



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 1 von 31

Stand: Sept. 2006

**Überwachung der Radioaktivität von Beta- und Gamma-Strahlern  
in Schwebstoff und Sediment**

Bearbeiter: W. J. Krause, G. Dersch und H. Mundschenk<sup>†</sup>,  
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

**Inhaltsverzeichnis**

1	Zweck der Überwachungsmaßnahme .....	2
2	Messgrößen, Maßeinheiten und zu fordernde Nachweisgrenzen .....	3
2.1	Messgrößen .....	3
2.2	Maßeinheiten.....	4
2.3	Zu fordernde Nachweisgrenzen .....	4
2.3.1	Schwebstoff.....	4
2.3.2	Sediment.....	5
3	Probenentnahme und Messverfahren .....	6
3.1	Grundlage des Verfahrens.....	6
3.2	Probenentnahme.....	6
3.2.1	Schwebstoff.....	6
3.2.2	Sediment.....	7
3.3	Probenvorbereitung und Herstellung der Messprobe.....	7
3.3.1	Schwebstoff.....	8
3.3.1.1	Gesamt- und Rest-Beta-Messung.....	8
3.3.1.2	Gammaspektrometrische Einzelnuklidbestimmung.....	8
3.3.2	Sediment.....	10
3.3.2.1	Gesamt- und Rest-Beta-Messung.....	10
3.3.2.2	Gammaspektrometrische Einzelnuklidbestimmung.....	11
3.4	Messung der Aktivität - Anforderungen an Messmethodik und -geräte .....	12
3.4.1	Gesamt- und Rest-Beta-Messung.....	12
3.4.1.1	Hinweise zur Messanordnung.....	12
3.4.1.2	Kalibrierung der Messanordnung.....	12
3.4.2	Gammaspektrometrische Messung .....	13
3.4.2.1	Hinweise zur Messanordnung.....	13
3.4.2.2	Kalibrierung der Messanordnung.....	14
4	Berechnung des Analysenergebnisses .....	16
4.1	Gesamt- und Rest-Beta-Messung.....	16
4.2	Gammaspektrometrische Messung .....	17
5	Erreichbare Erkennungs- und Nachweisgrenzen des Verfahrens .....	19
5.1	Gesamt- und Rest-Beta-Messung.....	19
5.2	Gammaspektrometrische Messung .....	21
6	Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte.....	25
6.1	Gesamt- und Rest-Beta-Messung.....	25
6.2	Gammaspektrometrische Messung .....	25
7	Probendokumentation .....	25
8	Bewertung der Verfahren.....	26
9	Glossar - Erklärung der Symbole.....	26
10	Literatur .....	27
11	Anhang.....	30



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**

**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG  
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 2 von 31

Stand: Sept. 2006

## **1 Zweck der Überwachungsmaßnahme**

Die Überwachung der Radioaktivität von Beta- und Gamma-Strahlern in Schwebstoff und Sediment dient der Kontrolle der Einhaltung der durch die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [1] festgelegten Grenzwerte der Strahlenexposition für den Menschen. Hierzu bedarf es der Überwachung der Radioaktivität der Umwelt einschließlich der Tätigkeitsbereiche in Medizin, Forschung und Industrie. Das sog. Routinemessprogramm (RMP, [2, Teil I]) regelt die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt der Bundesrepublik Deutschland im Allgemeinen und die Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung (REI, [3]) die Überwachung der Radioaktivität in unmittelbarer Umgebung kerntechnischer Anlagen im Besonderen.

Schwebstoffe stellen für die über die Abwässer kerntechnischer Anlagen, Isotopenanwender und -verarbeiter eingeleiteten Radionuklide die primären Reaktionspartner dar. Trotz des ungünstigen Phasenverhältnisses kann es hierbei, wegen der hohen spezifischen Oberfläche der besonders feindispersierten Anteile, zu den verschiedensten Sorptions- bzw. Resorptionsvorgängen kommen. In diesem System Schwebstoff/Wasser vollzieht sich somit überwiegend der in einem Gewässer ablaufende Stoffaustausch (auch der Radionuklide) zwischen flüssiger und fester Phase. Damit kommt den Schwebstoff- sowie auch den Sediment-Messungen zur Beschreibung der Kontamination eines Gewässers in gleicher Weise Bedeutung zu.

Eine Vielzahl von Radionukliden wird bevorzugt an den in Gewässern in Suspension auftretenden Feststoffen ("Schwebstoff") infolge Adsorption und/oder Agglomeration angereichert. Zur empfindlichen Erfassung einer radioaktiven Kontamination eines Gewässers ist daher die Überwachung der Schwebstoffphase in besonderem Maße geeignet und derjenigen der Wasserphase weit überlegen. Da der Sammelzeitraum stets eindeutig dem Zeitpunkt bzw. Zeitraum des Eintrages radioaktiver Stoffe zuzuordnen ist, kann die Schwebstoffphase daher als "Kurzzeitmonitor" zur Erfassung der kurzzeitigen Expositionen eines Gewässers angesehen werden. In dieser Funktion unterscheidet sich die Schwebstoffphase grundlegend von der Sedimentphase, die stets Feststoffanteile unterschiedlichen Alters umfasst und daher als "Langzeitmonitor" bezeichnet werden kann. Unter Normalbedingungen ist eine Überwachung von Schwebstoff auf radioaktive Stoffe immer dann angezeigt, wenn Flusswasser beispielsweise zur Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Anbauflächen und zur Tränkung von Weidevieh genutzt wird.

Die in die Oberflächengewässer eingebrachten Feststoffanteile

- a) aus durch Verwitterung bedingtem Bodenabtrag (Erosion: vorwiegend anorganische Stoffe, z. B. Tone, Silikate, Sande, Kies) und
- b) aus kommunalen und industriellen Kläranlagen (vorwiegend Mikroorganismen, unbelebte organische Anteile)

weisen gegenüber den in Abwässern kerntechnischer Anlagen, Isotopenanwendern und -verarbeitern abgeleiteten Radionukliden ein sehr unterschiedliches Sorptions- bzw. Resorptionsverhalten auf. Während die grobkörnigen Sand- und Kiesanteile Radionuklide kaum in nennenswertem Umfang zu binden vermögen, weisen die als Feldspatverwitterungsprodukte auftretenden feinkörnigen Schichtsilikate eine ausgeprägte Affinität zu einer Reihe von Spalt- und Aktivierungsprodukten auf. Im Hinblick auf die im Vergleich zur fließenden Welle lange mittlere Verweilzeit innerhalb eines Flussabschnittes stellen somit insbesondere die feinkörnigen Sedimentanteile (Schlamm) einen vorzüglichen Indikator für die langfristige Kontamination eines Oberflächengewässers dar.

Die Strahlenexposition über den Wasserpfad (d. h. durch unfiltriertes Wasser) wird hier bewusst nicht behandelt, da das Medium Wasser zur Beurteilung der Strahlenexposition über die für Schwebstoff und Sediment relevanten Expositionspfade bei Ablagerung auf Landflächen nur bezüglich des Feststofftransports eine Rolle spielt.

Während derzeit das am Gewässerboden abgelagerte und u. U. kontaminierte Sediment zur Strahlenexposition einer zudem begrenzten Bevölkerungsgruppe (Fischer, Schwimmer, Schleusenarbeiter, Taucher u. a.) in



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 3 von 31

Stand: Sept. 2006

einem sehr geringen Umfang beiträgt, ist bei der Baggerung von Sediment in kritischen Flussabschnitten (z. B. im Abwasserfahnenbereich von kerntechnischen Anlagen), insbesondere hinsichtlich der Verwendung des anfallenden Baggergutes auf Landflächen, eine eingehende Überprüfung der Unbedenklichkeit vorzusehen.

So führt eine eventuelle landwirtschaftliche Nutzung des Baggergutes zu drei möglichen Expositionspfaden:

- Boden-Pflanze-Mensch (vegetarische Nahrung),
- Boden-Futterpflanze-Tier-Mensch (Fleischpfad) und
- Boden-Futterpflanze-Tier-Milch-Mensch (Milchpfad).

Die hier resultierende Strahlendosis und die damit erforderliche Nachweisgrenze bei der Aktivitätsbestimmung sind jedoch von mehreren Parametern abhängig, z. B.

- a) Zusammensetzung des Baggergutes,
- b) chemische Bindung der Radionuklide,
- c) Art, Ertrag und Verarbeitung der Nutzpflanzen,

die nur schwer abgeschätzt werden können. Überschlägige Berechnungen und bisherige Erfahrungen deuten darauf hin, dass im Falle einer landwirtschaftlichen Nutzung des Baggergutes die Radionuklide Co-58, Co-60, Zn-65, Sr-90, Ru-106, Ag-110m, Cs-134 und Cs-137 besonders beachtet werden müssen.

Im Hinblick auf die langfristige Akkumulation von Radionukliden in der feinkörnigen Sinkstofffraktion erscheint die Messung der Schwebstoff- und Sedimentaktivität zur Beschreibung des Kontaminationsstatus eines Oberflächengewässers von besonderer Bedeutung.

Die Abwässer kerntechnischer Anlagen, Radioisotopenanwender und -verarbeiter können derzeit bis etwa 25 Radionuklide enthalten. Hiervon sind im Sediment insbesondere die Radionuklide Sr-89/-90, Cs-134/-137 sowie Co-58/-60 wegen ihrer hohen Beteiligung am Radionuklidgemisch im Abwasser kerntechnischer Anlagen (H-3, Cs-134/-137, Co-58/-60) und Kliniken (I-131) und in Anbetracht der hohen Radiotoxizität (Sr-90) von Interesse. Mit Ausnahme von Sr-89/-90 und H-3 handelt es sich um Gamma-Strahler, die zweckmäßigerweise gammaspektrometrisch mit Halbleiter-(Reinstgermanium)-Detektoren (HPGe-Detektoren) bestimmt werden.

Die Gesamtaktivität einer Probe kann auf einfache Weise über eine Rest-Beta-Messung ( $R_\beta$ ) bestimmt werden, wobei einer solchen Messung jedoch nur orientierender Charakter zukommt.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass bei störfallbedingten Freisetzungen radioaktiver Stoffe, neben orientierenden  $R_\beta$ -Messungen, insbesondere die Einzelnuklidbestimmungen schnell und zuverlässig direkt ausgeführt werden können (Schnellmethoden).

## **2 Messgrößen, Maßeinheiten und zu fordernde Nachweisgrenzen**

### **2.1 Messgrößen**

Messgröße ist die Zähl- oder Impulsrate des Messgerätes, das zur Registrierung der jeweiligen Strahlungsart und -intensität Verwendung findet. Anhand der charakteristischen Zählausbeuten und Umrechnungsfaktoren werden spezifische Aktivitäten errechnet, die die Zahl der Kernzerfälle eines Radionuklides pro Zeiteinheit und Masse ausdrückt. Auf Grundlage eines vorgegebenen Expositionsmodells [4] und den in [5] tabellierten radionuklidspezifischen Dosisleistungskoeffizienten lässt sich die Dosis für Personen aus der Bevölkerung bestimmen.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 4 von 31

Stand: Sept. 2006

## 2.2 Maßeinheiten

Die Einheit der spezifischen Aktivität zur Überwachung von Schwebstoff und Sediment ist im SI-System Bq/kg Trockenmasse (TM) [6], wobei 1 Bq (Becquerel) = 1 s<sup>-1</sup> ist. Bei der Kaliumbestimmung entsprechen die spezifischen Emissionsraten für Beta-Strahlung für 1 kg Knat = 27.600 β-Zerfälle/s und für 1 kg KCl = 14.500 β-Zerfälle/s [7] mit einer E<sub>βmax</sub> für K-40 von 1,31 MeV.

Bezugspunkt für die Aktivitätsangabe ist der Zeitpunkt der Probenentnahme.

Die Einheit der Energiedosis ist im SI-System J/kg, wobei 1 Gy (Gray) = 1 J/kg = 10<sup>4</sup> erg/g ist. Die radiobiologisch bewertete Energiedosis im Gewebe wird als Äquivalentdosis H in Sievert (Sv) gemessen.

## 2.3 Zu fordernde Nachweisgrenzen

Für Einzelpersonen der Bevölkerung beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis durch Strahlenexpositionen infolge von Tätigkeiten mit Radionukliden (z. B. Erwerb, Umgang, Transport, Verarbeitung, Aufbewahrung, Betrieb kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen, Abgabe aus denselben) 1 Millisievert im Kalenderjahr (mSv/a) (§ 46 in [1]). Die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser aus Anlagen oder Einrichtungen wird dergestalt begrenzt, dass die resultierende effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung jeweils 0,3 mSv/a nicht übersteigt (§ 47 in [1]).

Bei den unterschiedlichen Tätigkeiten in den Anlagen und Einrichtungen variiert der emittierte Anteil der verschiedenen Radionuklide; so gelangen z. B. mit radioaktiven Ableitungen mit Wasser aus Kernkraftwerken etwa 6 Radionuklide mit einem jeweils vergleichbaren Aktivitätsanteil in die Vorfluter. Die Auswahl der zu überwachenden Radionuklide ist demnach dem zu erwartenden bzw. tatsächlich emittierten Radionuklidgemisch anzupassen (REI [3], Abs. 4.9).

Basierend auf diesen Vorgaben wurden in der REI, Anhang A, Abschnitt 3.4.1 [3], die erforderlichen Nachweisgrenzen  $g_r^{\min}$  für Aktivitätskonzentrationen relevanter Radionuklide äquivalent einem jeweiligen Grenzwert der effektiven Dosis von 0,01 mSv/a festgelegt. Damit dieser noch sicher nachgewiesen wird, ergeben sich zur Realisierung der in Abschnitt 1 postulierten Überwachungsziele für Schwebstoffe und Sediment in Oberflächengewässern die zu fordernden Nachweisgrenzen für Spalt- und Aktivierungsprodukte wie in den nachfolgenden Abschnitten angegeben.

Die Berechnung der in Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 angegebenen Zahlenwerte ergibt sich aus der Rückrechnung der Jahresdosen für Referenzpersonen und den jeweils relevanten Expositionspfaden (Übersicht in [1], Anlage VII) unter Zugrundelegung eines repräsentativen Radionuklidvektors gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV [4].

### 2.3.1 Schwebstoff

Schwebstoffe befinden sich naturgemäß in der Wasserphase. In diesem Medium stellen Wassersportler (z. B. Schwimmer, Taucher) und Berufstaucher (z. B. bei angeordneten Taucheinsätzen) die kritische Bevölkerungsgruppe dar. Wegen der deutlich höheren Strahlungsabschwächung in Wasser gegenüber derjenigen in Luft ist sowohl die äußere Strahlenexposition durch Beta-/Gamma-Submersion in Wasser als auch die innere Strahlenexposition durch unbeabsichtigtes Verschlucken (Ingestion) des schwebstoffhaltigen Wassers beim Schwimmen vernachlässigbar; deshalb wird dieser Expositionspfad in der AVV [4] auch nicht betrachtet. Die Beta-Strahlung der im Wasser verteilten Schwebstoffe und des Sediments liefert keinen Beitrag zur äußeren Strahlenexposition.

Schwebstoffe gelangen bei Überflutung auf angrenzende Landflächen und bleiben in meist dünnen Schichten, je nach Verweildauer des Hochwassers, zurück. Hier ist die äußere Strahlenexposition durch Bodenstrahlung zu berücksichtigen; deren Rückführung auf die im Vorfluter mitgeführten Schwebstoffe allerdings nur dann von der ursprünglichen Bodenstrahlung rechnerisch abgetrennt werden kann, wenn die Vorbelas-



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14  
 Seite: 5 von 31  
 Stand: Sept. 2006

tung bekannt ist. Für diesen Fall lassen sich die nuklidspezifischen Strahlenexpositionen (und umgekehrt die Grenzwerte für die spezifische Radionuklidaktivität im Schwebstoff) für den Expositionsspfad „Bodenstrahlung auf Überschwemmungsgebieten“ ([4], Abschnitt 5.4.2) unter Berücksichtigung der effektiven Dosisleistungsfaktoren [5] ableiten. Für die innere Strahlenexposition kann auch der Expositionspfad „Landwirtschaftliche Nutzung auf Überschwemmungsgebieten“ ([4], Abschnitt 5.5.5) beitragen. Hier spielen Ablagerungsprozesse, der Konzentrationsfaktor für Schwebstoffe als Verhältnis Fließwasser- zu Schwebstoffaktivitätskonzentration eine Rolle und machen Schwebstoffanalysen notwendig. Auf diese Weise tragen die dort nachgewiesenen Radionuklide über deren Dosiskoeffizienten  $g_{g,r,T}$  durch Ingestion zur inneren Exposition bei. Die landwirtschaftliche Nutzung der Überschwemmungsgebiete ist allerdings nicht nur aus radiologischen Gründen sehr umstritten.

Für die Abschätzung der erforderlichen Nachweisgrenze für beide Expositionspfade wird folgendes Modellgemisch abgeleiteter radioaktiver Stoffe zugrunde gelegt (aus [4], Anhang 12):

Co-58: 19 %	Co-60: 20 %	Sr-90: 1 %
I-131: 10 %	Cs-134: 20 %	Cs-137: 30 %

Für diese Radionuklide und die hier angegebenen relevanten Expositionspfade sind die erforderlichen Nachweisgrenzen in Tabelle 1 angegeben. Zugrunde gelegt wurde die Schwebstofffracht am Niederrhein bei mittlerem Hochwasser unter Berücksichtigung aller Einleitungen (Mittelwerte der letzten Jahre) der oberliegenden kerntechnischen Anlagen.

**Tabelle 1:** Erforderliche Nachweisgrenzen in Bq/kg TM für ausgewählte Radionuklide in Schwebstoff und Sediment für relevante Expositionspfade unter Berücksichtigung des Nachweises einer effektiven Dosis von 0,01 mSv/a für die Altersklasse 7 – 12 Jahre.

<b>Radionuklid</b>	<b>in Schwebstoff</b>		<b>in Sediment</b>
	„Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten“ (innere Exposition)	„landw. Nutzung von Fluss- und Klärschlamm“ (innere Exposition)	„Aufenthalt auf Spülfeldern“ (äußere Exposition)
<b>Beta-Strahler</b>			
Sr-90	50	4	34
Y-90	66	nicht relevant	44
<b>Gamma-Strahler</b>			
Co-58	860	2.000	2.000
Co-60	22	300	26
Cs-134	150	250	74
Cs-137	120	92	78

### 2.3.2 Sediment

Der relevante Expositionspfad für dieses Medium ist der Aufenthalt auf Spülfeldern. Auf diesen Flächen wird in gewissen Zeitabständen und begrenzten Zeitspannen Baggergut aus der Flusssohle aufgebracht. Die zuständigen Behörden fordern in der Regel eine Aussage über die Schadstoffexposition dieses Baggergutes, da geschlossene Spülfelder nach einigen Jahren zur landwirtschaftlichen Nutzung zur Verfügung gestellt werden können. Für die kritische Bevölkerungsgruppe (Personal für Bagger- und Schleusenarbeiten in den Bundeswasserstraßen) wird zur Ermittlung der Strahlenexposition ein Aufenthalt von max. 1000 Stunden/Jahr auf einer Sedimentschichtdicke von 60 kg TM/m<sup>2</sup> angesetzt. Unter Berücksichtigung der Dosisleistungskoeffizienten durch Bodenstrahlung [5] und dem o. g. Nachweiskriterium ergeben sich für ausgewählte Radionuklide die in Tabelle 1 angegebenen erforderlichen Werte der Nachweisgrenzen in Bq/g TM.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 6 von 31

Stand: Sept. 2006

Für K-40 als natürliches Radionuklid wird keine Nachweisgrenze angegeben, da sein Beitrag zur Strahlenexposition nicht in die Kategorie „Emissions-Folgedosen“ einzuordnen ist, sondern lediglich als Vergleichsradionuklid mit erfasst wird. Die relativ hohen Werte für Co-58 resultieren aus seiner kurzen Halbwertszeit im Vergleich zu den anderen Radionukliden. Bei der vorgegebenen Probenvorbereitung (siehe Abschnitt 3.3.2.2) wird I-131 nicht erfasst. Dieses Radionuklid trägt infolge der geringen Einwirkung auf das Sediment und wegen seiner relativ kurzen Halbwertszeit nur zu einem geringfügigen Aktivitätsanteil im Sediment bei und ist daher als Strahlenquelle über die hier betrachteten Expositionspfade nur von untergeordneter Bedeutung. Sein Verlust bei der Anwendung der nachfolgend beschriebenen Messmethoden ist wegen seiner geringen Aussagekraft nicht als gravierend zu betrachten.

Zusammenfassend kann für die beiden in Tabelle 1 benannten Expositionspfade für die äußere Strahlenexposition eine zu fordernde Nachweisgrenze für Gamma-Strahler  $g_{\gamma}^{\text{min}} = 20 \text{ Bq/kg TM}$  bezogen auf Co-60 angegeben werden, die bei Annahme des o. a. Radionuklidgemisches die anderen relevanten Gamma-Strahler abdeckt. Für Beta-Strahler kommt der Expositionspfad für die innere Strahlenexposition in Betracht, in diesem Fall gilt  $g_{\beta}^{\text{min}} = 4 \text{ Bq/kg TM}$  bezogen auf Sr-90.

Gemäß der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung (REI) [3] wurde zur Überwachung der Umgebung vor Inbetriebnahme und im bestimmungsgemäßem Betrieb einer kerntechnischen Anlage (Normalfall) für die unabhängigen Messstellen eine spezifische Einzelnuclidaktivität von  $5 \text{ Bq/kg TM}$  bezogen auf Co-60 als erforderliche Nachweisgrenze  $g^{\text{min}}$  festgelegt (Tabelle A.2). Das Routinemessprogramm (RMP, [2, Teil I]) zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach Strahlenschutz-Vorsorgegesetz (StrVG) legt diesbezüglich für Verwaltungsbehörden des Bundes  $1 \text{ Bq/kg TM}$  und für Messstellen der Bundesländer  $5 \text{ Bq/kg TM}$ , jeweils bezogen auf Co-60, fest. Für das Intensivmessprogramm [2, Teil II] gibt es hierzu noch keine Angaben; jedoch wird in einer Novellierung (Bearbeitungsstand 12.08.2004) für Schwebstoff  $100 \text{ Bq/kg TM}$  bezogen auf Co-60 vorgeschlagen.

### **3 Probenentnahme und Messverfahren**

Das beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Rest-Beta-Aktivität sowie gammastrahlender Radionuklide in Schwebstoff und Sediment wurde verschiedentlich veröffentlicht [8 - 14]. Mit Ausnahme von Probenentnahme und Probenaufbereitung ist das eigentliche Messverfahren dem für Wasser- und Klärschlammproben, sowie auch für aus biologischem Material gewonnenen Proben vergleichbarer Konsistenz sehr ähnlich. Das Messverfahren muss hierbei so konzipiert sein, dass die Kontrolle der maximal zulässigen Aktivitätskonzentrationen in diesen Matrices nach § 47 (4) StrlSchV mit hinreichender statistischer Sicherheit gewährleistet werden kann, bzw. die Dosisgrenzwerte nach § 47 (1) StrlSchV sicher eingehalten werden können.

#### **3.1 Grundlage des Verfahrens**

Generell ist zwischen der Probenentnahme von Schwebstoff, überwiegend anorganischem Sediment und überwiegend organischen (Klär-)schlamm zu unterscheiden. Bei letzteren stehen direkt bei der Probenentnahme relativ große Volumina zur Verfügung, die es ermöglichen, einen qualitativ repräsentativen Probenquerschnitt, zu erhalten. Darüber hinaus ist bei natürlichen Sedimenten die Entnahme von Bohrkernen möglich, die sowohl einen qualitativen Querschnitt (integral) über eine vorgegebene Tiefe als auch aus relativ dünnen Schichten (differentiell) ermöglicht. Dagegen sind Schwebstoffe in der Wasserphase in ganz unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden und erfordern teilweise arbeits- oder zeitaufwändige Sammeltechniken.

#### **3.2 Probenentnahme**

##### **3.2.1 Schwebstoff**

Die Festlegung der Probenentnahmestellen sowie die Art der Probenentnahme sind derart durchzuführen, dass für das untersuchte Gewässer möglichst repräsentative Proben erhalten werden.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 7 von 31

Stand: Sept. 2006

Zur Wahrnehmung von Aufgaben im Rahmen der allgemeinen Überwachung nach Routinemessprogramm zum StrVG sind Schwebstoffproben vor allem aus dem Bereich der aktuellen bzw. potentiellen Nutzung eines Gewässers sowie aus grenzüberschreitenden Flussabschnitten auf radioaktive Stoffe hin zu untersuchen. Eine Untersuchung von Proben aus unbelasteten Flussabschnitten (Referenzstellen) ist ebenfalls zu empfehlen. Die möglichst kontinuierliche Entnahme der die Schwebstoffanteile enthaltenden Wasserproben ist an der Oberfläche des zu überwachenden Gewässers (bis max. 1 m Tiefe) im Stromstrich vorzunehmen.

Schwebstoffproben werden auch im Zusammenhang mit Wasserproben genommen und untersucht. Aufgrund des geringen Schwebstoffgehaltes im Oberflächenwasser (ca. 30 mg/l) werden, im Vergleich zur Probenentnahme von Sediment, besondere Anforderungen an die Schwebstoffprobenentnahme gestellt. Sie kann mittels Filtration, Zentrifugation oder auch Sedimentation in Absetzbecken erfolgen. In geeigneten Absetzbecken ist es möglich, genügend große, mit Sedimentproben vergleichbare Schwebstoffmengen zu erhalten, die dann auch nach diesen Arbeitsverfahren verarbeitet werden können.

Zur Probenentnahme von Schwebstoff im Normal- und Ereignisfall wird auf die näheren Angaben im LB 3.1.12.1 [15, 16], Abschnitt 3.2.2 und auf [17] verwiesen.

### 3.2.2 Sediment

Die Auswahl der Probenentnahmestellen sollte unter Berücksichtigung der kritischen Einwirkungsstellen und der topologischen und der hydrologischen Gegebenheiten erfolgen. Die Probenentnahme ist u. a. an denjenigen Orten (z. B. möglichst an repräsentativen Flussabschnitten unter Beachtung der besonderen hydrologischen Situation) vorzunehmen, die bezüglich der Überwachung der Radioaktivität in näherer und entfernterer Umgebung des Einleiters für den Schutz der Bevölkerung relevant sind, u. a. im Hinblick auf die Baggerung und gegebenenfalls Verwendung von Sedimenten und Schlämmen. Diese Orte können für jeden Einleiter verschieden sein und sollten in jedem Einzelfall den gegebenen Randbedingungen angepasst werden. Die Entscheidung für die Festlegung dieser Orte sollte im Einvernehmen der Landesbehörden mit den einzelnen Emittenten getroffen werden.

Während die in Wasser- und Schwebstoffproben gemessenen Gehalte radioaktiver Stoffe aufgrund des diskontinuierlichen Abgaberhythmus der Emittenten starken Schwankungen unterliegen, können Langzeitentwicklungen in der Sedimentphase erfasst werden. Somit ist eine vierteljährliche Probenentnahmefrequenz zur Überwachung der Radioaktivität im Sediment völlig ausreichend.

Zur Probenentnahme von Sediment wird auf die näheren Angaben im LB 3.1.12.1 [15, 16], Abschnitt 3.2.3 und auf [17] verwiesen.

### 3.3 Probenvorbereitung und Herstellung der Messprobe

Im Folgenden werden die Verfahren [8 - 13] zur Bestimmung der R $\beta$ - bzw. G $\beta$ -Aktivität sowie gamma-spektrometrisch nachweisbarer Radionuklide in Schwebstoff und Sediment zusammengestellt. Die angeführten Verfahren sind, mehr oder weniger modifiziert, seit Jahren für vergleichbare Aufgaben im Einsatz und haben sich, bei Einhaltung der für analytische Arbeiten notwendigen Sorgfalt, bewährt. Zur Messung der Beta-Aktivität von Sr-89/-90 stehen gesonderte Verfahren zur Verfügung [18]. Dies schließt nicht aus, dass bei Vorliegen bestimmter Umstände oder aufgrund technischer Entwicklungen auch andere Verfahren angewandt werden. Jedoch sollte stets davon ausgegangen werden, dass eine möglichst weitgehende Vereinheitlichung von Arbeitsvorschriften eine wesentliche Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Werte darstellt.

Das in Abschnitt 1 formulierte Überwachungsziel bestimmt weitgehend den Arbeits- und Messaufwand. Durch geeignete Kombination der einzelnen Analysenschritte kann ein weiter Konzentrationsbereich erfasst und somit den für die verschiedenen Aufgaben (z.B. Überwachung bei Störfall/Normalbetrieb) erforderlichen Voraussetzungen entsprochen werden.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 8 von 31

Stand: Sept. 2006

### 3.3.1 Schwebstoff

#### 3.3.1.1 Gesamt- und Rest-Beta-Messung

Die gewonnene Schwebstoffprobe wird zunächst getrocknet und anschließend geglüht. Bei der Ermittlung der spezifischen Aktivität von Schwebstoffproben ist, mit Hinblick auf die schwankenden Wassergehalte, stets der nach dem Trocknen bei 105 °C und Glühen bei 450 °C erhaltene Glührückstand als Trockenmasse (TM) [9] zugrunde zu legen. Von dem staubfein zermahlene Glührückstand wird ein Messpräparat definierter Schichtdicke hergestellt, das im  $\beta$ -Plateau eines Proportionalzählers gemessen wird.

Der K-40-Anteil der Probe wird auf direkte Weise entweder gammaspektrometrisch oder aber auf indirekte Weise röntgenfluorometrisch über den Kaliumgehalt bestimmt. Die flammenphotometrische Bestimmung nach Nassaufschluss ist problematisch und sollte nicht angewandt werden [19]. Hieraus wird die auf K-40 zurückgehende spezifische Aktivität  $a_{K40}$  bei einer Beta-Messung berechnet, die von der gemessenen spezifischen Gesamt-Beta-Aktivität  $a_{G\beta}$  der untersuchten Probe abgezogen werden muss, um die gesuchte spezifische Rest-Beta-Aktivität  $a_{R\beta}$  der eigentlichen Probe zu erhalten. Da der Kaliumgehalt von Schwebstoffproben ortsspezifisch in der Regel recht konstant ist, braucht nicht jede Einzelprobe dieser Stelle entsprechend untersucht zu werden. Dies ist jedoch im Einzelfall zu überprüfen.

#### Probenvorbereitung

- Ca. 10 g einer frisch entnommenen Schwebstoffprobe werden in einer Porzellanschale für 2 h in einem Trockenschrank bei 105° C getrocknet und anschließend für 1 h in einem Muffelofen bei 450° C geglüht. Zur Vermeidung von Verlusten an Cäsium sollte diese Temperatur nicht überschritten werden. Durch das Glühen wird der organische Anteil weitgehend vernichtet und Kristallwasser eliminiert. Die resultierende Massenverminderung führt zu einer verbesserten Qualität des Messpräparates und einer Erhöhung der Messempfindlichkeit für Beta-Strahler.
- Der Glührückstand wird in einem Achatmörser oder einer Kugelmühle staubfein zermahlen.

#### Herstellung des Messpräparates

- 300 bzw. 3000 mg ( $m_p$ ) der fein pulverisierten Probe werden auf einer 60 bzw. 200 mm-Messschale mit angerauter Oberfläche mit wenig destilliertem Wasser aufgeschlämmt, gleichmäßig verteilt und über Nacht an der Luft getrocknet. Die Schichtdicke ist zu ermitteln.
- Anschließend wird das Messpräparat im Beta-Plateau eines Proportionalzählers bei einer Messzeit von  $t_p = 6000$  s gemessen. Durch Variierung dieser Messzeit kann eine vorgegebene Nachweisgrenze erreicht werden.

#### Störungen

Störungen bei der Bestimmung der spezifischen Aktivität  $a_{R\beta}$  sind dann zu erwarten, wenn erhöhte Anteile an Alpha-Strahlern in der Probe vorliegen. In diesem Falle ist eine zusätzliche Messung im Alpha-Plateau eines Proportionalzählers vorzunehmen.

#### 3.3.1.2 Gammaspektrometrische Einzelnuklidbestimmung

Die auf geeignete Weise entnommene Schwebstoffprobe wird entweder in feuchter Form direkt oder aber nach dem Trocknen gammaspektrometrisch gemessen. Zur Erfassung flüchtiger Radionuklide (insbesondere I-131) empfiehlt sich die Probenmessung im feuchten Zustand und anschließender Bestimmung der Trockenmasse. Der Arbeitsschritt des Glühens ist in der Regel für gammaspektrometrische Messungen entbehrlich, da der durch organische Anteile und Kristallwasser erhöhte Anteil keinen nennenswerten Einfluss auf die Bestimmung hat. Dieser Arbeitsschritt ist nur bei sehr geringen Probenmengen von Bedeutung bzw. wenn nach niederenergetischen Gammastrahlern gesucht wird. Wesentlich ist jedoch die Trocknung der Probe bei 105°C bis Gewichtskonstanz.





**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**

**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG  
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 9 von 31

Stand: Sept. 2006

Zur Untersuchung von Proben mit sehr unterschiedlicher Probenmasse können verschiedene Zählansordnungen eingesetzt werden, so dass bei sonst gleichen Messbedingungen die erreichbare Erkennungsgrenze in einem weiten Bereich variiert und somit der jeweiligen Überwachungsaufgabe angepasst werden kann (siehe Abschnitt 3.4.2):

- Stehen nur kleine Schwebstoffmengen (z. B. im Ereignisfall) zur Verfügung, die mittels Filtration gewonnen wurden, ist eine Messung der Proben als Filterscheiben in den üblichen Messschalen (Durchmesser: 50 bzw. 60 mm) durchzuführen (**Zählansordnung A**). Alternativ können mittels Zentrifugation abgetrennte Proben in Zentrifugenröhrchen mit Halbleitersonden in Bohrlochausführung gemessen werden. In solchen Messansordnungen treten jedoch höhere Koinzidenzverluste auf, die zu korrigieren sind.
- Stehen Probenmengen im 100 g-Bereich zur Verfügung, so kann eine Messung der Probe als sog. Pressling vorgenommen werden (**Zählansordnung B**). Hierzu wird das getrocknete und fein pulverisierte Material in einer elektrohydraulischen Presse bei erhöhtem Druck zu einem zylindrischen Pressling verarbeitet (z.B. Probendurchmesser: 50 mm; Probenhöhe: 23 mm; Probenmasse: 86 g, je nach Dichte). Die Vorzüge dieser Probenform liegen vor allem in der ausgezeichneten Reproduzierbarkeit der Messgeometrie sowie in der Leichtigkeit der Handhabung, Stapelung und Beschriftung im praktischen Routinebetrieb.
- Alternativ hierzu können für eine ähnliche zylindrische Messgeometrie Kunststoffdosen oder Weithalsflaschen verwendet werden, mit vergleichbarer Schüttdichte wie bei Zählansordnung C.
- Sollen niedrigste Erkennungsgrenzen bei sonst gleichen Messbedingungen erreicht werden und stehen ausreichend große Probenmengen zur Verfügung, ist die Probe in getrockneter oder feuchter Form in Ringschalen (Marinelli-Becher) aus Kunststoff zu messen (**Zählansordnung C**). Die Schüttdichte von getrockneten Schwebstoffproben liegt bei ca.  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , so dass die Probenmasse von 1 kg einem Probenvolumen von 1 L entspricht.
- Bei geringen Probenmengen oder Schwebstoffproben mit geringen Trockenmassenanteilen empfiehlt es sich, die Probe mit Hilfe eines Geliermittels (z.B. Tapetenkleister) zu verdicken, um ein Absetzen des Feststoffanteils während der Messung und somit eine Änderung der effektiven Messgeometrie zu verhindern.

#### Probenvorbereitung

Die in geeigneter Weise entnommene Schwebstoffprobe wird vor oder nach dem Trocknen unmittelbar in einer geeigneten Zählansordnung gemessen. Alternativ kann die Probe nach dem Trocknen geglüht werden (s. o.). Für Details zur Veranschaulichung des Einflusses der Probenbehandlung siehe [11, 14].

Je nach Zusammensetzung der Schwebstoffproben können die Trocken- bzw. Glührückstände  $q_T$  erheblich schwanken. Da der Trocknungsverlauf auch vom vorgegebenen Nassgewicht und Wassergehalt der Probe abhängt, ist die Trocknung bei großvolumigen Feststoffproben ggf. zu verlängern. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

#### Herstellung des Messpräparates

Je nach der vorgegebenen Überwachungsaufgabe kann eine Verarbeitung der Schwebstoffprobe für die einzelnen Zählansordnungen A, B und C auf verschiedene Weise erfolgen:

#### Verfahren 1 für **Zählansordnung A**:

- 1) Aus einer Wasserprobe von mindestens 20 L wird der Schwebstoffanteil mittels Filtration über Membranfilter (Porenweite:  $0,45 \mu\text{m}$ ) auf einer Hahn'schen Nutsche o.ä. abgetrennt. Bei nachlassender Saugleistung muss der Filter gegebenenfalls mehrfach erneuert werden. Eine Druckfiltrationsvorrichtung ist hierbei von Vorteil.
- 2) Der auf einem vorgewogenen Filter abgeschiedene Schwebstoffanteil wird im Trockenschrank bei  $105^\circ\text{C}$  bis zur Gewichtskonstanz, maximal über Nacht, getrocknet; die Probenmasse  $m_p$  wird ermittelt.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 10 von 31

Stand: Sept. 2006

- 3) Als Messprobe wird die auf dem Filter abgeschiedene, zuvor bis zur Gewichtskonstanz getrocknete und gewogene Schwebstoffprobe verwendet: Platzierung und Fixierung in einer 60 (50) mm-Messschale.
- 4) Anschließend wird das nach 3) hergestellte Messpräparat mit einer Messzeit  $t_b$  solange gemessen, bis die erforderliche Nachweisgrenze erreicht ist. Typische Messzeiten liegen um 60.000 s, maximal um 220.000 s.

**Verfahren 2 für Zählordnung B:**

- 1) Eine in geeigneter Weise entnommene ausreichend große Schwebstoffmenge von mind. 200 g Feuchtmasse wird in einer Porzellanschale im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.
- 2) Der Rückstand wird in einer Kugelmühle staubfein zermahlen.
- 3) Eine exakt abgewogene Menge des pulverisierten Rückstandes (z. B.  $m_p = 86$  g) wird in einer elektrohydraulischen Presse bei hohem Druck (40 t) zu einem Pressling verarbeitet.
- 4) Der nach 3) hergestellte Pressling wird anschließend mit einer Messzeit  $t_b$  solange gemessen, bis die erforderliche Nachweisgrenze erreicht ist. Typische Messzeiten liegen um 60.000 s.

**Verfahren 3 für Zählordnung C:**

- 1) Eine in geeigneter Weise entnommene, ausreichend große Schwebstoffmenge von ca. 1000 g Feuchtmasse ( $m_F$ ) wird in feuchtem Zustand in eine Ringschale aus Kunststoff bis zur vorgegebenen Füllmarke eingefüllt.
- 2) Anschließend wird die Schwebstoffprobe mit einer Messzeit  $t_b$  solange gemessen, bis die erforderliche Nachweisgrenze erreicht ist. Typische Messzeiten liegen um 60.000 s, maximal um 220.000 s.
- 3) Nach der Messung wird die Probe ( $m_F$ ) bzw. ein Aliquot hiervon ( $m'_F$ ) in eine Porzellanschale überführt und zunächst in einem Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz, maximal über Nacht, getrocknet.
- 4) Der erhaltene Rückstand wird ausgewogen ( $m_p$  bzw.  $m'_p$ ) und bei der Berechnung der Radionuklidgehalte zugrundegelegt.

### 3.3.2 Sediment

#### 3.3.2.1 Gesamt- und Rest-Beta-Messung

Zur Bestimmung der spezifischen Aktivität  $a_{R\beta}$  wird die Sedimentprobe zunächst getrocknet und anschließend in einem Muffelofen geglüht. Der Glührückstand wird fein pulverisiert und hiervon ein Messpräparat von definierter Dicke hergestellt. Das Messpräparat wird im Beta-Plateau eines Proportionalzählers gemessen.

Der Kaliumgehalt der Probe wird entweder gammaspektrometrisch über K-40 oder aber röntgenfluorimetrisch bestimmt. Die flammenphotometrische Bestimmung nach Nassaufschluss ist problematisch und sollte nicht angewandt werden [19]. Aus dem Kaliumgehalt wird nun die auf das Radionuklid K-40 zurückgehende spezifische Aktivität  $a_{K40}$  ermittelt, die von der gemessenen spezifischen Aktivität  $a_{G\beta}$  abgezogen werden muss, um die gesuchte spezifische Aktivität  $a_{R\beta}$  der Probe zu erhalten. Da der Kaliumgehalt von Sedimentproben von jeweils der gleichen Entnahmestelle in der Regel recht konstant ist, braucht nicht jede Einzelprobe entsprechend untersucht zu werden. Dies ist jedoch im Einzelfall zu überprüfen.

Zur Messung der Beta-Aktivität von Sr-89/-90 stehen gesonderte Verfahren zur Verfügung [18].

#### Probenvorbereitung

- Ca. 20 g einer feinkörnigen und für den betreffenden Flussabschnitt repräsentativen Sedimentprobe werden in einer Porzellanschale für 2 h in einem Trockenschrank bei 105°C getrocknet und anschließend für 1 h in einem Muffelofen bei 450°C geglüht.
- Der Glührückstand wird in einem Achatmörser oder einer Kugelmühle staubfein zermahlen.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 11 von 31

Stand: Sept. 2006

Herstellung des Messpräparates

- 300 bzw. 3000 mg ( $m_p$ ) der pulverisierten Probe werden auf einer 60 bzw. 200 mm-Messschale mit angerauter Oberfläche mit wenig destilliertem Wasser aufgeschlämmt, gleichmäßig verteilt und über Nacht an der Luft getrocknet.
- Anschließend wird das Messpräparat im Beta-Plateau eines Proportionalzählers bei einer Messzeit von  $t_p = 6000$  s gemessen. Durch Variierung dieser Messzeit kann eine vorgegebene Nachweisgrenze erreicht werden.

Störungen

Störungen bei der Bestimmung der spezifischen Aktivität  $a_{R\beta}$  sind dann zu erwarten, wenn erhöhte Anteile an Alphastrahlern in der Probe auftreten. In diesem Falle ist eine zusätzliche Messung im Plateau eines Proportionalzählers vorzunehmen. Sedimentproben mit höherem Sandgehalt sind zur Messung ungeeignet.

3.3.2.2 Gammaskopmetrische Einzelnuklidbestimmung

Eine Probe wird nach Entfernen überschüssiger Wasserreste feucht in eine Ringschale eingefüllt und anschließend direkt gemessen. Nach der Messung wird die Probe oder ein Aliquot hiervon in einem Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Radionuklidgehalte sind stets auf den Rückstand bzw. Trockenmasse (TM) zu beziehen. Hierzu sind Ringschalen mit einem Inhalt von üblicherweise 0,5, 1 und 2 L im Handel erhältlich.

Probenvorbereitung

Die in geeigneter Weise entnommene Sedimentprobe wird vor oder nach dem Trocknen unmittelbar in einer geeigneten Zählordnung gemessen. Alternativ kann die Probe nach dem Trocknen gegläht werden (s. o.). Für Details zur Veranschaulichung des Einflusses der Probenbehandlung siehe [11, 14, 20].

Je nach Zusammensetzung der Sedimentproben können die Trocken- bzw. Glührückstände  $q_T$  erheblich schwanken. Da der Trocknungsverlauf auch vom vorgegebenen Nassgewicht und Wassergehalt der Probe abhängt, ist die Trocknung bei großvolumigen Feststoffproben ggf. zu verlängern. Dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

Herstellung des Messpräparates

a) zum Messen der Probe in feuchter Form:

- Die feuchte Sedimentprobe von der Masse  $m_F$  wird in eine Ringschale bis zur vorgeschriebenen Füllhöhe eingefüllt.
- Anschließend wird die Probe in einer gammaskopmetrischen Messanordnung bei Messzeiten von bis zu etwa  $t_p = 60.000$  s gemessen. Längere Messzeiten sind wegen der größeren verfügbaren Probenmasse in der Regel nicht erforderlich.
- Nach der Messung wird das feuchte Sediment ( $m_F$ ) bzw. ein Aliquot hiervon ( $m'_F$ ) in eine Porzellanschale überführt und in einem Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet.
- Die als Rückstand erhaltene Trockenmasse  $m_p$  bzw.  $m'_p$  wird bei der Auswertung der Spektren zur Ermittlung der spezifischen Aktivität der Probe zugrundegelegt.

Anmerkung:

Weicht die Dichte der gemessenen Probe, die aus Volumen und Feuchtgewicht erhalten wird, von der des zur Kalibrierung verwendeten Materials ab, so ist eine entsprechende Absorptionskorrektur vorzunehmen [21].

b) zum Messen der Probe in getrockneter Form:

Steht nur wenig oder auch höher kontaminiertes Material zur Verfügung, so kann die Messung der Probe in getrockneter Form als Pellet (Pressling) oder auch in pulverisierter Form in einer Kunststoffdose oder Weithalsflasche in zylindrischer Messgeometrie durchgeführt werden (siehe Abschnitt 3.4).

- Ca. 200 g einer feuchten Probe ( $m_F$ ) werden in einer Porzellanschale im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 12 von 31

Stand: Sept. 2006

- Der Rückstand wird nach dem Erkalten in einem Achatmörser oder einer Kugelmühle staubfein zermahlen.
- Eine genau abgewogene Menge ( $m_p = 86$  g) der feingepulverten Probe wird in einer elektrohydraulischen Presse bei einem Druck von 40 t zu einem zylindrischen von äußerst konstanten Abmessungen (Probendurchmesser: 50 mm; Probenhöhe: 23 mm; Masse der Probe: ca. 86 g, je nach Dichte) verarbeitet.
- Alternativ hierzu kann eine genau abgewogene Menge  $m_p$  der feingepulverten Probe in eine Kunststoffdose oder Weithalsflasche mit zylindrischer Messgeometrie gefüllt und hermetisch verschlossen werden.
- Anschließend wird die Probe in einer gammaspektrometrischen Messanordnung bei Messzeiten von bis zu etwa  $t_p = 60.000$  s gemessen. Längere Messzeiten sind wegen der größeren verfügbaren Probenmasse in der Regel nicht erforderlich.

### 3.4 Messung der Aktivität - Anforderungen an Messmethodik und -geräte

Aus dem vorangehend postulierten Überwachungsziel für die Oberflächenwässer ergeben sich sowohl bezüglich der Empfindlichkeit als auch hinsichtlich der Durchführung Forderungen an die anzuwendenden Verfahren.

#### 3.4.1 Gesamt- und Rest-Beta-Messung

Die folgenden Ausführungen gelten für Schwebstoff und Sediment.

##### 3.4.1.1 Hinweise zur Messanordnung

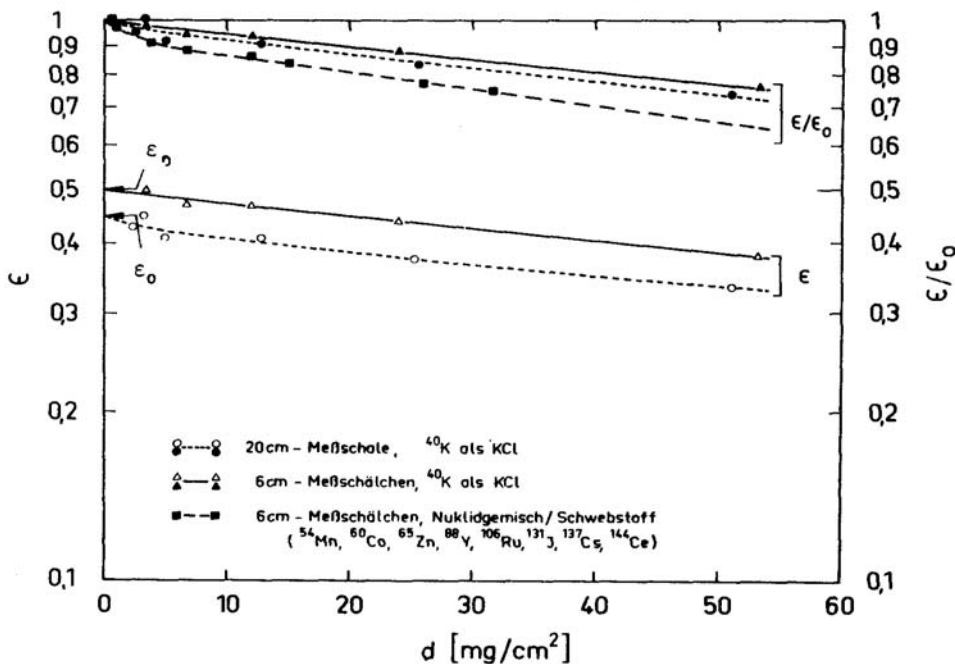
Die Messung der Messpräparate erfolgt im Beta-Plateau eines mit K-40 kalibrierten Proportionalzählers. Durch geeignete Wahl der Zählrohrspannung ist eine selektive Erfassung von Strahlern im Plateau und die simultane Messung von Alpha- und Beta-Strahlern im  $\beta$ -Plateau möglich. Eine getrennte Auswertung der spezifischen Alpha- und Beta-Aktivität erfordert einen Impulsformanalysator in der Messvorrichtung.

Zur Erzielung eines möglichst niedrigen Nulleffektes (typisch für 60 bis 200 mm-Messschalen:  $0,01 - 0,02$  s<sup>-1</sup> bis  $0,1 - 0,2$  s<sup>-1</sup>) ist eine ausreichende Abschirmung aus Blei oder Stahl vorzusehen (mind. 5 cm Stärke). Mit antikoinzident geschaltetem Schirmzähler kann der Nulleffekt weiter spürbar reduziert und damit die Empfindlichkeit der Messung gesteigert werden.

Zur Überprüfung der Langzeitkonstanz sowie der Zählhausbeute der Messanordnung sind in angemessenen zeitlichen Abständen regelmäßig Kontrollmessungen mit Standardpräparaten vorzunehmen. Zur Erfassung etwaiger Kontaminationen und Unregelmäßigkeiten ist eine Messung der Nulleffektzählrate fortlaufend durchzuführen.

##### 3.4.1.2 Kalibrierung der Messanordnung

Die Kalibrierung der Messanordnung mit K-40 in der Form von KCl muss stets unter den gleichen Messbedingungen (Messgeometrie, Arbeitsspannung u.a.) erfolgen, unter denen die eigentlichen Messpräparate gemessen werden. Da bei konstanter Flächenbelegung  $d$  der Messpräparate gemessen wird, sind Selbstabsorptionskorrekturen i. A. nicht erforderlich. Bei abweichenden Schichtdicken  $d$  müssen jedoch die jeweiligen Zählhausbeuten  $\epsilon_{K40}$  bzw. eine entsprechende Selbstabsorptionskorrektur vorgenommen werden (siehe Abb. 1).



**Abb. 1:** Verlauf der Zählausbeute  $\epsilon$  ( $\epsilon_{K40}$ ) bzw. der relativen Zählausbeute  $\epsilon/\epsilon_0$  ( $d = 0$ ) in Abhängigkeit von der Flächenbelegung  $d$  für K-40 und ein typisches Radionuklidgemisch.

Die für K-40 bei einer Schichtdicke  $d$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) auftretende Zählausbeute  $\epsilon_{K40}$  erhält man aus der gemessenen Zählrate  $R_{K40}$  ( $\text{s}^{-1}$ ) und der über die Einwaage von KCl berechneten Aktivität  $a_{K40}$  ( $1 \text{ mg K}^+ \equiv 0,0277 \text{ Bq}$ ;  $1 \text{ mg KCl} \equiv 0,0145 \text{ Bq}$ ) wie folgt:

$$\epsilon_{K40} = \frac{R_b - R_0}{a_{K40}} = \frac{R_{K40}}{0,0277 m_K} = \frac{R_{K40}}{0,0145 m_{KCl}} \quad (1)$$

Die Herstellung der zur Kalibrierung verwendeten Messpräparate erfolgt analog wie unter Abschnitt 3.3.2.1.2 beschrieben.

### 3.4.2 Gammaskopmetrische Messung

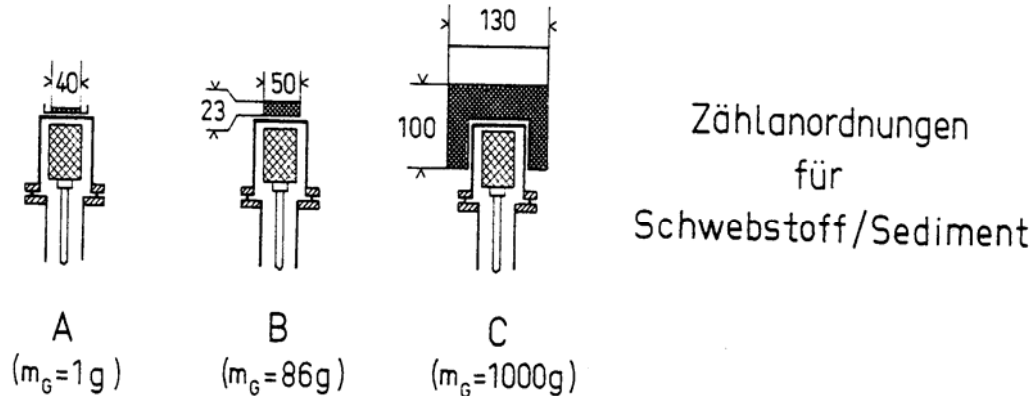
#### 3.4.2.1 Hinweise zur Messanordnung

Die derzeit kommerziell erhältlichen HPGe-Detektoren sind zur Messung von Radionukliden mit Gamma-Energien im Energiebereich von ca. 60 bis 3000 keV geeignet. Hiermit können praktisch alle relevanten Spalt- und Aktivierungsprodukte erfasst werden. Müssen auch Gamma-Strahler mit Energien deutlich unterhalb von 100 keV noch gemessen werden, sind mit Vorteil Germaniumdetektoren vom n-Typ zu verwenden ([22], Kapitel IV.1.1).

Um die bei den verschiedenen Überwachungsaufgaben anfallenden Schwebstoff- und Sedimentproben effizient verarbeiten zu können, empfiehlt sich eine Kalibrierung des Detektors mit mehreren Probenkonfigurationen [23, 24]. Drei der besonders gebräuchlichen Zählansordnungen sind in Abb. 2 zusammengestellt.

Als Detektoren kommen ausschließlich großvolumige Detektoren mit mind. 25 % Zählausbeute zur Anwendung. Die Energieauflösung sollte bei max. 1,9 keV für 1,33 MeV von Co-60 betragen. Zur Untersuchung von Umweltproben empfiehlt sich die Anschaffung von Detektoren in *low-level*-Ausführung, bei deren Herstellung besonders aktivitätsarme Materialien bzw. Bauteile eingesetzt wurden. Die Auswertung der Gamma-Spektren erfolgt zweckmäßigerweise mit Hilfe von rechnergestützten Mess- und Auswerteeinrichtungen im

on-line-Betrieb auf PC-Basis. Pro Spektrum sollten mind. 4000 Kanäle zur Verfügung stehen ([22], Kapitel IV.1.1) mit einer resultierenden Energieauflösung von 0,5 keV/Kanal.



**Abb. 2:** Verschiedene Zählordnungen zu gammaspektrometrischen Einzelnuklidbestimmungen in Schwebstoff- und Sedimentproben (Maße in mm).

Zur Steigerung der Empfindlichkeit der Messanordnung ist eine ausreichende Abschirmung mit aktivitätsarmen Materialien vorzusehen. Hierzu kann folgende abgestufte Abschirmung empfohlen werden, mit der gleichzeitig auch die sekundäre Streu- und Fluoreszenzstrahlung innerhalb der Abschirmung wirksam reduziert werden kann [25]:

Pb (10 – 15 cm) – Sn (0,1 cm) - Cu (0,2 cm),

wobei die inneren 3 cm frei von Pb-210 sein sollten. Zu dicke Schichten aus Material mit geringer Protonenzahl sollte man vermeiden. Plexiglas hat den Nachteil Radonfolgeprodukte anzuziehen wenn statische Elektrizität vorhanden ist. Weitere Hinweise können dem LB 3.1.12.3 [26] Abschnitt 3.4 sowie [27, 28] entnommen werden.

### 3.4.2.2 Kalibrierung der Messanordnung

#### 3.4.2.2.1 Kalibrierung hinsichtlich der Energie

Siehe [26].

#### 3.4.2.2.2 Kalibrierung hinsichtlich der Peakzählausbeute

Die Bestimmung der Peakzählausbeute  $\varepsilon_r$  als Funktion der Gamma-Energie  $E_\gamma$  hat für jeden Detektor und jede einzelne Zählordnung gesondert mit Standardpräparaten bekannter spezifischer Aktivität  $a_r$  zu erfolgen. Hierbei müssen die gleichen Messbedingungen hinsichtlich Messgeometrie, Dichte der Probe u.a. vorliegen, bei denen die eigentlichen Umweltproben auch gemessen werden sollen.

Eine Kalibrierung der Messanordnung zur Absolutbestimmung von Radionukliden in Sedimentproben kann nuklidspezifisch oder aber energiespezifisch erfolgen. Hierzu kann das von der Bundesanstalt für Gewässerkunde im Rahmen von Vergleichsanalysen bereitgestellte und mit ausgewählten Radionukliden markierte Material verwendet werden [29]. Falls Sedimentproben in getrockneter Form gemessen werden sollen, bei denen das effektive Schüttgewicht nahe 1,0 liegt, können auch die von der Physikalisch-Technische Bundesanstalt lieferbaren Standardlösungen (Aktivitätsnormale) zur Kalibrierung eingesetzt werden. Aus der gemessenen Peakzählrate  $R_n$  ( $s^{-1}$ ) von Radionuklid  $r$ , der in der Standardprobe vorgegebenen bzw. bekannten spezifischen Aktivität  $a_r$  (Bq/kg) sowie der eingesetzten Probenmasse  $m_p$  (kg) erhält man die nuklidspezifische Peakzählausbeute  $\varepsilon_r$  zu:

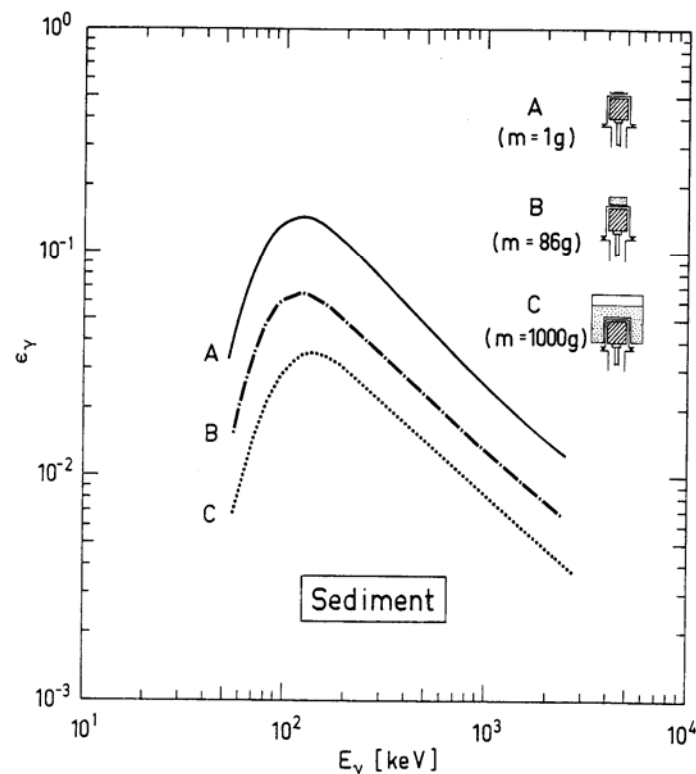
$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{R_n}{a_r m_p} \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung der Häufigkeit der Gamma-Linie (Emissionswahrscheinlichkeit)  $p_{\gamma}$  erhält man hieraus die häufiger verwendete energiespezifische Peakzählausbeute  $\varepsilon_{\gamma}$  zu:

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{R_n}{a_r p_{\gamma} m_p} \quad (3)$$

Der Verlauf der energiespezifischen Peakzählausbeute  $\varepsilon_{\gamma}$  ist für den Energiebereich zu ermitteln, in dem Radionuklide bestimmt werden sollen. Hierzu sind nach Möglichkeit Gammastrahler mit nicht koinzidenten Übergängen einzusetzen (z.B. Am-241, Co-57, Ce-139, Ce-141, Hg-203, Cr-51, Sn-113, Be-7, Cs-137, Mn-54, Zn-65, Fe-59 und K-40). In Abb. 3 ist die energiespezifische Peakzählausbeute  $\varepsilon_{\gamma}$  als Funktion von  $E_{\gamma}$  für drei in der Messpraxis gebräuchliche Zählordnungen in doppellogarithmischem Maßstab aufgetragen [23, 24].

So kann aus Abb. 3 entnommen werden, dass zwar die höchsten  $\varepsilon_{\gamma}$ -Werte mit Zählordnung A (50 mm-Messschälchen;  $m_p = 1$  g) erhalten wurden. Da in Zählordnung C (1 L-Ringschale;  $m_p = 1000$  g) jedoch eine Probenmasse von 1000 g gemessen werden kann, können hiermit bei sonst gleichen Messbedingungen wesentlich niedrigere konzentrationsbezogene Erkennungsgrenzen  $g_r$  erhalten werden.



**Abb. 3:** Energiespezifische Peakzählausbeute  $\varepsilon_{\gamma}$  ( $\varepsilon_{K40}$ ) (in Abhängigkeit von der Gamma-Energie für Zählordnung A, B und C (Sediment-/Schwebstoffmessung))

#### 3.4.2.2.3 Korrektur der Zählverluste bei Kaskadenstrahlern

Siehe [27] und LB-Nr 3.1.12.3 [26] Abschnitt 3.4.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 16 von 31

Stand: Sept. 2006

#### 3.4.2.2.4 Störungen

Siehe [27] und LB-Nr 3.1.12.3 [26] Abschnitt 3.4.

### 4 Berechnung des Analysenergebnisses

Die heutigen Auswertprogramme verfügen über Algorithmen, um die Peakflächen und den Untergrund zu berechnen und ermöglichen die komplette Auswertung einzelner spezifischer Aktivitäten mit Angabe ihrer Gesamtunsicherheit bei vorgegebener statistischer Sicherheit.

#### 4.1 Gesamt- und Rest-Beta-Messung

Die folgenden Ausführungen gelten für Schwebstoff und Sediment.

Schwebstoff- und Sedimentproben unterschiedlicher Herkunft weisen schwankende Gehalte an Kalium auf, die sich mitunter um eine Größenordnung und mehr unterscheiden können. Proben gleicher Herkunft weisen demgegenüber nur geringfügig unterschiedliche Gehalte an Kalium auf, das über das Radionuklid K-40 (Isotopenhäufigkeit:  $q_{K40} = 0,011672 \%$ ; Halbwertszeit:  $t_{1/2K40} = 1,277 \cdot 10^9$  Jahre [30] zum Messwert  $R_b$  beiträgt. Beim Zerfall von K-40 werden  $\beta$ -Teilchen mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p_\beta = 0,8933$  und  $\gamma$ -Quanten mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p_\gamma = 0,1067$  emittiert (30). Unter Zugrundelegung dieser Zerfallsdaten erhält man folgende Äquivalenz zwischen Kaliumkonzentration  $w_K$  (mg/kg) und spezifischer Aktivität  $a_{K40}$  (Bq/kg) [6]:

$$a_{K40} = 0,0276 w_K \quad (\text{Bq/kg}) \quad (4)$$

Neben K-40 werden im  $\beta$ -Plateau eines Proportionalzählers auch Alpha-Strahler mit unterschiedlicher Zähl- ausbeute mitgemessen. Werden erhöhte Anteile an Alpha-Strahlern vermutet, ist das Messpräparat zusätzlich im  $\alpha$ -Plateau auszumessen [31]. Man erhält somit aus der ermittelten spezifischen Aktivität  $a_{G\beta}$  (Bq/kg) unter Berücksichtigung des K-40-Anteils  $a_{K40}$  (Bq/kg) die gesuchte spezifische Aktivität  $a_{R\beta}$  (Bq/kg) zu:

$$a_{R\beta} = a_{G\beta} - a_{K40} - a_{G\alpha} \approx a_{G\beta} - a_{K40} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (5)$$

Die Berechnung der auf K-40 bezogenen spezifischen Rest-Beta-Aktivität  $a_{R\beta}$  einer konkreten Schwebstoff- oder Sedimentprobe erfolgt nach folgender Beziehung:

$$a_{R\beta} = \frac{R_b - R_{K40} - R_o}{\varepsilon_{K40} \cdot m_p} = \frac{R_n}{\varepsilon_{K40} \cdot m_p} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (6)$$

mit:

$$R_{K40} = 0,0276 \varepsilon_{K40} w_K m_p \quad (s^{-1}) \quad (7)$$

Eine Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls zwischen Zeitpunkt der Probenentnahme und der Messung ist bei der  $R_\beta$ -Bestimmung i. A. nicht erforderlich.

Die bei einer  $R_\beta$ -Messung auftretende statistische Zählunsicherheit  $s_n$  der Nettozählrate  $R_n$  wird nach folgender Beziehung berechnet:

$$s_n = \sqrt{\frac{R_o}{t_o} + \frac{R_b}{t_b} + (s_{R_{K40}})^2} \quad (s^{-1}) \quad (8)$$

mit:

$$s_{R_{K40}} = 0,0276 \varepsilon_{K40} w_K m_p s_{w_K}^{rel} \quad (s^{-1}) \quad (9)$$





**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 17 von 31

Stand: Sept. 2006

Hieraus errechnet sich die zählstatistische Unsicherheit einer  $R_{\beta}$ -Messung  $s(a_{R_{\beta}})$  zu:

$$s(a_{R_{\beta}}) = \frac{S_n}{\varepsilon_{K40} m_p} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (10)$$

und die relative Standardabweichung  $s(a_{R_{\beta}})/a_{R_{\beta}}$  (Variationskoeffizient):

$$\frac{s(a_{R_{\beta}})}{a_{R_{\beta}}} = \frac{S_n}{\varepsilon_{K40} m_p a_{R_{\beta}}} \quad (11)$$

### Rechenbeispiel

Ermittlung der spezifischen Rest-Beta-Aktivität  $a_{R_{\beta}}$  einer Schwebstoff- oder Sedimentprobe:

Messzeit des Nulleffektes	$t_o$	= 60000 s
Messzeit der Probe	$t_b$	= 6000 s
Zählausbeute der Messanordnung	$\varepsilon_{K40}$	= 0,40
Nulleffektzählrate	$R_0$	= 0,017 s <sup>-1</sup>
Bruttozählrate	$R_b$	= 0,085 s <sup>-1</sup>
Kaliumgehalt der Probe	$w_K$	= 10000 mg/kg
Masse des Messpräparates	$m_p$	= 0,0003 kg TM
Zählrate des K-40-Anteils:	$R_{K40}$	= 0,033 s <sup>-1</sup> (aus Gleichung (7))
Rel. Standardabweichung der Kaliumbestimmung	$s_{rel}(w_K)$	= 0,05

Hieraus erhält man die gesuchte spezifische Aktivität  $a_{R_{\beta}}$  nach Gl. 6 zu:

$$a_{R_{\beta}} = \frac{0,085 - 0,033 - 0,017}{0,40 \cdot 0,0003} \quad \text{Bq / kg TM} = 290 \text{ Bq/kg TM}$$

Die zugehörige zählstatistische Unsicherheit  $s(a_{R_{\beta}})$  wird nach Gl. 10 berechnet:

$$s(a_{R_{\beta}}) = \frac{\sqrt{\frac{0,017}{60000} + \frac{0,085}{6000} + 0,0017^2}}{0,40 \cdot 0,0003} \quad \text{Bq / kg TM} = 35 \text{ Bq/kg TM}$$

Das Ergebnis der  $R_{\beta}$ -Bestimmung an einer Schwebstoff- oder Sedimentprobe mit der einfachen statistischen Zählunsicherheit lautet somit:

$$a_{R_{\beta}} = (290 \pm 35) \text{ Bq/kg TM}$$

bzw.  $a_{R_{\beta}} = 290 \text{ Bq/kg TM} \pm 12 \%$

## 4.2 Gammaspktrometrische Messung

Die folgenden Ausführungen gelten für Schwebstoff und Sediment.

Bei einer gammaspktrometrischen Einzelnuklidbestimmung erfolgt die meist rechnergestützt durchgeführte Ermittlung der spezifischen Aktivität  $a_r$  der Schwebstoff- oder Sedimentprobe nach folgender Beziehung:

$$a_r = \frac{R_n}{\varepsilon_r m_p} = \frac{R_n}{\varepsilon_r p_{\gamma} m_p} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (12)$$



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14  
 Seite: 18 von 31  
 Stand: Sept. 2006

Wird nur ein Aliquot  $m_F$  zur Trocknung eingesetzt, so erhält man aus dem Rückstand  $m_p$  somit die spezifische Aktivität  $a_r$  zu:

$$a_r = \frac{R_n}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m_F \frac{m'_p}{m'_F}} = \frac{R_n}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m_F q_T} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (13)$$

mit:  $m'_p = m'_F q_T \quad (14)$

Bei der Messung kurzlebiger Gammastrahler ist stets die Mitte des Messzeitintervalles als Bezugszeitpunkt  $t_M$  zu wählen. Zur Umrechnung auf den Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_p$  ist Gleichung 13 entsprechend zu erweitern:

$$a_r(t_p) = \frac{R_n \exp[\lambda_r(t_M - t_p)]}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m_p} = \frac{R_n f_{HWZ}^r}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m_p} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (15)$$

Zählverluste bei Kaskadenstrahlern (z.B. Co-60, Cs-134 u.a.) sind entsprechend Abschnitt 3.4.2.2.3 zu korrigieren.

Die bei einer gammaspektrometrischen Einzelnuklidbestimmung auftretende statistische Zählunsicherheit  $s_n$  der Peakzählrate  $R_n$  kann aus der mittleren kanalbezogenen Untergrundzählrate  $\overline{r_u}$  ( $\text{s}^{-1} \text{ Kanal}^{-1}$ ), der Halbwertsbreite  $h$  (Kanäle) und der Messzeit  $t_b$  (s) wie folgt berechnet werden:

$$s_n = \sqrt{\frac{R_n + 3,40 \cdot h \cdot \overline{r_u}}{t_b}} \quad (\text{s-1}) \quad (16)$$

Diese Gleichung entspricht der in [32] bei der Definition des Vertrauensbereichs (Gl. 2.18) angegebenen Beziehung für  $s(R_n)$  unter der Voraussetzung, dass  $b/2L = 1$  ist, der vermutlich häufigste Anwendungsfall (Erläuterung siehe Abschnitt 9). Da der Verlauf von Photopeaks in guter Näherung durch eine Normalverteilung approximiert werden kann, wird als auswertbarer Peakbereich der Spektrumsabschnitt definiert, der 95 % der gesamten Peakfläche - entsprechend 1,7 h - umfasst. Somit erhält man die statistischen Zählunsicherheit  $s(a_r)$  einer gammaspektrometrischen Einzelnuklidbestimmung zu:

$$s_{a_r} = \frac{s_n}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m_p} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (17)$$

bzw. die relative Standardabweichung (Variationskoeffizient)  $s(a_r)/a_r$  zu:

$$\frac{s(a_r)}{a_r} = \frac{s_n}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m_p a_r} \quad (18)$$

Rechenbeispiel:

Ermittlung der spezifischen Aktivität von Cs 137 einer Sedimentprobe

Zeitpunkt der Probenentnahme:	$t_p$	= 01.03.2001
Zeitpunkt der Messung:	$t_M$	= 01.09.2001
Messzeit der Probe:	$t_b$	= 60000 s
Peakzählausbeute bei 661,6 keV:	$\varepsilon_\gamma$	= 0,0200
Emissionshäufigkeit für Cs-137:	$p_\gamma$	= 0,850
Trockenmasse der Probe (Pellet-Geometrie):	$m_p$	= 0,086 kg TM
Zerfallskonstante von Cs-137:	$\lambda_{\text{Cs137}}$	= 0,0231 $\text{a}^{-1}$
Peakhalbwertsbreite bei 661,6 keV:	$h$	= 1,5 Kanäle
Peakzählrate:	$\overline{R_n}$	= 0,080 $\text{s}^{-1}$
Mittlere kanalbezogene Untergrundzählrate bei 661,6 keV:	$\overline{r_u}$	= 0,00077 $\text{s}^{-1} \text{ Kanal}^{-1}$



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 19 von 31

Stand: Sept. 2006

Hieraus erhält man die gesuchte spezifische Aktivität der Sedimentprobe  $a_{\text{Cs137}}$  zum Zeitpunkt der Messung  $t_M$  nach Gleichung 12 zu:

$$a_{\text{Cs137}} = \frac{0,080}{0,0200 \cdot 0,850 \cdot 0,086} \text{ Bq / kg TM} = 54,7 \text{ Bq / kg TM}$$

und zum Zeitpunkt der Probeentnahme  $t_p$  nach Gleichung 15 zu:

$$a_{\text{Cs137}}(t_p) = 54,7 \exp(0,0231 \cdot 0,50) \text{ Bq/kg TM} = 55,3 \text{ Bq/kg TM}$$

Die zugehörige statistische Zählunsicherheit für den Zeitpunkt der Messung  $t_M$  wird nach den Gleichungen 16, 17 und 18 erhalten:

$$s(a_{\text{Cs137}}) = \frac{\sqrt{\frac{0,0800 + 3,40 \cdot 1,5 \cdot 0,00077}{60000}}}{0,0200 \cdot 0,850 \cdot 0,086} \text{ Bq / kgTM} = 0,81 \text{ Bq / kgTM}$$

Das Ergebnis der Bestimmung von Cs-137 in einer Schwebstoff- oder Sedimentprobe zum Zeitpunkt der Probenentnahme  $t_p$  mit der einfachen statistischen Zählunsicherheit lautet somit:

$$a_{\text{Cs137}}(t_p) = (55,3 \pm 0,8) \text{ Bq/kg TM}$$

bzw:  $a_{\text{Cs137}}(t_p) = 55,3 \text{ Bq/kg TM} \pm 1,5 \%$

## 5 Erreichbare Erkennungs- und Nachweisgrenzen des Verfahrens

Die heutigen Auswerteprogramme verfügen über Algorithmen, die, abgesehen vom Ergebnis samt Unsicherheit, auch die Erkennungs- und/oder Nachweisgrenzen bei vorgegebenen Quantilen der Normalverteilung angeben.

### 5.1 Gesamt- und Rest-Beta-Messung

Die folgenden Ausführungen gelten für Schwebstoff und Sediment.

Die bei einer  $R_\beta$ -Messung für eine vorgegebene Probenmasse  $m_p$  erreichbare Erkennungsgrenze  $g_{R\beta}$  ist sowohl von weitgehend festliegenden apparativen Parametern, wie

- Nulleffektzählrate  $R_o$ , (abhängig von Abschirmung, Ortsdosisleistung und inhärentem Nulleffekt)
- Zählausbeute (abhängig von Messgeometrie, Detektorkonstruktion und Zählrohrfenster)

als auch von variablen Größen, wie

- Messzeit  $t_b$
- Kaliumkonzentration der Proben  $w_K$
- Quantil der Normalverteilung für die statistische Sicherheit  $k_{1-\alpha}$

abhängig.

Bei einer  $R_\beta$ -Messung an Schwebstoff- und Sedimentproben wird eine Zählrate  $R_n$  erst dann als nachgewiesen angesehen, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$R_b - R_{K40} - R_o = R_n \geq k_{1-\alpha} \cdot s_n \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (19)$$

Die Standardabweichung  $s_n$  der Nettozählrate  $R_n$  erhält man nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz zu:

$$s_n = \sqrt{s^2(R_b) + s^2(R_o) + s^2(R_{K40})} \quad (s^{-1}) \quad (20)$$

und hieraus:

$$s_n = \sqrt{\frac{R_b}{t_b} + \frac{R_o}{t_o} + s^2(R_{K40})} \quad (s^{-1})$$

Dies ist identisch mit der zählstatistischen Unsicherheit (Gleichung 8). Durch Einsetzen dieser Gleichung 8 in Gleichung 19, Lösen der quadratischen Gleichung und mit entsprechender Umformung erhält man aus in der Messpraxis leicht zugänglichen Daten bei Zeitvorwahl die gesuchte Erkennungsgrenze  $g_{R\beta}^*$  wie folgt:

$$g_{R\beta}^* = \frac{k_{1-\alpha}^2 + \sqrt{k_{1-\alpha}^4 + 4 t_b k_{1-\alpha}^2 [R_o (1 + t_b / t_o) + R_{K40} + t_b s^2(R_{K40})]}}{2 t_b \varepsilon_{K40} m_p} \quad (\text{Bq/kg TM}) \quad (21)$$

Für in der Messpraxis übliche Messbedingungen, d.h. für hinreichend große Impulszahlen des Nulleffekts, kann Gleichung 21 weiter vereinfacht werden und man erhält in guter Näherung für die Erkennungsgrenze  $g_{R\beta}^*$  einer  $R_{\beta}$ -Messung [10].

$$g_{R\beta}^* = \frac{k_{1-\alpha}}{\varepsilon_{K40} m_p} \sqrt{R_o \left( \frac{1}{t_o} + \frac{1}{t_b} \right) + \frac{R_{K40}}{t_b} + s^2(R_{K40})} \quad (\text{Bq/kg TM}) \quad (22)$$

Diese Gleichung ist identisch mit den in [32 - 34] angegebenen Ausdrücken bei Zeitvorwahl wenn diese mit den Unsicherheiten zur Bestimmung von K-40 ergänzt werden. So beträgt nach Gleichung 22 für eine Zählordnung mit einer Zählrohrbeute  $\varepsilon_{K40} = 0,40$  und einer Nulleffektzählrate  $R_o = 0,017 \text{ s}^{-1}$ , einer Messzeit für Nulleffekt  $t_o = 60000 \text{ s}$  und Messpräparat  $t_b = 6000 \text{ s}$ , einer Probenmasse  $m_p = 0,0003 \text{ kg}$ , einem Kaliumgehalt der Schwebstoff- oder Sedimentprobe von  $w_K = 10^4 \text{ mg/kg}$  und einer relativen Unsicherheit der Kaliumbestimmung von  $s(w_K)/w_K = 0,05$  die für ein Quantil der Normalverteilung  $k_{1-\alpha} = 1,645$  (d.h. 5 % Unsicherheitswahrscheinlichkeit) erreichbare Erkennungsgrenze  $g_{R\beta}^* = 46 \text{ Bq/kg}$ .

Die Berechnung der Nachweisgrenze bei Zeitvorwahl erfolgt nach der folgenden Gleichung:

$$g_{R\beta} = \frac{(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})}{\varepsilon_{K40} m_p} \left\{ \sqrt{R_o \left( \frac{1}{t_o} + \frac{1}{t_b} \right) + \frac{R_{K40}}{t_b} + s^2(R_{K40})} + \frac{1}{4} (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})^2 \left( \frac{1}{t_o} + \frac{1}{t_b} \right) \right\} \quad (\text{Bq/kg TM}) \quad (23)$$

Für hinreichend große Impulszahlen des Nulleffekts, kann Gleichung 23 weiter vereinfacht werden und man erhält in guter Näherung für die Nachweisgrenze  $g_{R\beta}$  einer  $R_{\beta}$ -Messung [10]:

$$g_{R\beta} = \frac{(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})}{\varepsilon_{K40} m_p} \sqrt{R_o \left( \frac{1}{t_o} + \frac{1}{t_b} \right) + \frac{R_{K40}}{t_b} + s^2(R_{K40})} \quad (\text{Bq/kg}) \quad (24)$$

Auch diese Gleichung ist identisch mit den in [32 - 34] angegebenen Ausdrücken wenn diese mit den Unsicherheiten zur Bestimmung von K-40 ergänzt werden. So beträgt nach Gleichung 24 für die beschriebene Zählordnung unter den gleichen Messbedingungen und für Unsicherheitswahrscheinlichkeiten  $\alpha$  und  $\beta$  von jeweils 5 % (d.h. mit den entsprechenden Quantilen der Normalverteilung von 1,645) die Nachweisgrenze  $g_{R\beta} = 92 \text{ Bq/kg}$ .

Für den Bezug auf andere Betastrahler müssen die entsprechenden Zählrohrbeuten verwendet werden und es entfallen die Terme, die die Zählrate für K-40 beinhalten.



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14  
 Seite: 21 von 31  
 Stand: Sept. 2006

**Tabelle 2:** Beispiel für erreichbare Erkennungs- (EG) und Nachweisgrenzen (NWG) nach [10, 32 – 34], für  $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$ ; Unsicherheitswahrscheinlichkeit = 5 %) Messzeit Nulleffekt: 60.000 s; Messzeit Probe: 6.000 s; restliche Parameter siehe Text. Art der Messung:  $R_\beta$ - bzw.  $G_\beta$ -Messung am Messgerät Mini 20, Fa. Eurisys  
 Aktive Fläche: 16,6 cm<sup>2</sup> (5 cm-Schälchen); 254 cm<sup>2</sup> (20 cm-Schälchen)

Radionuklid	Energie $E_\beta$ max (keV)	Art der Messung	Messgeometrie		Null-effekt $R_0$ (s <sup>-1</sup> )	Zähl-ausbeute $\epsilon_{K40}$ (%)	Proben-masse $m_p$ (kg)	EG $g_r^*$ ( $\frac{Bq}{kg TM}$ )	NWG $g_r$ ( $\frac{Bq}{kg TM}$ )
			Schalen-durch-messer (cm)	Flächen-belegung (mg/cm <sup>2</sup> )					
K-40	1314	$R_\beta$	5	18	0,05	35,3	0,0003	62	125
		$R_\beta$	20	12	0,38	40	0,003	27	55
		$G_\beta$	5	18	0,05	35,3	0,0003	62	125
		$G_\beta$	20	12	0,38	40	0,003	27	55
Sr-90	543	$R_\beta$	5	18	0,0107	17	0,00023	59	118
		$R_\beta$	20	12	0,38	19	0,003	24	48
Y-90 <sup>1)</sup> (Sr-90)	2283	$R_\beta$	5	18	0,0107	36	0,00023	28	56
		$R_\beta$	20	12	0,38	41	0,003	11	22

<sup>1)</sup> indirekte Bestimmung des Sr-90 z.B. durch Messung als abgetrenntes Yttriumoxalat

## 5.2 Gammaskopimetrische Messung

Die folgenden Ausführungen gelten für Schwebstoff und Sediment.

Die bei einer gammaskopimetrischen Einzelnuklidbestimmung erreichbaren nuklid- bzw. energiespezifischen Erkennungsgrenzen  $g_r^*$  bzw.  $g_r$  (Bq/kg) werden von weitgehend festliegenden Parametern, wie

- Comptonuntergrund  $r_u$  (abhängig von Aktivität und Radionuklidgemisch der Probe, Abschirmung, Ortsdosisleistung im Labor, Detektormaterialien u. a.)
- Peakzählhausbeute  $\epsilon_\gamma$  bzw.  $\epsilon_r$  (abhängig von Detektorgröße, Zählgeometrie u.a.)
- Halbwertsbreite  $h$  (abhängig von Detektor sowie von Haupt- und Vorverstärker u.a.)

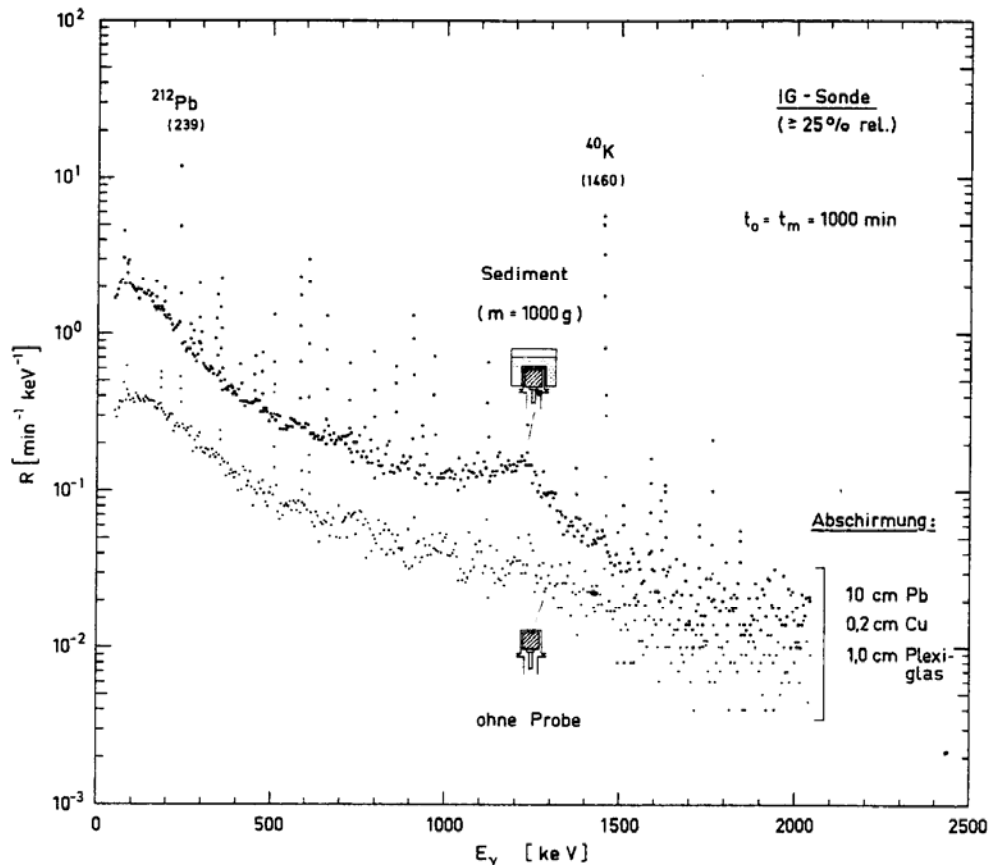
sowie von, in weiten Grenzen variierenden Größen

- Probenmasse  $m_p$
- Messzeit  $t_b$
- Zusammensetzung der Messprobe (z. B. Dichte der Matrix)

bestimmt. Da Radionuklidgehalte stets auf den Zeitpunkt der Probenentnahme  $t_p$  zu beziehen sind, ist auch die Halbwertszeit insbesondere von kurzlebigen Radionukliden von Einfluss.

Zur Veranschaulichung des Einflusses der die Höhe der Erkennungsgrenze bestimmenden Spektrumsuntergrundes wurde der Spektrumsverlauf, einerseits ohne und zum anderen mit einer relativ unbelasteten Sedimentprobe (Ringschale,  $m_p = 1000$  g) in einer konventionellen Halbleiteranordnung bei einer Messzeit von  $t_b = 1000$  min gemessen, beispielhaft einmal in Abb. 4 aufgetragen [24]. Hieraus kann entnommen werden, dass die Höhe des Comptonuntergrundes über den nahezu gesamten Energiebereich entscheidend durch die in der Probe vorhandenen Radionuklide bestimmt wird, wobei das K-40 eine besondere Rolle einnimmt. Die Anhebung des Spektrumsuntergrundes um einen Faktor von ca. 4 bedeutet eine Erhöhung der Erkennungsgrenze der einzelnen Radionuklide um einen Faktor von ca. 2. Da aber der Feststoffanteil  $q_T$  von frisch entnommenen Sedimentproben erheblichen Schwankungen unterliegt und damit auch der Aktivitätsgehalt der

den Comptonuntergrund bestimmenden Radionuklide, ist bei der Messung der Probe in feuchtem Zustand von entsprechenden Auswirkungen auf die im Einzelfall zu erwartenden Erkennungsgrenzen auszugehen (siehe auch [27]).



**Abb. 4:** Comptonuntergrund eines Ge-Detektors (25 %, rel.), gemessen ohne Probe bzw. mit einer typischen Sedimentprobe (Zählordnung C,  $m_p = 1000$  g) mit einer Abschirmung von 10 cm Pb - 0,2 cm Cu - 1 cm Plexiglas

Zur Berechnung der nuklidspezifischen Erkennungsgrenzen  $g_r^*$  (EG) und Nachweisgrenzen  $g_r$  (NWG) der Aktivitätskonzentration werden in der Literatur verschiedene Formeln angegeben, die auf unterschiedlichen Vorschriften und Entscheidungskriterien für die Berechnung des Peakuntergrundes beruhen [14, 33, 35-37]. Sie basieren im Wesentlichen auf den Grundformen:

$$\text{EG:} \quad g_r^* = \frac{R_n^*}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m_p} \quad (25)$$

$$\text{NWG:} \quad g_r = \frac{R_n}{\varepsilon_\gamma p_\gamma m_p} \quad (26)$$

mit  $R_n^*$  bzw.  $R_n$  als Nettozählrate bei der Berechnung der Erkennungs- bzw. Nachweisgrenze und  $p_\gamma$  als Emissionswahrscheinlichkeit für die jeweils auszuwertende Gamma-Linie. Gemäß DIN 25 482, Teil 5 [36], sind für  $R_n^*$  und für  $R_n$  folgende Beziehungen einzusetzen:

Für die Berechnung der EG:

exakte Gleichung: 
$$R_n^* = \frac{k_{1-\alpha}^2}{2t_b} \frac{b}{2L} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4R_o t_b}{k_{1-\alpha}^2} \frac{2L}{b} \left( 1 + \frac{2L}{b} \right)} \right] \quad (27)$$

Näherungsgleichung: 
$$R_n^* \approx k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{R_o}{t_b} \left( 1 + \frac{b}{2L} \right)} \quad (28)$$

Für die Berechnung der NWG:

Exakte Gleichung: 
$$R_n = (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{R_o}{t_b} \left( 1 + \frac{b}{2L} \right)} + \frac{1}{4t_b} (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})^2 \left( 1 + \frac{b}{2L} \right) \quad (29)$$

Näherungsgleichung: 
$$R_n \approx (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{R_o}{t_b} \left( 1 + \frac{b}{2L} \right)} \quad (30)$$

Im Anhang sind zu Vergleichszwecken die Werte der Erkennungs- und Nachweisgrenzen für die in der rezenten Literatur angegebenen Gleichungen und Vorgaben für die zugrunde liegende Peakfußbreite  $b$  und die Quantile der Standardnormalverteilung für den Fehler 1. und 2. Art,  $k_{1-\alpha}$  bzw.  $k_{1-\beta}$ , beispielhaft für das Radionuklid Cs-137 angegeben.

In Abb. 5 ist beispielhaft der Verlauf der Peakhalbwertsbreite  $h$  in Abhängigkeit der Energie  $E_\gamma$  im Bereich von 60 bis 1836 keV für einen konventionellen Halbleiterdetektor einmal aufgetragen.

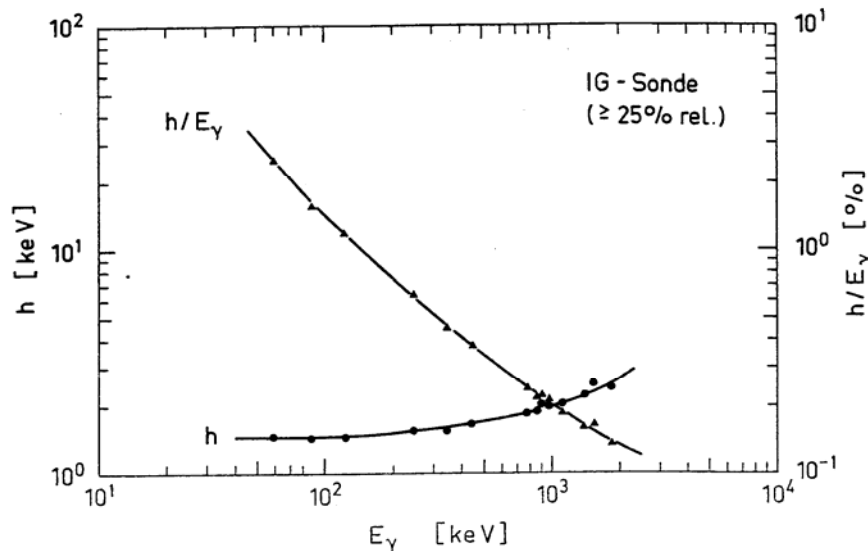


Abb. 5: Absolute bzw. relative Peakhalbwertsbreite  $h$  bzw.  $h/E_\gamma$  eines konventionellen Halbleiterdetektors im Bereich zwischen 50 und 2000 keV

Demzufolge können sich die aufgrund verschiedener Vorschriften als auch unterschiedlicher Berechnungsverfahren des Peakuntergrunds bedingten Kenngrößen um einen Faktor 2 bis 3 unterscheiden. Die niedrigsten Werte derselben erhält man bei Anwendung der DIN-Norm 25 482 Teil 5. Anhand dieser Berechnungsgrundlage können für  $m_p = 1$  kg TM,  $t_b = 70.000$  min,  $k = 1,96$  (Vertrauensbereich 95 %) und den in Tabelle 3 angegebenen Untergrund-Zählraten und Probenmengen die entsprechenden Nachweisgrenzen für einen



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14  
 Seite: 24 von 31  
 Stand: Sept. 2006

typischen HPGe-Detektor (p-Typ, 28 % rel. Effizienz) erreicht werden. Die Werte für  $R_u$ ,  $\varepsilon_{pk}^{\gamma}$  und  $h$  gelten für einen 140 cm<sup>3</sup> großen HPGe-Detektor.

**Tabelle 3:** Beispiel für erreichbare Nachweisgrenzen (nach DIN 25482, Teil 5, für  $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,96$ ) für eine gammaspektrometrische Messung mit Messgeometrie: 1 L-Ringschale aus Polyethylen direkt auf dem Detektor  
 Detektor: HPGe-Detektor, Volumen 140 cm<sup>3</sup>  
 Messzeit: 70000 s; Probenmasse  $m_p = 1$  kg  
 Probenahmezeitpunkt: 03.08.2004 Messbeginn: 28.08.2004

Radionuklid	Energie $E_{\gamma}$ (keV)	Gesamt- untergrund- Zählrate $R_u^{1)} = \Sigma r_u$ (s <sup>-1</sup> )	Zähl- ausbeute $\varepsilon_{\gamma}$ (%)	Peak- Halbwerts- breite $h$ (keV)	Nachweis- grenze $g_r$ (Bq/kg TM)
Be-7	477,6	0,027	1,44	1,75	2,4
K-40	1460,8	0,008	0,709	1,88	3,4
Cr-51	320,1	0,055	2,00	1,70	2,4
Mn-54	834,8	0,013	0,97	1,79	2,7
Fe-59	1099,3	0,008	0,82	1,27	0,51
Co-57	122,1	0,032	2,10	1,65	0,43
Co-58	810,8	0,014	0,99	1,30	0,29
Co-60	1332,5	0,024	0,742	1,85	0,28
Sr-85	514,0	0,025	1,37	1,85	0,26
Y-88	898,0	0,007	0,93	1,75	0,31
Zn-65	1115,6	0,003	0,82	1,88	0,57
Zr-95	724,2	0,011	1,05	1,64	0,60
Nb-95	765,8	0,003	1,02	1,80	0,28
Ru-103	497,1	0,026	1,40	1,80	0,27
Ru-106	621,8	0,025	1,18	1,70	2,5
Ag-110m	657,8	0,025	1,14	1,80	0,27
Sn-113	391,7	0,016	1,70	1,50	0,38
Sb-124	602,7	0,024	1,20	1,65	0,26
Sb-125	427,9	0,008	1,58	1,60	0,84
Cs-134	795,8	0,009	1,00	1,20	0,33
Cs-137	661,7	0,025	1,13	1,79	0,34
Ba-140	537,3	0,014	1,30	1,70	1,03
Ce-141	145,4	0,034	2,40	1,62	0,66
Ce-144	133,5	0,033	2,30	1,65	3,0
La-140	1596,0	0,001	0,68	1,80	0,27

<sup>1)</sup> bei der Gamma-Messung: Zählrate des Spektrumuntergrundes im Peakbereich,

Es ist zu betonen, dass derart berechnete Werte lediglich eine Orientierung zur Kennzeichnung der Empfindlichkeit eines gammaspektrometrischen Verfahrens darstellen können, da, wegen schwankender Gehalte ubiquitärer Radionuklide sowie stark variierender  $q_T$ -Werte, die jeweiligen Kennwerte bei den gleichen Messbedingungen von Probe zu Probe entsprechenden Schwankungen unterliegen. Mit den unter praxisnahen Bedingungen erreichbaren Nachweisgrenzen  $g_r$  können somit die im RMP zum StrVG [2] bzw. in der REI [3] vorgegebenen Nachweisgrenzen  $g_r^{\min}$  (siehe Abschnitt 2.3.2) leicht eingehalten werden. Weitere Hinweise können der Messanleitung [27] entnommen werden.





## **6 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte**

Die folgenden Ausführungen gelten für Schwebstoff und Sediment.

### **6.1 Gesamt- und Rest-Beta-Messung**

#### **Chemikalien**

- KCl, p. A.

#### **Geräte**

- Low-Level-Alpha-/Beta-Messplatz mit Proportionalzählrohr und antikoinzident geschaltetem Schirmzähler für 60 bis 200 mm-Messschalen
- Trockenschrank
- Muffelofen
- Achatmörser oder Kugelmühle
- Laborgrundausrüstung

### **6.2 Gammaskopmetrische Messung**

#### **Chemikalien**

- Standardpräparate in Pulverform (getrockneter und gemahlener Schwebstoff), markiert mit ausgewählten Radionukliden bekannter spezifischer Aktivität (Aktivitätsnormale)
- Standardlösungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig (alternativ)

#### **Geräte**

- Vielkanalanalysator mit Rechner zur Aufnahme und Auswertung der Gamma-Spektren im on-line-Betrieb sowie digitaler und analoger Messwertausgabe
- HPGe-Detektor ( $\geq 100 \text{ cm}^3$ ) mit einer rel. Ausbeute von  $> 25 \%$  und einer Energieauflösung von  $< 1,9 \text{ keV}$  bei  $1,33 \text{ MeV}$
- Trockenschrank mit Abzugsvorrichtung
- Elektrohydraulische Pulverpresse (optional)
- Achatmörser oder Kugelmühle
- Porzellanschalen,
- Kunststoffflaschen, 500 ml,
- Ringschalen aus Kunststoff (Marinelli-Becher) mit 0,5; 1 und 2 L Inhalt
- Laborgrundausrüstung

## **7 Probendokumentation**

Bezugspunkt für die Aktivitätsangabe ist für Zeit-Mischproben die Mitte ihres Sammelzeitraumes, für Stichproben der Zeitpunkt der Probenentnahme.

Beta-Zählraten werden üblicherweise auf Druckerpapier oder Diskette ausgegeben, die mit Angaben über Probenentnahmeort, Probenart, Mess- und Eichdaten des Messgerätes versehen werden. Modernere Geräte sind mit einem Steuerungsrechner versehen, deren Software es ermöglicht, die Aktivitätskonzentration in Bezug auf ein vorgewähltes Referenznuclid auszuwerten.

Vielkanalanalysatoreinheiten sind üblicherweise mit Steuerungs- und Rechnereinrichtungen verbunden. Dem Rechner müssen in jedem Fall Informationen über die Probe (Herkunft, Probenentnahmedatum und ggf. Besonderheiten zur Probe), die Eichung (Eichparameter, Ausbeutekurve), über Messparameter (Probenmasse, Datum und Dauer der Messung, Untergrundspektrum) und Auswahl der zu berechnenden Radionuklide (Radionuklidbibliothek) eingegeben werden. Gammaskopmetrische Ergebnisse (bei identifizierten Radionukliden: spezifische Aktivität und deren Gesamtunsicherheit; bei zu berichtenden Radionukliden: zusätzlich die Nachweisgrenzen) werden derzeit in der Regel zunächst auf der Festplatte dieser Einrichtungen gespei-



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 26 von 31

Stand: Sept. 2006

chert. Zur weiteren Datensicherung ist die Langzeitspeicherung der Ergebnisse mit der entsprechenden Identifikation auf geeigneten Datenträgern vorzunehmen.

Von allen Schwebstoff- und Sedimentproben ist jeweils eine Rückstellprobe ein Jahr lang aufzubewahren. Die Probenmenge sollte so bemessen sein, dass im Notfall eine Wiederholungsbestimmung durchführbar ist. Diese Proben sind eindeutig, mit Probenentnahmeort und Datum zu kennzeichnen.

## 8 Bewertung der Verfahren

Die Vorzüge einer  $R_{\beta}$ -Messung als Entscheidungsmessung gegenüber einer Einzelnuclidmessung liegen vor allem darin, dass die in Schwebstoff und Sediment vorhandenen Radionuklide mit einem Proportionalzähler bei hoher Zählhausbeute als Summenaktivität in einem einzigen Arbeitsgang erfasst werden (Monitormessung). In Verbindung mit einer gammaspektrometrischen Messung lassen sich ggf. Aussagen über den Anteil radioökologisch relevanter reiner Beta-Strahler, wie Sr-89/-90, machen.

Die Vorzüge der hochauflösenden HPGe-Detektoren bestehen in:

1. der relativ einfachen sowie empfindlichen quantitativen und qualitativen Bestimmung einzelner Radionuklide (nur Gamma-Strahler),
2. der Vermeidung aufwendiger chemischer Trennschritte,
3. der Auswertung von Gamma-Spektren mit Hilfe geeigneter Softwareprogramme. Hiermit können selbst sehr komplexe Radionuklidgemische nahezu vollautomatisch analysiert und die aus den erhaltenen Gamma-Spektren im online-Betrieb ausgewerteten Gehalte tabellarisch mit den notwendigen Angaben (z.B. Probenmenge, -entnahme, -material u.a.) und in den gewünschten Maßeinheiten (z.B. Bq/g TM u.a.) mit entsprechenden digitalen Peripherieeinheiten direkt archiviert werden.

## 9 Glossar - Erklärung der Symbole

- $a_{G\alpha}$  = spezifische Gesamt- $\alpha$ -Aktivität (Bq/kg)  
 $a_{G\beta}$  = spezifische Gesamt- $\beta$ -Aktivität (Bq/kg)  
 $a_{R\beta}$  = spezifische Rest- $\beta$ -Aktivität (Bq/kg)  
 $a_{K40}$  = spezifische  $^{40}\text{K}$ -Aktivität (Bq/kg)  
 $a_r$  = nuklidspezifische Aktivität (Bq/kg)  
 $a_r(t_p)$  = nuklidspezifische Aktivität (Bq/kg) zum Zeitpunkt der Probenentnahme  
 $b$  = Peakfußbreite, gleich 1,7 h und umfaßt dann 95 % der gesamten Peakfläche  
 $d$  = Schichtdicke (Flächenbelegung) der Messprobe ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )  
 $\epsilon_{K40}$  = Zählhausbeute, bezogen auf  $^{40}\text{K}$   
 $\epsilon_{K40}^0$  = Zählhausbeute, bezogen auf  $^{40}\text{K}$  und Schichtdicke Null  
 $\epsilon_r$  = nuklidspezifische Peak-Zählhausbeute  
 $\epsilon_{\gamma}$  = energiespezifische Peak-Zählhausbeute  
 $f_{HWZ}^r$  = Halbwertszeitkorrektur von Radionuklid r  
 $g_r$  = Radionuklidspezifische Nachweisgrenze des Radionuklids r bei  $\gamma$ -spektrometrischer Bestimmung (Bq, Bq/kg)  
 $g_r^*$  = Radionuklidspezifische Erkennungsgrenze des Radionuklids r bei  $\gamma$ -spektrometrischer Bestimmung (Bq, Bq/kg)  
 $g_{R\beta}$  = Nachweisgrenze der Rest- $\beta$ -Aktivitätsbestimmung (Bq bzw. Bq/kg)  
 $g_{R\beta}^*$  = Erkennungsgrenze der Rest- $\beta$ -Aktivitätsbestimmung (Bq bzw. Bq/kg)  
 $g_r^{\min}$  = zu fordernde Nachweisgrenze für gammaspektrometrisch gemessene Einzelnuclide r (Bq bzw. Bq/kg)  
 $g_{R\beta}^{\min}$  = zu fordernde Nachweisgrenze für Rest- $\beta$ -Aktivität (Bq bzw. Bq/kg)  
 $h$  = Peakhalbwertsbreite (Kanäle oder keV)  
 $k_{1-\alpha}$  = Quantil der Normalverteilung für statistische Sicherheit  $1-\alpha$ , Unsicherheit erster Art



$k_{1-\beta}$	=	Quantil der Normalverteilung für statistische Sicherheit $1-\beta$ , Unsicherheit zweiter Art
$L$	=	Länge des Nulleffektbereichs beidseitig von Gammalinien (Kanäle oder keV), maximal gleich $b/2$
$\lambda_r$	=	Zerfallskonstante ( $s^{-1}$ ) des Radionuklides $r$
$m^c$	=	Aliquot einer Probenmasse (kg, g, mg)
$m_F$	=	Feuchtmasse (kg, g, mg) einer Probe
$m_G$	=	Masse des Glührückstandes (g, mg) einer Probe
$m_p$	=	Probenmasse (kg, g, mg)
$m_K$	=	Kalium-Masse (kg, g, mg)
$m_{KCl}$	=	Kaliumchlorid-Masse (kg, g, mg)
$p_\beta$	=	Emissionswahrscheinlichkeit von $\beta$ -Teilchen
$p_\gamma$	=	Emissionswahrscheinlichkeit einer $\gamma$ -Strahlung definierter Energie
$q_r$	=	Isotopenhäufigkeit des Radionuklids $r$
$q_T$	=	Verhältnis der Feucht- zur Trockenmasse einer Probe
$r_u$	=	kanalbezogene Zählrate des Spektrumuntergrundes (Ips/Kanal, Ips/keV oder $s^{-1}$ Kanal $^{-1}$ bzw. $s^{-1}$ keV $^{-1}$ )
$\bar{r}_u$	=	mittlere kanalbezogene Zählrate des Spektrumuntergrundes (Ips/Kanal, Ips/keV oder $s^{-1}$ Kanal $^{-1}$ bzw. $s^{-1}$ keV $^{-1}$ )
$R_b$	=	Brutto-Zählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$R_\alpha$	=	Gesamt- $\alpha$ -Zählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$R_{G\beta}$	=	Gesamt- $\beta$ -Zählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$R_{pk}$	=	Peakzählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$R_{K40}$	=	K-40-Zählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$R_0$	=	Nulleffekt-Zählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$R_n$	=	Netto-Zählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$R_{R\beta}$	=	Rest- $\beta$ -Zählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$R_u$	=	Untergrund-Zählrate des Photopeaks (Ips oder $s^{-1}$ )
$s_n$	=	statistische Zählunsicherheit einer $\gamma$ -spektrometrischen Einzelnuklidbestimmung (Bq/kg)
$s(a_r)$	=	statistische Zählunsicherheit der Nettozählrate (Ips oder $s^{-1}$ )
$s(a_{R\beta})$	=	statistische Zählunsicherheit der spezifischen $R\beta$ -Aktivität (Bq/kg)
$s_{R_{K40}}$	=	statistische Zählunsicherheit der berechneten Nettozählrate für $^{40}\text{K}$ (Ips oder $s^{-1}$ )
$s_{w_K}^{rel}$	=	relative Unsicherheit der Kaliumkonzentration in Schwebstoff bzw. Sediment
$t_b$	=	Messzeit der Probe (s)
$t_0$	=	Messzeit des Nulleffektes (s)
$t_M$	=	Bezugszeitpunkt des Messzeitintervalls (Datum, Uhrzeit)
$t_{r^{1/2}}$	=	Halbwertszeit des Radionuklids $r$ (d, a)
$t_p$	=	Bezugszeitpunkt der Probenentnahme (Datum, Uhrzeit)
$w_K$	=	Kaliumkonzentration in Schwebstoff bzw. Sediment (mg/kg)

## 10 Literatur

- [1] Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), BGBl. I Nr. 38, S. 1714 ff, 20.07.2001 und Berichtigung zur StrlSchV, BGBl. I S. 2618 ff, 01.09.2005
- [2] Richtlinie für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz:  
Teil I: Messprogramm für den Normalbetrieb (Routinemessprogramm), GMBL. 45 Nr.32, S. 929-960, Bonn, 26.09.1994; letzter Überarbeitungsstand: 11.10.2004  
Teil II: Messprogramm für den Intensivbetrieb (IMP), GMBL. 46 Nr. 14, S. 261-279, Bonn, 11.04.1995
- [3] Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI), GMBL. Nr.14-17. S. 254 vom 23. März 2006



## LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU

### EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 3.1.14

Seite: 28 von 31

Stand: Sept. 2006

- [4] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen vom 21.02.1990, BAnz 42, Nr. 64a, Bundesminister der Justiz, Bonn, 31.03.1990, 23 S.  
Entwurf der AVV zu § 47 StrlSchV, Stand: 21.01.2005, 40 S. und 34 S. Anhang
- [5] Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition vom 23.07.2001, BAnz 53, Nr. 160a, Band 1, Bundesministerium der Justiz, Berlin, 28.08.2001
- [6] DIN 6814-4: Begriffe in der radiologischen Technik – Radioaktivität, Ausgabe 1990/02, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; in Überarbeitung
- [7] Kaliumäquivalente zur Bestimmung der Kaliumkonzentration über die Kalium-40-Aktivität, in [12], 2. Lfg./1994
- [8] Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (DEV) – Physikalische, chemische, biologische und mikrobiologische Verfahren; Herausg.: Wasserchemische Gesellschaft – Fachgruppe in der Gesellschaft Deutscher Chemiker in Gemeinschaft mit dem Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN; Wiley VCH – Beuth-Verlag GmbH Berlin - Wien – Zürich
- [9] DIN 38 414 Teil 2: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes bzw. der Trockensubstanz (S 2), Ausgabe November 1985, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., in [8], 51. Lieferung 2001
- [10] DIN 38 414 Teil 15: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Bestimmung der spezifischen Rest-Beta-Aktivität  $a_{R\beta}$  in Schlamm, Sediment und Schwebstoffen, Ausgabe Juni 1990, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., in [8], 23. Lieferung 1990
- [11] H. Mundschenk: Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in Oberflächenwasser, Schwebstoff und Sediment, 3. überarbeitete Fassung, Bericht BfG-0650, Leitstelle für die Überwachung der Radioaktivität der Binnengewässer, Koblenz, Januar 1992
- [12] Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und zur Erfassung radioaktiver Emissionen aus kerntechnischen Anlagen; Herausgeber: Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Urban & Fischer-Verlag München – Jena 2001, ISBN 3-437-11456-5, ISSN 0941-939 X
- [13] H. Mundschenk: Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in Schwebstoff: Abschnitt 2: Verfahren zur gammaspektrometrischen Bestimmung von Radionukliden in Schwebstoffproben, (C- $\gamma$ -SPEKT-SCHWE-01), (Stand: 1.12.1993), in [12], 2. Lfg./1994
- [14] H. Mundschenk: Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in Sediment, Abschnitt 2: Verfahren zur gammaspektrometrischen Bestimmung von Radionukliden in Sedimentproben, (C- $\gamma$ -SPEKT-SEDIM-01), (Stand: 1.12.1993), in [12], 2. Lfg./1994
- [15] Loseblattsammlung FS-78-15-AKU „Empfehlungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität“; Herausg.: Fachverband für Strahlenschutz e.V., Red.: M. Winter, J. Narrog, W. Kukla, M. Vilgis; Beginn: Dezember 1979, Stand: März 2004, ISSN 1013-4506
- [16] W.J. Krause, H. Mundschenk, Th. Steinkopff und H. Rühle: Entnahme von Wasser-, Schwebstoff-, Sediment- und Klärschlammproben unterschiedlicher Herkunft zur Überwachung auf radioaktive Stoffe, Blatt 3.1.12.1, 16 S., (Stand: 25.03.1996) in [15], Aktualisierung in Vorbereitung
- [17] H. Mundschenk: Zur Gewinnung repräsentativer Wasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben in Binnengewässern; 1. Fachliches Kolloquium zum Integrierten Mess- und Informationssystem (IMIS) zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt. Veranstalter: Institut für Strahlenhygiene des Bundesamtes für Strahlenschutz, Neuherberg, 19. - 20. April 1989. Tagungsband S. 69 – 86, Herausg.: Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, 1989
- [18] Alternative Strontium-Bestimmungsmethoden, Bearb.: Ad-hoc-Ausschuss „Alternative Strontium-Bestimmungsmethoden“ im Arbeitskreis „Umweltüberwachung“ (AKU) des Fachverbands für Strahlenschutz e.V. (in Vorbereitung; Drucklegung voraussichtlich 2006/07)
- [19] H. Mundschenk: Vergleichsanalyse „Radionuklide in Sediment 1981“, Bericht BfG-0011, Dezember 1981, 102 S.
- [20] H. Mundschenk: Analysen- und Messanleitungen zur Bestimmung der Radioaktivität in Oberflächenwasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Oktober 1980

**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU****EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG  
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14

Seite: 29 von 31

Stand: Sept. 2006

- [21] K. Debertin, R. Jianping: Measurements of the activity of radioactive samples in Marinelli beakers, Nucl. Instr. and Meth. 278 (1989) p. 541-549
- [22] K. Debertin, R.G. Helmer: Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, Elsevier Science Publishers B.V., 1988. North-Holland-Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo
- [23] H. Mundschenk: Sensitivity of a low-level Ge(Li) spectrometer applied to environmental aquatic studies, Nucl. Instr. and Meth. 177 (1980) 563-575
- [24] H. Mundschenk: Optimierung einer konventionellen Messeinrichtung zur  $\gamma$ -spektrometrischen Einzelnuklidbestimmung an Wasser-, Schwebstoff- und Sedimentproben. 5. Fachgespräch "Überwachung der Umweltradioaktivität". Veranstalter: Bundesforschungsanstalt für Ernährung/ Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 22.-24. März 1983. Tagungsband S. 70-92. Herausgeber: Bundesminister des Innern, Bonn
- [25] P. Vojtyla, Comenius University, Dept. of Nuclear Physics, Bratislava, Slowakische Republik: persönliche Mitteilung vom 24.06.2005
- [26] W.J. Krause, H. Mundschenk, H. Rühle und Th. Steinkopff: Überwachung der Aktivität gammastrahlender Radionuklide im Wasser (Niederschlag, Oberflächen-, Grund-, Trink- und Abwasser), Blatt 3.1.12.3, 23 S., Stand: 26.09.1997, in [15]
- [27] H. Mundschenk: Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in Oberflächenwasser; Abschnitt 3: Verfahren zur gammaspektrometrischen Bestimmung von Radionukliden in Oberflächenwasser, (C- $\gamma$ -SPEKT-OWASS-01), (Stand: 1.12.1993), in [12], 2. Lfg./1994
- [28] P. Vojtyla: Fast computer simulations of background of low-level Ge  $\gamma$ -spectrometers induced by  $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Bi}$  in shielding lead, Nucl. Instr. Meth. in Physics Research B 117 (1996) 189-198
- [29] H. Mundschenk: Vergleichsanalyse „Radionuklide in Sediment 1989“, Bericht BfG-0525, Koblenz, Januar 1990, ISSN 0934-6635,
- [30] U. Schötzig und H. Schrader: Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden, 5. erweiterte Auflage, Bericht der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, PTB-Ra-16/5, Braunschweig, Mai 2000, 95 S., ISSN 0341-6747, ISBN 3-89701-279-0
- [31] H. Mundschenk: Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in Sediment; Abschnitt 4: Verfahren zur Bestimmung der Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration in Sedimentproben (C- $\alpha$ -GESAMT-SEDIM-01), (Stand: 1.12.1994), in [12], 3. Lfg./1995
- [32] G. Kanisch, H. Rühle: Nachweis- und Erkennungsgrenzen verschiedener Messmethoden (ERK/NACHWEISGR), (Stand: 1.9.1992), Kap. IV.5 in [12], 1. Lfg./1992
- [33] DIN 25 482: Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag GmbH Berlin
- [34] DIN 25 482-1: Teil 1: Zählende Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbehandlungseffektes, Ausgabe April 1989 in [33]
- [35] DIN 38 404, Teil 16: Physikalisch und physikalisch-chemische Kennproben (Gruppe C) – Bestimmung von Radionukliden in Trink-, Grund-, Oberflächenwasser und Abwasser mittels Gamaspektrometrie (C 16), Ausgabe April 1989, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., in [8], 22. Lieferung 1989
- [36] DIN 25 482, Teil 5: Zählende hochauflösende gammaspektrometrische Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbeeinflussungseffektes, Ausgabe Juni 1993 in [33]
- [37] Ref. N-203D6 Nachweisgrenzen: Erkennungsgrenzen und Nachweisgrenzen in der hochauflösenden Gamaspektrometrie: Methodenvergleich und Umrechnungsfaktoren (InterGamma und Winner-Gamma), Eurisys Messtechnik, Mainz, COGEMA-Gruppe, Ausgabe November 1994/Rev. 6

---

Bitte beachten Sie den Hinweis im Losen Blatt 1.3 „Erläuterungen zur Loseblattsammlung“.

## 11 Anhang

In Tabelle A-1 sind die Werte der Erkennungs- und Nachweisgrenzen für die in der rezenten Literatur angegebenen Gleichungen und Vorgaben für die zugrunde liegende Peakfußbreite  $b$  und die Quantile der Standardnormalverteilung für den Fehler 1. und 2. Art,  $k_{1-\alpha}$  bzw.  $k_{1-\beta}$ , beispielhaft für das Radionuklid Cs-137 angegeben.

Tabelle A-1: Vergleich der erreichbaren Erkennungs- (EG) und Nachweisgrenze (NWG) für eine gamma-spektrometrische Messung am Beispiel des Cs-137  
Messgeometrie: 1 L-Ringschale aus Polyethylen direkt auf dem Detektor  
Messzeit Probe: 70.000 s; Probenmasse  $m_p = 1$  kg

a) für in der Literatur [14, 33, 35, 36] empfohlene Werte für die Peakfußbreite  $b$  und für die Quantile  $k_{1-\alpha}$  und  $k_{1-\beta}$

Lit.	Gl. Nr.	Formel für $R_n^*$	empf. Peakfußbreite $b, n$ (Kanäle)	empf. $k_{1-\alpha}$	EG $g_{Cs-137}^*$ $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg TM}}\right)$ 11.1.1.1	Gl. Nr.	Formel für $R_n$	empf. $k_{1-\beta}$	NWG $g_{Cs-137}$ $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg TM}}\right)$
14	8	$1,064 h k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{R_o (1+1/n)}{t_b}}$	1,7 . h	1,64	0,36	8, 10	$1,064 h (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{R_o (1+1/n)}{t_b}}$	1,64	0,71
14	9	$k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{2 b r_u}{t_b}}$	1,7 . h	3	0,65	9, 10	$(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{2 b r_u}{t_b}}$	1,64	1,01
35	12	$k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{2 b r_u}{t_b}}$	1,7 . h	3	0,38	11	$(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{2 b r_u}{t_b}}$	1,64	0,59
36	5	$\frac{k_{1-\alpha}^2 b}{2 t_b 2L} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4 R_o t_b 2L}{k_{1-\alpha}^2 b} \left( 1 + \frac{2L}{b} \right)} \right]$	2,5 . h	1,96	0,16	7	$(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{R_o}{t_b} \left( 1 + \frac{b}{2L} \right)} + \frac{1}{4 t_b} (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})^2 \left( 1 + \frac{b}{2L} \right)$	1,96	0,36
36	6	$k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{R_o}{t_b} \left( 1 + \frac{b}{2L} \right)}$	2,5 . h	1,96	0,17	8	$(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{R_o}{t_b} \left( 1 + \frac{b}{2L} \right)}$	1,96	0,34



**LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU**  
**EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG**  
**DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT**

Blatt: 3.1.14  
 Seite: 31 von 31  
 Stand: Sept. 2006

b) für identische Werte der Peakfußbreite  $b = 2,5$  h und Quantile  $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,96$ ; Unsicherheitswahrscheinlichkeit = 2,5 %)

Lit.	Gl. Nr.	Formel für $R_n^*$	EG $g_{Cs-137}^*$ $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg TM}}\right)$	Gl. Nr.	Formel für $R_n$	NWG $g_{Cs-137}$ $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg TM}}\right)$
14	8	$1,064h k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{R_o (1+1/n)}{t_b}}$	0,25	8, 10	$1,064h (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{R_o (1+1/n)}{t_b}}$	0,50
14	9	$k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{2 b r_u}{t_b}}$	0,43	9, 10	$(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{2 b r_u}{t_b}}$	0,85
35	12	$k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{2 b r_u}{t_b}}$	0,43	11	$(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\frac{2 b r_u}{t_b}}$	0,85

Abgesehen von der Probenmesszeit  $t_b$  wird in allen Fällen, wenn auch in unterschiedlichem Maße, die erreichbare Erkennungsgrenze durch die energetische Auflösung der Messeinrichtung bzw. die entsprechende Peakhalbwertsbreite  $h$  mitbestimmt. Um gammaspektrometrische Einzelnuklidbestimmungen empfindlich durchzuführen, sollten daher Detektoren mit möglichst hoher Energieauflösung eingesetzt werden ( $h \leq 1,9$  keV (1,33 MeV)).