

Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

**Grundsätze und Methoden
zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten
für die Ermittlung repräsentativer Werte
der spezifischen Aktivität von Rückständen**

Erläuterung zur Empfehlung und zur ihrer Anwendbarkeit

Stellungnahme der Strahlenschutzkommission

Vorwort

Rückstände mit natürlicher Radioaktivität treten unter unterschiedlichen Gegebenheiten auf. Je nach Ursprung oder Bearbeitung des Materials sind diese sehr inhomogen in der Konzentration der radioaktiven Stoffe. Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) verlangt in §§ 97 und 98 in Verbindung mit der Anlage XII Teile B bis D je nach Größe des repräsentativen Wertes der spezifischen Aktivität bestimmte Maßnahmen. Wegen der Inhomogenität des Materials gibt es nicht einen Wert, sondern eine ganze Verteilung von Konzentrationswerten. Aus diesen muss ein repräsentativer Wert ermittelt werden. Die Methodik hierzu wird in der Empfehlung der SSK „Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen“ (verabschiedet in der 197. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Dezember 2004) beschrieben. Die hier dargestellten Erläuterungen sollen eine Einführung zu der Empfehlung der SSK geben.

Inhaltsverzeichnis

1	Anwendungsbereich	7
2	Gegenstand	8
3	Grundsätze	9
3.1	Festlegung von Chargen	9
3.2	Beprobung	10
3.3	Messtechnisch zu erfassende Radionuklide.....	10
3.4	Messverfahren	11
3.5	Zufällige Schwankungen der spezifischen Aktivität	12
4	Methodik	13
4.1	Verfahren	13
4.2	Zur Wahl der statistischen Verteilung	15
4.3	Vereinfachte Schätzung oberer Konfidenzgrenzen	15
4.4	Berechnung oberer und unterer Konfidenzgrenzen.....	16
4.5	Maximale Werte $C_{U238max}$ und $C_{Th232max}$ der spezifischen Aktivitäten.....	17
4.6	Ansatz und Prognose für größeren Stichprobenumfang.....	18
4.7	Verwendung von Mischproben	18
5	Zusammenfassung	19
6	Literatur.....	19

1 Anwendungsbereich

Die Strahlenschutzkommission hat in ihrer 197. Sitzung am 16./17. Dezember 2004 eine Empfehlung zu Grundsätzen und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen verabschiedet [1].

Die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität ist erforderlich für die Umsetzung in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [2] enthaltener Regelungen

- zum Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen zur Verwertung oder Beseitigung von Rückständen¹⁾ erhöhter spezifischer Aktivität von Radionukliden der natürlichen Zerfallsreihen von U-238 und Th-232 gemäß § 97 i.V.m. Anlage XII Teil B StrlSchV und
- zum Nachweis der Einhaltung einer effektiven Dosis von 1 mSv pro Jahr als Richtwert zur Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung infolge einer Verwertung oder Beseitigung von Rückständen auf Basis von Dosisabschätzungen unter Beachtung der Umstände des Einzelfalls für eine Entlassung von Rückständen aus der Überwachung nach § 98 i.V.m. Anlage XII Teil D bzw. Teil C StrlSchV bei gemeinsamer Deponierung mit anderen Rückständen oder Abfällen.

Diese Grundsätze und Methoden können analog zur Erstellung von Rückstandskonzepten gemäß § 100 StrlSchV sowie für die Beurteilung sonstiger Materialien, die keine Rückstände im Sinne der Anlage XII Teil A sind, für die aber nach § 102 StrlSchV Strahlenschutzmaßnahmen zu prüfen sind, herangezogen werden. Von den empfohlenen Verfahren kann nach Einschätzung der SSK in begründeten Fällen, z.B. bei kleinen Mengen, abgewichen werden, wenn durch andere Verfahren hinreichend konservativ der Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen bzw. des Dosisrichtwerts zur Verwertung oder Beseitigung von Rückständen erbracht werden kann.

Obwohl in der Empfehlung nicht ausdrücklich ausgeführt, können dieselben Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten analog auch zum Nachweis der Einhaltung der Freigabewerte bei der Freigabe nach § 29 StrlSchV angewandt werden, wenn Chargen radioaktiver Abfälle auf der Grundlage von stichprobenartigen Messungen aus dem Atomrecht entlassen werden sollen.

¹⁾ „Rückstände“ sind nach § 3 Nr. 27 Materialien, die in den in Anlage XII Teil A StrlSchV genannten industriellen und bergbaulichen Prozessen anfallen und die dort genannten Voraussetzungen erfüllen.

2 Gegenstand

Die spezifische Aktivität einer Stoffmenge ist nur bei vollständiger Messung der Stoffmenge als Wert einer Messgröße bestimmbar. Dies ist im Allgemeinen nicht möglich, sondern ein repräsentativer Wert der spezifischen Aktivität muss anhand von Stichproben geschätzt werden. In Stichproben einer Stoffmenge erhält man Verteilungen der Messwerte der spezifischen Aktivitäten der einzelnen Proben einer Stichprobe, die die Heterogenität der Verteilung der Aktivität in der Stoffmenge und die Messunsicherheiten widerspiegeln. Die messtechnische Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität einer Stoffmenge anhand von Stichproben kann infolge heterogener Verteilungen der Aktivität, des begrenzten Umfangs von Stichproben und Messunsicherheiten also nur einen Schätzwert liefern, der mit Unsicherheiten behaftet ist.

Im Hinblick auf das Schutzziel der Begrenzung der Strahlenexposition sind bei inhomogener Verteilung der Aktivität nicht die Einzelwerte von Proben einer Stoffmenge die relevante Größe, sondern der Erwartungswert der spezifischen Aktivität der Stoffmenge.

Die Forderung der StrlSchV, dass zum Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen, Freigabewerten bzw. von Dosisricht- oder -grenzwerten von repräsentativ ermittelten Werten der spezifischen Aktivität auszugehen ist, verlangt daher eine möglichst realistische und zugleich ausreichend konservative Schätzung der Erwartungswerte der spezifischen Aktivitäten anhand von Stichproben.

Hinreichende Konservativität der Schätzung des Erwartungswertes kann durch Betrachtung des Konfidenzbereichs (Vertrauensbereichs) des Erwartungswertes zu einer vorgegebenen Konfidenzwahrscheinlichkeit P (Vertrauenswahrscheinlichkeit) erreicht werden. Der Vertrauensbereich des Erwartungswertes ist ein Intervall, das durch die untere und obere Konfidenzgrenze (Vertrauensgrenze) festgelegt wird und in dem der wahre Wert des Erwartungswertes mit der Wahrscheinlichkeit P liegt.

In Abbildung 1 sind die vier möglichen Fälle dargestellt, die beim Vergleich von aus Stichproben geschätzten Erwartungswerten und ihren Konfidenzbereichen mit einer Überwachungsgrenze auftreten können. Im Fall 1 sieht die SSK die Einhaltung der Überwachungsgrenze für die betrachtete Charge als gegeben an. Im Fall 4 wird die Überwachungsgrenze überschritten und die Charge ist überwachungsbedürftig. Problematisch sind die Fälle 2 und 3, bei denen davon ausgegangen werden muss, dass die Überwachungsgrenze überschritten sein kann. In diesen Fällen ist aber auch nicht auszuschließen, dass man durch eine exaktere, aber auch aufwändigere statistische Analyse der Messwerte oder durch eine Vergrößerung der Stichprobenanzahl, die mit einer Verkleinerung des Konfidenzbereichs für den Erwartungswert der spezifischen Aktivität der Charge verbunden ist, zum Nachweis kommen kann, dass die Charge nicht überwachungsbedürftig ist. Da sowohl eine exaktere statistische Analyse als auch die Vergrößerung des Stichprobenumfangs mit Kosten verbunden ist, muss erwogen werden, ob es wirtschaftlich sinnvoller ist, die Charge in den Fällen 2 und 3 als überwachungsbedürftig einzustufen oder mit größerem Aufwand eventuell festzustellen, dass dies nicht der Fall ist.

Die Empfehlung der SSK [1] beschreibt Grundsätze und Methoden für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der drei natürlichen Zerfallsreihen von U-238, U-235 und Th-232 bzw. der Maximalwerte $C_{U238max}$ und $C_{Th232max}$ unter Beachtung der genannten statistischen Unsicherheiten. Die Empfehlung betrifft auch die Fest-

legung von Chargen zum Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen bzw. des Dosisrichtwertes für Rückstandsmengen sowie Art und Umfang der Beprobung.

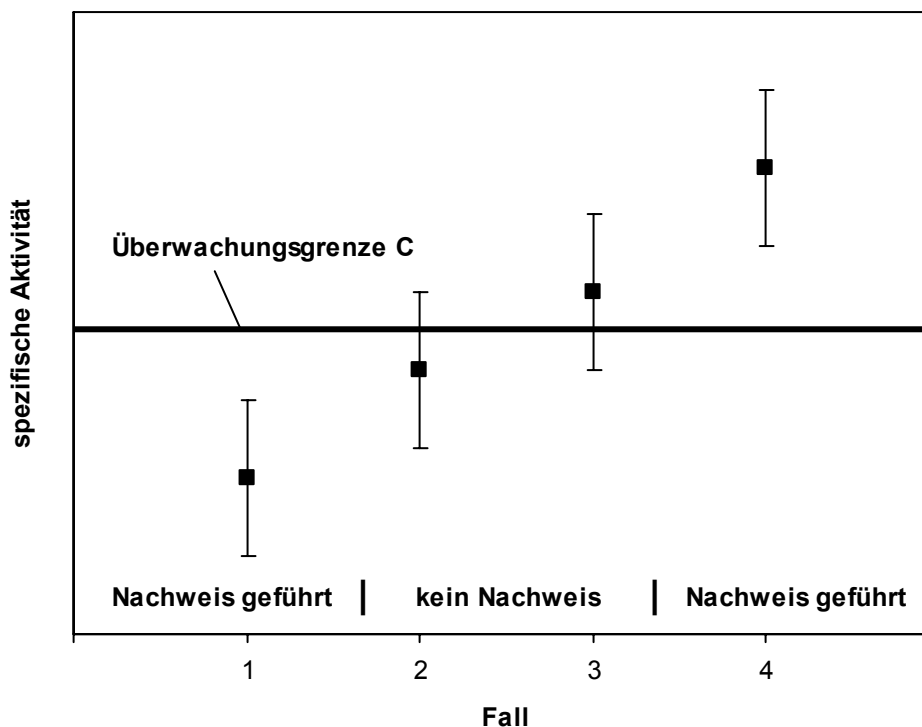


Abb. 1: Mögliche Lagen der Erwartungswerte der spezifischen Aktivität einer Stoffmenge in Relation zur Überwachungsgrenze C (waagerechte Linie). Die „Fehlerbalken“ repräsentieren die jeweiligen Konfidenzbereiche der Erwartungswerte, die sich auf der Grundlage ihrer Schätzung durch die Messwerte von Proben einer Stichprobe ergeben. Im Fall 1 ist der Nachweis geführt, dass der Erwartungswert der spezifischen Aktivität unterhalb der Überwachungsgrenze liegt, im Fall 4, dass der Erwartungswert der spezifischen Aktivität oberhalb der Überwachungsgrenze liegt. In den Fällen 2 und 3 ist auf der Grundlage der Messwerte für die vorliegende Stichprobe kein Nachweis möglich.

3 Grundsätze

3.1 Festlegung von Chargen

Die spezifische Aktivität der Rückstände aus bergbaulichen und industriellen Prozessen kann durch Verarbeitung unterschiedlicher Eingangsstoffe bzw. durch Veränderungen der Prozessparameter erhebliche Schwankungen aufweisen. Die Ermittlung von repräsentativen Werten der spezifischen Aktivität zum Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen bzw. des Dosisrichtwertes oder zur Aufstellung von Bilanzen sollte für Chargen erfolgen, die dadurch charakterisiert sind, dass auf Grund ihrer Herkunft keine erheblichen technologisch bedingten Schwankungen der spezifischen Aktivität zu erwarten sind und ihre Verwertung oder Beseitigung einheitlich erfolgt. Eine Charge sollte in der Regel auf die im Laufe eines Jahres anfallende Rückstandsmenge begrenzt werden.

Der Grundsatz, die Einhaltung von Überwachungsgrenzen für einzelne Chargen zu prüfen, bietet eine hinreichende Flexibilität bei der Festlegung damit verbundener Rückstandsmengen gemäß den konkreten Gegebenheiten. So wird es für Rückstände, deren spezifische Aktivität weit unter der Überwachungsgrenze für einen vorgesehenen Weg der Verwertung oder Beseitigung liegt, nicht erforderlich sein, bei relativ kleinen technologisch bedingten Schwankungen der spezifischen Aktivität eine Aufteilung in mehrere Chargen vorzunehmen. Eine feinere Aufteilung der Rückstände in Chargen kann dagegen angebracht sein, wenn auf Basis der vorliegenden Messungen davon ausgegangen werden muss, dass die spezifische Aktivität in der Nähe der Überwachungsgrenze liegt.

3.2 Beprobung

Die Beprobung von Chargen sollte unter Beachtung der konkreten Umstände des jeweiligen Falls so erfolgen, dass den Voraussetzungen an die Schätzung des Erwartungswertes der spezifischen Aktivitäten auf Basis zufälliger Stichproben möglichst gut Rechnung getragen wird. Methodische Hinweise zur Festlegung des Stichprobenumfangs enthält das Kapitel 4 dieser Empfehlung.

Zur Beprobung einer Rückstandscharge ist eine zufällige Stichprobe mit n Einzelproben zu entnehmen. Zur Methodik der Probenahme verweist die Empfehlung auf die Literatur [9] und [10]. Danach sind i. Allg. die „einfache zufällige Probenahme“ oder die „zufällige Probenahme in Blöcken“ (z.B. zufällige Probenahme pro Tag, Woche o.ä.) geeignet. Wenn keine zeitlichen/räumlichen Trends/Muster in der Verteilung der spezifischen Aktivität auftreten, kann auch eine „systematische Probenahme“ geeignet sein.

Der Stichprobenumfang sollte auf Basis der Vorkenntnisse zur Heterogenität bzw. Variabilität der spezifischen Aktivität des zu untersuchenden Rückstandes und des vermuteten Abstandes des zu bestimmenden Erwartungswertes der spezifischen Aktivität von der Überwachungsgrenze für den vorgesehenen Weg der Verwertung oder Beseitigung festgelegt werden. Der für einen zuverlässigen Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen bzw. des Dosisrichtwertes erforderliche Stichprobenumfang wird sich letztlich als um so größer ergeben, je ausgeprägter die Heterogenität bzw. Variabilität der spezifischen Aktivität ist und je näher die spezifische Aktivität an der Überwachungsgrenze bzw. die resultierende effektive Dosis am Dosisrichtwert liegt.

Zur erstmaligen Untersuchung von Rückständen einer bestimmten Art wird ein Stichprobenumfang von $n = 20$ empfohlen [10]. Im Einzelfall kann auch ein kleinerer Stichprobenumfang (z.B. $n = 10$) gerechtfertigt sein, wenn für den Rückstand eine gute Homogenität und/oder relativ kleine Werte der spezifischen Aktivität anzunehmen sind. Der in den Konfidenzgrenzen für die Schätzung des Erwartungswertes der spezifischen Aktivität enthaltene „Sicherheitsfaktor“ ist umso größer, je stärker die Heterogenität/Variabilität des Rückstandes und je geringer der Stichprobenumfang ist. Der Anwender kann somit im Rahmen der empfohlenen Methodik den Beprobungsaufwand nach den konkreten Materialeigenschaften und strahlenschutzrechtlichen Anforderungen optimieren.

3.3 Messtechnisch zu erfassende Radionuklide

Die Strahlenexposition der Bevölkerung infolge der Verwertung oder Beseitigung von Rückständen wird durch die Erwartungswerte der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide in der jeweiligen Charge bestimmt [3]. Für den Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen

nach § 97 i.V.m. Anlage XII Teil B StrlSchV und den vereinfachten Nachweis der Einhaltung des Dosisrichtwertes nach § 98 i.V.m. Anlage XII Teile C StrlSchV sind nur die Radionuklide aus den Zerfallsreihen von U-238 und Th-232 mit dem jeweils höchsten Erwartungswert der spezifischen Aktivität, die als $C_{U238max}$ bzw. $C_{Th232max}$ bezeichnet werden, relevant. Dosisbeiträge durch Radionuklide der U-235-Zerfallsreihe sind in den Überwachungsgrenzen bei Ansatz des natürlichen Aktivitätsverhältnisses der Radionuklide der U-238- und der U-235-Zerfallsreihe berücksichtigt.

Die Einhaltung des Dosisrichtwertes nach § 98 i.V.m. Anlage XII Teile D StrlSchV kann unter Berücksichtigung von Störungen des radioaktiven Gleichgewichtes innerhalb der Zerfallsreihen nachgewiesen werden. Hierzu sind grundsätzlich auch die spezifischen Aktivitäten der langlebigen Radionuklide der U-235-Zerfallsreihe zu bestimmen.

Für kurzlebige Radionuklide der Zerfallsreihe von U-238, U-235 und Th-232 kann vom Aktivitätsgleichgewicht mit dem jeweils übergeordneten langlebigen Radionuklid ausgegangen werden. Für das langlebige Radionuklid U-234 (Halbwertszeit: $2,5 \cdot 10^5$ a) kann in der Regel angenommen werden, dass in Rückständen U-234 die gleiche spezifische Aktivität aufweist wie U-238. Für die spezifische Aktivität des langlebigen Radionuklids U-235 kann ein Wert von 5 % der spezifischen Aktivität von U-238 angenommen werden.

Somit sind i. Allg. die spezifischen Aktivitäten für folgende langlebige Radionuklide zu bestimmen:

U-238-Zerfallsreihe:	U-238, Th-230, Ra-226, Pb-210, Po-210;	
U-235-Zerfallsreihe:	Pa-231, Ac-227;	(4)
Th-232-Zerfallsreihe:	Th-232, Ra-228, Th-228.	

In einer ersten Untersuchung der in bergbaulichen bzw. industriellen Prozessen anfallenden Rückstände sollten unter Beachtung von Vorkenntnissen zu ihrer Herkunft und Entstehung Messungen zur spezifischen Aktivität für die relevanten langlebigen Radionuklide vorgenommen werden. Wenn in etwa gleiche Eingangsstoffe und Prozessparameter beibehalten werden, muss für weitere Beprobungen nicht unbedingt die spezifische Aktivität aller relevanten Radionuklide gemessen werden. Auf Grundlage der Basisuntersuchung können Aktivitätsrelationen zu geeigneten Referenznucliden ermittelt werden, die zur weiteren Analyse von Stichproben genutzt werden können. Solche Aktivitätsrelationen sollen aber durch neue Messungen überprüft und ggf. präzisiert werden, wenn erhebliche Veränderungen der Eingangsstoffe oder der Prozessparameter eingetreten sind.

3.4 Messverfahren

Zur Ermittlung der spezifischen Aktivität von Rückständen können verschiedene Messverfahren angewendet werden. Besonders geeignet sind Messungen mittels γ -Spektrometrie, da mit diesem Messverfahren die spezifische Aktivität fast aller relevanten langlebigen Radionuklide gleichzeitig gemessen werden kann. Die Standardunsicherheiten liegen hier nach Stand der Technik zwischen 10 und 20 %. Hinweise zur Messung der spezifischen Aktivität der langlebigen Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen enthält Anhang A; bzgl. ausführlicher Erläuterungen siehe in [4] und [5].

Für Messungen der spezifischen Aktivität sollten vollständige Standardunsicherheiten ausgewiesen werden, die statistische und systematische Messunsicherheiten nach DIN 1319-3 und DIN 1319-4 erfassen (Typ A und Typ B Unsicherheiten; siehe [6], [7]).

Zur Überprüfung, ob die verwendeten Messverfahren eventuell gestellten Anforderungen genügen, sind die Nachweisgrenzen nach DIN 25482-10 [8] zu verwenden. Zu Beurteilung, ob für ein Radionuklid in einer Probe ein Messeffekt beobachtet wurde, ist die Erkennungsgrenze nach DIN 25482-10 [8] zum Vergleich heranzuziehen.

Für Proben, bei denen die Messung für das Radionuklid lediglich zur Feststellung eines unter der Erkennungsgrenze liegenden Werts der spezifischen Aktivität geführt hat, ist das Ergebnis der Messung als „kleiner Erkennungsgrenze“ auszuweisen (siehe [8], [11]).

Es ist nicht unbedingt nötig, immer für alle langlebigen Radionuklide Messungen durchzuführen. In vielen Fällen ist es sinnvoll und ausreichend, für bestimmte Radionuklide die spezifische Aktivität über Aktivitätsrelationen zu schätzen, die in früheren Untersuchungen für den zu bewertenden Rückstand ermittelt wurden. Dadurch kann der Aufwand zur Bestimmung der spezifischen Aktivität für einige schwer messbare Radionuklide (z.B. Po-210) erheblich reduziert werden.

Wird für einzelne Radionuklide die spezifische Aktivität aus Messwerten für Referenznuclide und vorab ermittelten Aktivitätsrelationen bestimmt, so sollte neben der Messunsicherheit für das Referenznuclid auch die Unsicherheit der zugrunde gelegten Aktivitätsrelation erfasst werden.

3.5 Zufällige Schwankungen der spezifischen Aktivität

Die i. Allg. vorliegende räumliche Heterogenität oder zeitliche Variabilität der spezifischen Aktivität von Rückständen bewirkt zufällige Schwankungen der Messwerte von Stichproben. Daraus resultieren statistische Unsicherheiten der Schätzung von Erwartungswerten der spezifischen Aktivität. Für den Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen bzw. des Dosisrichtwertes wird empfohlen, eine obere Konfidenzgrenze der Schätzung des Erwartungswertes als repräsentativen Wert der spezifischen Aktivität zu verwenden.

Eine obere Konfidenzgrenze wird so definiert, dass zu einem vorgegebenen Vertrauensniveau P der wahre Erwartungswert unter dieser Kenngröße liegt. Analog zur oberen Konfidenzgrenze kann eine untere Konfidenzgrenze für den Erwartungswert berechnet werden, die zum vorgegebenen Vertrauensniveau P kleiner als der wahre Erwartungswert ist. Die Konfidenzgrenzen zur Schätzung des Erwartungswertes der spezifischen Aktivität sollten zum Vertrauensniveau $P = 0,95$ bestimmt werden. Auf diesem Weg kann das Ziel einer realitätsnahen, ausreichend konservativen und statistisch sicheren Schätzung des Erwartungswertes der spezifischen Aktivität mit der Möglichkeit verknüpft werden, auch den für eine repräsentative Beprobung erforderlichen Stichprobenumfang entsprechend den konkreten Gegebenheiten zu bestimmen.

Wird auf Basis der oberen Konfidenzgrenze des Erwartungswertes der spezifischen Aktivität die Überwachungsgrenze bzw. der Dosisrichtwert eingehalten, so ist der zu überprüfende Rückstand nachweislich nicht überwachungsbedürftig. Wird mit der oberen Konfidenzgrenze die relevante Überwachungsgrenze bzw. der Dosisrichtwert nicht eingehalten, so bedeutet dies nicht unbedingt, dass der Rückstand überwachungsbedürftig ist. Durch Erhöhung des Stichprobenumfangs könnte die Einhaltung der Überwachungsgrenze bzw. des Dosisrichtwertes

tes nachweisbar sein, weil damit der in der oberen Konfidenzgrenze enthaltene „Sicherheitsfaktor“ reduziert wird. Diese Chance ist nicht mehr als real anzusehen, wenn mit der unteren Konfidenzgrenze die Überwachungsgrenze bzw. der Dosisrichtwert überschritten wird. In diesem Fall ist der untersuchte Rückstand als überwachungsbedürftig einzustufen (Fall 4 in Abb. 1).

Die Berechnung von Konfidenzgrenzen für den Erwartungswert erfordert den Ansatz eines bestimmten Modells der statistischen Verteilung der Stichprobenwerte. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass die spezifische Aktivität eine lognormal verteilte Zufallsgröße ist. In bestimmten Fällen kann die spezifische Aktivität von Rückständen durch eine Normalverteilung modelliert werden. Dies kann insbesondere bei relativ homogenen Rückständen aus industriellen Prozessen und bei Verwendung von Mischproben, die aus einer großen Anzahl von Einzelproben hergestellt wurden, angemessen sein. Für eine Anwendung des Ansatzes der Normalverteilung statt des generellen Ansatzes einer Lognormalverteilung ist es erforderlich, dessen bessere Eignung durch einen Anpassungstest nachzuweisen.

Störungen der angesetzten Verteilungsart, wie in der Stichprobe enthaltene Ausreißer oder – im Fall der Lognormalverteilung – durch einen in den Messwerten enthaltenen konstanten Untergrund, sollten bei der Berechnung von Konfidenzgrenzen des Erwartungswertes berücksichtigt werden.

Ebenfalls sollten Proben, deren spezifische Aktivität unter der messtechnischen Erkennungsgrenze liegt, bei der statistischen Auswertung der Messergebnisse zur Schätzung der Verteilungsparameter, die für die Berechnung von Konfidenzgrenzen des Erwartungswertes benötigt werden, in geeigneter Weise berücksichtigt werden.

4 Methodik

4.1 Verfahren

Zur Umsetzung der in Kapitel 3 dargelegten Grundsätze für den Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen bzw. des Dosisrichtwertes wird in der Empfehlung [1] ein methodisches Gesamtschema angegeben.

Methodische Aspekte der Probenahme, der Messung der spezifischen Aktivitäten der langlebigen Radionuklide und zur Berechnung von Konfidenzgrenzen für die Erwartungswerte der spezifischen Aktivitäten anhand von Stichproben werden ebenfalls erläutert. Auf die verwendeten Ansätze und statistischen Modelle wird in den Anhängen A bis E der Empfehlung [1] näher eingegangen.

Das methodische Gesamtschema zur Prüfung der Einhaltung von Überwachungsgrenzen gliedert sich in die nachstehend aufgeführten 13 Schritte. Nach Entscheidung des Anwenders kann das Verfahren nach den Schritten 4, 6, 8, 10 oder 12 mit dem bis dahin erhaltenen Ergebnis abgebrochen werden.

In der Empfehlung [1] ist das Verfahren auch in Form von Flussdiagrammen verdeutlicht und jeder Verfahrensschritt ausführlich beschrieben. Eine Beispielrechnung verdeutlicht das empfohlene Verfahren. Soll der Nachweis der Einhaltung des Dosisrichtwertes zur Entlassung von Rückständen aus der Überwachung nach § 98 StrlSchV geführt werden, so ergeben sich in

diesem Schema einige Änderungen, die in der Empfehlung explizit dargestellt sind. Die einzelnen Verfahrensschritte sind:

1. Beprobung einer Charge mit Stichprobenumfang n ($n \sim 20$)
2. Messung der spezifischen Aktivitäten
3. Vereinfachte Schätzung oberer Konfidenzgrenzen
4. Ist die Überwachungsgrenze eingehalten?
 - a) Ist die obere Konfidenzgrenze kleiner als die Überwachungsgrenze, so ist die Charge **nicht überwachungsbedürftig**.
 - b) Ist die obere Konfidenzgrenze größer oder gleich der Überwachungsgrenze, so ist die Charge als **überwachungsbedürftig** einzustufen oder mit exakterer Berechnung der oberen Konfidenzgrenze nach Schritt 5 fortzufahren.
5. Berechnung oberer Konfidenzgrenzen
6. Ist die Überwachungsgrenze eingehalten?
 - a) Ist die obere Konfidenzgrenze kleiner als die Überwachungsgrenze, so ist die Charge **nicht überwachungsbedürftig**.
 - b) Ist die obere Konfidenzgrenze größer oder gleich der Überwachungsgrenze, so ist die Charge als **überwachungsbedürftig** einzustufen oder mit Schritt 7 die Prüfung fortzusetzen.
7. Berechnung unterer Konfidenzgrenzen und Testgrößen für Nebenbedingungen
8. Ist die Überwachungsgrenze für alle unteren Konfidenzgrenzen eingehalten?
 - a) Ist die größte für ein Radionuklid berechnete untere Konfidenzgrenze größer oder gleich der Überwachungsgrenze, so ist die Charge **überwachungsbedürftig**.
 - b) Ist die größte für ein Radionuklid berechnete untere Konfidenzgrenze kleiner der Überwachungsgrenze, so ist die Charge als **überwachungsbedürftig** einzustufen oder mit Schritt 9 die Prüfung fortzusetzen.
9. Ansatz und Prognose für größeren Stichprobenumfang
10. Ist eine Erhöhung des Stichprobenumfangs wirtschaftlich akzeptabel?
 - a) Ist eine Erhöhung des Stichprobenumfangs wirtschaftlich nicht akzeptabel, so ist die Charge als **überwachungsbedürftig** einzustufen oder mit Schritt 12 der Prüfung fortzufahren.
 - b) Ist eine Erhöhung des Stichprobenumfangs wirtschaftlich akzeptabel, so ist mit Schritt 11 fortzufahren.
11. Erhöhung des Stichprobenumfangs

Dann ist bei Schritt 2 „Messung der spezifischen Aktivitäten“ wieder in das Verfahren einzutreten.
12. Ist die Analyse von Mischproben sinnvoll?
 - a) Ist die Analyse von Mischproben sinnvoll, so ist mit Schritt 13 fortzufahren.
 - b) Ist die Analyse von Mischproben nicht sinnvoll, so ist die Charge **überwachungsbedürftig**.
13. Beprobung einer Charge mit n Mischproben ($n \sim 20$) und bei Schritt 2 „Messung der spezifischen Aktivitäten“ wieder in das Verfahren eintreten.

In den folgenden Kapiteln 4.2 bis 4.7 soll die generelle Vorgehensweise näher erläutert werden. Die Empfehlung [1] gibt zu den einzelnen Verfahrensschritten detaillierte Hinweise, so zur Messung der spezifischen Aktivität von Rückständen, zur vereinfachten Schätzung von Konfidenzgrenzen für den Erwartungswert bei normal und lognormal verteilten Zufallsgrößen, zur Schätzung der Parameter von normal und lognormal verteilten Zufallsgrößen und zur Berechnung von Konfidenzgrenzen zum Erwartungswert normal und lognormal verteilter Zufallsgrößen. Außerdem enthält die Empfehlung [1] methodische Beispiele und alle zur Berechnung benötigten statistischen Parameter in tabellarischer oder grafischer Form.

4.2 Zur Wahl der statistischen Verteilung

Sowohl die vereinfachte Schätzung der oberen Konfidenzgrenze nach Schritt 3 als auch die Berechnung oberer und unterer Konfidenzgrenzen nach den Schritten 5 oder 7 ist abhängig von der statistischen Verteilung der Messwerte. Für die spezifische Aktivität kann in der Regel von einer Lognormalverteilung ausgegangen werden, die unter Umständen durch einen konstanten Untergrund gestört sein kann. Untergrundwerte der spezifischen Aktivität von Rückständen können entsprechend der Herkunft des Materials geogen bedingt sein; sie können aber auch durch die technologischen Prozesse entstanden sein. In bestimmten Fällen kann es gerechtfertigt sein, für die spezifische Aktivität von der Annahme einer Normalverteilung auszugehen.

Sofern nicht bereits durch vorherige Untersuchungen der zu bewertenden Rückstände hinreichende Kenntnisse zur Art der statistischen Verteilung der spezifischen Aktivität vorliegen, ist die Eignung der Annahmen einer Lognormal- bzw. einer Normalverteilung zu prüfen, auch wenn i. Allg. das Modell der Lognormalverteilung zutreffend sein wird.

Zur Definition der Verteilungsart kann das Bestimmtheitsmaß im sogenannten Quantil-Quantil-Plot (Q-Q-Plot) für lognormal bzw. normal verteilte Zufallsgrößen genutzt werden. Diese Methode ist einfach und effizient; ihre Anwendung verlangt keine vertiefte Datenanalyse mit aufwändigen Rechnungen und ermöglicht auch die Berücksichtigung von Proben mit Messergebnissen unter der Erkennungsgrenze.

Wenn das Bestimmtheitsmaß für die Annahme einer Normalverteilung deutlich größer ist als das für die Annahme einer Lognormalverteilung, kann die Berechnung von Konfidenzgrenzen zum Erwartungswert der spezifischen Aktivität unter Annahme einer Normalverteilung erfolgen, sonst gilt die Annahme, dass die spezifische Aktivität eine lognormal verteilte Größe ist.

4.3 Vereinfachte Schätzung oberer Konfidenzgrenzen

Die vereinfachten Schätzungen oberer Konfidenzgrenzen zum Erwartungswert der spezifischen Aktivität basieren auf der Statistik der nach aufsteigender Größe geordneten Messwerte. Danach kann im Fall der Normalverteilung für die obere Konfidenzgrenze eine Linearkombination von zwei bestimmten, aufeinander folgenden Messwerten gesetzt werden, die nur vom Stichprobenumfang abhängt. Im Fall der Lognormalverteilung wird die obere Konfidenzgrenze durch einen Messwert bestimmt, dessen Ordnungszahl vom Stichprobenumfang sowie von einer Prüfgröße, die aus den beiden größten und den beiden mittleren Messwerten zu berechnen ist, bestimmt wird.

Die Methode zur vereinfachten Schätzung von oberen Konfidenzgrenzen setzt im Fall der Lognormalverteilung voraus, dass der Stichprobenumfang eine gerade Zahl ist und wenig-

tens die Hälfte der Messwerte größer als die Erkennungsgrenze ist. Für eine einheitliche Vorgehensweise wird die Gültigkeit dieser Annahmen auch für normal verteilte Messwerte angenommen. Die vereinfachte Schätzung von oberen Konfidenzgrenzen wird in der Empfehlung [1] für Stichprobenumfänge von 6 bis 30 in Schritten von 2 sowie darüber hinaus für Stichprobenumfänge von 40 bis 100 in Schritten von 10 detailliert behandelt.

4.4 Berechnung oberer und unterer Konfidenzgrenzen

Wenn mit der im vorigen Abschnitt genannten vereinfachten Schätzung oberer Konfidenzgrenzen zum Erwartungswert der spezifischen Aktivität die Einhaltung der Überwachungsgrenze bzw. des Dosisrichtwertes nicht nachgewiesen werden kann, so muss die Berechnung von Konfidenzgrenzen zum Erwartungswert der spezifischen Aktivität für die Fälle der Normal- und der Lognormalverteilung mit genaueren Methode erfolgen, die zu weniger konservativen Werten führen. Damit können auch untere Konfidenzgrenzen berechnet werden.

Die in der Empfehlung [1] erläuterte Methode zur Berechnung von Konfidenzgrenzen für den Erwartungswert der spezifischen Aktivität basiert auf der Schätzung der Parameter für normal bzw. lognormal verteilte Zufallsgrößen auf Basis der Stichprobenwerte und ermöglicht die Berechnung oberer Konfidenzgrenzen als auch unterer Konfidenzgrenzen²⁾. In Abbildung 2 der Empfehlung [1] ist das Verfahren zur Berechnung oberer und unterer Konfidenzgrenzen auch in Form eines Flussdiagramms verdeutlicht.

Die Schätzung der Parameter einer Normalverteilung bzw. einer Lognormalverteilung anhand der für die Stichprobe gemessenen Werte der spezifischen Aktivität kann durch Störungen der „reinen“ Verteilung erschwert werden. Solche Störungen sind Messergebnisse unterhalb der Erkennungsgrenze, ein bei einer Lognormalverteilung möglicher konstanter Untergrundwert sowie in der Stichprobe evtl. enthaltene „Ausreißer“, die zu identifizieren und ggf. zu separieren sind.

Gibt es Proben, deren Messwerte unterhalb der Erkennungsgrenze liegen, so kann ein ggf. vorhandener konstanter Untergrundwert bei Lognormalverteilung als vernachlässigbar klein angesehen werden. Liegen jedoch keine Messwerte unterhalb der Erkennungsgrenze, so können die Messwerte einen nennenswerten konstanten Untergrund enthalten, dessen Wert zusammen mit den Parametern der Lognormalverteilung zu bestimmen ist.

Ausreißer sind einzelne extrem große bzw. kleine Messwerte, die sich nicht in die statistische Verteilung der übrigen Messwerte einordnen. Ausreißerverdächtige Messwerte sind sorgfältig zu überprüfen. Wenn sie aus Mess- oder Datenübertragungsfehlern resultieren, so sind diese Daten nach Möglichkeit zu korrigieren. Wenn dies nicht möglich ist, sind sie aus der Stichprobe für die Berechnung von Konfidenzgrenzen auszuschließen.

Ein mit einem statistischen Verfahren als Ausreißer identifizierter Messwert ist jedoch meist ein korrekter Messwert der analysierten Probe. Die starke Abweichung von der empirischen Verteilung der übrigen Messwerte kann physikalisch begründet sein, wenn z.B. bei bergbaulichen Rückständen gemäß den geologischen Bedingungen gewisse Anteile an Nebengestein mit sehr kleiner/großer spezifischer Aktivität enthalten sind. In diesem Fall enthält die untersuchte Charge eine Mischung unterschiedlicher Verteilungen, wobei die Anteile mit extrem

²⁾ Siehe hierzu in der Empfehlung [1] die Gleichungen 20a und 20b für den Fall normal verteilter Daten bzw. die Gleichungen 23a und 23b für den Fall lognormal verteilter Daten.

kleiner/großer spezifischer Aktivität gering sind und deshalb als Ausreißer erscheinen. Ausreißer können auch zufällig auftreten, wenn die spezifische Aktivität dieser Probe einem sehr kleinen/großen Perzentil der Verteilung einer Grundgesamtheit entspricht, was im Rahmen des Stichprobenumfangs zwar mit extrem geringer Wahrscheinlichkeit zu erwarten, jedoch nicht völlig unmöglich ist.

Die beiden Fälle korrekt gemessener Ausreißer können in der Praxis oft nicht unterschieden werden. Sie sollen bei der Berechnung der aus den Stichprobendaten zu bestimmenden Konfidenzgrenzen zwar berücksichtigt werden, aber nicht im Rahmen der auf dem Ansatz einer bestimmten Verteilungsart basierenden Beziehungen. Hier könnten sie zu erheblichen Überschätzungen der oberen bzw. Unterschätzungen der unteren Konfidenzgrenze führen [13]. Deshalb wird empfohlen, die korrekt gemessenen Ausreißer mit ihren Messwerten in den Konfidenzgrenzen separat zu berücksichtigen. Sie werden aber aus der Berechnung der Verteilungsparameter ausgeschlossen.

Zur Ausreißer-Identifikation wird der in Anhang C der Empfehlung [1] näher erläuterte GRUBBS-Test [14] empfohlen, wozu eine kleine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01 angesetzt werden sollte, um nicht unnötig viele große/kleine Messwerte als Ausreißer einzuordnen.

Wenn einer der beiden Extremwerte als Ausreißer identifiziert wird, ist er aus der Stichprobe für die Berechnung der Verteilungsparameter zu separieren. Danach ist mit dem verkleinerten Stichprobenanteil eine erneute Berechnung der Verteilungsparameter erforderlich.

Nicht korrekte Messwerte, die nachweislich auf Mess- oder Datenübertragungsfehlern beruhen und nicht korrigierbar sind, werden aus den weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Ausreißer, die korrekten Messungen entsprechen, werden bei der Berechnung von Konfidenzgrenzen des Erwartungswertes der spezifischen Aktivität berücksichtigt.

Nach der Separation von Ausreißern sind die verbleibenden Werte als Stichprobe aus der jeweiligen Grundgesamtheit (einer Normalverteilung bzw. einer Lognormalverteilung, letztere evtl. mit einem konstanten Untergrund) für die Zufallsgröße spezifische Aktivität eines Radionuklids anzusehen. Für ihre Verteilungsparameter werden die Schätzwerte berechnet.

Die Empfehlung [1] gibt explizite Formeln zur Berechnung der oberen bzw. unteren Konfidenzgrenze der Schätzung des Erwartungswertes sowohl für normal als auch für lognormal verteilte Zufallsgrößen der spezifischen Aktivitäten zum Vertrauensniveau $P = 0,95$ an. Für normal verteilte Daten geschieht diese Berechnung aus den Verteilungsparametern mit Hilfe der Perzentile der t-Verteilung zur Wahrscheinlichkeit P als Konfidenzfaktoren. Für lognormal verteilte Daten geschieht diese Berechnung aus den Verteilungsparametern mit Hilfe spezieller Konfidenzfaktoren, deren numerische Werte aus Grafiken abgelesen werden können oder die mittels angegebenen analytischen Näherungen zu berechnen sind.

In jedem Fall werden die korrekt gemessenen Ausreißer und ein (bei Lognormalverteilung) in Messwerten ggf. enthaltener Untergrund zur Berechnung der oberen und unteren Konfidenzgrenzen für den Erwartungswert der spezifischen Aktivität zum Vertrauensniveau $P = 0,95$ berücksichtigt.

4.5 Maximale Werte $C_{U238max}$ und $C_{Th232max}$ der spezifischen Aktivitäten

Für den Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen gemäß Anlage XII Teil B StrlSchV werden im Sinne „repräsentativ zu ermittelnder Werte“ der größten spezifischen

Aktivitäten der Radionuklide der Zerfallsreihen von U-238 und Th-232 die Maximalwerte $C_{U238max}$ bzw. $C_{Th232max}$ als die jeweils maximalen oberen Konfidenzgrenzen für den Erwartungswert der spezifischen Aktivitäten zum Vertrauensniveau $P = 0,95$ der beiden Zerfallsreihen angesetzt.

4.6 Ansatz und Prognose für größeren Stichprobenumfang

Wenn die mit den oberen Konfidenzgrenzen resultierenden größten spezifischen Aktivitäten $C_{U238max}$ und $C_{Th232max}$ den Nachweis der Einhaltung einer Überwachungsgrenze der Anlage XII StrlSchV nicht gestatten, so könnte dies die Folge zu großer statistischer Unsicherheiten wegen eines zu geringen Stichprobenumfangs sein. Mit einem höheren Stichprobenumfang könnte in diesem Fall die Einhaltung der Überwachungsgrenze nachweisbar sein.

Die Empfehlung [1] geht zur Prüfung dieser Möglichkeit davon aus, dass nur dann, wenn die größten unteren Konfidenzgrenzen zu den Erwartungswerten der spezifischen Aktivitäten der U-238- und Th-232-Zerfallsreihen unterhalb der Überwachungsgrenze liegen, die Möglichkeit besteht, durch Vergrößerung des Stichprobenumfangs eine Einhaltung der Überwachungsgrenze nachzuweisen.

Wenn die größten unteren Konfidenzgrenzen zu den Erwartungswerten der spezifischen Aktivitäten der U-238- oder der Th-232-Zerfallsreihe die Überwachungsgrenze überschreiten, ist der untersuchte Rückstand als überwachungsbedürftig einzustufen.

Die Empfehlung [1] nennt Testgrößen, mit deren Hilfe anhand der Nomogramme bzw. der analytischen Formeln für den Konfidenzfaktor eine optimale Erhöhung des Stichprobenumfangs, die für eine sichere Entscheidung vermutlich erforderlich ist, prognostiziert werden kann.

Wenn eine Erhöhung des Stichprobenumfangs wirtschaftlich akzeptabel ist, sollte die Beprobung der zu bewertenden Charge entsprechend ergänzt werden. Danach ist die Einhaltung von Überwachungsgrenzen bzw. des Dosisrichtwertes auf der Grundlage der erweiterten Datenbasis erneut zu prüfen.

4.7 Verwendung von Mischproben

Für bestimmte Rückstände (z.B. aus bergbaulichen Prozessen) kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Bandbreite der spezifischen Aktivität für mengenmäßig relativ kleine Proben so groß ist (langschwänzige Lognormalverteilung, große Varianz), dass der Konfidenzfaktor zur Berechnung der oberen Konfidenzgrenze des Erwartungswertes der spezifischen Aktivität auch bei großem Stichprobenumfang so hohe Werte annimmt, dass der Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen bzw. des Dosisrichtwertes auf der Grundlage von einfachen Proben einen unverhältnismäßig großen Stichprobenumfang erfordern würde. In diesem Fall kann es angebracht sein, mehrere einfache Materialproben zu vermischen, so dass die zu bewertende Stichprobe aus n Mischproben besteht.

Zur Herstellung von Mischproben sei darauf hingewiesen, dass die Heterogenität der spezifischen Aktivität häufig räumliche Strukturen aufweist (besonders bei Rückständen aus dem Bergbau) oder eine Variabilität durch zeitliche Schwankungen bestimmter Einflussfaktoren (z.B. bei Rückständen aus industriellen Prozessen) verursacht wird. Deshalb wäre es i.d.R. kaum hilfreich, Mischproben aus Einzelproben herzustellen, die von eng beieinander liegenden Stellen bzw. in kurzen Zeitabständen gewonnen wurden. Zunächst sollte der Umfang der

Entnahme von Einzelproben im Rahmen der gewählten Strategie deutlich erhöht werden. Zur Herstellung von 20 Mischproben könnten 100 Einzelproben entnommen werden, aus denen nach dem Zufallsprinzip jeweils 5 Proben ausgewählt und dann vermischt werden.

5 Zusammenfassung

Mit der Empfehlung „Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen“ [1] hat die SSK detaillierte Verfahren zur Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität für die Umsetzung in §§ 97, 98, 100 und 102 StrlSchV angegeben.

Obwohl in der Empfehlung nicht ausdrücklich ausgeführt, können dieselben Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten analog auch zum Nachweis der Einhaltung der Freigabewerte bei der Freigabe nach § 29 StrlSchV angewandt werden, wenn Chargen radioaktiver Abfälle auf der Grundlage von stichprobenartigen Messungen aus dem Atomrecht entlassen werden sollen.

Nach Einschätzung der SSK sind im Hinblick auf das Schutzziel der Begrenzung der Strahlenexposition bei inhomogener Verteilung der Aktivität generell nicht die Einzelwerte von Proben einer Stoffmenge, sondern der Erwartungswert der spezifischen Aktivität der Stoffmenge die relevante Größe. Die Forderung der StrlSchV, dass zum Nachweis der Einhaltung von Überwachungsgrenzen, Freigabewerten bzw. von Dosisricht- oder -grenzwerten von repräsentativ ermittelten Werten der spezifischen Aktivität auszugehen ist, verlangt nach Einschätzung der SSK eine möglichst realistische und zugleich ausreichend konservative Schätzung der Erwartungswerte der spezifischen Aktivitäten und ihrer Vertrauensbereiche anhand von Stichproben.

Die Empfehlung der SSK beschreibt ein abgestuftes Verfahren mit verschiedenen Varianten unterschiedlicher Komplexität, das es dem Benutzer bei hinreichender statistischer Sicherheit erlaubt, ökonomisch sinnvolle Entscheidungen bei der Umsetzung der Regelungen der StrlSchV zu treffen.

6 Literatur

- [1] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION: Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 197. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Dezember 2004
- [2] REGIERUNG DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), Artikel 1 der Verordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I, S. 1714 ber. I 2002 S. 1459), geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Juni 2002 (BGBl. I, S. 1869, 1903)
- [3] BARTHEL, R.; GOLDAMMER, W.; HELMING, M.: Exemption Levels for the Recycling and Disposal of Residues with Enhanced Levels of Natural Radioactivity (TENORM) in Germany, Proceedings of ICEM'01, The Eighth International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation; Bruges (Brugge), Belgium, September 30 - October 4, 2001

- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (HRSG.): Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und zur Erfassung radioaktiver Emissionen aus kerntechnischen Anlagen, Urban & Fischer, München, 2001
- [5] DEBERTIN, K.; HELMER, R.G.: Gamma and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, Elsevier Science Publishers, North-Holland, 1989
- [6] DIN 1319: Grundlagen der Messtechnik; Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit; Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit (Neufassung), Beuth Verlag, Berlin, Köln, 1996 und 1999
- [7] DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth Verlag, Berlin, Juni 1999
- [8] DIN 25482-10: Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen; Teil 10: Allgemeine Anwendungen, Beuth Verlag, Berlin, Mai 2000
- [9] GILBERT, R.O.: Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, John Wiley & Sons Inc., New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 1987
- [10] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA): PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, Schmidt-Verlag, Berlin, 2002
- [11] MICHEL, R.; KIRCHHOFF, K.: Nachweis-, Erkennungs- und Vertrauensgrenzen bei Kernstrahlungsmessungen, Fachverband für Strahlenschutz e.V.; Publikationsreihe Fortschritte im Strahlenschutz, Band FS-99-108-AKSIGMA, TÜV-Verlag, Köln, 1999
- [12] COHEN, A.C.: Simplified Estimators for the Normal Distribution When Samples Are Singly Censored or Truncated, *Technometrics*, **1**, pp. 217-237, 1959
- [13] BARTHEL, R.: Statistische Auswertung von Stichproben lognormal verteilter Größen für realistisch-konservative radioökologische Bewertungen, in: Aktuelle und zukünftige Aufgaben in der Radioökologie – Klausurtagung des Ausschusses „Radioökologie“ der Strahlenschutzkommission am 25./26. Juli 2001; Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission Band **49**, S. 207 - 280, Urban & Fischer, München, Jena, 2003
- [14] GRUBBS, F.E.: Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples, *Technometrics*, **11**, pp. 1-21, 1969