

# **Gammapektrometrische Bestimmung der Aktivitäten natürlicher Radionuklide**

$\gamma$ -SPEKT/NATRAD

Bearbeiter:

U.-K. Schkade<sup>1</sup>

A. Heckel<sup>1</sup>

H. Wershofen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bundesamt für Strahlenschutz

<sup>2</sup>Physikalisch-Technische Bundesanstalt

# **Gammastrahlenspektrometrische Bestimmung der Aktivitäten natürlicher Radionuklide**

## **1 Einleitung**

Zu den natürlichen Radionukliden gehören, neben Kalium-40 und kosmogenen Radionukliden, die Radionuklide der drei natürlichen Zerfallsreihen (siehe Abbildung 1). Im Rahmen der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung bei bergbaulichen Tätigkeiten (REI Bergbau) werden üblicherweise

- Uran-238, Radium-226 und Blei-210 aus der Uran-Radium-Zerfallsreihe,
- Uran-235 und Actinium-227 aus der Uran-Actinium-Zerfallsreihe sowie
- Thorium-232, Radium-228 und Thorium-228 aus der Thorium-Zerfallsreihe

gammastrahlenspektrometrisch bestimmt (1). Von diesen langlebigen Radionukliden können einige nur nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts zwischen Mutter- und Tochternuklid über das Tochternuklid gammastrahlenspektrometrisch quantitativ gemessen werden.

Grundlegende Ausführungen zur Gammastrahlenspektrometrie sind im Allgemeinen Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL, weitergehende Hinweise zu Nulleffekten und Interferenzen in den Allgemeinen Kapiteln  $\gamma$ -SPEKT/NULLEF und  $\gamma$ -SPEKT/INTERF dieser Messanleitungen zu finden.



## 2 Spezielle Anforderungen an die Messeinrichtung und ihre Umgebung

### 2.1 Anforderungen an den Aufstellungsort

Natürliche Radionuklide kommen ubiquitär vor. Damit treten sie sowohl in den Baustoffen von Fußböden, Wänden und Decken sowie in der Luft von Messräumen als auch in den Materialien, aus denen Detektoren und Abschirmungen aufgebaut sind, auf.

Ein besonderes Augenmerk gilt dabei den Isotopen des Edelgases Radon, die aus den oben genannten Materialien in die Luft von Messräumen emanieren und zum Nulleffektspektrum beitragen. Insbesondere bei der Bestimmung der Aktivitäten natürlicher Radionuklide sind durch geeignete Maßnahmen die Konzentrationen von Radonisotopen und deren Zerfallsprodukten zu minimieren sowie Konzentrationschwankungen so weit wie möglich zu vermeiden, um ein Impulshöhenspektrum korrekt auswerten zu können (siehe Allgemeines Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/NULLEF dieser Messanleitungen).

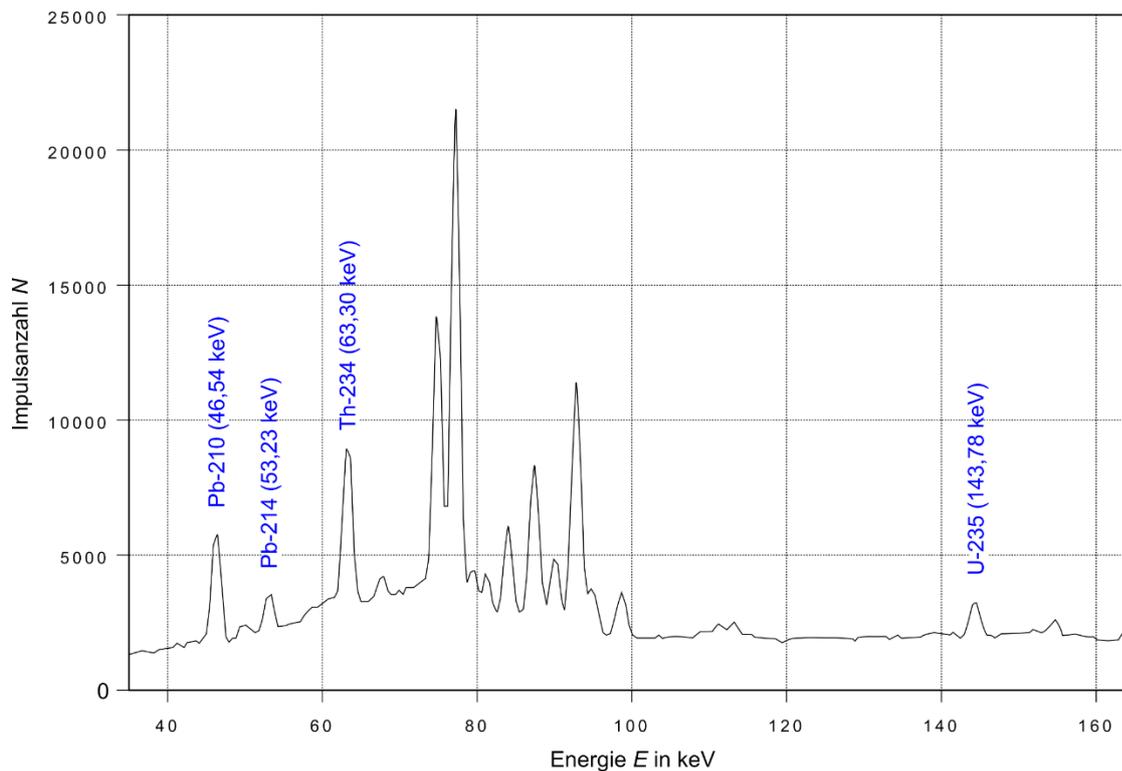
#### **Anmerkung:**

- Hohe Radonkonzentrationen können in Kellerräumen alter Gebäude auftreten.
- Insbesondere bei niedrigen Radonkonzentrationen müssen jahreszeitlich auftretende Konzentrationschwankungen von Radonisotopen und ihren Folgeprodukten berücksichtigt werden.

### 2.2 Anforderungen an die Gammaskopiermesseinrichtung

Sollen sehr kleine Aktivitäten natürlicher Radionuklide zuverlässig bestimmt werden, wird üblicherweise eine Ultra-low-level-Messeinrichtung eingesetzt, deren Komponenten aus Materialien mit sehr niedriger Eigenaktivität natürlicher Radionuklide bestehen. Diese Messeinrichtung sollte optimalerweise in der Mitte eines Raumes, dessen Baumaterial möglichst niedrige spezifische Aktivitäten natürlicher Radionuklide aufweist, mit dem jeweils maximal zur Verfügung stehenden Abstand zu den Raumwänden aufgestellt werden. Die weiteren Anforderungen sind in Abschnitt 2 des Allgemeinen Kapitels  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen beschrieben.

Einige natürliche Radionuklide können nur über Gammalinien im niederenergetischen Bereich des Impulshöhenspektrums unterhalb von 100 keV gemessen werden (siehe Abbildung 2). Es ist daher von Vorteil, wenn neben den gängigen p-type-Germaniumdetektoren auch ein n-type-Detektor eingesetzt werden kann.



**Abb. 2:** Impulshöhenspektrum einer Bodenprobe (Energiebereich bis 160 keV)

### 3 Betrachtungen zum radioaktiven Gleichgewicht in Zerfallsreihen

In einigen Fällen können Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen, die keine Gammastrahlung emittieren, gammaspektrometrisch nur indirekt über ihre Folgenuklide bestimmt werden. Bei diesen Messungen muss sichergestellt werden, dass das radioaktive Gleichgewicht zwischen Mutternuklid und den zu messenden Tochternukliden besteht.

In Umweltproben kann das radioaktive Gleichgewicht aufgrund der unterschiedlichen chemischen bzw. biochemischen Eigenschaften der betreffenden Elemente gestört sein. Beispiele hierfür sind:

- unterschiedliche Löslichkeit von Radium und Thorium in Wasser;
- unterschiedliches Transferverhalten von Mutter- und Folgenukliden in der Kette *Boden-Bewuchs-Tier-Milch*;
- Störung des radioaktiven Gleichgewichtes bei der Probeentnahme, z. B. durch Verwendung von Filtermaterialien;
- Entweichen von Radon aus der Probe.

Als Maßnahmen sind zu empfehlen:

- die zu messenden Proben ausreichend lange vor Beginn der Messung zu lagern oder für eine eventuell erforderlich Kontrollmessung aufzubewahren. Ist die Gleichgewichtseinstellung eines langlebigen Mutternuklides mit seinem kurzlebigen Tochternuklid erwünscht, sollte die Wartezeit mindestens sechs Halbwertszeiten des Tochternuklides betragen.
- das Probenmaterial, vor allem im Falle der Messung von kurzlebigen Folgenukliden des Rn-222, in gasdicht verschließbare Messgefäße zu überführen

und die Einstellung des radioaktiven Gleichgewichts abzuwarten. Das Totvolumen zwischen der eingefüllten Probe und dem Deckel des Messgefäßes sollte dabei so gering wie möglich sein.

Besonderes Augenmerk ist bei Mutter-Tochter-Paaren darauf zu legen, dass die Halbwertszeit eines kurzlebigen Tochternuklids durch die Halbwertszeit des langlebigen Mutternuklids ersetzt wird, damit bei einer Zerfallskorrektur auf einen vor dem Messzeitpunkt zurück liegenden Bezugszeitpunkt einer Umweltprobe, in der Regel der Probeentnahmezeitpunkt, keine physikalisch unsinnigen Aktivitäten berechnet werden. Dabei sind sowohl der radioaktive Zerfall des jeweiligen Radionuklids als auch sein Nachwachsen aus seinem Mutternuklid zu berücksichtigen. Beispiele hierfür sind die Radionuklidpaare: Ra-226/Pb-210, Ra-228/Th-228, U-238/Th-234 (siehe Allgemeines Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen).

## 4 Betrachtung ausgewählter natürlicher Radionuklide

Im Folgenden werden die in der REI Bergbau geforderten natürlichen Radionuklide ausführlich diskutiert (1). Dabei werden im Einzelfall auch die Erfordernisse zur Korrektur von Selbstabsorptions- und Summationsverlusten angesprochen.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Photonenenergien ( $E_\gamma$ ) und Emissionsintensitäten ( $p_\gamma$ ) der betrachteten Radionuklide sowie ihrer Störnuklide (2) aufgeführt. Bei den Zerfallsreihen im Gleichgewicht beziehen sich die hier angegebenen Emissionsintensitäten jeweils auf einen Zerfall des Mutternuklids und berücksichtigen bereits mögliche Verzweigungen.

Ein Beispiel hierfür findet sich in Abschnitt 4.8, bei dem bei der Bestimmung des Th-228-Gehalts über das Tochternuklid Tl-208 die angegebenen Tl-208-Emissionsintensitäten bereits berücksichtigen, dass auf Grund der Verzweigung beim Zerfall des Radionuklids Bi-212 lediglich 35,93 % der Aktivität von Th-228 beim Tochternuklid Tl-208 vorliegen (siehe Abbildung 1).

### 4.1 Uran-238

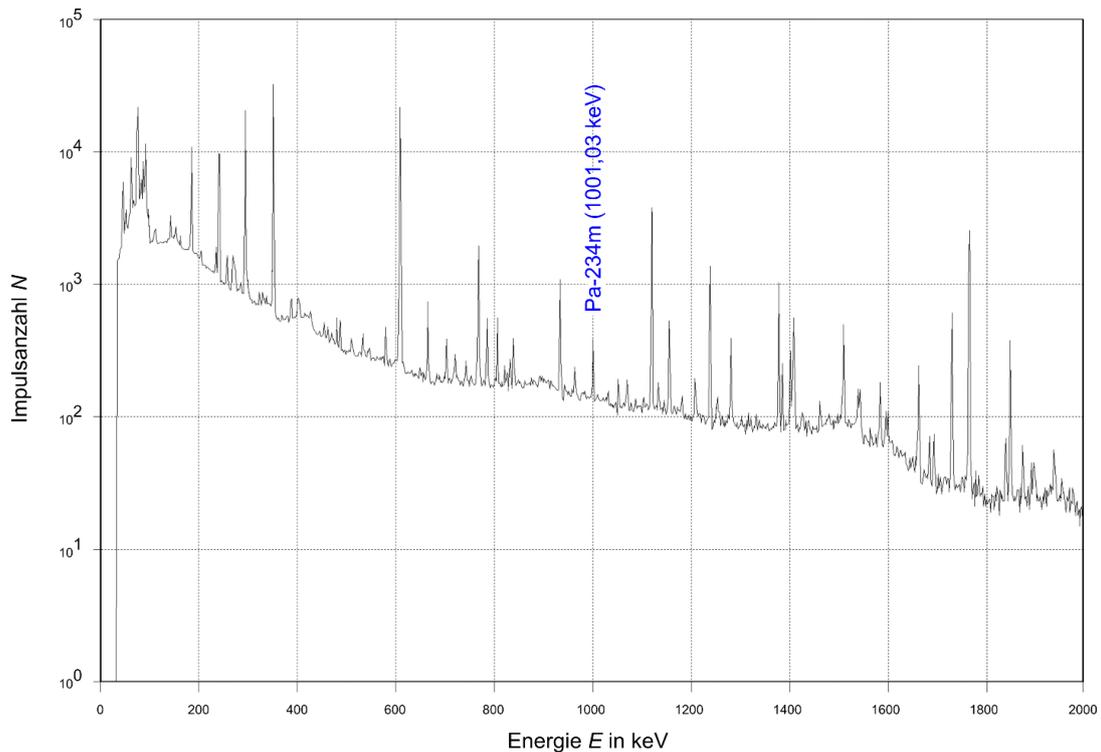
Uran-238 (U-238) mit seiner Halbwertszeit von  $4,468 \cdot 10^9$  Jahren ist das Mutternuklid in der Uran-Radium-Zerfallsreihe und kann gammaspektrometrisch nur über die Tochternuklide Th-234 und Pa-234m bestimmt werden.

Meist wird hierfür die 63,3-keV-Linie des Th-234 benutzt. Bei dieser niedrigen Energie haben Matrixunterschiede zwischen Kalibrier- und Messpräparat infolge unterschiedlicher Selbstabsorption einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis und müssen entsprechend berücksichtigt werden (siehe Allgemeines Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen). Außerdem wird die Linie bei 63,3 keV durch eine Linie vom Th-232 bei 63,8 keV mit einer Emissionsintensität von 0,259 % gestört.

#### **Anmerkung:**

Für die Bestimmung des U-238-Gehalts sollte die Doppellinie des Th-234 bei den Energien 92,4 keV und 92,8 keV mit einer Gesamtemissionsintensität von 4,33 % (2,18 % + 2,15 %) nicht herangezogen werden.

Die Linien des Pa-234m bei 1001,0 keV und 766,4 keV sind infolge ihrer höheren Energien zur Auswertung des Impulshöhenspektrums besser geeignet, führen jedoch aufgrund ihrer geringen Emissionsintensitäten zu schlechteren Nachweisgrenzen (siehe Abbildung 3).



**Abb. 3:** Auswertung der Pa-234m-Linie im Impulshöhenspektrum einer Bodenprobe zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von U-238

In Tabelle 1 sind die für die Auswertung geeigneten Linien zusammengefasst.

**Tab. 1:** Kernphysikalische Daten der auszuwertenden Radionuklide und ihrer Störnuklide bei der gammaspektrometrischen Bestimmung des U-238-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %	Störnuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %
Th-234	63,30	3,75	Th-232	63,81	0,259
	92,38	2,18	Th-234 ( $K\alpha_1 + K\alpha_2$ )	93,35	5,6
	92,80	2,15			
Pa-234m	766,36	0,323			
	1001,0	0,847			
	3				

Bei Proben natürlichen Ursprungs kann zu Plausibilisierungszwecken das nahezu konstante natürliche U-238/U-235-Aktivitätsverhältnis von 21,7 herangezogen werden (siehe Abschnitt 4.4).

## 4.2 Radium-226

Radium-226 (Ra-226) ist ein langlebiges Radionuklid in der Uran-Radium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 1600 Jahren, für dessen Bestimmung zwei Vorgehensweisen möglich sind:

- Auswertung der 186,2-keV-Linie von Ra-226 im Impulshöhenspektrum;
- Auswertung der Gammalinien der kurzlebigen Tochternuklide Pb-214 und Bi-214 des Rn-222 im Impulshöhenspektrums nach Erreichen des radioaktiven Gleichgewichts zwischen Ra-226, Rn-222, Pb-214 und Bi-214 (siehe Abbildung 4).

Wird die 186,2-keV-Linie von Ra-226 ausgewertet, muss deren Überlagerung durch die 185,7-keV-Linie des Radionuklids U-235 berücksichtigt werden. Die spezifische Aktivität des U-235 beträgt in natürlichen Medien etwa  $1/22$  der spezifischen Aktivität des Ra-226. Demgegenüber ist die Emissionsintensität 185,7-keV-Linie des Radionuklids U-235 um den Faktor 16 höher als die Emissionsintensität 186,2-keV-Linie von Ra-226.

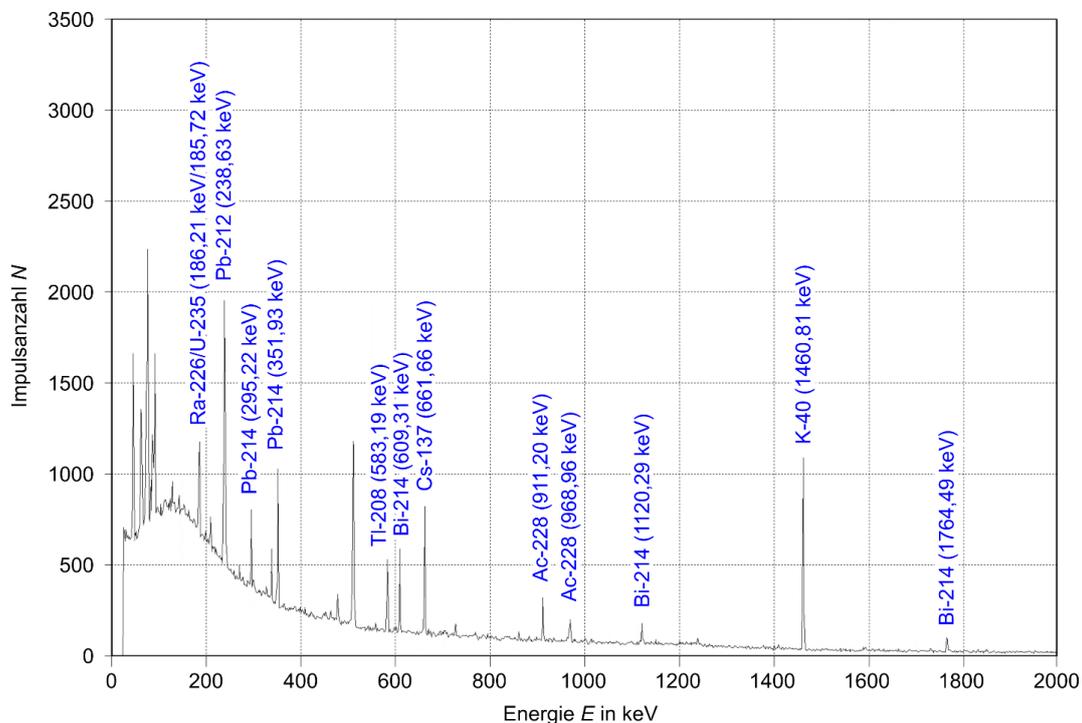
Kann davon ausgegangen werden, dass radioaktives Gleichgewicht in der Probe vorliegt, ist diese Überlagerung unproblematisch. Das heißt, dass der Gehalt von U-238 gleich dem von Ra-226 ist, und damit der Gehalt von U-235 ebenfalls bekannt ist.

Dies gilt für die meisten Umweltproben jedoch nicht. Deshalb ist die Korrektur der Störlinie des U-235 nur dann möglich, wenn die Aktivität des U-235 mit Hilfe anderer Gammalinien bestimmt wird oder aus der U-238-Aktivität abgeleitet wird.

#### Anmerkung:

Der U-238-Gehalt einer Probe kann auch mittels anderer Methoden, z. B. Alphaspektrometrie, Röntgenfluoreszenzmessung oder Massenspektrometrie, erhalten werden.

Für die Bestimmung der Aktivitäten der kurzlebigen Folgenuklide von Rn-222 werden gasdichte Messgefäße benötigt, da sonst auf Grund von Rn-222-Emanation aus dem Messgefäß zu geringe Impulsanzahlen für Pb-214 und Bi-214 im Impulshöhenspektrum erfasst werden. Der Zeitraum zwischen Einfüllen der Probe in das gasdichte Gefäß und dem Beginn der Messung sollte mindestens 23 Tage betragen, da er durch die Halbwertszeit des Rn-222 von 3,82 Tagen bestimmt wird. Bei der Auswertung des Impulshöhenspektrums ist eine Summationskorrektur üblicherweise erforderlich (siehe Allgemeine Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL und  $\gamma$ -SPEKT/SUMESC dieser Messanleitungen).



**Abb. 4:** Auswertung der Pb-214-Linien und der Bi-214-Linien im Impulshöhenspektrum einer Bodenprobe zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von Ra-226

Einige zur Auswertung geeignete Linien sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

**Tab. 2:** Kernphysikalische Daten der auszuwertenden Radionuklide und ihrer Störnuklide bei der gammaspektrometrischen Bestimmung des Ra-226-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %	Störnuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %
Ra-226	186,21	3,56	U-235	185,72	57,0
Pb-214	295,22	18,41	Bi-211	351,03	13,00
	351,93	35,60			
Bi-214	609,31	45,49			
	1120,29	14,91			
	1764,49	15,31			

### 4.3 Blei-210

Blei-210 (Pb-210) ist ein Radionuklid in der Uran-Radium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 22,23 Jahren. Die gammaspektrometrische Bestimmung des Pb-210-Gehalts erfolgt direkt über die Gammalinie bei der vergleichsweise niedrigen Energie von 46,5 keV (siehe Tabelle 3). Eine unterschiedliche Materialzusammensetzung zwischen Kalibrier- und Messpräparat spielt bei dieser Energie wegen der unterschiedlichen Selbstabsorption eine große Rolle und muss in geeigneter Weise über Korrekturfaktoren berücksichtigt werden (siehe Allgemeines Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen).

**Tab. 3:** Kernphysikalische Daten des auszuwertendes Radionuklids zur gamma-spektrometrischen Bestimmung des Pb-210-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %	Störnuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %
Pb-210	46,54	4,25			

### 4.4 Uran-235

Uran-235 (U-235) ist das Mutternuklid der Uran-Actinium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von  $7,04 \cdot 10^8$  Jahren. Der U-235-Gehalt kann direkt über die in Tabelle 4 genannten Gammalinien bei 143,8 keV, 163,4 keV, 185,7 keV und 205,3 keV ermittelt werden. Bei der Auswertung dieser Gammalinien im Impulshöhenspektrum muss Folgendes beachtet werden:

- Für die Auswertung der Gammalinie bei 185,7 keV, die die höchste Emissionsintensität hat, muss die Ra-226-Aktivität bekannt sein (siehe Abschnitt 4.2).
- Die Gammalinie bei 143,8 keV wird durch die Ra-223-Gammalinie bei 144,2 keV gestört (siehe Abbildung 2).
- Die beiden anderen Gammalinien besitzen so niedrige Emissionsintensitäten, dass sie bei Proben mit geringen Gehalten an U-235 zur Auswertung üblicherweise nicht herangezogen werden.

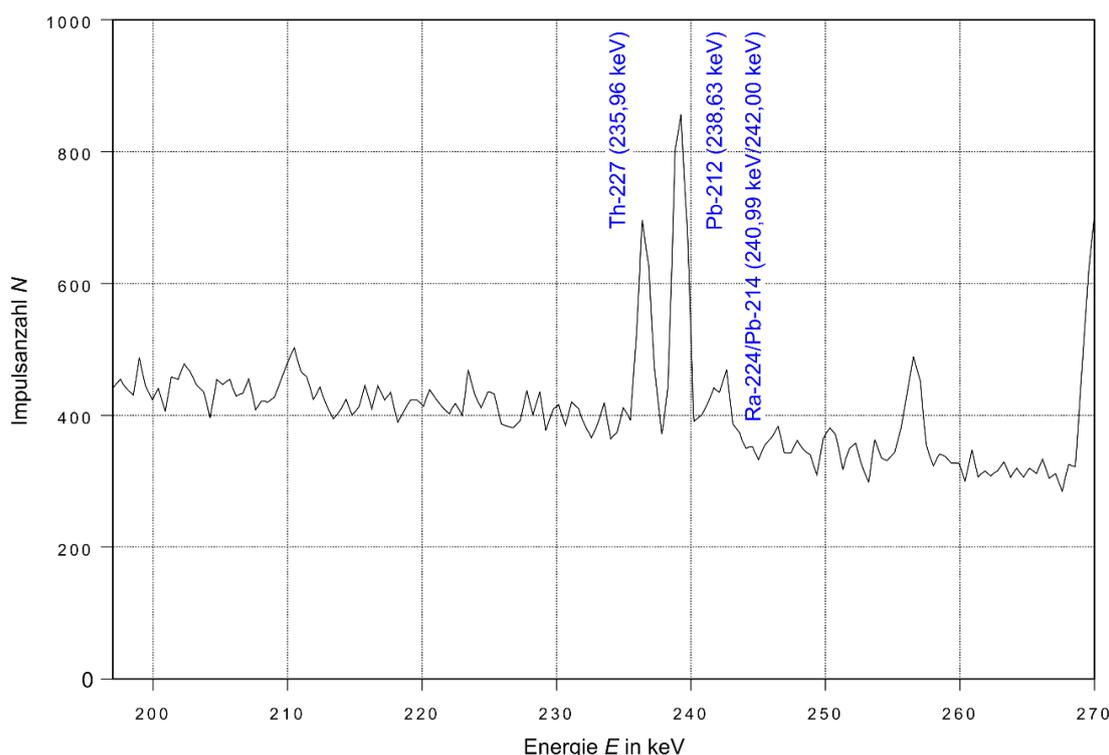
**Tab. 4:** Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids und der Störnuklide zur gammaspektrometrischen Bestimmung des U-235-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %	Störnuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %
U-235	143,77	10,94	Ra-223	144,27	3,36
	163,36	5,08			
	185,72	57,0	Ra-226	186,21	3,56
	205,32	5,02			

#### 4.5 Actinium-227

Actinium-227 (Ac-227) ist ein Radionuklid der Uran-Actinium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 21,77 Jahren. Ac-227 kann gammaspektrometrisch nur über seine kurzlebigen Tochternuklide Th-227, Ra-223 und Rn-219 bestimmt werden.

Vorzugsweise wird die Gammalinie des Th-227 bei 236,0 keV im Impulshöhenspektrum ausgewertet (siehe Abbildung 5 und Tabelle 5). Die anderen in Frage kommenden Linien weisen entweder niedrigere Emissionsintensitäten auf oder sind durch Gammalinien anderer Radionuklide gestört.

**Abb. 5:** Auswertung der 236,0-keV-Linie von Th-227 im Impulshöhenspektrum einer Schwammprobe (Grönland) zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von Ac-227**Tab. 5:** Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids zur gammaspektrometrischen Bestimmung des Ac-227-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %	Störnuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %
Th-227	235,96	12,6			

## 4.6 Thorium-232

Thorium-232 (Th-232) mit einer Halbwertszeit von  $1,40 \cdot 10^{10}$  Jahren ist das Mutternuklid der Thorium-Zerfallsreihe. Th-232 besitzt eine Gammalinie bei 63,8 keV mit einer sehr geringen Emissionsintensität von 0,259 %, die durch eine Gammalinie des Th-234 bei 63,3 keV mit einer höheren Emissionsintensität von 3,75 % gestört wird (siehe Tabelle 1), so dass Th-232 in Umweltproben nicht direkt gammaspektrometrisch bestimmt werden kann.

Die Bestimmung über seine Tochternuklide Ac-228, Pb-212 und Tl-208 ist nur dann möglich, wenn sich diese Radionuklide im radioaktiven Gleichgewicht miteinander und mit dem Mutternuklid Th-232 befinden. Diese Voraussetzung ist in Umweltproben nicht immer erfüllt. Ursache hierfür ist das vergleichsweise langlebige Radionuklid Ra-228, das in der Zerfallsreihe zwischen Th-232 und Ac-228 steht, und aufgrund seiner chemischen Eigenschaften das radioaktive Gleichgewicht verändern kann.

## 4.7 Radium-228

Radium-228 (Ra-228) ist ein Radionuklid der Thorium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 5,75 Jahren. Die Bestimmung des Ra-228-Gehalts erfolgt über die Auswertung der Gammalinien seines Tochternuklids Ac-228, das auf Grund seiner kurzen Halbwertszeit von 6,15 Stunden nach etwa 30 Stunden im radioaktiven Gleichgewicht mit Ra-228 vorliegt. Dabei ist eine Koinzidenzsummkorrektur in jedem Fall erforderlich (siehe Allgemeines Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen). In Tabelle 6 sind die Gammalinien angegeben, die zur Auswertung geeignet sind.

Weichen die Aktivitäten von Ra-224, Pb-212 und Tl-208, deren Gammalinien in Tabelle 7 aufgeführt sind, nicht signifikant von der Aktivität von Ac-228 ab, können auch diese Radionuklide zur Bestimmung der Ra-228-Aktivität herangezogen werden.

**Tab. 6:** Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids und des Störnuklids zur gammaspektrometrischen Bestimmung des Ra-228-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %	Störnuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %
Ac-228	209,25	3,97	Ra-223	338,28	2,85
	338,32	11,40			
	911,20	26,20			
	968,96	15,90			

## 4.8 Thorium-228

Thorium-228 (Th-228) ist ein Radionuklid der Thorium-Zerfallsreihe mit einer Halbwertszeit von 1,91 Jahren. Th-228 kann – unter der Voraussetzung des radioaktiven Gleichgewichts – durch die Auswertung der Gammalinien seiner kurzlebigen Tochternuklide Ra-224, Pb-212 und Tl-208 bestimmt werden. Dabei muss zwischen Feststoff- und flüssigen Proben hinsichtlich des radioaktiven Gleichgewichts unterschieden werden. Dieses hat sich bei flüssigen Proben nach einer Wartezeit von 23 Tagen sicher eingestellt, während bei Feststoffproben davon ausgegangen werden darf, dass es bereits zum Zeitpunkt der Probeentnahme vorliegt.

Bei der Auswertung der Gammalinie des Ra-224 bei 241,0 keV muss die Störung durch die Gammalinie von Pb-214 bei einer Energie von 242,0 keV berücksichtigt werden (siehe Abbildung 5).

Erfolgt die Bestimmung des Th-228-Gehalts über die Gammalinien der Radionuklide Pb-212 und Tl-208 muss Rn-220 in der Probenmatrix verbleiben, was durch seine geringe Halbwertszeit von 55,8 Sekunden im Allgemeinen gegeben ist. Vorzugsweise wird die Gammalinie des Pb-212 bei 238,6 keV zur Auswertung herangezogen, wobei Koinzidenzsummkorrekturen in jedem Fall erforderlich sind (siehe Allgemeines Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen).

**Tab. 7:** Kernphysikalische Daten der auszuwertenden Radionuklide und der Störnuklide zur gammaspektrometrischen Bestimmung des Th-228-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %	Störnuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %
Ra-224	240,99	4,12	Pb-214	242,00	7,27
Pb-212	238,63	43,60	Th-227 Pa-231	300,50	0,014
	300,09	3,18		300,06	2,41
Tl-208	277,37	2,37	Ac-228	278,80	0,235
	583,19	30,54	Ac-228	583,39	0,120
	860,53	4,46			
	2614,51	35,84			

#### 4.9 Kalium-40

Kalium-40 (K-40) ist im Isotopengemisch des natürlichen Kaliums (K-39, K-40, K-41) zu 0,0117 Massenprozent enthalten und zerfällt mit einer Halbwertszeit von  $1,25 \cdot 10^9$  Jahren zu Ca-40 ( $\beta^-$ -Zerfall) bzw. Ar-40 (Elektroneneinfang). K-40 wird gammaspektrometrisch über seine 1460,8-keV-Linie bestimmt (siehe Abbildung 4).

Die in Tabelle 8 ausgewiesene Störung durch Ac-228 muss beispielsweise bei der Bestimmung der spezifischen Aktivität in Klärschlamm und/oder in verschiedenen NORM-Stoffen, in denen im Gegensatz zu Umweltproben erhöhte spezifische Ra-228-Aktivitäten im Vergleich zum K-40 auftreten, berücksichtigt werden.

**Tab. 8:** Kernphysikalische Daten des auszuwertenden Radionuklids und des Störnuklids zur gammaspektrometrischen Bestimmung des K-40-Gehalts

Auszuwertendes Radionuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %	Störnuklid	$E_\gamma$ in keV	$p_\gamma$ in %
K-40	1460,82	10,55	Ac-228	1459,13	0,87

## ANHANG A

### Kernphysikalische Daten ausgewählter Radionuklide

In Tabelle A-1 sind für ausgewählte natürliche Radionuklide die Gammaphotonenenergien im Energiebereich oberhalb von 25 keV und die zugehörigen, verzweigungskorrigierten Emissionsintensitäten zusammengestellt (2, 3). Die dort aufgenommenen Röntgenlinien sind hinsichtlich der Emissionsintensitäten nicht verzweigungskorrigiert; dies wird durch ein "\*" hinter der Emissionsintensität dargestellt.

**Anmerkung:**

Die Emissionsintensitäten der charakteristischen Röntgenphotonen gelten für die entsprechenden Kernumwandlungen. Es ist zu beachten, dass charakteristische Röntgenstrahlung auch als Fluoreszenzstrahlung auftreten kann. Bei Aktivitätsbestimmungen natürlicher Radionuklide in Umweltproben ist der Beitrag der Fluoreszenzstrahlung zu den Nettozählraten jedoch in den meisten Fällen vernachlässigbar.

In der rechten Spalte der Tabelle finden sich zusätzlich künstliche Radionuklide, die im Allgemeinen in Kalibrierstandards verwendet werden, und Aktivierungsprodukte (6, 7), die durch Neutronen aus kosmischer Strahlung in der Messeinrichtung erzeugt werden können (siehe Allgemeines Kapitel γ-SPEKT/NULLEF, Abschnitt 2, dieser Messanleitungen).

**Tab. A-1:** Photonenenergien und Emissionsintensitäten ausgewählter Radionuklide

Linie $E_\gamma$ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$ bzw. Ursprung
25,64					Th-231	0,139				
39,86	Bi-212	0,00107								
46,54			Pb-210	0,0425						
50,13							Th-227	0,082		
53,16									Ba-133	0,0214
53,20					U-234	0,00125				
53,23			Pb-214	0,0106						
53,47									Ge-73m	(n, γ)
57,75	Ac-228	0,0047								
59,54									Am-241	0,359
63,30					Th-234	0,0375				
63,81	Th-232	0,00259								
66,75									Ge-73m	(n, γ)
67,67					Th-230	0,00377				
72,80	Pb-Kα2	0,0077*								
72,87								Tl-Kα1	0,01225*	
74,82	Bi-Kα2	0,107*	Bi-Kα2	0,0626*						
74,97	Pb-Kα1	0,0361*								
76,86			Po-Kα2	0,00426*						
77,11	Bi-Kα1	0,177*								
79,29			Po-Kα1	0,00710*						
79,61									Ba-133	0,0263
79,72								Th-227	0,0189	

Linie $E_\gamma$ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$ bzw. Ursprung
81,00									Ba-133	0,333
81,07	Rn-K $\alpha$ 2	0,0013	Rn-K $\alpha$ 2	0,00192*			Rn-K $\alpha$ 2	0,150*		
83,78	Rn-K $\alpha$ 1	0,00215	Rn-K $\alpha$ 1	0,00317*			Rn-K $\alpha$ 1	0,249*		
84,21					Th-231	0,0670				
84,37	Th-228	0,0119								
84,94	Pb-K $\beta$ 1	0,0117*								
85,43							Ra-K $\alpha$ 2	0,0017*		
87,34	Bi-K $\beta$ 1	0,0612*								
88,03									Cd-109	0,0366
88,47								Ra-K $\alpha$ 1	0,0028*	
89,81			Po-K $\beta$ 1	0,00245*						
89,95	Th-K $\alpha$ 2	0,025*								
92,38					Th-234	0,0218				
92,80					Th-234	0,0215				
93,35	Th-K $\alpha$ 1	0,041*								
93,93							Th-227	0,0137		
94,86			Rn-K $\beta$ 1	0,198*			Rn-K $\beta$ 1	0,0870*		
96,73									Se-75	0,0335
97,90							Rn-K $\beta$ 2	0,0280*		
99,51	Ac-228	0,0126								
102,27					Th-231	0,00441				
105,31									Eu-155	0,211
105,60	Th-K $\beta$ 1	0,00155*								
109,19					U-235	0,0166				
109,70									F-19	(n,n', $\gamma$ )
112,81					Th-234	0,00215				
115,18	Pb-212	0,00624								
121,12									Se-75	0,169
122,06									Co-57	0,855
122,32							Ra-223	0,0124		
129,07	Ac-228	0,0250								
136,00									Se-75	0,577
136,47									Co-57	0,107
139,20									Ge-75m	(n, $\gamma$ )
143,77					U-235	0,109				
144,27							Ra-223	0,0336		
145,44									Ce-141	0,483
145,84	Ac-228	0,00169								
153,97	Ac-228	0,00754								
154,21							Ra-223	0,0584		
159,50									Ge-77m	(n, $\gamma$ )
160,61									Ba-133	0,00638

Linie $E_\gamma$ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$ bzw. Ursprung
163,36					U-235	0,0508				
174,88									Ge-71m	(n, $\gamma$ )
185,72					U-235	0,570				
186,01			Ra-226	0,0356					Cu-66	(n, $\gamma$ )
186,20									Ge-70m	(n, $\gamma$ )
191,35	Ac-228	0,00133								
197,90									Ge-71m	(n, $\gamma$ )
198,61									Se-75	0,0146
202,12					U-235	0,0108				
205,32					U-235	0,0502				
209,25	Ac-228	0,0397								
210,65							Th-227	0,0111		
215,51									Ge-77	(n, $\gamma$ )
223,24									Ba-133	0,00450
235,96							Th-227	0,126		
238,63	Pb-212	0,436								
240,99	Ra-224	0,0412								
242,00			Pb-214	0,0727						
256,23							Th-227	0,070		
258,87			Pb-214	0,00532						
264,66									Se-75	0,588
269,46							Ra-223	0,142		
270,25	Ac-228	0,0355								
271,23							Rn-219	0,111		
274,80			Pb-214	0,00362						
276,40									Ba-133	0,0713
277,37	Tl-208	0,0237								
278,24									Cu-64	(n, $\gamma$ )
278,80	Ac-228	0,00235								
279,20									Hg-203	0,815
279,54									Se-75	0,249
283,69					Pa-231	0,0165				
286,12							Th-227	0,0154		
288,18	Bi-212	0,0032								
295,22			Pb-214	0,184						
300,05							Th-227	0,000140		
300,06					Pa-231	0,0241				
300,09	Pb-212	0,0318								
302,67					Pa-231	0,023				
302,85									Ba-133	0,183
303,92									Se-75	0,0131
304,52							Th-227	0,012		

Linie $E_\gamma$ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$ bzw. Ursprung
320,08									Cr-51	0,0989
321,65	Ac-228	0,00232								
323,87								Ra-223	0,0406	
328,04	Bi-212	0,00121								
328,00	Ac-228	0,0304								
329,85								Th-227	0,027	
330,04					Pa-231	0,0136				
332,37	Ac-228	0,0037								
334,38								Th-227	0,0105	
338,28								Ra-223	0,0285	
338,32	Ac-228	0,1140								
340,97	Ac-228	0,00405								
351,03								Bi-211	0,130	
351,93			Pb-214	0,356						
356,01									Ba-133	0,621
383,85									Ba-133	0,089
386,77			Bi-214	0,00296						
388,88			Bi-214	0,00394						
400,66									Se-75	0,114
401,81								Rn-219	0,0675	
404,83								Pb-211	0,0383	
409,46	Ac-228	0,0202								
427,15								Pb-211	0,0181	
445,03								Ra-223	0,0128	
452,98	Bi-212	0,00340								
454,77			Bi-214	0,00288						
463,00	Ac-228	0,0445								
475,37									Cs-134	0,0148
477,60									Be-7	0,104
480,43			Pb-214	0,00337						
487,09			Pb-214	0,00433						
503,82	Ac-228	0,00171								
508,96	Ac-228	0,00510								
510,74	Tl-208	0,0808								
558,46									Cd-114	(n, $\gamma$ )
562,50	Ac-228	0,00890								
563,25									Cs-134	0,0834
569,33									Cs-134	0,154
570,88	Ac-228	0,00190								
580,13			Pb-214	0,00369						
583,19	Tl-208	0,305								
583,39	Ac-228	0,00120								

Linie $E_\gamma$ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$ bzw. Ursprung
595,85									Ge-74	(n,n', $\gamma$ )
600,70									Ge-74	(n,n', $\gamma$ )
604,72									Cs-134	0,976
608,35									Ge-74	(n,n', $\gamma$ )
609,31			Bi-214	0,455						
651,26									Cd-114	(n, $\gamma$ )
661,66									Cs-137	0,850
665,45			Bi-214	0,0153						
669,60									Cu-63	(n,n', $\gamma$ )
693,40									Ge-72	(n,n', $\gamma$ )
703,11			Bi-214	0,00479						
719,86			Bi-214	0,00393						
726,88	Ac-228	0,00680								
727,33	Bi-212	0,0665								
755,31	Ac-228	0,0103								
763,45	Tl-208	0,0647								
765,80									Nb-95	0,998
766,36					Pa-234m	0,00323				
768,36			Bi-214	0,0489						
772,29	Ac-228	0,0152								
782,14	Ac-228	0,00500								
785,37	Bi-212	0,0111								
785,96			Pb-214	0,0106						
794,94	Ac-228	0,0431								
795,86									Cs-134	0,855
801,95									Cs-134	0,0869
803,00									Pb-206	(n,n', $\gamma$ )
805,89									Cd-114	(n, $\gamma$ )
806,17			Bi-214	0,0126						
830,48	Ac-228	0,00610								
831,98							Pb-211	0,0350		
834,85									Mn-54	0,9998
835,70	Ac-228	0,0170								
839,04			Pb-214	0,00587						
840,37	Ac-228	0,00970								
860,53	Tl-208	0,0446								
867,90									Ge-74	(n, $\gamma$ )
893,41	Bi-212	0,0038								
904,20	Ac-228	0,0078								
911,20	Ac-228	0,262								
934,06			Bi-214	0,0310						
962,00									Cu-63	(n,n', $\gamma$ )

Linie $E_\gamma$ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$ bzw. Ursprung
964,79	Ac-228	0,0499								
968,96	Ac-228	0,159								
1001,03					Pa-234m	0,00847				
1038,61									Cs-134	0,00991
1051,96			Bi-214	0,00324						
1063,60									Pb-207	(n,n', $\gamma$ )
1078,63	Bi-212	0,00550								
1115,54									Cu-65	(n,n', $\gamma$ )
1120,29			Bi-214	0,149						
1127,80									Ge-(75)	(n, $\gamma$ )
1155,19			Bi-214	0,0164						
1167,97									Cs-134	0,0179
1173,23									Co-60	0,9985
1207,68			Bi-214	0,00454						
1238,11			Bi-214	0,0583						
1247,10	Ac-228	0,00524								
1280,96			Bi-214	0,0144						
1327,00									Cu-63	(n,n', $\gamma$ )
1332,49									Co-60	0,9998
1365,19									Cs-134	0,0302
1377,67			Bi-214	0,0397						
1385,31			Bi-214	0,00795						
1401,50			Bi-214	0,0133						
1407,98			Bi-214	0,0239						
1412,00									Cu-63	(n,n', $\gamma$ )
1459,13	Ac-228	0,00870								
1460,82									K-40	0,106
1495,90	Ac-228	0,00920								
1501,59	Ac-228	0,00513								
1509,23			Bi-214	0,0213						
1512,70	Bi-212	0,00290								
1538,50			Bi-214	0,00401						
1543,32			Bi-214	0,0302						
1580,53	Ac-228	0,00620								
1583,22			Bi-214	0,00707						
1588,20	Ac-228	0,0306								
1599,31			Bi-214	0,00322						
1620,74	Bi-212	0,0151								
1630,62	Ac-228	0,0152								
1638,27	Ac-228	0,0046								
1661,28			Bi-214	0,0105						
1729,60			Bi-214	0,0284						

Linie $E_\gamma$ in keV	Th-232 und Folgenuklide		Ra-226 und Folgenuklide		U-238/U-235 und Folgenuklide		Ac-227 und Folgenuklide		Sonstige	
	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$	Nuklid	$p_\gamma$ bzw. Ursprung
1764,49			Bi-214	0,1531						
1838,36			Bi-214	0,0034						
1847,42			Bi-214	0,0203						
2118,55			Bi-214	0,0116						
2204,21			Bi-214	0,0491						
2293,40			Bi-214	0,0031						
2447,86			Bi-214	0,0155						
2614,51	Tl-208	0,358								

## Literatur

- (1) Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung bei bergbaulichen Tätigkeiten (REI Bergbau) vom 11.08.1997
- (2) Laboratoire National Henri Becquerel, ed: *Recommended Data* [online]. Verfügbar unter: <http://www.lnhb.fr/nuclear-data/nuclear-data-table/>, [Zugriff am 20.06.2018].
- (3) Chu, S. Y. F., Edström, L. P., Firestone, R. B.: *The Lund/LBNL Nuclear Data Search* [online]. Version 2.0, Februar 1999 verfügbar unter: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>, [Zugriff am 20.06.2018].
- (4) Gehrke, R. J., Davidson, J. R.: *Acquisition of quality  $\gamma$ -ray spectra with HPGe spectrometers*. Appl. Radiat. Isot., 2005, Vol. 62, S. 479-499. ISSN 0969-8043.
- (5) Jovancevic, N., Krmar, M., Mrda, D., Slivka, J., Bikit, I.: *Neutron induced background gamma activity in low-level Ge-spectroscopy systems*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 2010, Vol. 612, S. 303-308.
- (6) National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, ed.: *CapGAM - Thermal Neutron Capture Gammas by Energy* [online]. Version 20.09.2013 verfügbar unter: <https://www.ornl.gov/PTP/PTP%20Library/library/DOE/bnl/tnc/ngtblcontentbye.shtml.htm>, [Zugriff am 29.06.2018].
- (7) International Atomic Energy Agency (IAEA), ed.: *Evaluated Gamma-ray Activation File (EGAF)* [online]. Verfügbar unter: <https://www-nds.iaea.org/pgaa/egaf.html>, [Zugriff am 29.06.2018].