rn-222-Expositionen. Die Rn-222-Exposition ist das Integral der zeitlich veränderlichen Rn-222-Aktivitätskonzentration über die Expositionsdauer gemäß Gleichung (1):

$$P_{\text{Rn}} = \int_0^t c(t') dt' = \bar{c} \cdot t \quad (1)$$

In der Gleichung (1) bedeuten:

- P_{Rn} Rn-222-Exposition in $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$;
 \bar{c} Mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentration während der Expositionsdauer in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$;
 $c(t)$ Zeitabhängige Rn-222-Aktivitätskonzentration in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$;
 t Expositionsdauer in h.

Zur Kalibrierung werden die Probeentnahmeeinrichtungen während einer bestimmten Zeitdauer in einer Rn-222-Atmosphäre bekannter Radonkonzentration exponiert. Die klimatischen Bedingungen der Kalibrieratmosphäre sollen den Umgebungsbedingungen beim sonstigen Einsatz der Probeentnahmeeinrichtungen entsprechen.

Nach der Exposition werden die Kernspurdetektoren geätzt und die Spuranzahl innerhalb einer Teilfläche des Kernspurdetektors ermittelt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Ätz- und Auswertebedingungen für den Kernspurdetektor mit den Bedingungen übereinstimmen, die auch bei den sonstigen Auswertungen angewendet werden.

Die Kalibrierfunktion wird mittels linearer Regression der gemessenen Spuranzahlen in Abhängigkeit von den Rn-222-Kalibrierexpositionen der Referenzatmosphäre gemäß Gleichung (2) berechnet:

$$N_{\text{s,K}} = b_0 + b_1 \cdot P_{\text{Rn,K}} \quad (2)$$

Neben den bereits definierten Symbolen bedeuten in Gleichung (2):

- $P_{\text{Rn,K}}$ Radon-222-Kalibrierexposition in $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$;
 $N_{\text{s,K}}$ Spuranzahl auf einer Teilfläche des Kernspurdetektors bei einer Radon-222-Kalibrierexposition;
 b_0 Regressionskoeffizient;
 b_1 Regressionskoeffizient in $\text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3$.

Der Schnittpunkt b_0 der Regressionsgerade mit der Ordinate ist identisch mit der Nulleffektspuranzahl der Kernspurdetektoren. Im Expositionsbereich oberhalb von ca. $2500 \text{ kBq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ kommt es in Abhängigkeit vom verwendeten Detektormaterial und den angewendeten Ätzmethoden infolge der nunmehr hohen Spuranzahlen zur verstärkten Überlagerung der angeätzten Alphateilchenspuren. In diesem Bereich wird die Kalibrierfunktion durch eine nichtlineare Funktion (Polynom) beschrieben. Die statistische Auswertung der linearen Regression und ihre Anwendung bei der Bestimmung von Messunsicherheiten werden in (1), (2) und (3) ausführlich beschrieben.

5 Berechnung der Analyseergebnisse

5.1 Gleichungen zur Berechnung

Die mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentration während der Probeentnahme wird nach Gleichung (3) berechnet. Diese ergibt sich durch Einsetzen der Gleichung (1) in Gleichung (2):

$$\bar{c} = \frac{N_S - b_0}{b_1 \cdot t} \quad (3)$$

In der Gleichung (3) bedeutet:

N_S Anzahl der gemessenen angeätzten Alphateilchenspuren auf einer Teilfläche, die gleich groß der Teilfläche ist, mit der die Kalibrierexpositionen ausgewertet wurden.

Die Voraussetzung für Gleichung (3) ist, dass sowohl die Probeentnahme als auch die Ätz- und Auswertebedingungen mit den Bedingungen der Kalibrierung identisch sind.

Die relative Standardabweichung der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration wird nach Gleichung (4) berechnet:

$$\frac{s(\bar{c})}{\bar{c}} = \frac{s_{N_{s,K} \cdot P_{Rn,K}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n_1} + \frac{(P_{Rn} - \bar{P}_{Rn,K})^2}{\sum_i (P_{Rn,K,i} - \bar{P}_{Rn,K})^2}}}{N_S - b_0} \quad (4)$$

Die Reststandardabweichung ist ein Maß für die Unsicherheit, der bei der Schätzung oder der Voraussage eines Beobachtungswertes mittels der linearen Regression auftritt. Bei der vorliegenden Anwendung der linearen Regression wird die Reststandardabweichung nach Gleichung (5) berechnet:

$$s_{N_{s,K} \cdot P_{Rn,K}} = \sqrt{\frac{\sum_i (N_{s,K,i} - b_0 - b_1 \cdot P_{Rn,K,i})^2}{n_1 - 2}} \quad (5)$$

Neben den bereits definierten Symbolen bedeuten in den Gleichungen (4) und (5):

$s(\bar{c})$ Standardmessunsicherheit der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$;

n_1 Anzahl der Kalibrierwerte;

$s_{N_{s,K} \cdot P_{Rn,K}}$ Reststandardmessunsicherheit der gemessenen Spuranzahlen für eine gegebene Rn-222-Exposition;

P_{Rn} Radon-222-Exposition, die der gemessenen Spuranzahl N_S entspricht in $\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$;

- $\bar{P}_{\text{Rn,K}}$ Mittelwert aller Rn-222-Kalibrierexpositionen in $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$;
- $P_{\text{Rn,K},i}$ Rn-222-Kalibrierexposition des i-ten Beobachtungspaares ($N_{\text{s,K},i}$, $P_{\text{Rn,K},i}$) der Kalibrierung in $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$;
- $N_{\text{s,K},i}$ Spuranzahl des i-ten Beobachtungspaares ($N_{\text{s,K},i}$, $P_{\text{Rn,K},i}$) der Kalibrierung.

Findet an einem Probeentnahmeort die Probeentnahme zeitgleich mit mehreren Probeentnahmeeinrichtungen statt, dann ist die an diesem Probeentnahmeort festgestellte mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentration der Mittelwert der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentrationen, die mit den einzelnen Probeentnahmeeinrichtungen ermittelt wurden.

Die relative Standardabweichung wird im beschriebenen Fall nach Gleichung (6) berechnet:

$$\frac{s(\bar{c})}{\bar{c}} = \frac{s_{N_{\text{s,K}}, P_{\text{Rn,K}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_1} + \frac{(\bar{P}_{\text{Rn}} - \bar{P}_{\text{Rn,K}})^2}{\sum_i (P_{\text{Rn,K},i} - \bar{P}_{\text{Rn,K}})^2}}}{\bar{N}_s - b_0} \quad (6)$$

Neben den bereits definierten Symbolen bedeuten in Gleichung (6):

- n_2 Anzahl der Probeentnahmeeinrichtungen, die zeitgleich am selben Ort aufgestellt werden;
- \bar{N}_s Mittelwert der gemessenen Spuranzahlen auf den Kernspurdetektoren, die diesen Probeentnahmeeinrichtungen entnommen wurden;
- \bar{P}_{Rn} Mittlere Rn-222-Exposition, die sich aus der Regressionskurve für den Mittelwert der gemessenen Spuranzahlen \bar{N}_s ergibt in $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$.

Die Voraussetzung für Gleichung (6) ist, dass für alle eingesetzten Probeentnahmeeinrichtungen sowohl die Probeentnahme als auch die Ätz- und Auswertebedingungen mit den Bedingungen der Kalibrierung identisch sind.

5.2 Rechenbeispiel

Im nachfolgenden Beispiel werden die Ergebnisse von 6 Kalibrierexpositionen mit jeweils 3 Probeentnahmen verwendet:

Nr.	Rn-222-Kalibrierexposition ($\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$)	Spuranzahl N_s		
		Probe 1	Probe 2	Probe 3
1	90 000	304	352	316
2	174 000	587	511	535
3	271 000	786	835	847
4	548 000	1 625	1 524	1 583
5	975 000	2 754	2 667	2 698
6	1 178 000	3 246	3 334	3 198

5.2.1 Kalibrierung

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

$$\begin{aligned}\bar{P}_{\text{Rn,K}} &= 5,4 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}; \\ s_{N_{\text{s,K}} \cdot P_{\text{Rn,K}}} &= 40,5; \\ n_1 &= 18; \\ b_0 &= 85,3; \\ b_1 &= 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3.\end{aligned}$$

5.2.2 Berechnung der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration

Die während einer Expositionsdauer von 4400 Stunden ermittelte Spuranzahl beträgt 1270. Damit folgt nach Gleichung (6) für die mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentration:

$$\bar{c} = \frac{1270 - 85,3}{2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 4400} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Mit den obigen Werten wird die relative Standardabweichung der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration für eine Einzelmessung nach Gleichung (4) berechnet:

$$\frac{s(\bar{c})}{\bar{c}} = \frac{40,5 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{18} + \frac{(100 \cdot 4400 - 5,4 \cdot 10^5)^2}{3,0 \cdot 10^{12}}}}{1270 - 85,3} = 3,5 \cdot 10^{-2}$$

5.3 Unsicherheiten der Analyseergebnisse

Die bei der Kalibrierung auftretenden Gesamtunsicherheiten beinhalten alle Unsicherheiten, die sowohl durch die Probeentnahmeeinrichtung als auch durch die Ätz- und Auswertungsbedingungen hervorgerufen werden. Zusätzlich auftretende Unsicherheiten, die insbesondere durch extreme klimatische Einflüsse (z. B. Feuchtigkeit) hervorgerufen werden, als auch andere Effekte bei Langzeitmessungen, werden mit dieser Fehlerbetrachtung nicht berücksichtigt. Beim vorgesehenen Einsatz von Kernspurdetektoren unter extremen klimatischen Bedingungen, wie z. B. Messungen in Bergwerken mit großen Abweichungen von Temperatur, Luftdruck und Luftströmung von den Standard-Kalibrierbedingungen, sind an diese Umgebungsbedingungen angepasste Kalibrierungen durchzuführen. Im Routinebetrieb ist mit einer Gesamtmessunsicherheit in der Größenordnung von 10 % zu rechnen. Langzeituntersuchungen mit MAKROFOL-Kernspurdetektoren ergaben keine zusätzlichen Messunsicherheiten infolge Fadings der latenten Spuren.

6 Nachweisgrenzen des Verfahrens

6.1 Gleichungen zur Berechnung

Die Nachweisgrenze der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration für n_2 zeitgleiche Messungen wird nach DIN 32645 (3) gemäß Gleichung (7) berechnet:

$$g = \frac{(t_{n-2,\alpha} + t_{n-2,\beta})}{b_1 \cdot t} \cdot S_{N_{s,K} \cdot P_{Rn,K}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{\bar{P}_{Rn}^2}{\sum_i (P_{Rn,K,i} - \bar{P}_{Rn,K})^2}} \quad (7)$$

Neben den bereits definierten Symbolen bedeuten:

g Nachweisgrenze der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$;
 $t_{n-2,\alpha}$, $t_{n-2,\beta}$ Quantile der Studentverteilung mit einem Freiheitsgrad $n-2$ und den Irrtumswahrscheinlichkeiten α und β zur Berücksichtigung der Fehler 1. und 2. Art

6.2 Rechenbeispiel

Mit einem Freiheitsgrad von $f = n_2 - 2 = 16$ und einer Irrtumswahrscheinlichkeit für $\alpha = 0,1 \%$ den Fehler 1. Art und $\beta = 5 \%$ für den Fehler 2. Art betragen die Quantile der Studentverteilung für das obige Beispiel $t_{16,0,001} = 3,686$ und $t_{16,0,05} = 1,746$ (4). Damit beträgt die Nachweisgrenze der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration für das obige Beispiel gemäß Gleichung (7):

$$g = \frac{(3,686 + 1,746)}{2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 4400} \cdot 40,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{1} + \frac{1}{18} + \frac{(5,4 \cdot 10^3)^2}{3,0 \cdot 10^{12}}} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 19 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Die Nachweisgrenze kann weiter verringert werden, wenn mehrere Probeentnahmeeinrichtungen aufgestellt werden, die simultan die Probeentnahme zur Bestimmung der mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentration durchführen. Wenn die mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentration am Probeentnahmeort aus dem Mittelwert der Anzeigen von zwei im gleichen Zeitraum exponierten Probeentnahmeeinrichtungen bestimmt wird, beträgt die Nachweisgrenze:

$$g = \frac{(3,686 + 1,746)}{2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 4400} \cdot 40,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{18} + \frac{(5,4 \cdot 10^3)^2}{3,0 \cdot 10^{12}}} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 14 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Durch eine Erhöhung der Anzahl von Probeentnahmeeinrichtungen am Aufstellort kann die Nachweisgrenze entsprechend weiter verringert werden.

7 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte

7.1 Chemikalien

Die verwendeten Chemikalien sollten analysenrein sein.

- Natrium- oder Kaliumhydroxid, NaOH oder KOH;
- Ethanol, C₂H₅OH: absolut;
- Essigsäure, CH₃COOH: 6 mol·l⁻¹.

7.2 Geräte

- Probeentnahmeeinrichtung mit Kernspurdetektor;
- Aluminium-Polyethylen-Verbundfolientüten;
- Vakuumschweißgerät;
- Computerunterstütztes Bildauswertesystem mit Mikroskop.

Bei chemischer Ätzung von Kernspurdetektoren:

- Ätzgefäß mit Halterung für die Kernspurdetektoren;
- Wärmebad mit Thermostat.

Bei elektrochemischer Ätzung von Kernspurdetektoren:

- Elektrochemische Ätzapparatur mit Hochspannungs-Frequenz-Generator;
- Trockenschrank zur Temperierung der Ätzapparatur.

Literatur

- (1) EURACHEM/CITAC Guide: Quantifying uncertainty in analytical measurement, EURACHEM 2000
- (2) Weber, E.: Grundriss der biologischen Statistik; Gustav Fischer Verlag, Jena, 1972
- (3) Norm DIN 32645 Chemische Analytik; Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze. 1994-05
- (4) Sachs, L.: Angewandte Statistik; Statistische Methoden und ihre Anwendungen; Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, 1978