



Bundesamt  
für Strahlenschutz

## **Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz**

Strategien für die Probenahme von Feststoffen aus  
überwachungsbedürftigen Rückständen zur  
Bestimmung der spezifischen Aktivität natürlicher  
Radionuklide mittels gammaspektrometrischer Analyse

**Vorhaben 3622S12291**

Nuclear Control & Consulting GmbH  
Eurofins IAF-Radioökologie GmbH

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) und im Auftrag des Bundesamtes für  
Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUKN (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

## **Impressum**

Bundesamt für Strahlenschutz  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0  
Fax: +49 30 18333-1885  
E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)  
De-Mail: [epost@bfs.de-mail.de](mailto:epost@bfs.de-mail.de)

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

BfS-RESFOR-257/26

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
[urn:nbn:de:0221-2026021659051](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2026021659051)

Salzgitter, Februar 2026

# **Handlungsanleitung für die Probenahme von Feststoffen aus Rückständen zur Bestimmung der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide mittels gammaskopimetrischer Analyse**

## **Inhaltsverzeichnis**

|       |                                                                                                                                          |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Vorwort.....                                                                                                                             | 3  |
| 2     | Einleitung .....                                                                                                                         | 4  |
| 3     | Strahlenschutzfachliche Grundlagen .....                                                                                                 | 4  |
| 4     | Konzeptionelle Vorgehensweise .....                                                                                                      | 5  |
| 4.1   | Grundlegendes.....                                                                                                                       | 5  |
| 4.2   | Probenahmestrategie .....                                                                                                                | 7  |
| 4.2.1 | Voraussetzungen .....                                                                                                                    | 7  |
| 4.2.2 | Charakterisierung von Grundmengen.....                                                                                                   | 9  |
| 4.3   | Probenahmeplanung.....                                                                                                                   | 9  |
| 4.3.1 | Allgemeine Betrachtungen.....                                                                                                            | 9  |
| 4.3.2 | Beschaffenheit von Rückständen .....                                                                                                     | 10 |
| 4.4   | Einsatz von In-situ-Messtechnik zur Erfassung der Gamma- und/oder Betastrahlung .....                                                    | 11 |
| 4.5   | Berücksichtigung von Hot Spots bei der Auswertung einer Probenahme .....                                                                 | 15 |
| 5     | Probenahmedurchführung .....                                                                                                             | 17 |
| 5.1   | Beprobung aus Haufwerken.....                                                                                                            | 17 |
| 5.1.1 | Allgemeines .....                                                                                                                        | 17 |
| 5.1.2 | Arten von Haufwerken .....                                                                                                               | 18 |
| 5.1.3 | Gleichmäßige Entnahme von Einzelproben aus der Grundmenge mit festgelegter<br>Probenanzahl.....                                          | 20 |
| 5.1.4 | Durchführung mit Unterstützung von In-situ-Messungen und Entnahme von Einzelproben<br>aus der Grundmenge mit variabler Probenanzahl..... | 22 |
| 5.1.5 | Beprobung von Hot Spots in Haufwerken .....                                                                                              | 24 |
| 5.2   | Beprobung aus Behältnissen und festen Bauwerken (Becken).....                                                                            | 24 |
| 5.2.1 | Allgemeines .....                                                                                                                        | 24 |
| 5.2.2 | Arten von Behältnissen .....                                                                                                             | 25 |
| 5.2.3 | Feste Bauwerke (Becken) .....                                                                                                            | 27 |
| 5.2.4 | Entnahme von Proben .....                                                                                                                | 28 |
| 5.2.5 | Durchführung der Beprobung mit Unterstützung von In-situ-Messungen .....                                                                 | 29 |
| 5.2.6 | Beprobung von Hot Spots aus Behältnissen .....                                                                                           | 31 |
| 5.3   | Beprobung von Ablagerungen aus Rohren oder Anlagenteilen / Beprobung von Anlagenteilen .....                                             | 32 |
| 5.3.1 | Allgemeines .....                                                                                                                        | 32 |
| 5.3.2 | Arten von Rohren/Anlagenteilen.....                                                                                                      | 33 |
| 5.3.3 | Entnahme von Proben .....                                                                                                                | 33 |
| 5.3.4 | Durchführung der Beprobung mit Unterstützung von In-situ-Messungen .....                                                                 | 33 |

|     |                                                                                 |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6   | Ergänzende praktische Hinweise für die Beprobung von Rückständen.....           | 34 |
| 6.1 | Allgemeines zur Probenahmeplanung/-vorbereitung.....                            | 34 |
| 6.2 | Besondere Anforderungen bei der Probenahme und Hinweise zum Arbeitsschutz ..... | 36 |
| 7   | Technische Hinweise für die gammaspektrometrische Analyse.....                  | 36 |
| 7.1 | Probenahmebehälter und Anlieferung an das Labor .....                           | 36 |
| 7.2 | Relevante Informationen zur Probencharakterisierung .....                       | 37 |
| 8   | Literatur-/Unterlagenverzeichnis.....                                           | 38 |

---

#### *Verwendetes Bildmaterial*

*Sämtliche Abbildungen entstammen aus der Durchführung des BfS-Vorhabens zum Thema „Strategien für die Probenahme von Feststoffen aus überwachungsbedürftigen Rückständen zur Bestimmung der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide mittels gammaspektrometrischer Analyse“ (FKZ: 3622S12291) und wurden von den Autoren dieser Handlungsanleitung erzeugt.*

---

# 1 Vorwort

Bei industriellen oder bergbaulichen Prozessen wie z. B. bei der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas und aus der Tiefengeothermie, aus der Grundwasseraufbereitung, aus der Gewinnung und Aufbereitung von Erzen und Mineralien oder der Roheisenherstellung können Rückstände entstehen, die natürlich vorkommende Radionuklide enthalten. Diese Rückstände können strahlenschutzrechtlich überwachungsbedürftig sein, und ihre weitere Handhabung ist im Strahlenschutzgesetz geregelt.

Die Rückstände sind für eine geplante Entsorgung (d.h., Verwertung oder Beseitigung) strahlenschutzfachlich zu beurteilen, und unter anderem sind dafür die spezifischen Aktivitäten natürlich vorkommender Radionuklide zu bestimmen. Nach derzeitigem Stand von Wissenschaft und Technik ist die Gammaskpektrometrie das in vielen praktischen Anwendungen am besten geeignete Messverfahren für die Aktivitätsbestimmung. Für die Aussagekraft der Aktivitätsbestimmung ist jedoch vorrangig die Probenahme entscheidend, denn die Zusammensetzung der Rückstände ist meist inhomogen, und die spezifische Aktivität kann je nach Art und Herkunft des Materials oder seiner Entstehung (z.B. des Aufbereitungsverfahrens) schwanken.

In der Vollzugspraxis der Bundesländer im Zusammenhang mit der Charakterisierung und Entsorgung von Rückständen werden durch die zuständigen Behörden zunehmend hohe fachliche Standards gefordert, die vor allem bereits die qualitätsgesicherte Probenahme betreffen, der damit eine besonders hohe Bedeutung zukommt. Die Handlungsanleitung ist das Ergebnis des in den Jahren 2023 bis 2025 bearbeiteten Ressortforschungsvorhabens „Strategien für die Probenahme von Feststoffen aus überwachungsbedürftigen Rückständen zur Bestimmung der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide mittels gammaspektrometrischer Analyse“ (FKZ: 3622S12291) des Bundesamtes für Strahlenschutz (Auftraggeberin) sowie der Nuclear Control & Consulting GmbH und der Eurofins IAF-Radioökologie GmbH (Auftragnehmer) und wird veröffentlicht. Im Ressortforschungsprojekt wurden für unterschiedliche Rückstände verschiedene Probenahmestrategien entwickelt, die die Individualität der Materialien berücksichtigen und dabei einfach und wenig fehleranfällig durchzuführen sind. Diese Strategien werden in dieser Handlungsanleitung beschrieben.

Die Handlungsanleitung stützt sich auf etablierte Regelungen wie Richtlinien oder Leitfäden (z. B. von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall/LAGA oder DIN-Vorschriften) zu Untersuchungen im Zusammenhang mit der Entsorgung von Abfällen, und zu einem großen Teil auf die langjährige Expertise der Auftragnehmer. Die Handlungsanleitung leistet einen Beitrag zur Erfüllung der gesetzlichen Regelungen und der Anforderungen im behördlichen Vollzug im Zusammenhang mit der Charakterisierung von Rückständen. Sie kommt darüber hinaus den Anforderungen aus der behördlichen und industriellen Praxis nach methodischer Unterstützung bei der Probenahme von Rückständen nach. Naturgemäß besteht aufgrund der großen Spannbreite der in Deutschland anfallenden Rückstände, ihrer Menge, Beschaffenheit und Zugänglichkeit für eine Beprobung sowie der unterschiedlichen behördlichen Erwartungen, zugrunde zu legenden Regelwerke aus anderen Fachgebieten (z.B. Abfallrecht) ein breiter Spielraum von Herangehensweisen an die Probenahme. Insbesondere soll deshalb mit der Handlungsanleitung eine in der Praxis der Entlassung von Rückständen akzeptierte Grundlage zur Entwicklung von Probenahmestrategien geschaffen werden.

## 2 Einleitung

Rückstände im Sinne des Strahlenschutzes sind radiologisch potenziell relevant, da bei ihrer Verwertung oder Beseitigung Expositionen für beruflich tätige Personen und für Einzelpersonen der Bevölkerung auftreten können, die aus Sicht des Strahlenschutzes nicht außer Acht gelassen werden können. Es gilt ein Richtwert von 1 Millisievert (mSv) im Kalenderjahr.

Für belastbare Aussagen zu den radiologischen Eigenschaften von Rückständen ist eine an die jeweiligen Rückstände angepasste Probenahmestrategie unerlässlich. Sie bildet die Grundlage für die Probenahme und die nachfolgende qualitätsgesicherte Bestimmung der spezifischen Aktivität natürlich vorkommender Radionuklide im Labor. Die potenziellen Fehlerquellen bei der Probenahme überwiegen dabei den Messfehler von Messverfahren für die Aktivitätsbestimmung in der Regel deutlich. Zufällige und systematische Fehler der Probenahme werden mit der Ausweisung von Unsicherheiten auf Laborprüfberichten nicht erfasst, da letztere sich lediglich auf die Messunsicherheiten einer Laborprobe beziehen.

Probenahmestrategien sind auf die individuellen Bedingungen der Rückstände anzupassen und setzen gleichzeitig ein grundlegendes Wissen zum Stand der Technik voraus. Ziel dieser Handlungsanleitung ist, sowohl allgemeine Hinweise für die Entwicklung einer Probenahmestrategie als auch praktische, fallspezifische und für verschiedene Rückstandsarten anwendbare, Anleitungen bereitzustellen. Diese Handlungsanleitung beinhaltet die Grundlagen zur Entwicklung der Probenahmestrategie für eine qualitätsgerechte Probenahmeplanung und -durchführung für Personen, die bereits über allgemeine Erfahrungen mit der Probenahme, z.B. aus festen Abfällen, verfügen, jedoch noch keine Kenntnisse und Erfahrungen mit Untersuchungen zur radiologischen Charakterisierung von Rückständen haben.

## 3 Strahlenschutzfachliche Grundlagen

Im Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) [1] sind in der Anlage 1 Rückstände aus industriellen und bergbaulichen Prozessen aufgeführt, die grundsätzlich der regulatorischen Kontrolle zu unterziehen sind. Bei Überschreitung von Überwachungsgrenzen, die in der Anlage 5 StrlSchV [2] für festgelegte Verwertungs- und Beseitigungswege aufgeführt sind, unterliegen sie der strahlenschutzrechtlichen Überwachung, da die Überschreitung des Richtwertes der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr nicht ausgeschlossen werden kann.

Für die Beurteilung der Überwachungsbedürftigkeit bzw. zur Feststellung der Überschreitung der Überwachungsgrenzen sind die Werte  $C_{U238max}$  und  $C_{Th232max}$  der größten spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der U-238-Zerfallsreihe und der Th-232-Zerfallsreihe, jeweils bezogen auf Trockenmasse, repräsentativ zu ermitteln und die folgende Summenformel anzuwenden:

$$C_{U238max} + C_{Th232max} \leq C \text{ [Bq/g]} \quad (1)$$

Die Nachweisführung beinhaltet eine sachgerechte Charakterisierung von Rückständen, da die Probenahme in jedem Fall eine wesentliche Grundlage bildet.

Für die Beseitigung von überwachungsbedürftigen Rückständen gemeinsam mit anderen Rückständen und Abfällen auf eine Deponie enthält die Anlage 7 StrlSchV ein vereinfachtes Verfahren zur Sicherstellung

der Einhaltung des Richtwerts der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr<sup>1</sup>. Die zuständige Behörde kann davon ausgehen, dass der Richtwert für die Entlassung aus der Überwachung eingehalten wird, wenn die mittlere spezifische Aktivität aller auf der Deponie in den zurückliegenden 12 Monaten beseitigten Massen unter Einbeziehung des aktuellen Beseitigungsvorgangs die in Anlage 7 StrlSchV festgelegten Werte nicht überschreitet. Es gilt für die Mittelwerte  $C_{U238max}^M$  und  $C_{Th232max}^M$  der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der U-238-Zerfallsreihe und der Th-232-Zerfallsreihe die Summenformel

$$C_{U238max}^M + C_{Th232max}^M \leq C^M \quad (2)$$

Der Mittelwert  $C^M$  hängt dabei von in Anlage 7 StrlSchV vorgegebenen Eigenschaften der Deponie ab.

Die Entsorgung von Rückständen erfordert eine hinreichend genaue Bestimmung der spezifischen Aktivität aller relevanten, natürlich vorkommenden Radionuklide zur Entscheidung darüber, ob

- es sich um überwachungsbedürftige Rückstände handelt (Überschreitung der Überwachungsgrenzen in Anlage 5 StrlSchV),
- ob zur Entlassung relevante Schwellen für die Deponierung eingehalten werden (z.B. in Anlage 7, Punkt 1, Satz 4 StrlSchV: 10 bzw. 50 Bq/g).

Für die Erstellung einer Rückstandsbilanz gemäß § 60 Abs. 4 StrlSchG bildet die Ermittlung von spezifischen Aktivitäten der Rückstände eine wesentliche Grundlage.

Die Verpflichteten, bei denen überwachungsbedürftige Rückstände anfallen, haben gemäß § 61 Abs. 1 StrlSchG mit geeigneten Maßnahmen sicherzustellen, dass durch deren Lagerung, Verwertung oder Beseitigung für Einzelpersonen der Bevölkerung der Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr nicht überschritten wird. Hierzu haben sich die Verpflichteten von einer Person mit der erforderlichen Fachkunde im Strahlenschutz (S 9.2 bzw. Module GH, OG, NH) [3] beraten zu lassen. Die Probenahme kann für die Sicherstellung einer sachgemäßen, problemangepassten und fachlich fundierten Durchführung durch eine für diese Aufgabe angeleitete Person mit grundlegenden Vorkenntnissen erfolgen, die selbst nicht fachkundig sein muss.

## **4 Konzeptionelle Vorgehensweise**

### **4.1 Grundlegendes**

Die Handlungsanleitung gibt für die Planung und Durchführung von Probenahmen an Rückständen einen Rahmen für die oben genannten Personen vor, die über theoretische und praktische Vorkenntnisse in der Abfallprobenahme sowie auf dem Gebiet der natürlichen Radioaktivität sowie über folgende Vorkenntnisse verfügen:

- Grundverständnis technologischer Prozesse im jeweils betrachteten Industrie- bzw. Bergbaubereich,
- Kenntnis der eingesetzten Messtechnik, messbare Strahlungsarten, typisch nutzbare Messbereiche und Mittelungszeiten,
- Kenntnisse zur Gerätekalibrierung,
- Verfahren der Anschlusskalibrierung von Messgeräten,
- Probenahmetechniken, -geräte und -verfahrensweisen,

---

<sup>1</sup> Im Gegensatz zu Anlage 5 fordert Anlage 7 allerdings nicht explizit eine repräsentative Ermittlung von  $C^M$ .

- Erfahrungen aus der abfallrechtlichen Probenahme (z. B. LAGA PN 98 [4, 5]) sowie
- Bewertung von Messergebnissen.

Die Handlungsanleitung ergänzt somit die LAGA PN 98 und die DIN 19698 Teile 1-5 [6]. Für die Beprobung von Rückständen mit dem Ziel der radiologischen Charakterisierung bilden diese Richtlinien und Normen eine gute Grundlage für die Beschreibung der methodischen Herangehensweise. Darüber hinaus wird in der Handlungsanleitung ein Prozessverständnis für die Entstehung unterschiedlicher Rückstände gegeben.

Es werden die Vorgehensweisen zur Probenahme der unterschiedlichen überwachungsbedürftigen Rückstände, aufbauend auf einfachen und etablierten Probenahmenvorschriften, beschrieben. Die Anleitung berücksichtigt die Spezifik von Rückständen wie z. B. die Beprobung

- von kleinen Massen (bis wenige Mg),
- heterogen verteilter Ablagerungen in Rohren oder an Anlagenteilen sowie Stäube in Filtern,
- oberflächenkontaminierter oder voluminös kontaminierter Materialien.

Über die Entscheidung der regulatorischen Kontrolle hinaus kann eine rückstandsangepasste Probenahme auch zur Durchführung von Dosisabschätzungen und Planung von Strahlenschutzmaßnahmen für die Handhabung und Entsorgung (Beseitigung bzw. Verwertung) von Rückständen sowie für die Erstellung der Radionuklidbilanz eines Produktionsprozesses<sup>2</sup> dienen.

In Anlehnung an die LAGA PN 98 [4] und an die Handlungshilfe [7] als Begleitdokument zur LAGA PN 98 orientiert sich die Gliederung dieser Handlungsanleitung an den folgenden Inhalten:

- Liste erforderlicher Informationen, die vor Beginn der Probenahme bekannt sein sollten, um die Probenahme optimal an die überwachungsbedürftigen Rückstände und den jeweiligen industriellen bzw. bergbaulichen Prozess anzupassen,
- Zusammenstellung von Informationen zu Lagerungsbedingungen: Haufwerke, Oberflächenablagerungen, Fässer, Container, Tanks, Big Bags,
- Allgemeine Betrachtungen zur Probenahmestrategie,
- Visuelle Kontrolle zur Identifizierung von homogenen Rückstandschargen oder -bereichen,
- Festlegung
  - der Probenanzahl aus einer Gesamtmenge in Abhängigkeit von der Rückstandsmenge bzw. Gebindeanzahl,
  - der Probenahmeorte und -tiefen (auf Flächen) bzw. der zu beprobenden Schichten (bei eingebauten Rückständen bzw. aus Haufwerken), in denen Proben zu nehmen sind,
  - der Probenahmeintervalle, in denen bei bewegten Rückständen eine Probe zu entnehmen ist ((quasi-)kontinuierliche oder einmalige Probenahme),
  - zur Vereinigung von Einzelproben zu Misch- bzw. Laborproben,
- Abtrennung bzw. Berücksichtigung nicht repräsentativer Bestandteile wie z.B. Fremdkörper, elementares Quecksilber, Flüssigkeitsüberstand und/oder suspendierten Feinstkornanteils im Überstand etc.,

---

<sup>2</sup> Teilströme der Aktivität in einem Prozess mit Input-, Output- und internen Strömen müssen hinsichtlich der Frachten und spezifischen Aktivitäten hinreichend genau und vollständig ermittelt werden, um eine ausgeglichene Bilanz zu erstellen

- Dokumentation der Probenahme.

Die Empfehlungen für die Probenahmedurchführung sind kapitelweise nach der Beprobung

- von Haufwerken,
- aus Behältnissen oder festen Bauwerken sowie
- von Ablagerungen aus Rohren oder Anlagenteilen

gegliedert (siehe Kap. 5).

Bei schwierig zu beprobenden (z.B. stark inhomogenen) Rückständen oder bei Rückständen aus komplexen chemisch-physikalischen Prozessen kann diese Handlungsanleitung nur einen Rahmen bieten, der anhand der konkreten Gegebenheiten anzupassen und auszufüllen ist.

In Anlehnung an die LAGA PN 98 bildet für die Beprobung von Rückständen in dieser Handlungsanleitung der in der Abbildung 4-1 beschriebene, konzeptionelle Ablauf, die Grundlage der Probenahmestrategie für Rückstände. Auf Grund ihrer Komplexität wird auf iterative Methoden, wie in der Empfehlung der SSK Heft 46 beschrieben [8], verzichtet. Mit Blick auf die Ermittlung von repräsentativen Werten ist die Identifizierung von Hot Spots zu berücksichtigen. Im Regelfall sind Hot Spots insbesondere bei Haufwerken, allerdings selten (siehe Kap. 4.5).

## **4.2 Probenahmestrategie**

### **4.2.1 Voraussetzungen**

Die Probenahmestrategie beschreibt die grundsätzliche Vorgehensweise der Probenahme, um die an die radiologische Charakterisierung der Rückstände gestellten Zielsetzungen zu erreichen. Die Vorgaben für die Herangehensweise dazu leiten sich aus den zu erfüllenden Anforderungen der strahlenschutzrechtlichen Vorschriften ab.

Die Entwicklung einer Probenahmestrategie ist ein vielschichtiger (und sich ggf. schrittweise entwickelnder) Prozess. Die in dieser Handlungsanleitung beschriebene Strategie für unterschiedliche überwachungsbedürftige Rückstände baut auf den oben genannten etablierten Probenahmევorschriften auf und umfasst unter anderem die folgenden Aspekte:

- Vorgehensweise bei der Informationsbeschaffung zur Genese der Rückstände, ihrer Ablagerungsgeschichte und möglicher Variabilität/Heterogenität,
- Rückstandsspezifische Herangehensweise hinsichtlich der Bewertung, entweder allein auf der Beprobung aus einer Grundmenge beruhend oder mit Unterstützung von geeignet kalibrierter In-Situ-Messtechnik,
- Ermittlung der (räumlichen) Heterogenität bzw. (zeitlichen) Variabilität der spezifischen Aktivitäten natürlich vorkommender Radionuklide der zu beurteilenden Grundmenge,
- Festlegung der grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Charakterisierung der Grundmenge, ggf. Vorgehensweise bei der Separierung von Hotspots oder nicht zur Grundmenge gehörenden Probenbestandteilen,
- Festlegung, ob eine einmalige Beprobung ausreichend ist oder die Notwendigkeit weiterer Beprobungen in Abhängigkeit von den statistischen Ergebnissen vorhergehender Probenahmen besteht,

- Anwendung einer möglichst einheitlichen Verfahrensweise zur statistischen Auswertung von Laboranalysen,
- Anwendung einer möglichst einheitlichen Verfahrensweise zur Kalibrierung von In-situ-Messungen, sofern daraus quantitative Aussagen zur spezifischen Aktivität abgeleitet werden sollen).

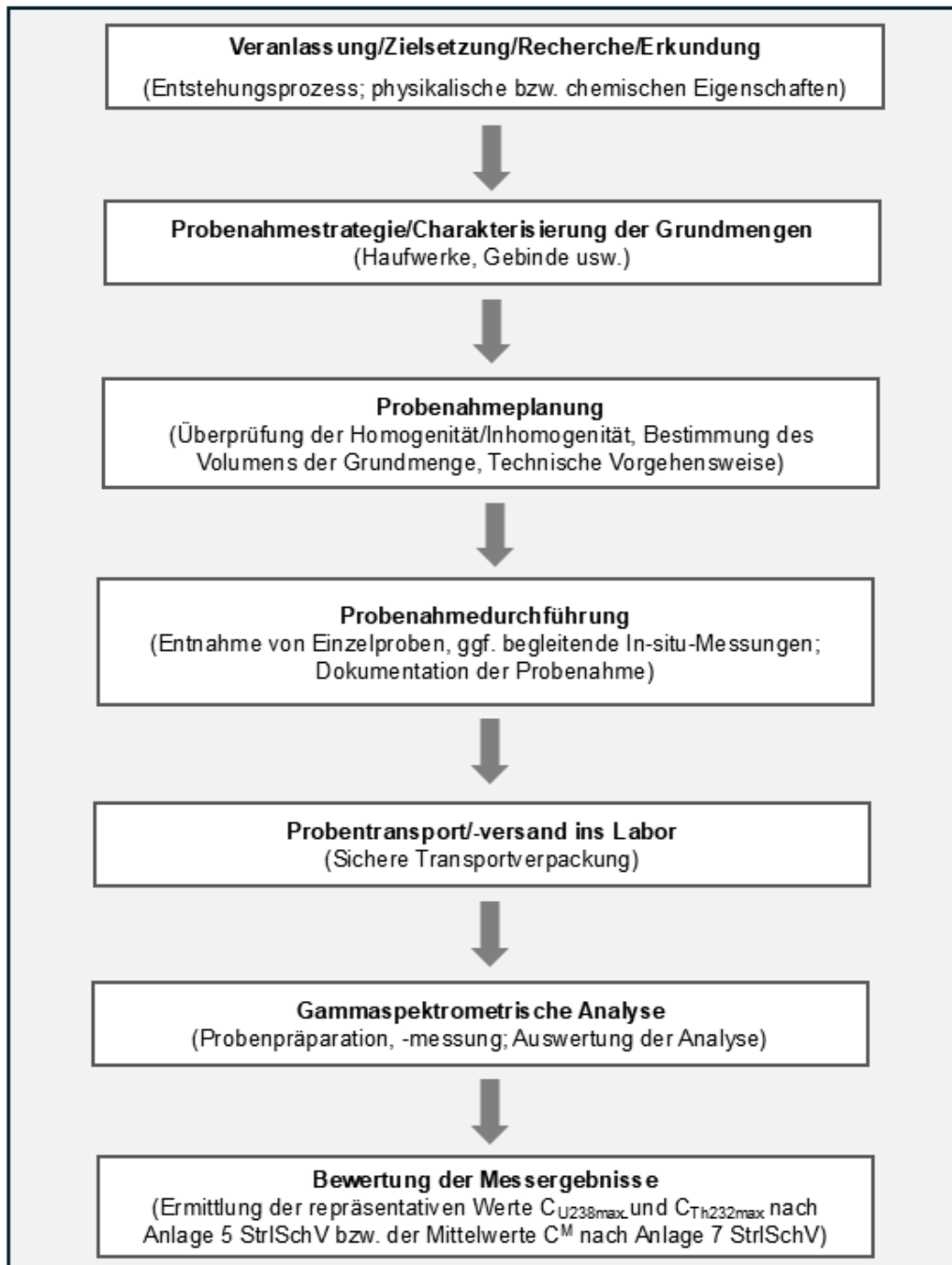


Abbildung 4-1: Konzeptioneller Ablauf der Beprobung von Rückständen

#### **4.2.2 Charakterisierung von Grundmengen**

In den meisten Fällen werden die aus verschiedenartigen Prozessen stammenden Rückstände in „ruhenden Abfallströmen“ (i. S. der LAGA PN 98 [4]) beprobt. Sie befinden sich auf Lagerflächen zur Zwischenlagerung und Vorbereitung einer beabsichtigten Beseitigung oder Verwertung. In Einzelfällen wie z. B. bei Rückständen aus bergbaulichen Prozessen sind beispielsweise Halden bereits dauerhaft abgelagert. Rückstände aus industriellen und bergbaulichen Prozessen oder auch bei Reinigungsarbeiten in den Prozessanlagen werden nach ihrem Anfall in

- Haufwerken,
- Behältnissen wie Big Bags, Fässern, Tanks, Containern oder
- in festen Bauwerken

gesammelt.

Eine Besonderheit sind Ablagerungen (Scale), die insbesondere in der Aufbereitung, Gewinnung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas und aus der Tiefengeothermie, aber auch in der chemischen und erzverarbeitenden Industrie in Rohren oder Anlagen bzw. Anlagenteilen (Filtern) auftreten können. Die Beprobung von Ablagerungen ist in den allgemein bekannten Richtlinien oder Empfehlungen [4, 6, 9] nicht oder nur am Rande berücksichtigt. Die Probenahmestrategie und die darauf aufbauende Probenahmeplanung/-durchführung sind sehr individuell und nicht ohne weiteres aus der Beprobung von Haufwerken oder aus Behältnissen übertragbar.

Rückstände werden im Regelfall für einzelne Chargen bewertet. Die für sie vorzusehende Probenahmestrategie wird nach Art und Umfang der jeweils zu verwertenden oder zu beseitigenden Grundmenge festgelegt. Diese Festlegung hängt von zeitlichen wie prozessbedingten Parametern ab, die die Schwankungsbreite von spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der U-238- und der Th-232-Zerfallsreihen beeinflussen. Da sich die Vorgaben in den Anlagen 5 und 7 StrlSchV jeweils auf ein Kalenderjahr beziehen, sollte eine Charge maximal auf die während eines Kalenderjahres anfallende Rückstandsmenge begrenzt sein.

### **4.3 Probenahmeplanung**

#### **4.3.1 Allgemeine Betrachtungen**

Die Probenahmeplanung und -vorbereitung erfordert detaillierte Vorkenntnisse zum Entstehungsprozess und zu den physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften der Rückstände. Hierbei ist eine detaillierte Erfassung von Informationen zur Genese der Rückstände erforderlich. Rückstände aus industriellen und bergbaulichen Prozessen können sich in ihrer Menge und in ihrer Zusammensetzung ändern. Die erforderlichen Informationen sind in erster Linie bei den Rückstandsbesitzern (Verpflichteten) abzufragen, da nur diese über eine genaue Kenntnis der Abfallentstehung und technologischen Randbedingungen und über weitere für die Planung und praktische Durchführung der Probenahme unverzichtbare Informationen verfügen. Ergänzend hierzu, und insbesondere wenn Angaben aus erster Hand durch den Verpflichteten nicht verfügbar sind, sind Informationen gezielte Recherchen zu ermitteln. Hierbei ist zu beachten, dass sich Literaturangaben auf Rückstände mit ggf. vom konkreten Fall abweichender Entstehung und damit verschiedenen Eigenschaften beziehen und deshalb nicht ohne eingehende Prüfung übertragbar sind. Die Informationsbeschaffung kann teilweise sehr umfangreich und sehr zeitaufwendig sein. Die gezielten

Abfragen (ggf. anhand einer Checkliste, siehe Kap. 5) orientieren sich auf die bei den verschiedenen Rückstandstypen relevanten Sachverhalte

- zu den im industriellen oder bergbaulichen Prozess eingesetzten Ausgangs- und Zusatzstoffen bzw. zur Herkunft der Rückstände,
- zur Ablagerungsgeschichte und zur Altersstruktur der Rückstände,
- zu in sich zusammenhängenden Bereichen mit gleicher oder ähnlicher Genese und damit statistisch ausreichend beschreibbaren Eigenschaften,
- zu möglichen Gründen für Inhomogenitäten und ggf. vorhandenen Teilbereichen, die nicht zur betrachteten Grundgesamtheit gehören und deshalb gesondert betrachtet und beprobt werden müssen, einschließlich möglicher Hot Spots,
- zu möglichen Schwankungen der stofflichen (einschließlich radiologischen) Eigenschaften bzw. zu abzugrenzenden Teilmengen.

Auf Grundlage dieser Informationen können die potenziell relevanten Radionuklide und ggf. auch die Größenordnung ihrer spezifischen Aktivitäten in Rückständen eingeschätzt werden. In einzelnen Fällen kann mit Hilfe von Messdaten aus In-Situ-Messungen die Vorgehensweise zur Probenahme vor Ort angepasst werden. Die eigentliche Probenahme von Homogenbereichen kann anhand der bekannten und akzeptierten linearen Vorschriften wie der LAGA PN 98 erfolgen.

Bei einigen Rückständen können bereits nach visueller Einschätzung unterschiedliche Bestandteile und Rückstandsfraktionen voneinander separiert werden, auf deren Grundlage Proben z.B. aus in sich jeweils homogenen Teilbereichen entnommen werden können. Allerdings zeigt die Erfahrung, dass auch zwischen visuell ähnlichen Proben eines Probentyps die spezifische Aktivität erheblich schwanken kann.

Die Ermittlung repräsentativer Werte nach Anlage 5 StrlSchV unterstellt nicht zwingend eine Mindestanzahl von Proben („Stichprobenumfang“), in denen die spezifische Aktivität durch gammaspektrometrische Messungen oder andere adäquate Messverfahren zu bestimmen ist. Die Bewertungsmethodik einer Grundmenge hängt von

- ihrem Volumen bzw. ihrer Masse,
- ihrem Homogenisierungs-/Durchmischungsgrad und
- der geforderten Zuverlässigkeit der Aussage bzw. der zulässigen Irrtumswahrscheinlichkeit für die Prüfung der Überwachungsbedürftigkeit

ab. Damit ist die Beachtung von statistischen Unsicherheiten, die aus der Heterogenität oder Variabilität der Rückstände hervorgehen, ein wesentlicher Bewertungsmaßstab für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivitäten.

#### **4.3.2 Beschaffenheit von Rückständen**

Für die Ermittlung belastbarer und untereinander vergleichbarer Ergebnisse aus Laboranalysen können individuell für unterschiedliche Rückstandstypen jeweils weitgehend einheitliche Verfahrensweisen zur Beprobung festgelegt werden. Die Planung der Probenahme ist individuell an die charakteristischen Eigenschaften der Rückstände anzupassen. Die Eigenschaften häufig anzutreffender Rückstände sind in der Tabelle 4-1 zusammengestellt.

Tabelle 4-1: Gruppierung von Arten von Grundmengen hinsichtlich der Beprobung entsprechend der Beschaffenheit und Eigenschaften von Rückständen

| Gruppe                                  | Beschaffenheit, Beprobung                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a) Stäube                               | Sehr feinkörnig, „technisch“ einfach zu beproben                                                                                                                                                                              |
| b) Schlämme                             | Sehr feinkörnig, „technisch“ einfach zu beproben, jedoch sind Fest- und Flüssigphase ggf. getrennt zu betrachten*                                                                                                             |
| c) Kiese, Sande, Kornaktivkohle         | In Filtern der Grundwasseraufbereitung häufig mit in Fließrichtung abnehmender spezifischer Aktivität                                                                                                                         |
| d) Kontaminierter Boden                 | Ggf. heterogen kontaminiert, Tiefenprofil ist oft nicht bekannt                                                                                                                                                               |
| e) Kontaminierter Bauschutt, Formstücke | Sehr grobstückig und ggf. heterogen kontaminiert                                                                                                                                                                              |
| f) Ablagerungen                         | Teilweise inhomogen hinsichtlich ihrer Schichtdicke und ihrer Verteilung an/auf Anlagenteilen, schwierig bis sehr schwierig zu beproben (mechanische Entfernung, teilweise hohe Quecksilbergehalte und/oder ölige Konsistenz) |
| g) Betriebsmittel                       | Stark inhomogen sowohl bezüglich des Materials als auch der spezifischen Aktivität                                                                                                                                            |

\* Beispielsweise ist oft ein erheblicher oder sogar der überwiegende Teil der Gesamtaktivität in Schlämmen und ähnlichen Proben an der in der Wasserphase suspendierten Feinstkornfraktion gebunden.

#### 4.4 Einsatz von In-situ-Messtechnik zur Erfassung der Gamma- und/oder Betastrahlung

Eine Besonderheit der Beprobung von Rückständen besteht in der Möglichkeit, zur Unterstützung In-situ-Messungen der Gamma- oder Betastrahlung einzusetzen. Dies setzt eine gute Kenntnis des anhand von Rückstandstyp und -genese zu erwartenden Nuklidvektors einschließlich der zu erwartenden Schwankungsbreite der spezifischen Aktivitäten voraus.

In der Praxis werden vorzugsweise In-situ-Messwerte der Gamma- bzw. Betastrahlung

- für die größenordnungsmäßige Abschätzung der spezifischen Aktivität (auf Grundlage einer Kalibrierung bzw. Anschlusskalibrierung und unter Berücksichtigung der Haufwerks- bzw. Gebindegeometrie),
- zur Abgrenzung von offensichtlich getrennt zu betrachtenden Homogenbereichen (Chargen) oder
- zur Identifizierung von potenziellen Hotspots

erfasst. Die Kombination von begleitenden In-situ-Messungen und Probenahme ist ein wichtiger Beitrag zur Vorerkundung bei der Probenahme.

Bei der Interpretation von Messwerten sind u. a.

- bei Gebinden der Füllstand und/oder die Verteilung des Gebindeinhalts (z.B. eine am Boden befindliche Quecksilberphase) oder
- Geometrieeffekte auf Haufwerken, Halden und anderen unregelmäßigen Geometrien

zu beachten. Der alleinige Einsatz von In-situ-Messtechnik ohne weitere Informationen z. B. zur Masse, Ausdehnung, Form erlauben keine Rückschlüsse auf die spezifischen Aktivitäten der zu bewertenden Rückstände.

Für die vor Ort durchzuführenden Messungen sind Ortsdosisleistungsmessgeräte (ODL) und Oberflächenkontaminationsmonitore praktikabel. Auf die fachlichen Aspekte zur Messtechnik wird in dieser Handlungsanleitung nicht eingegangen. Die Probenehmer müssen über das notwendige Wissen zur Handhabung von In-Situ-Messtechnik, wie z. B. eine fachgerechte Anschlusskalibrierung, verfügen.

Es ist zu beachten, dass ODL-Messgeräte bei alpha- und betastrahlenden Radionukliden oder mit nur schwacher Gammakomponente (z.B. Pb-210, Po-210) nicht eingesetzt werden können. Bei Betastrahlern wie Pb-210 können beta-empfindliche Oberflächen-Kontaminationsmonitore verwendet werden.

Für die erforderliche Kalibrierung können bereits vorher ermittelte Daten aus gammaspektrometrischen Analysen von stichpunktartig entnommenen Proben genutzt werden, die möglichst eine große Spannweite (z. B. durch Lokalisierung von Minimum/Maximum der In-situ-Messwerte in der Grundmenge) abbilden. In der Praxis können Faustregeln zur größenordnungsmäßigen Abschätzung der spezifischen Aktivität anhand der In-situ-Messwerte der Gamma- bzw. Betastrahlung angewendet werden. Die Erläuterungen zu den Berechnungsgrundlagen Bergbau [10] geben in Kap. 4.1 Hinweise zu Berechnung der Ortsdosisleistung bei ebenen Geometrien, mit denen sich flächig ausgedehnte Haufwerke näherungsweise beschreiben lassen. Für unregelmäßige Geometrien, wie z. B. Gebinde oder Container, sind vor Beginn der eigentlichen Probenahme Kalibriermessungen durchzuführen, denen auch der Nuklidvektor der Rückstände zugrunde zu legen ist.

Plausibilitätsbetrachtungen wie beispielsweise der Vergleich von Aktivitätsverhältnissen chemisch sich gleich verhaltender Nuklide (Ra-226, Ra-228) oder Mutter-Tochter-Nuklidverhältnissen (Ra-228/Th-228, Ra-226/Pb-210) können die Interpretation der Proben und das Verständnis der Analysenergebnisse unterstützen. Diese Korrelationen zwischen den spezifischen Aktivitäten und Messdaten aus In-situ-Messtechnik sind von der Gerätespezifik (Sonden-/Detektorart und -größe), den Eigenschaften der Rückstände (Dichte) und von den Materialeigenschaften von Gebinden (Abschirmung) abhängig.

Es ist auch zu beachten, dass der Radius des Erfassungsbereiches typischer ODL-Messgeräte einige Meter beträgt. Die spezifische Aktivität kann jedoch auf erheblich kleineren Längenskalen variieren, so dass mit ODL-Messgeräten Inhomogenitäten nicht in jedem Fall auflösen sind.

Insbesondere bei grobstückigen Haufwerken ist es ohne Zuhilfenahme von Baggern, motorisiertem Bohrgerät o. ä. oft schwierig, mehr als ca. 20 cm in das Material einzudringen. In diesem Fall muss die Probenahme auf eine oberflächenschicht beschränkt bleiben, und die Bewertung der Proben beruht auf der Annahme, dass die oberflächlich entnommenen Proben repräsentativ für das gesamte Haldenvolumen sind. Suffosion und Erosion kann die Gültigkeit dieser Annahme einschränken.

## Fallbeispiel

Die Abbildungen 4-2 und 4-3 zeigen beispielhaft die Korrelation von spezifischen Aktivitäten von Radiumnukliden und den während der Beprobung von zirkon- und monazithaltigen, feinkörnigen Sanden bzw. von Kupferschlackesteinen erfassten ODL-Werten. Anhand der ODL-Messwerte können unmittelbar während der Beprobung die spezifischen Aktivitäten von Rückständen gut geschätzt werden, insbesondere wenn für vergleichbare Rückstände qualitätsgesicherte Laboranalysen und In-situ-Messwerte vorliegen, aus denen die Korrelation zwischen ODL und spezifischer Aktivität hervorgeht. Die untersuchten Rückstände in der Abbildung 4-2 stammen aus einem konstanten Prozess der Monazit-/Zirkonaufbereitung. Die Ergebnisse der begleitenden Messung der ODL korrelieren gut mit der in den Proben bestimmten spezifischen Aktivität von Ra-226 und Ra-228/Th-228. Aus den bereits vor Ort ermittelten Messdaten können bereits einige Aussagen hergeleitet werden. Die spezifischen Aktivitäten von Ra-226 und Ra-228 weisen Schwankungen von etwa 20% um den (arithmetischen) Mittelwert auf. Sie sind wahrscheinlich durch die natürliche Variabilität der abgebauten Schwermineralsande bedingt. Die ODL-Messungen können als Indikator für die Aktivitätsverteilung von Ra-226 und Ra-228 genutzt werden.

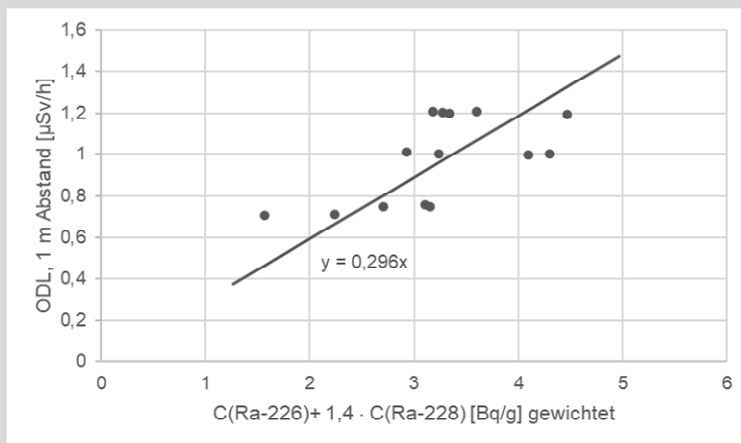


Abbildung 4-2: Korrelation der ODL<sup>3</sup> in 1 m Abstand zur Oberfläche und der spezifischen Aktivitäten von  $C(\text{Ra-226}) + 1,4 \cdot C(\text{Ra-228})$  in einem Haufwerk mit zirkon- und monazithaltigen, feinkörnigen Sande; Ra-228 und Th-228 sind im Gleichgewicht

Die untersuchten Materialien in der Abbildung 4-3 stammen aus einem Haufwerk mit Kupferschlackesteinen (Formstücke). Die Ergebnisse der begleitenden Messung der ODL (als Kontaktmessungen auf den Oberflächen der Schlackesteine) korrelieren sehr gut mit der in den Proben bestimmten spezifischen Aktivität von Ra-226 als dominierendem Radionuklid in diesen Rückständen. Aus den bereits vor Ort ermittelten Messdaten können bereits einige Aussagen hergeleitet werden. Die spezifischen Aktivitäten von Ra-226 weisen Schwankungen von etwa 45% um den (arithmetischen) Mittelwert auf. Sie sind wahrscheinlich durch die natürliche Variabilität der früheren Kupferlagerstätten bedingt. Die ODL-Messungen können damit auch als Indikator für die Aktivitätsverteilung von Ra-226 genutzt werden. Es kann außerdem bereits vor Ort die Aussage getroffen werden, dass bei ODL-Messwerten  $< 0,7 \mu\text{Sv/h}$  die spezifische Aktivität von Ra-226  $< 1 \text{ Bq/g}$  liegt.

Eine ähnliche Herleitung ist auch mit Messungen der Oberflächenkontaminationszählraten möglich (siehe Abbildung 4-4). Bei Messwerten  $< 130$  Impulse pro Sekunde (IPS) kann ebenso davon ausgegangen werden, dass die spezifischen Ra-226-Aktivitäten  $< 1 \text{ Bq/g}$  sind.

<sup>3</sup> Messungen mit kalibriertem Dosisleistungsmessgerät 6150 AD6/E mit Sonde 6150 AD-b/E (Hersteller: Automeß GmbH)

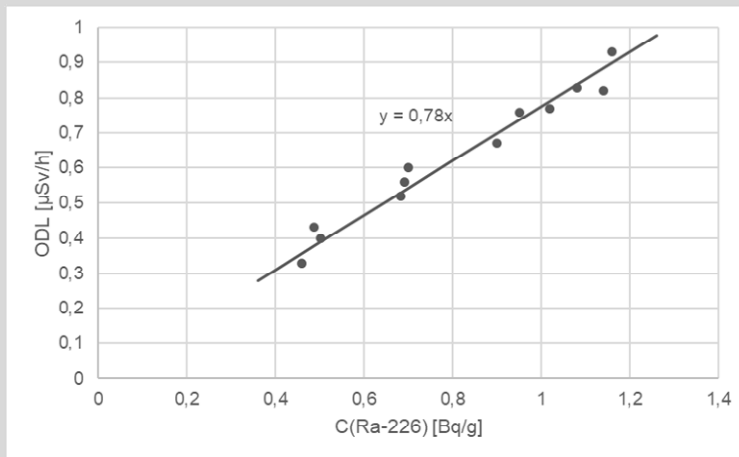


Abbildung 4-3: Korrelation der ODL<sup>4</sup> bei Kontaktmessungen auf der Oberfläche von Kupferschlackesteinen (Formstücke) und der spezifischen Aktivität von C(Ra-226) in einem Haufwerk

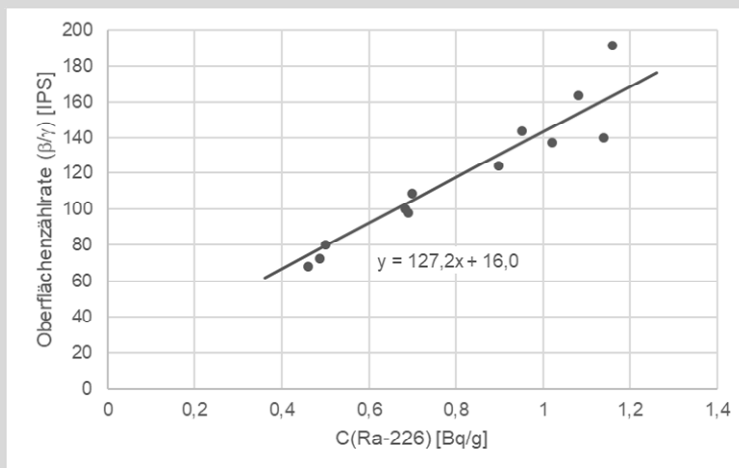


Abbildung 4-4: Korrelation der Oberflächenzählraten<sup>5</sup> auf der Oberfläche von Kupferschlackesteinen (Formstücke) und der spezifischen Aktivität von C(Ra-226) in einem Haufwerk

<sup>4</sup> Messungen mit kalibriertem Dosisleistungsmessgerät 6150 AD6/E mit Sonde 6150 AD-b/E (Hersteller: Automess GmbH)

<sup>5</sup> Messungen mit dem Messgerät CoMo170 (Hersteller: S.E.A. Strahlenschutz-Entwicklungs- und Ausrüstungsgesellschaft GmbH)

#### 4.5 Berücksichtigung von Hot Spots bei der Auswertung einer Probenahme

Hot-Spots (Proben mit auffällig hoher spezifischer Aktivität bzw. ungewöhnlich hohe In-situ-Messwerte) beeinflussen die Bewertung einer Grundgesamtheit, indem sie die mittlere spezifische Aktivität überschätzen. Auffällige Bestandteile oder Areale können vor Ort nach visuell erkennbaren Kriterien und ggf. In-Situ-Messungen oder anhand der Laborergebnisse aus den gewonnenen Proben erkannt werden.

Hot Spots können einerseits eine mit geringer Wahrscheinlichkeit eintretende Manifestation der den jeweiligen Rückstand beschreibenden statistischen Verteilung sein. Sie können andererseits auf das Vorliegen von Bereichen hindeuten, die einen anderen Ursprung und/oder grundsätzlich andere statistische Eigenschaften besitzen als die betrachtete Grundgesamtheit<sup>6</sup>. Im letzteren Fall sollten Hot Spots separat bewertet werden und für die Ermittlung von repräsentativen Werten  $C$  nach Anlage 5 StrlSchV bzw. der Mittelwerte  $C^M$  nach Anlage 7 StrlSchV als „Ausreißer“ außer Acht gelassen werden. Ggf. deuten Hot Spots auf Bereiche hin, die eine eigenständige Grundgesamtheit enthalten und als solche gesondert beprobt und bewertet werden müssen [4, 9].

Eine allgemeine Methode zur Identifizierung von statistisch nicht zur Grundgesamtheit gehörenden Proben bzw. den daran ermittelten Messwerten kann im Rahmen der vorliegenden Handlungsanleitung nicht angegeben werden. Hierzu sind im Einzelfall problemspezifische Betrachtungen durchzuführen. Die konkret zu wählende Methode hängt dabei unter anderem von der Anzahl der zweifelhaften Messwerte und der zugrundeliegenden statistischen Verteilung ab.

Beispielhaft wird ein vereinfachtes Verfahren [11] zur Bewertung eines einzelnen zweifelhaft hohen Messwertes  $x_{Hot Spot}$  vorgestellt, unter der häufig geltenden Voraussetzung einer Lognormalverteilung der Messwerte der Grundmenge. Hierzu wird zunächst der Wert  $T_N$  aus dem arithmetischen Mittel

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x_i) \quad (3)$$

aller  $N$  logarithmierten Einzelwerte (einschließlich des zweifelhaften Messwertes) und der ihrer Standardabweichung

$$\sigma = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(x_i) - \mu)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

wie folgt ermittelt:

$$T_N = \frac{\ln(x_{Hot Spot} - \mu)}{\sigma} \quad (5).$$

$x_{Hot Spot}$  ist dabei der höchste aller  $N$  Messwerte. Ist der Wert  $T_N$  größer als der in der Tabelle 4-2 für die Probenanzahl  $N$  genannte Wert  $T_N^*$ , dann stammt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % der Hot Spot aus einer anderen Grundgesamtheit als die übrigen Messwerte und muss somit gesondert behandelt werden. Für weitere Signifikanzniveaus (99 %, 97,5 %) und weitere methodische Hinweise wird auf [11] verwiesen.

---

<sup>6</sup> Der Fall, dass sich ungewöhnliche Messwerte aus offensichtlichen Unzulänglichkeiten bei der Messung oder Probenahme ergeben, wie beispielsweise eine Fremdkontamination oder fehlerhafter Kalibrierung, wird hier nicht betrachtet. Die hieraus resultierenden Ergebnisse sind aus der Bewertung auszuschließen.

Tabelle 4-2: Vergleichswert  $T_N^*$  für das Vorliegen eines statistisch nicht zur Grundgesamtheit gehörenden Messwertes aus [11]

| Probenanzahl $N$ | Kriterium $T_N^*$ für das Signifikanzniveau 95 % |
|------------------|--------------------------------------------------|
| 3                | 1,15                                             |
| 4                | 1,46                                             |
| 5                | 1,67                                             |
| 6                | 1,82                                             |
| 7                | 1,94                                             |
| 8                | 2,03                                             |
| 9                | 2,11                                             |
| 10               | 2,18                                             |
| 11               | 2,23                                             |
| 12               | 2,29                                             |
| 13               | 2,33                                             |
| 14               | 2,37                                             |
| 15               | 2,41                                             |
| 16               | 2,44                                             |
| 17               | 2,47                                             |
| 18               | 2,50                                             |
| 19               | 2,53                                             |
| 20               | 2,56                                             |
| 21               | 2,58                                             |
| 22               | 2,60                                             |
| 23               | 2,62                                             |
| 24               | 2,64                                             |
| 25               | 2,66                                             |
| 30               | 2,75                                             |
| 35               | 2,82                                             |
| 40               | 2,87                                             |
| 45               | 2,92                                             |
| 50               | 2,96                                             |
| 60               | 3,03                                             |
| 70               | 3,09                                             |
| 80               | 3,14                                             |
| 90               | 3,18                                             |
| 100              | 3,21                                             |

Wenn Hot-Spots in einer Grundmenge nicht separiert werden können, sollte die gesamte, zu charakterisierende Charge nach deren spezifischen Aktivitäten bewertet werden. Diese Vorgehensweise führt zu einer konservativen Überschätzung der mittleren spezifischen Aktivität.

## 5 Probenahmedurchführung

### 5.1 Beprobung aus Haufwerken

#### 5.1.1 Allgemeines

In Haufwerken fallen i. d. R. die folgenden Arten von Grundmengen gemäß Tabelle 4-1 an:

- a) Stäube (z. B. Gichtgasstaub, Filterbeläge),
- b) (getrocknete) Schlämme wie z. B. Gichtschlämme,
- c) Kiese, Sande,
- d) Kontaminierter Boden,
- e) Kontaminierter Bauschutt, Formstücke.

Es handelt sich um feste bzw. stichfeste Materialien. Stäube, getrocknete Schlämme sowie Kiese und Sande sind in Haufwerken größtenteils homogen. In Einzelfällen können sich je nach Schüttvorgang durch gravitative Prozesse Gradierungen entwickeln und gröbere Kornfraktionen in den unteren Bereichen und die feineren Kornfraktionen in den oberen Bereichen bilden. Von den Haufwerksoberflächen können staubige Fraktionen abwehen, die höhere spezifische Aktivitäten von natürlich vorkommenden Radionukliden als die gröberen Fraktionen aufweisen können. In den Berechnungsgrundlagen Bergbau [12] wird beispielsweise für Staubfraktionen ein Aufkonzentrationsfaktor der spezifischen Aktivität von 4 angegeben.

#### Fallbeispiel

Die individuelle Aufkonzentration wird im Folgenden aus dem Ergebnis einer Beprobung eines Haufwerks mit feinkörnigen Sanden und Stäuben von monazithaltigen Rückständen illustriert. Abseits des Haufwerks wurde feinkörniges, abgewehtes Material vorgefunden und ebenfalls wie das Haufwerk beprobt. Die Abbildung 5-1 zeigt das Verhältnis der spezifischen Aktivität der Staubprobe zum Mittelwert der Materialproben aus dem Haufwerk. Der Aufkonzentrationsfaktor ist in der Th-232-Zerfallsreihe deutlich höher (ca. 6) als in der U-238-Zerfallsreihe (2 bis 3). Dies kann mit den in verschiedenen Korngrößenbereichen vorliegenden Mineralfraktionen erklärt werden, die vorrangig mit Nukliden der Uranreihe (gröbere Fraktion, Zirkon) bzw. der Thoriumreihe (feinere Fraktion, Monazit) assoziiert sind (Annex I von [13]).

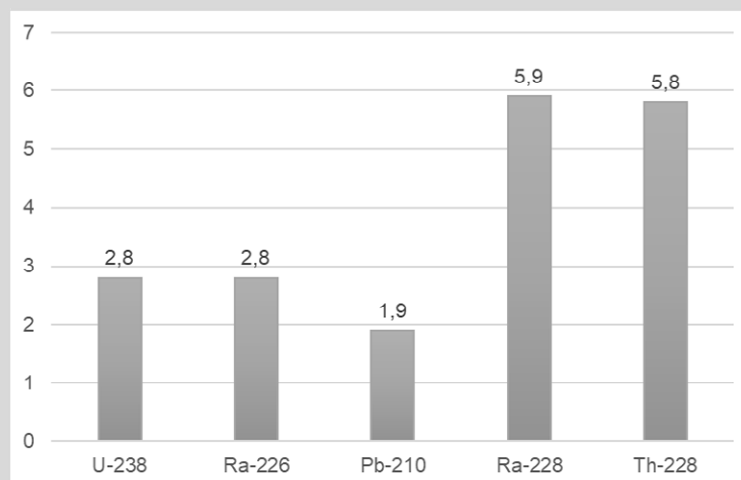


Abbildung 5-1: Verhältnis der spezifischen Aktivität der Staubprobe zum Mittelwert der Rückstände im gesamten Haufwerk

Bei kontaminierten Böden oder Bauschutt handelt es sich um Mischhaufwerke mit feinen bis groben Anteilen und ggf. unterschiedlichen Substraten. Für weitere Details zur Haufwerkszusammensetzung wird auf das Kap. 6.1 in der LAGA PN 98 [4] sowie in den Erläuterungen dazu in der „Handlungshilfe zur LAGA PN 98“ [7] verwiesen.

Für die Beprobung von Haufwerken können zwei Herangehensweisen gewählt werden:

1. Gleichmäßige Entnahme von Einzelproben aus der Grundmenge mit festgelegter Probenanzahl (Stichprobenumfang),
2. Durchführung mit Unterstützung von In-situ-Messungen zur Erfassung der Aktivitätsverteilung und, gestützt auf die Messwertverteilung, Auswahl von Einzelproben mit variabler Probenanzahl (Stichprobenumfang) (siehe Kap. 4.2).

### 5.1.2 Arten von Haufwerken

Haufwerke können sich abhängig von ihrer Entstehung z. B. entweder durch einen kontinuierlichen Schüttprozess (siehe Beispiel in Abbildung 5-2) oder durch diskontinuierliche Aufschüttung (z. B. Abkippen von LKW-Ladungen oder mittels Bagger/Radlader; siehe Beispiel in Abbildung 5-3) entmischen und eine Gradierung in der Korngröße oder der Dichte und damit in der spezifischen Aktivität aufweisen.



Abbildung 5-2: Beispiel für ein kontinuierlich aufgeschüttetes Haufwerk (ca. 2.000 m<sup>3</sup> Hüttensand aus einem Hochofenprozess bei der Roheisenherstellung, Entstehung durch stetige Schüttung von einem Transportband)



Abbildung 5-3: Beispiel für ein diskontinuierlich aufgeschüttetes Haufwerk mit mehreren kleinen Schüttkegeln (ca. 700 m<sup>3</sup> Gichtstaub aus einem Hochofenprozess bei der Roheisenherstellung, Entstehung durch Abkippen von einem Radlader)



Abbildung 5-4: Weiteres Beispiel für ein diskontinuierlich aufgeschüttetes Haufwerk (Sandige Rückstände aus der Aufbereitung von Monazit und Zirkon)

Haufwerke mit Rückständen können in den meisten Fällen mit einfach handhabbarer Probenahmetechnik beprobt werden. Die Probenahmegeräte sind an die Stück-/Komponentengröße in den Haufwerken anzupassen (unterschiedliche Schaufelgrößen). Das Probenahmegerät muss hinreichend groß sein, dass das gesamte Korngrößenspektrum erfasst werden kann. Außerdem sollte durch die Probenahme möglichst das gesamte Haufwerk erreichbar sein. Dafür sind beispielsweise Probenahmesonden oder sonstige Bohrtechnik geeignet (siehe beispielhaft in Abbildung 5-5). Mit Ausnahme von Formstücken oder Haldenmaterialien handelt es sich bei Rückständen im Regelfall um sandige bzw. tonige/schluffige/sandige Materialien. Schlacken beinhalten auch kiesige (Korngröße bis 63 mm) und ggf. auch steinige Komponenten (> 63 mm) nach DIN EN ISO 17892-4:2017-04 [14].

Weitere Erläuterungen zu geeigneten Probenahmegeräten beinhaltet der Anhang D in der LAGA PN 98.



Abbildung 5-5: Links: Probenahme aus einem Haufwerk mit einem Probenstecher; Rechts: Probenstecher mit seitlicher Schlitzöffnung

### 5.1.3 Gleichmäßige Entnahme von Einzelproben aus der Grundmenge mit festgelegter Probenanzahl

Die LAGA PN 98 [4] und die DIN 19698-1:2014-05 [6] sehen für die Bewertung von Haufwerken die Entnahme von Einzel- und Mischproben vor. Um gemäß Anlage 5 StrlSchV repräsentative Werte zu ermitteln (siehe Kap. 3), wird in dieser Handlungsanleitung eine Beprobung von Haufwerken bis ca. 2.000 m<sup>3</sup> ausschließlich mittels Einzelproben empfohlen. Auf dieser Grundlage kann eine höhere Belastbarkeit der Messergebnisse aus gammaspektrometrischen Analysen oder aus anderen Analyseverfahren sichergestellt werden, da einerseits die Variabilität der Radionuklidverteilung im Haufwerk sowie ggf. vorhandene Hot Spots erkannt und fachlich bewertet werden können.

Die Anzahl von Einzelproben ist vom Volumen bzw. von der Masse des Haufwerks abhängig. Die Probenahmeorte im Haufwerk sollten eine zufällige Verteilung aufweisen. Zur Orientierung der Mindestanzahlen von Proben können die Vorgaben für definierte Volumenintervalle in der Handlungshilfe zur LAGA PN 98 bzw. in der DIN 19698-1:2014-05 dienen (siehe Abbildung 5-6). Dazu ist der Hinweis zu ergänzen, dass in diesen Anleitungen bzw. Vorschriften für Kleinmengen mit Volumina von bis zu einigen zehn Kubikmetern nur orientierende Vorgaben für die Probenanzahlen gemacht werden, und die Entscheidung dazu nach visueller Einschätzung zur Durchmischung, Korngrößenverteilung und möglichen Schwankungen der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der U-238- und der Th-232-Zerfallsreihen (ggf. begleitend mit In-Situ-Messtechnik abgeschätzt) zu treffen ist.

Für die Volumen-/Massenbestimmung wird auf das Kap. 6.2 in der LAGA PN 98 [4] verwiesen. Die Richtlinie beinhaltet Hinweise zu geometrieabhängigen, volumenbezogenen Mengenabschätzung, zu Schüttdichten verschiedener Abfälle (Tab. 1 in Kap. 6.2) sowie daraus ableitbare Massenbestimmungen.

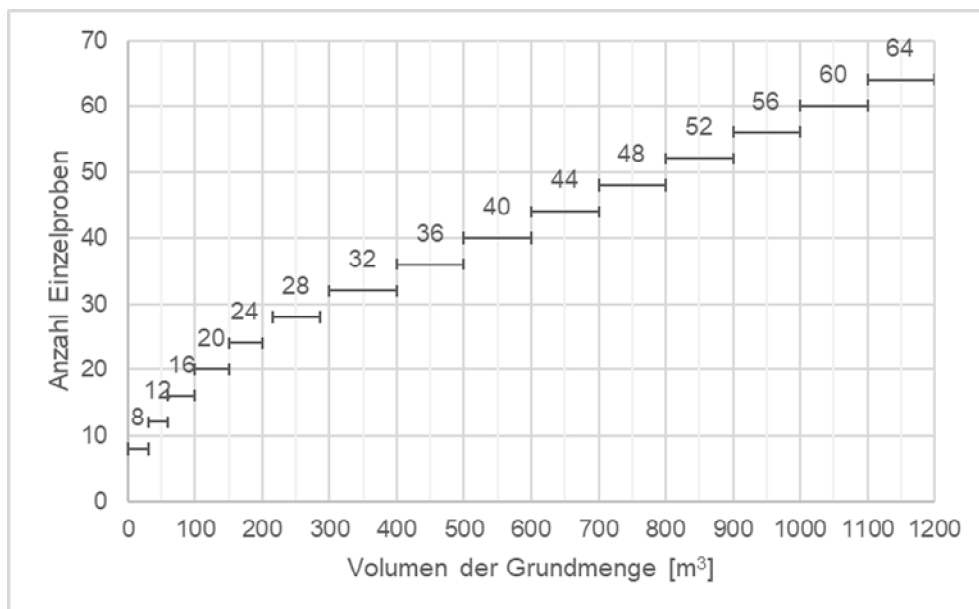


Abbildung 5-6: Mindestanzahl der Einzelproben bei Haufwerken nach Handlungshilfe zur LAGA PN 98 bzw. nach der DIN 19698-1:25014-05

Mehrere Einzelproben können zu einer Laborprobe für die Analyse vereinigt und gemischt werden. Die Einzelproben werden gleichmäßig über das Haufwerk verteilt entnommen und, analog der Verfahrensweise der LAGA PN 98, können die Haufwerke charakterisierende Messergebnisse erzielt werden.

In der Praxis ist die beauftragte Anzahl der zu untersuchenden Proben aus ökonomischen Gründen in der Regel geringer als die in den beiden genannten Unterlagen empfohlenen Mindestanzahlen. Auch bei der Verringerung der Probenzahlen ist die Ermittlung der repräsentativen Werte C nach Anlage 5 StrlSchV oder der Mittelwerte  $C^M$  nach Anlage 7 StrlSchV möglich. Dazu wird vorausgesetzt, dass genügende Informationen

- aus ggf. vorherigen Messergebnissen vorliegen (Hinweise auf Homogenität),
- zu den industriellen und bergbaulichen Prozessen hinsichtlich ihrer Stationarität bekannt sind und
- über die Lagerungsbedingungen der Rückstände (stets gleiche Bedingungen) vorhanden sind.

Unter diesen Voraussetzungen kann die Probenanzahl optimiert werden, und es werden folgende Probenanzahlen je Volumen vorgeschlagen. Die Abbildung 5-7 zeigt orientierende aus praktischen Erfahrungen abgeleitete, von dem Volumen der Haufwerke (Grundmenge) in  $m^3$  abhängige Probenanzahlen für die Entnahme von Einzelproben. Die volumenabhängige Probenanzahl ist nicht als feste, sondern eher als orientierende Größe zu verstehen, die abhängig von der Haufwerkspezifika bzw. den oben genannten, verfügbaren Informationen größer oder kleiner (graue Bereiche im Diagramm) sein kann.

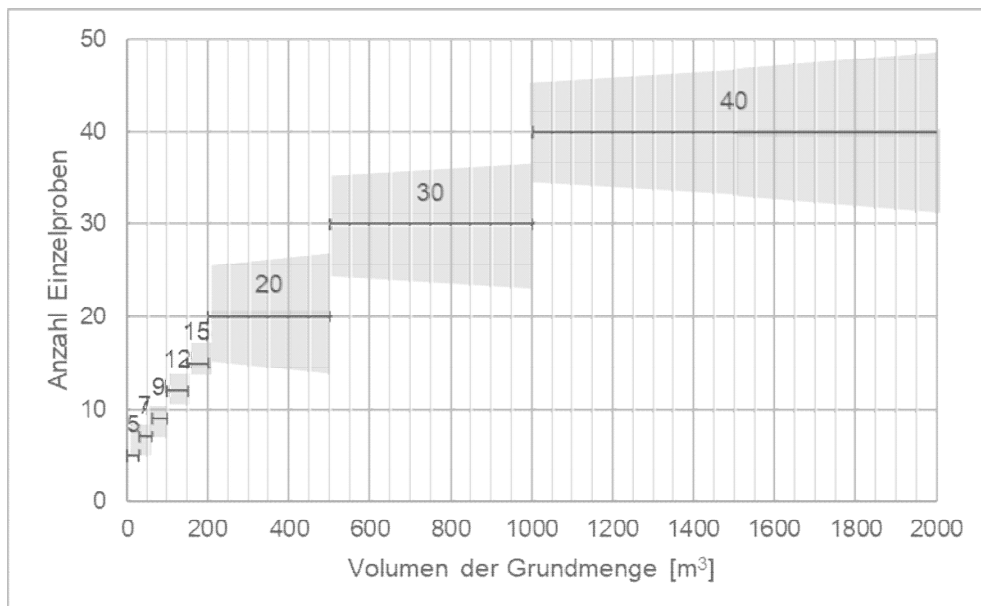


Abbildung 5-7: Empfohlene Anzahl von Einzelproben bei Haufwerken zur Bestimmung der spezifischen Aktivitäten von Radionukliden in Rückständen; grau: mögliche Variation der Probenanzahl (orientierend), abhängig von den Vorkenntnissen des zu bewertenden Haufwerks

Analog der Vorgehensweise in der LAGA PN 98 können bei sicher anzunehmender Homogenität des Rückstandes insbesondere die reduzierten Probenanzahlen entsprechend der Handlungshilfe zur LAGA PN 98 [7] angewendet werden.

Zur Orientierung kann die folgende „Faustformel“ angewendet werden: Bis zu einem Volumen der Grundmenge von 600  $m^3$  können vier Einzelproben jeweils zu einer Laborprobe vereinigt werden. Bei größeren Volumina kann eine Laborprobe aus fünf Einzelproben hergestellt werden.

#### 5.1.4 Durchführung mit Unterstützung von In-situ-Messungen und Entnahme von Einzelproben aus der Grundmenge mit variabler Probenanzahl

Mit Hilfe von Dosisleistungsmessungen oder Messungen von Oberflächenzählraten mit Kontaminationsmonitoren kann die Beprobung von Haufwerken mit Rückständen begleitet und damit die erforderliche Probenanzahl zur Bewertung des Haufwerks optimiert werden. Mit Hilfe der Messtechnik können vor Ort die Aktivitätsverteilung erfasst und Einzelproben abhängig von der Gesamtverteilung der Vorortmesswerte vom Minimum bis Maximum ausgewählt werden.

Die Abbildung 5-8 illustriert ein Beispiel mit Messungen der Ortsdosisleistung in  $\mu\text{Sv/h}$  und der Oberflächenzählraten in IPS. Die Messwerte können für die Auswahl von Einzelproben verwendet werden. Das vorliegende Beispiel zeigt die vor Ort während der Probenahme von Kupferschlackesteinen gemessenen Werte.

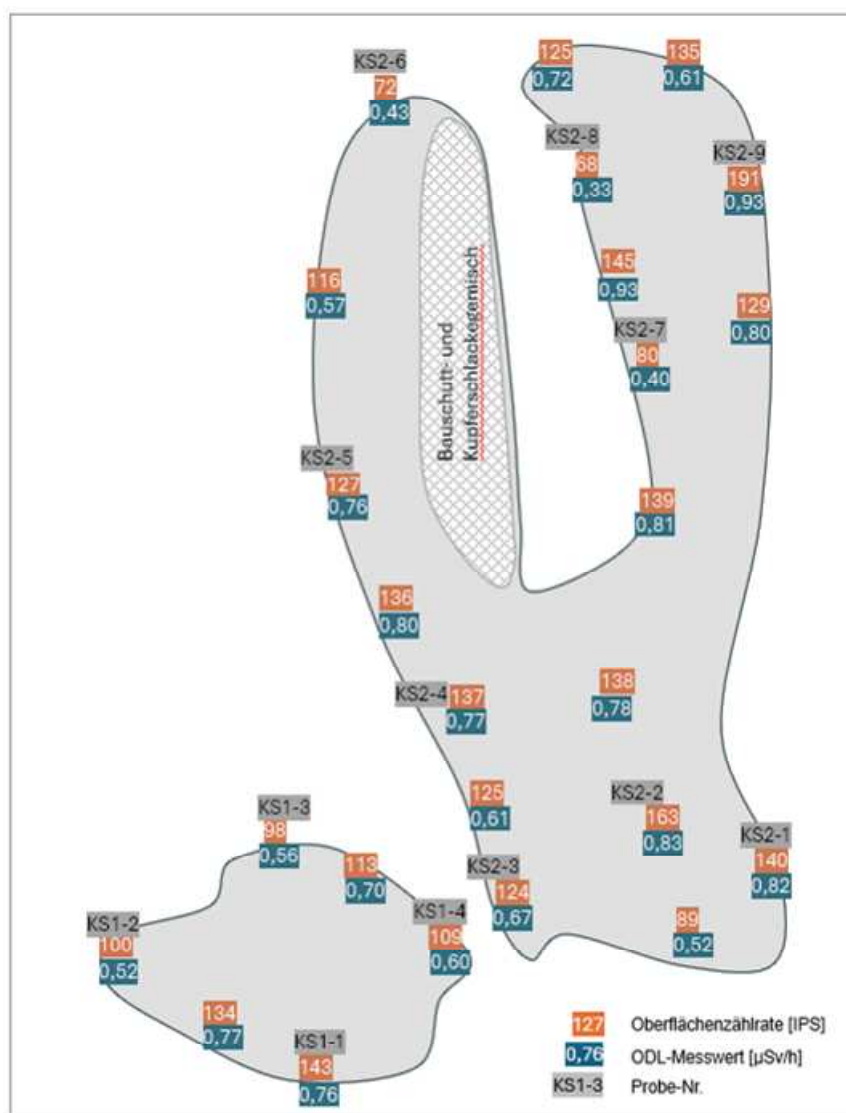


Abbildung 5-8: Beprobtes Haufwerk mit Kupferschlackesteinen auf einer Betriebsfläche (Grundriss) mit vor Ort erfassten Messungen zur Ortsdosisleistung in  $\mu\text{Sv/h}$  und zu Oberflächenzählraten in Impulse je Sekunde (IPS)

In der Abbildung 5-9 sind die Verteilungen der ermittelten spezifischen Ra-226-Aktivitäten in Bq/g, der ODL-Messdaten (Kontaktmessungen) in  $\mu\text{Sv/h}$  sowie der Oberflächenzählraten in IPS als Box-Plots dargestellt.

Mit Boxplots kann die Streuung von Daten dargestellt werden. Im vorliegenden Fall werden jeweils Minimum, 1. Quartil, Mittelwert, 3. Quartil und das Maximum der Messdatenverteilung dargestellt. Die drei Diagramme in der Abbildung 5-9 zeigen, abhängig von der jeweiligen Messgröße, eine gute Vergleichbarkeit zur relativen Verteilung der Messdaten. Auf dieser Grundlage ist somit unmittelbar eine Abschätzung zur Aktivitätsverteilung in einem Haufwerk möglich.

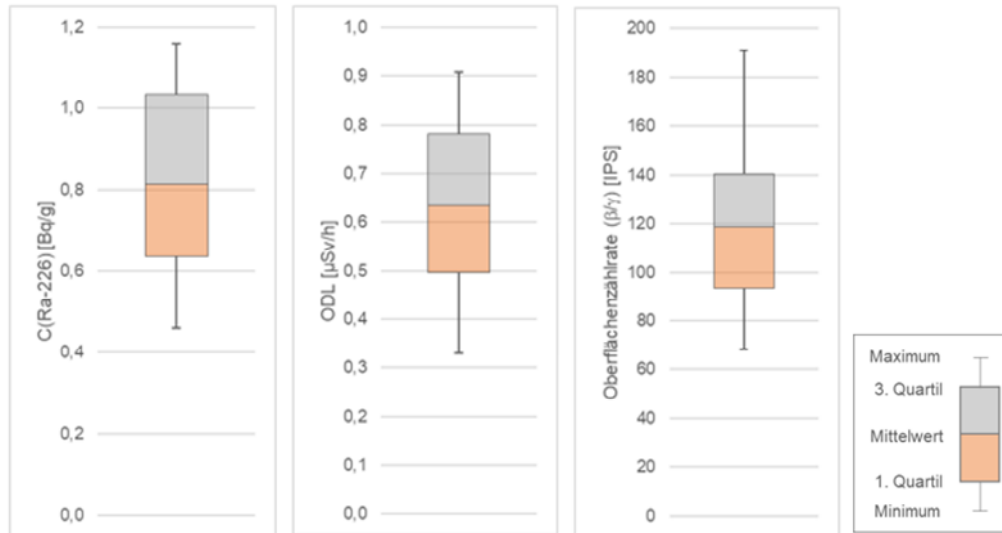


Abbildung 5-9: Boxplot von ODL-Messdaten und Oberflächenzählraten im  $\beta$ -/ $\gamma$ -Modus von Messungen an einem Haufwerk von Kupferschlackesteinen

Es ist allerdings zu beachten, dass das Haufwerk in seinem Aufbau homogen zusammengesetzt ist, also keine Hot Spots beinhaltet. Mit Bezug auf die bereits in Kap. 5.1.2 beschriebene Beprobung eines Haufwerks mit feinkörnigen, monazit-/zirkonhaltigen Sanden und Stäuben als Rückständen aus der Produktion von Rutil- und Ilmenitkonzentraten zeigt die Abbildung 5-10 die gemessenen ODL-Werte von den Proben aus dem Haufwerk und separat vom Staub. Auf Grund der deutlich geringeren Masse und damit der geringen absoluten Aktivität der Radioaktivität (bei deutlich höherer spezifischer Aktivität) bilden die ODL-Messwerte spezifische Aktivität des abgewehten Staubs nicht ab. Die gammaspektrometrisch an Proben im Labor ermittelten spezifischen Aktivitäten sind im Staub um den Faktor 2 bis 3 (Uranreihe) bzw. 6 (Thoriumreihe) höher als in den übrigen Haufwerken. Die ODL allein kann damit zu Fehlschlüssen hinsichtlich der spezifischen Aktivität führen.

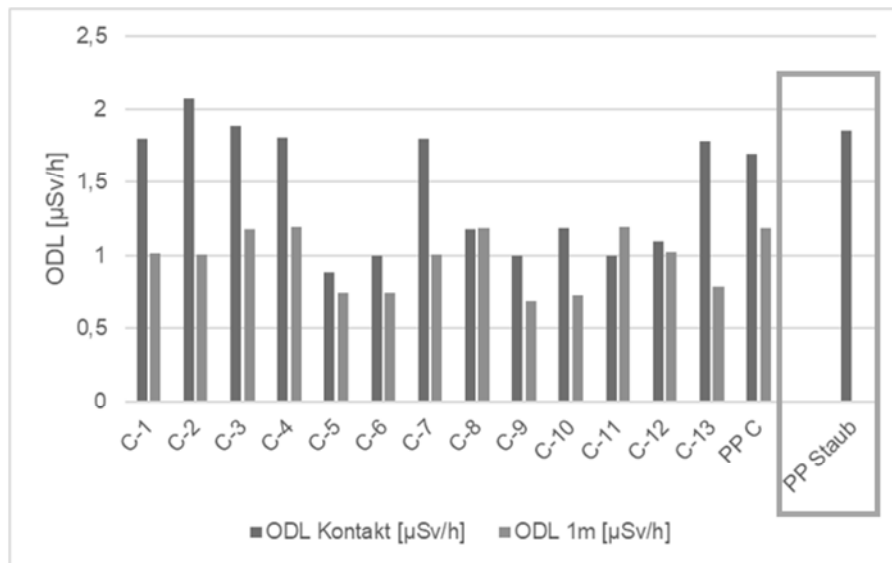


Abbildung 5-10: ODL-Messwerte der Gammastrahlung an den Probenahmepunkten aus dem Haufwerk C-1 bis C-12 und PP C und dem separat gelagerten Staub PP Staub (roter Rahmen)

### 5.1.5 Beprobung von Hot Spots in Haufwerken

Wenn in Haufwerken auf Basis visueller Einschätzung oder mittels unterstützender In-situ-Messungen eine ungleichmäßige Aktivitätsverteilung festgestellt wird, können einzelne Bereiche abgegrenzt und als Hot Spots charakterisiert werden. Hot Spots sollten separiert und getrennt beprobt werden. Wenn im Ergebnis von In-situ-Messungen eingeschätzt werden kann, dass Hot Spots in einem zu untersuchenden Haufwerk nur einen geringen Anteil (< 10 %) aufweisen, sollten sie als „Ausreißer“ gewertet und bei der Probenahme für die Bewertung der Grundgesamtheit außer Acht gelassen werden.

Bei einem Hot Spot-Anteil > 10 % in einem Haufwerk ist der Aktivitätsanteil in separierten Proben zu bestimmen. Die erforderliche Anzahl der Proben und der Probenahmeplan sind für die Hot-Spot-Beprobung durch die Person mit der erforderlichen Fachkunde fallspezifisch festzulegen. Die Hot-Spot-Proben sind eindeutig als solche durch Beschriftung zu kennzeichnen.

#### Ermittlung von Ausreißern:

„Ausreißer“ werden identifiziert, wenn einzelne, deutlich vom Rest der Messdaten (ODL oder Zählrate) abweichende Werte registriert werden (siehe Kap. 4.5). Das Maß der deutlichen Abweichung ist zu definieren und kann fallspezifisch festgelegt werden. Als Faustregel sollte auf der Grundlage von mindestens 10 Messwerten der Median ermittelt werden. Anschließend wird eine relative Abweichung von 30 % des Medians zu diesem Wert addiert.

## 5.2 Beprobung aus Behältnissen und festen Bauwerken (Becken)

### 5.2.1 Allgemeines

In Big Bags, Fässern oder Containern können alle in der Tabelle 3-1 aufgeführten Arten von Grundmengen anfallen, d.h.,

- a) Stäube,
- b) Schlämme,
- c) Kiese, Sande, Kornaktivkohle,

- d) Kontaminierter Boden,
- e) Kontaminierter Bauschutt, Formstücke,
- f) Ablagerungen,
- g) Betriebsmittel.

Bei a) bis f) handelt sich um

- schlammig-pastöse (nasse bzw. sehr feuchte),
- stichfeste (erdfeuchte bzw. trockene) oder auch
- lockere, tonige/sandige/kiesige

Rückstände. Betriebsmittel können durch Anhaftungen schlammiger oder staubiger Rückstände kontaminiert sein.

Flüssige Rückstände weisen in Gebinden in vielen Fällen eine durch Dichteunterschiede bedingte Schichtung auf und sind inhomogen. Sande, Kiese, Aktivkohle, Gichtschlämme und Filterstäube sind im Regelfall homogen.

In Einzelfällen befinden sich auch gemischte Rückstände in den Gebinden, in denen lockere, sandige und pastöse, tonig-schluffige Materialien wechseln. Diese Inhomogenitäten können sich auch auf die Verteilung der spezifischen Aktivitäten bei den Radionukliden der U-238- und der Th-232-Zerfallsreihe auswirken. Sie sind durch eine visuelle Einschätzung mit Hilfe von stichpunktartigen Probenahmen mittels Bohrstock oder Probenstechern über die gesamte Behältnistiefe oder z. B. mittels Dosisleistungsmessungen als Kontaktmessungen an der Außenseite der Behältnisse identifizierbar.

Gemischtkörnige Rückstandsarten sollten in Gebinden zunächst als inhomogen charakterisiert werden.

### **5.2.2 Arten von Behältnissen**

Es gibt unterschiedliche Arten von Behältnissen, in denen die oben genannten Rückstandsarten gesammelt werden. Big Bags (0,5 m<sup>3</sup> bis ca. 2 m<sup>3</sup>), 30- bis 120-Liter-Gebinde (z.B. PE Standarddeckelfässer) oder Container mit einem Fassungsvermögen von 1 m<sup>3</sup> bis einigen 10 m<sup>3</sup> werden exemplarisch in den Abbildungen 5-11 bis 5-15 gezeigt.

Rückstände z. B. aus der Erdöl-/Erdgasindustrie können mit Quecksilber und/oder H<sub>2</sub>S belastet sein und müssen insbesondere aus diesem Grund in gut verschließbaren Behältnissen bis zu ihrer Beseitigung gelagert werden (siehe Beispiel in Abbildung 5-13).

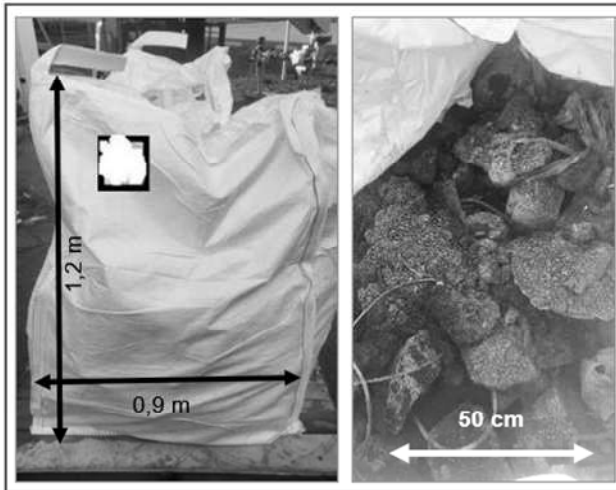


Abbildung 5-11: 1,1-m<sup>3</sup>-Big Bag mit Formstücken aus Bauschutt



Abbildung 5-12: 120-Liter-PE-Gebinde mit Betriebsmitteln



Abbildung 5-13: 1-m<sup>3</sup>-Container mit schlammigen Rückständen

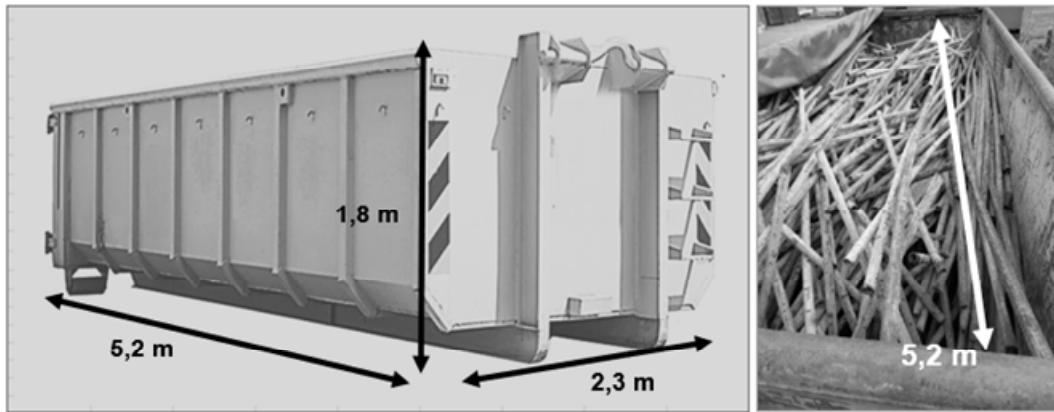


Abbildung 5-14: 40-m<sup>3</sup>-Container mit radioaktiv kontaminierten Rohren



Abbildung 5-15: Container mit Filtersanden

### 5.2.3 Feste Bauwerke (Becken)

Eine besondere Gruppe von Behältnissen sind feste Bauwerke bzw. Betonbecken mit z. B. Filtersanden für die Aufbereitung von Grundwasser (siehe Abbildung 5-16). Die Filtersande werden in großen Zeitabschnitten (einige Jahrzehnte) ausgebaut, in Entwässerungscontainern (siehe Abbildung 4-18) zum Transport bereitgestellt und beseitigt.



Abbildung 5-16: Festes Bauwerk (Becken) mit Filtersanden in einem Wasserwerk

#### 5.2.4 Entnahme von Proben

Die LAGA PN 98 [4] legt für die Bewertung von Abfällen aus Big Bags, Fässer, Trommeln oder anderen Gebinden Mindestanzahlen dieser Behältnisse fest, aus denen Einzelproben zu entnehmen und Mischproben herzustellen sind (siehe Abbildung 5-17). Dabei gilt als Voraussetzung, dass die zu bewertende Rückstandsmenge von gleicher Herkunft ist und damit eine einheitliche Charakteristik aufweist.

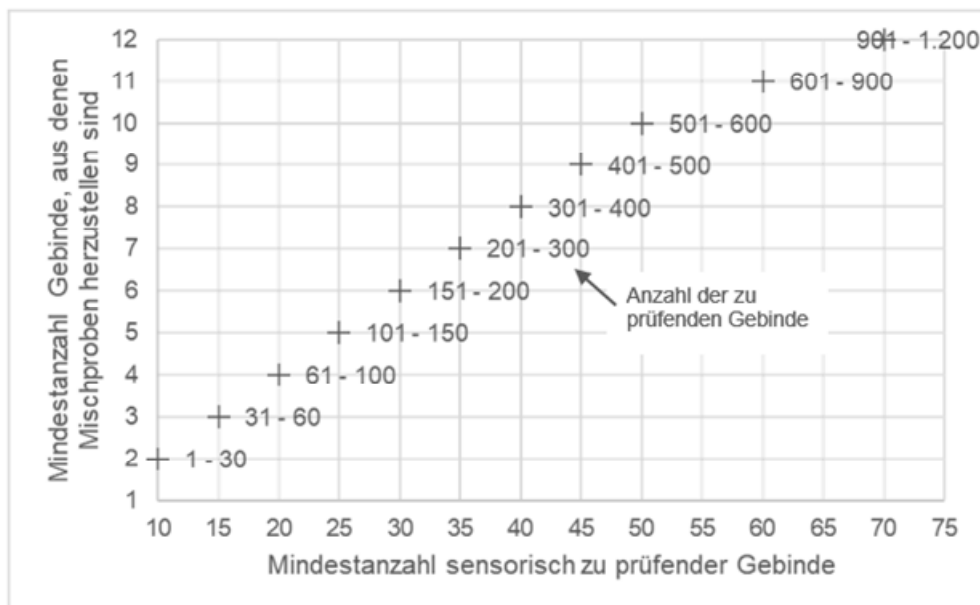


Abbildung 5-17: Mindestanzahl der zu beprobenden Big Bags, Fässer, Trommeln und Gebinde (nach LAGA PN 98)

Die Probenahmestrategie nach der LAGA PN 98 orientiert sich an der Anzahl der zu prüfenden Gebinde. Das tatsächliche Volumen von Abfällen in diesen Gebinden bleibt bei der Festlegung der Anzahl von Proben jedoch unberücksichtigt. Für die Beprobung von Rückständen wird im folgenden Kap. 5.2.5 eine volumenbezogene Festlegung der Anzahl der zu entnehmenden Proben vorgeschlagen.

### 5.2.5 Durchführung der Beprobung mit Unterstützung von In-situ-Messungen

Für die Beprobung von Rückständen kann die Mindestanzahl von zu entnehmenden Einzelproben zur Ermittlung von repräsentativen Werten der spezifischen Aktivitäten optimiert werden: Die Tabelle 5-1 beinhaltet eine Empfehlung für auf das Volumen bezogene Anzahlen von Einzelproben für die Beprobung von Rückständen aus Behältnissen. Die Probenahme kann mit und ohne unterstützende In-Situ-Messungen durchgeführt werden. Abhängig von der Messwerteverteilung (ODL, Beta-/Gamma-Zählraten), aus denen die Aktivitätsverteilung (Homogenitätsgrad) eingeschätzt werden kann, ist eine Reduzierung der Anzahl der zu entnehmenden Proben möglich.

Die In-situ-Messungen werden als Kontaktmessungen an den Außenwänden der Behältnisse bzw. auf der Oberfläche der Rückstände durchgeführt. Die Anzahl der Messungen hängt von der Größe der Außenfläche ab. Im Regelfall wird bei Gebinden mit bis zu ca. 1 m<sup>3</sup>-Volumen an vier Seiten sowie oben und, wenn möglich, auch unten jeweils ein Messwert erfasst. Bei einem Füllstand von weniger als etwa 2/3 der Gebindehöhe ist eine Messung oben nicht sinnvoll. Bei größeren Behältnissen sollte abhängig von der Größe der Außenflächen je ca. 2 m<sup>2</sup> bis 3 m<sup>2</sup> eine Messung durchgeführt werden.

Den erforderlichen Probenanzahlen in Tabelle 5-1 liegt die folgende Vorgehensweise zugrunde: Aus den Messwerten wird die Abweichung des Maximums und des Minimums vom arithmetischen Mittelwert geprüft. Dazu werden Toleranzschwellen  $\leq 30\%$ ,  $\leq 50\%$  und  $> 50\%$  für die Abweichungen definiert. Die erforderliche Probenanzahl richtet sich nach der in der Tabelle 5-1 angegebenen Abweichungsklasse für Beprobungen mit unterstützender In-Situ-Messung. Wird bei den Probenahmen keine unterstützende In-Situ-Messtechnik eingesetzt, ist die Probenanzahl in der rechten Spalte anzuwenden.

Tabelle 5-1: Orientierende Anzahl von Einzelproben aus den zu bewertenden Chargen mit und ohne Einsatz In-Situ-Messtechnik (Kontaktmessung ODL)

| Volumen der zu bewertenden Charge | Abweichung Min/Max <sup>1)</sup> $\leq 30\%$ vom Mittelwert <sup>2)</sup> | Abweichung Min/Max <sup>1)</sup> $30\% - \leq 50\%$ vom Mittelwert <sup>2)</sup> | Abweichung Min/Max <sup>1)</sup> $> 50\%$ vom Mittelwert <sup>2)</sup> oder ohne Unterstützung von In-Situ-Messtechnik |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bis 2 m <sup>3</sup>              | 1                                                                         | 1                                                                                | 2                                                                                                                      |
| 2 bis 5 m <sup>3</sup>            | 2                                                                         | 2                                                                                | 3                                                                                                                      |
| 5 bis 15 m <sup>3</sup>           | 2                                                                         | 3                                                                                | 4                                                                                                                      |
| 15 bis 30 m <sup>3</sup>          | 3                                                                         | 5                                                                                | 7                                                                                                                      |
| 30 bis 50 m <sup>3</sup>          | 5                                                                         | 7                                                                                | 10                                                                                                                     |
| 50 bis 100 m <sup>3</sup>         | 7                                                                         | 10                                                                               | 14                                                                                                                     |
| $> 100\text{ m}^3$                | Nach Einschätzung oder 6 Proben je                                        | einer fachkundigen angefangene 100                                               | Person mit der Fachkunde S9.2 m <sup>3</sup>                                                                           |

<sup>1)</sup> Min = Minimum; Max = Maximum

<sup>2)</sup> Arithmetischer Mittelwert

Die in der Tabelle 5-1 aufgeführten Probenanzahlen mit unterstützender In-situ-Messtechnik besitzen orientierenden Charakter. Die Messungen sollten gemäß den Anforderungen in § 61 Abs. 1 StrlSchG von Personen mit der erforderlichen Fachkunde im Strahlenschutz durchgeführt oder mindestens von ihnen begleitet werden. Je nach individueller Einschätzung der Rückstände oder wenn bereits Analysedaten aus

vorherigen Probenahmen zur Verfügung stehen, kann die Probenanzahl durch die fachkundige Person modifiziert bzw. optimiert werden.

Bei der Entnahme von mehreren Proben aus einem Behältnis sind die Probenahmepunkte mit Lagebezeichnungen zu definieren. Diese Bezeichnungen können beispielsweise wie in den Abbildungen 5-18 bis 5-21 festgelegt werden. Soweit möglich, sollten die Probenahmepunkte zur Orientierung an den Außenseiten der Behältnisse markiert bzw. beschriftet werden, um bei möglichen Unklarheiten von Analyseergebnissen die Proben zurückverfolgen zu können.

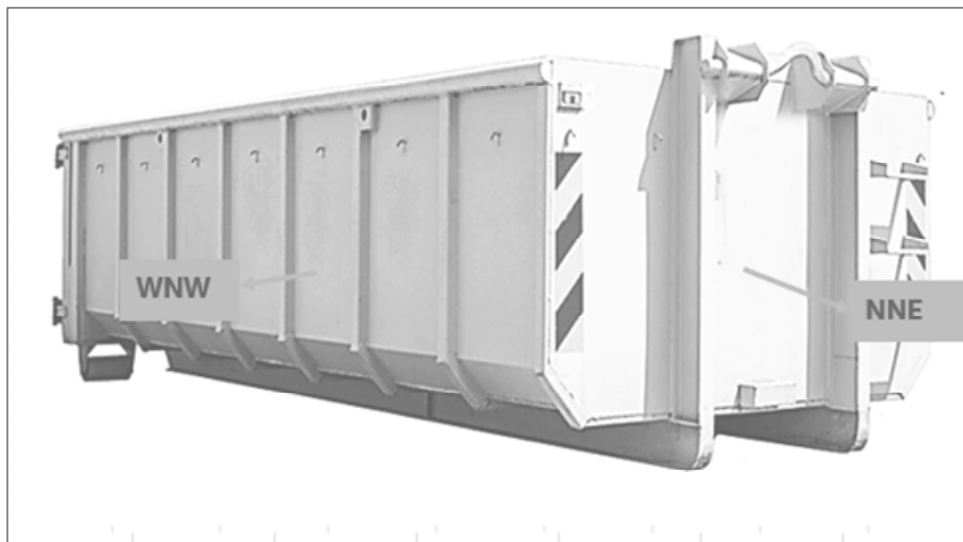


Abbildung 5-18: Lage und Kennzeichnung von Mess- und Probenahmepunkten auf der Außenseite von Containern (Beispiel 1 mit 40 m<sup>3</sup>-Container)

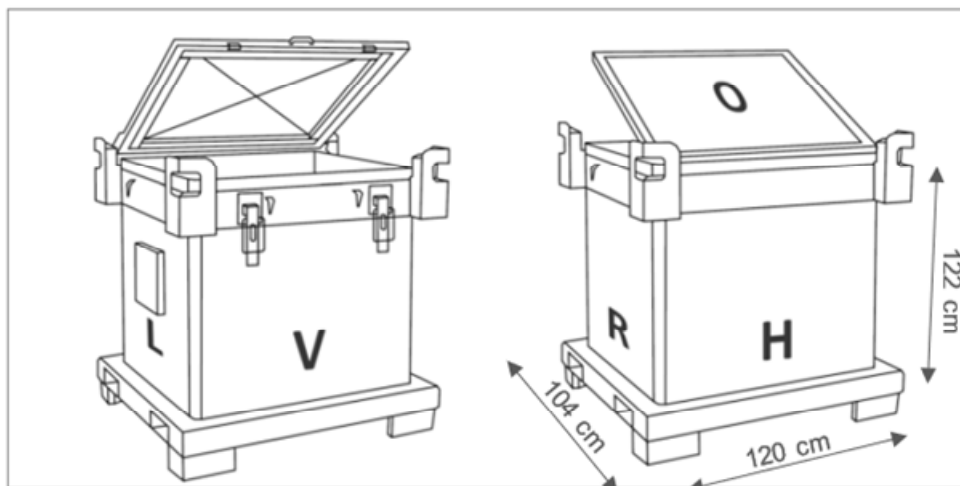


Abbildung 5-19 Lage und Kennzeichnung von Mess- und Probenahmepunkten auf der Außenseite von Containern (Beispiel 2 mit 1,1 m<sup>3</sup>-Container)

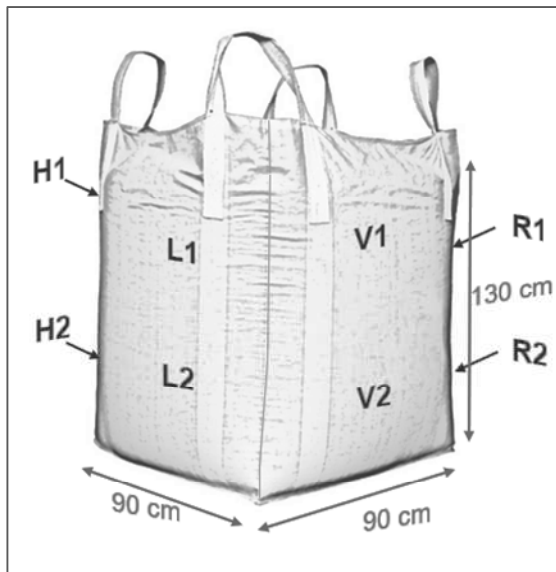


Abbildung 5-20 Lage und Kennzeichnung von Mess- und Probenahmepunkten auf der Außenseite von Big Bags



Abbildung 5-21: Lage und Kennzeichnung von Mess- und Probenahmepunkten auf der Außenseite von Fässern (60 oder 120 L Volumen)

### 5.2.6 Beprobung von Hot Spots aus Behältnissen

Wie bei der Beprobung von Haufwerken bereits beschrieben (Kap. 4.3.5), können auch in Behältnissen ungleichmäßige Aktivitätsverteilungen als Hot Spots visuell oder mittels unterstützender In-situ-Messungen festgestellt und eingegrenzt werden. Sie sollten separiert und getrennt beprobt werden. Anhand von In-situ-Messungen an den Außenseiten der Behältnisse kann eingeschätzt werden, ob Hot Spots einen größeren Anteil ( $> 10\%$ ) aufweisen oder als „Ausreißer“ bei der Probenahme für die Bewertung der Grundgesamtheit außer Acht gelassen werden können.

Der Anteil der Hot Spots an der Gesamtaktivität der Grundgesamtheit ist an separierten Proben zu bestimmen und muss entsprechend des Massenanteils in der spezifischen Aktivität berücksichtigt werden. Die erforderliche Anzahl der Proben und der Probenahmeplan ist für die Hot-Spot-Beprobung fallspezifisch festzulegen. Die Hot-Spot-Proben sind eindeutig als solche durch Beschriftung zu kennzeichnen.

Statistische „Ausreißer“ werden identifiziert, wenn einzelne, deutlich an den Außenseiten der Behälter abweichende Werte der Messdaten (ODL oder Zählrate) registriert werden (siehe Kap. 4.5). Das Maß der deutlichen Abweichung ist zu definieren und fallspezifisch durch eine fachkundige Person bzw. nach deren Anleitung festzulegen.

### 5.3 Beprobung von Ablagerungen aus Rohren oder Anlagenteilen / Beprobung von Anlagenteilen

#### 5.3.1 Allgemeines

Mit natürlich vorkommenden Radionukliden kontaminierte Ablagerungen in Rohren oder an Anlagenteilen (Grundmenge f) gemäß Tabelle 3-1) können in drei unterschiedlichen Formen eingeordnet werden:

- in das Metall eingedrungene Radionuklide,
- am Metall festhaftende Ablagerungen,
- vom Metall ablösbare Ablagerungen.

Ein Beispiel für in das Metall eingedrungene Radionuklide sind z. B. Pb-210-Kontaminationen in Anlagenteilen aus der Erdgasindustrie (siehe Abbildung 5-22, linkes Bild). Ein wesentlicher Aspekt ist die Verhältnismäßigkeit bzw. die wirtschaftliche Zumutbarkeit, festhaftende Ablagerungen von Schrottmaterialien zu entfernen (siehe mittleres Bild in Abbildung 5-22) und separat zu bewerten, oder andernfalls die Metallkomponente und damit die gesamte Schrottmasse in die Bewertung mit einzubeziehen. Diese Unterscheidung ist maßgeblich zur Ermittlung der Überwachungsbedürftigkeit gemäß Anlage 5 StrlSchV.

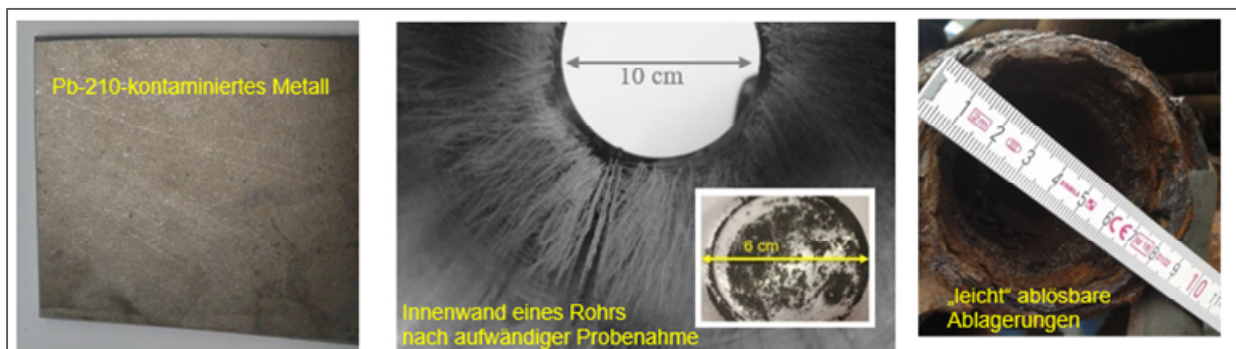


Abbildung 5-22: Beispiele für in das Metall eingedrungene Radionuklide (links), am Metall festhaftende Ablagerungen (mitte) und vom Metall ablösbare Ablagerungen (rechts)

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die konstruktionsbedingte „Erreichbarkeit“ von NORM-kontaminierten Ablagerungen für die Beprobung, z. B. bei Tanks mit Einbauten und nur kleinen Öffnungen (Abbildung 5-23). Eine Beprobung der schwer erreichbaren Bereiche in diesen Anlagenteilen ist mit erheblichem Aufwand wie z. B. einer Zerlegung der Anlagenteile verbunden, der in der Regel nicht verhältnismäßig und für die Ermittlung der Überwachungsbedürftigkeit nicht wesentlich zielführend ist. Mit Hilfe von ODL-Messungen oder Messungen mit Kontaminationsmessgeräten kann unter Berücksichtigung der Abschirmwirkung des Metalls die Aktivitätsverteilung innerhalb der Anlagenteile in guter Näherung eingeschätzt werden.



Abbildung 5-23: Tank mit NORM-kontaminierten Ablagerungen an den Innenwänden

### 5.3.2 Arten von Rohren/Anlagenteilen

Die Ablagerungen sind in den meisten Fällen an Rohren und Anlagenteilen im Zusammenhang mit der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas und aus der Tiefengeothermie bekannt. Es handelt sich u. a. um Förderrohre, Erdöl- bzw. Erdgasleitungen einschließlich Verdichterstationen, mit denen der durch Gasentnahme und Strömungsverluste verursachte Druckabfall kompensiert wird.

Auch in anderen chemischen Industriebereichen sind Bildungen von Ablagerungen an den technischen Anlagen (Fließ-/Förderbänder, Filtermaterialien, Abluftsysteme und sonstigen Anlagenteilen) bekannt. Es handelt sich sowohl um Metall-/Stahlkomponenten als auch um Kunststoffmaterialien, auf denen sich natürlich vorkommende Radionuklide enthaltende Krusten ablagern können.

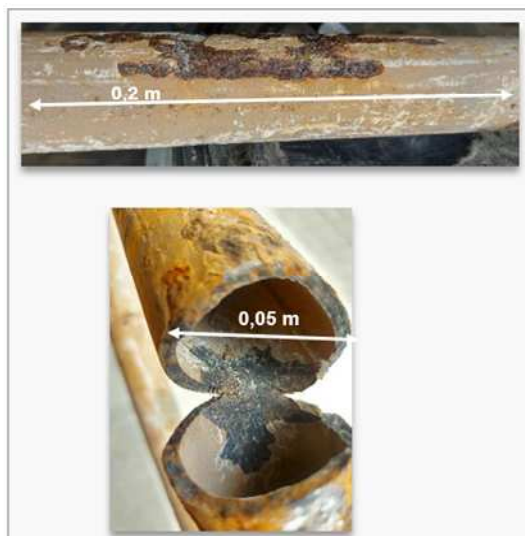


Abbildung 5-24: Rohr mit Ablagerungen sowohl auf der Außenseite als auch in der Rohrrinnenwand

### 5.3.3 Entnahme von Proben

Für die Ermittlung der repräsentativen Werte der größten spezifischen Aktivitäten  $C_{U238max}$  und  $C_{Th232max}$  ist unter den beschriebenen Umständen eine normierte Festlegung von Probenanzahlen nicht möglich, und es ist fallspezifisch eine angepasste Probenahmestrategie zu erstellen.

### 5.3.4 Durchführung der Beprobung mit Unterstützung von In-situ-Messungen

Bei Ablagerungen sind begleitende In-situ-Messungen nur mit ODL-Messgeräten für Gammastrahlung sinnvoll, da Betastrahlung in der Regel durch das Metall von Rohren und sonstigen Anlagenteilen zu stark

abgeschirmt wird. Auf Grund der unbekannten Geometrie der Ablagerungen im Inneren der Anlagenteile sowie der Dicke und inneren Struktur der Metallbauteile ist eine Zuordnung der ODL zur Aktivität der Ablagerung in vielen Fällen nicht belastbar möglich. ODL-Messungen können dennoch unterstützend für die qualitative Erkundung der Kontaminationssituation (z.B. Lokalisierung von Rückständen im Inneren von Bauteilen) eingesetzt werden. Damit kann eine zielgerichtete Gewinnung von Probenmaterial von den betroffenen Stellen in Anlagenteilen erzielt werden, insbesondere durch eine gezielte Öffnung von Anlagenteilen bzw. Ausbohrung der Metallwandung oder Aussägen von kontaminierten Teilbereichen.

Eine Ausnahme bilden gerade Rohre und andere regelmäßig geformte Bauteile. Die kombinierten gammaspektrometrischen Laboranalysen an Scale-Rückständen und Vergleichsmessungen der ODL an der Außenwand ermöglichen für diese Materialien eine Korrelation, aus der für weitere Rohre/Bauteile mit gleicher Geometrie, Wandstärke und Herkunft (Lagerstätte) die flächenbezogene Aktivität abgeschätzt werden kann. Zur Verifizierung des Verhältnisses aus ODL an der Außenseite und Aktivität an der Innenseite ist es empfehlenswert, regelmäßig Proben aus den Rohren/Bauteilen zu entnehmen, im Labor zu untersuchen und mit den ODL-Messwerten zu vergleichen. Erforderlichenfalls ist der Kalibrierfaktor für das ODL-Aktivitäts-Verhältnis anzupassen.

## **6 Ergänzende praktische Hinweise für die Beprobung von Rückständen**

### **6.1 Allgemeines zur Probenahmeplanung/-vorbereitung**

Für eine Beprobungskampagne an einem Standort ist je nach Umfang ein angemessener Zeit- und Personalaufwand zu kalkulieren, damit

- die Probenahme und begleitende Messungen mit der erforderlichen Sorgfalt durchgeführt
- das Risiko fehlerhafter oder lückenhafter Dokumentation vermieden

werden können. Das jeweilige für eine Anlage bzw. die Rückstände verantwortliche Unternehmen ist vorab auf diese Randbedingungen hinzuweisen.

Der Aufwand für logistische Vorbereitungen kann einen erheblichen Anteil des zur Verfügung stehenden Zeitbudgets beanspruchen und ist ebenfalls angemessen zu planen. Es sind u. a. folgende Aufgaben zu planen:

- Beschaffung von Gabelstaplern oder Hubwagen zur Bereitstellung von Rückstandsgebinden,
- Anfahrt von Besprechungsräumen zum Standort der zu beprobenden Rückstände,
- Zeit für Arbeitsschutz-Belehrungen und -Unterweisungen, Vorgespräche, Abstimmung von Vertraulichkeitsvereinbarungen etc.,
- Zeit für Beschaffung von Schlüsseln und das Öffnen von Toren, Containern, Lagerhallen,
- Zeit für Voruntersuchungen an (und die Auswahl von) Rückstandsgebinden und die Abstimmung der weiteren Vorgehensweise,
- Bedeutung von Mittags- und Frühstückspausen für Beschäftigte der Unternehmen, die zu längeren Unterbrechungen im Ablauf führen können,
- Unvorhergesehene Unterbrechungen durch Telefonate, dringende Besprechungen und andere Verpflichtungen der Ansprechpersonen im Unternehmen können den Zeitplan erheblich beeinflussen.

Die rechtzeitige Vorbereitung der erforderlichen Ausrüstung, Werkzeuge etc. ist essenziell, da bei unvollständiger Ausrüstung eine wiederholte Anreise oft nur mit erheblichem organisatorischem Aufwand möglich ist. Im Folgenden ist eine Aufzählung von Ausrüstungsgegenständen zusammengestellt, die auf den jeweiligen Einsatzfall anzupassen ist:

- Zusammenstellung von Unterlagen mit Vorinformationen (Angaben zu Rückstandsart, Massen, ggf. Ergebnisse aus vorherigen Probenahmen)
- Vorbereitung von Formblättern/Protokollen zur Dokumentation der Probenahme
- Maßband/Gliedermaßstab,
- Bohrstock, Edelman-Auger, Spiralbohrer für Boden- und Haufwerksproben, Schappe („Flap gouge auger“), Kiesbohrer („Gravel auger“),
- Werkzeuge (Kreuzschraubendreher) für Montage und Demontage von Probenahmegeräten (Schappe, Bohrgestänge),
- Hammer, Gummihammer,
- Schaufel,
- Ebene, saubere Platte (z. B. Blech oder Kunststoffplatte mit farbllichem Kontrast zur Rückstandsfarbe) für die Ausbreitung und visuelle Kontrolle von Proben,
- Kleiner Schraubendreher, Spatel oder kleine Schaufel für Probenentnahme aus Bohrer/Bohrstock,
- PSA (Arbeitsschutzhandschuhe, Nitrilhandschuhe, Gummistiefel, Stahlkappenschuhe, Schutzbrille, Helm, ggf. Schutzanzug),
- Klemmbrett, wasserfeste Stifte, Marker,
- Probenbehälter, Tüten oder Becher,
- Kamera,
- GPS.

Verfügbare Informationen sind im Rahmen der Probenahmeplanung zu erfragen bzw. zu recherchieren, zu verarbeiten und systematisieren, und ggf. im Rahmen einer Vorerkundung zu überprüfen und durch weitere Informationsbeschaffung, Recherchen und Rückfragen zu vertiefen.

Nur mit diesen Vorbereitungen ist gewährleistet, dass überhaupt die "richtigen" Proben an den "richtigen" Stellen und dann ggf. auch mit der statistisch erforderlichen Anzahl genommen werden. In der Praxis treten jedoch auch bei optimaler Vorbereitung immer wieder unvorhergesehene Situationen auf, die in einer vorab vorbereiteten Probenahmeplanung nicht berücksichtigt werden konnten und die vor Ort eine fachgerechte Anpassung erfordern. In vielen Fällen stellt sich erst nach Auswertung der Proben heraus, welche Fragestellungen in den Vordergrund rücken und wie die konkrete Probenahme und ggf. auch die grundsätzliche Probenahmestrategie zu modifizieren oder zu verfeinern ist.

Wenn keine Vorkenntnisse zur Verfügung stehen oder nicht ausreichend beachtet werden, kann die Charakterisierung der Rückstände und die Interpretation der Messergebnisse erfahrungsgemäß weitaus fehlerhafter als beispielsweise eine unter statistischen Gesichtspunkten unzureichende Probenzahl sein.

## **6.2 Besondere Anforderungen bei der Probenahme und Hinweise zum Arbeitsschutz**

Schlämme als Rückstände z. B. aus der Erdöl-/Erdgasindustrie können mit Quecksilber und/oder Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) belastet sein und müssen insbesondere aus diesem Grund in gut verschließbaren Behältnissen bis zu ihrer Beseitigung gelagert werden. Für die Beprobung dieser Schlämme ist zu beachten, dass sie teilweise nur von speziell ausgebildetem Personal durchgeführt werden darf, da entweder Quecksilber anwesend ist und/oder sich ein explosionsfähiges und giftiges  $\text{H}_2\text{S}$ -Luft-Gemisch bilden kann. Diese Rückstände können nur mit Einhaltung strikter Maßnahmen zum Arbeitsschutz (Persönliche Schutzausrüstung inkl. Atemschutz) und mit Vorkehrungen zum Explosionsschutz beprobt werden.

In einigen Fällen können Ablagerungen an metallischen Komponenten nur durch eine gezielte Öffnung von Anlagenteilen oder Rohren mit mechanischer Bearbeitung (Sägen, Bohren) gewonnen werden. Bei einer durch diese technischen Arbeiten gegebenenfalls auftretenden Wärmeentwicklung sollten angepasste Maßnahmen, wie z.B. durch den Einsatz langsam laufender Kaltsägen oder eines Kühlmittels geplant werden. Eine Wärmeentwicklung ist insbesondere bei Anwesenheit von elementarem Quecksilber oder gesundheitsschädlichen Organikverbindungen, die verdunsten/verdampfen könnten, zu vermeiden.

## **7 Technische Hinweise für die gammaspektrometrische Analyse**

### **7.1 Probenahmebehälter und Anlieferung an das Labor**

Für die Bestimmung von spezifischen Aktivitäten natürlich vorkommender Radionuklide in Rückständen ist nach derzeitigem Stand von Wissenschaft und Technik die Gammaspektrometrie die bevorzugte Messmethode.

In den meisten Fällen werden für die zu erwartenden spezifischen Aktivitäten in Rückständen Probenmengen mit einem Volumen von 0,5 l oder 1 l eingesetzt. Wenn mit hohen spezifischen Aktivitäten zu rechnen ist, sind ggf. auch kleinere Mengen mit 30 ml bis 100 ml Volumen ausreichend. Die tatsächlich erforderlichen Probenmengen sollten bei der Probenahmeplanung mit dem Labor, in dem die gammaspektrometrischen Analysen durchgeführt werden, abgesprochen werden.

Die Proben sollten nach ihrer Entnahme in geeignete, (mit Schraubverschluss) gut verschließbare Kunststoffbehältnisse mit den entsprechenden Volumina gefüllt werden. Bei trockenen bis erdfeuchten, nicht-schlammigen Proben können auch gewöhnliche, reißfeste Polyethylenbeutel („Gefrierbeutel“) verwendet werden. Glasbehälter sollten wegen der Bruchgefahr nicht verwendet werden. Die Proben werden nach ihrer Anlieferung im Rahmen der Vorbereitung in für die Messung geeignete Messgefäße mit definierter Geometrie (z.B. Marinellibecker) umgefüllt. Während der Beprobung sind keine Maßnahmen zur Konservierung erforderlich.

Da sich die in Anlage 5 StrlSchV genannten spezifischen Aktivitäten auf die Trockenmasse der Rückstände beziehen, ist in der Regel eine Trocknung der Proben erforderlich. Für Fragestellungen im Zusammenhang mit der Erstellung einer Radionuklidbilanz kann jedoch im Einzelfall auch die auf die Originalsubstanz bezogene spezifische Aktivität relevant sein.

## 7.2 Relevante Informationen zur Probencharakterisierung

Die Aktivitätserteilung der natürlich vorkommenden Radionuklide kann z. B. in Formstücken (natürlich vorkommenden Radionuklide auf den Oberflächen oder im Volumen) oder in Materialien mit unterschiedlichen Kornverteilungen (Aufkonzentration in der Feinkornfraktion) sehr spezifisch sein. Sie ist damit für die Auswertung von gammaspektrometrischen Analysen relevant. Die relevanten Informationen aus der Charakterisierung der Proben bei deren Gewinnung, z. B. zur Homogenität, müssen dem Labor für die Probenbearbeitung mitgeteilt werden. Auf Grundlage dieser Informationen kann das Labor die Messstrategie planen.

Die Probenmaterialien müssen für die Analyse in geeignete Messbehältnisse (Marinellibecher oder zylindrische Behältnisse) gefüllt werden. Größere Formstücke müssen dementsprechend so weit zerkleinert werden, dass sie in die Messbehältnisse passen. Für die Auswertung der gammaspektrometrischen Analysen muss die Aktivitätsverteilung in den zu bewertenden Proben bekannt sein. Es handelt sich hierbei um:

- oberflächenbehaftete Kontamination oder
- voluminöse Kontamination.

Für die Einstufung als überwachungsbedürftiger Rückstand ist die Aktivität, bezogen auf das Gesamtvolumen der Proben relevant. Aus dem Grund ist darauf zu achten, dass insbesondere bei Formstücken mit oberflächenbehafteten Kontaminationen die spezifischen Aktivitäten repräsentativ für das gesamte zu bewertende Probenmaterial ermittelt werden. Bei Anwendung von Auswertetools für gammaspektrometrische Messungen muss so gut wie möglich

- die Geometrie der Probe beschrieben und
- die Aktivitätsverteilung charakterisiert

werden. Die Anpassung der Modellparameter kann sehr aufwändig sein. Wenn vorausgesetzt werden kann, dass die Aktivität sich auf die Oberflächen der Materialien konzentriert, kann es im Einzelfall sinnvoll sein, die „Kontamination“ von den Formstücken abzukratzen. Damit kann das Probenvolumen für die gammaspektrometrischen Analysen reduziert werden. Die Probengewinnung kann mit begleitenden Oberflächenkontaminationsmessungen optimiert werden, und hinterher ist für die Ermittlung von repräsentativen Werten der spezifischen Aktivitäten in der Gesamtprobe der Anteil des separierten Probenmaterials zu ermitteln und entsprechend zu bilanzieren.

Bei gemischtkörnigen, z. B. tonig bis sandigen Probenmaterialien ist darauf zu achten, dass das Kornspektrum in der Messprobe die gesamte, angelieferte Probe abbildet. Denn feinkörnige, tonig-schluffige Materialien bieten proportional zur Gesamtoberfläche der Kornfraktionen mehr Adsorptionsplätze als sandige Materialien, an denen Elemente wie Radium, Thorium oder Blei anhaften können. Tonige Materialien haben zudem eine hohe Kationenaustauschkapazität, durch die diese Elemente als Ionen durch elektrostatische Anziehung oder Komplexbildung gut binden können [15]. Unterschiedliche Kornverteilungen in der Messprobe können für die Größe der spezifischen Aktivitäten erhebliche Auswirkungen haben.

## 8 Literatur-/Unterlagenverzeichnis

- [1] Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), in der jeweils gültigen Fassung.
- [2] Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), in der jeweils gültigen Fassung.
- [3] Anforderungen an den Erwerb und die Aktualisierung der Fachkunde für Tätigkeiten an Arbeitsplätzen mit natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen und für die Sanierung von radioaktiven Altlasten (Fachkunde-Anforderungen NORM und Altlasten). - RdSchr. d. BMU v. 18.11.2019 – S II 3 – 15 040/3; Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 65, G 3191 A vom 10.2019, Seite 1321 (ISSN 0939-4729).
- [4] LAGA PN 98, Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall | Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 32; Vorsitz der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (veröffentlicht unter URL <http://www.laga-online.de>); Stand: Mai 2019.
- [5] LAGA-Methodensammlung Abfalluntersuchung, LAGA-Forum Abfalluntersuchung. Version 2.0, Stand: 01. Oktober 2012
- [6] DIN 19698-1:2014-05: Untersuchung von Feststoffen – Probenahme von festen und stichfesten Materialien – Teil 1: Anleitung für die segmentorientierte Entnahme von Proben aus Haufwerken. - DIN Deutsches Institut für Normung e. V./Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN; 29 Seiten; Beuth-Verlag, Mai 2014.
- [7] Handlungshilfe zur Anwendung der LAGA Mitteilung 32 (LAGA PN 98). - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall | Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 32; Vorsitz der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA); Stand: 5. Mai 2019.
- [8] SSK Heft 46: Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen. – Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Elsevier/Urban & Fischer (ISBN 3-347-22199-X), September 2005.
- [9] DIN 19698-5:2018-06: Untersuchung von Feststoffen - Probenahme von festen und stichfesten Materialien - Teil 5: Anleitung für die Beprobung von Hot-Spots in Grundmengen. – Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN; DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; Juni 2018.
- [10] BfS: Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität - Erläuterungen zur Berechnung mit den Berechnungsgrundlagen Bergbau. – Bundesamt für Strahlenschutz; BfS-SW-12/12; urn:nbn:de:0221-201204168021; Salzgitter, April 2012.
- [11] F. E. Grubbs: Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. Technometrics, Vol. 11, No. 1, pp. 1-21, 1969
- [12] BfS: Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen – Bergbau), BfS-SW-70/10, 2010.
- [13] IAEA Safety Reports Series No. 51: Radiation protection and NORM residue management in the zircon and zirconia industries. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007.
- [14] DIN EN ISO 17892-4:2017-04: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016.
- [15] W. Amelung, H.P. Blume, H. Fleige, R. Horn, E. Kandeler, I. Kögel-Knabner, R. Kretzschmar, K. Stahr, B.M. Wilke: Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage). – Springer-Verlag (ISBN 978-3-662-55870-6 | DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>); 2018.