



## Überwachung der Gamma-Ortsdosis mit Festkörperdosimetern

Bearbeiter: B. Burgkhardt, Karlsruhe, ehem. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
W. Kukla, Schönbrunn, ehem. Kernkraftwerk Obrigheim  
J. Narrog, Hesel, ehem. Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart  
K. Prokert, Grosserkmannsdorf, ehem. Technische Universität Dresden  
M. Vilgis, WAK – Rückbau- und Entsorgungs-GmbH, Eggenstein-Leopoldshafen  
M. Winter, Stutensee, ehem. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Zweck der Überwachungsmaßnahme .....	2
2	Messgröße und Maßeinheit .....	2
3	Messbereich, Messunsicherheit und geforderte Nachweisgrenze .....	2
4	Empfohlenes Messverfahren .....	3
4.1	Voraussetzungen .....	3
4.2	Anzahl der eingesetzten Dosimeter .....	3
4.3	Auswahl der Auslegeorte .....	4
4.4	Aufbau des Dosimeters und äußere Umhüllung .....	4
4.5	Planung der Expositionszeit .....	4
4.6	Einsetzbare Dosimetriesysteme .....	5
5	Ermittlung der Ortsdosis $H$ .....	5
5.1	Dosismesswert .....	5
5.2	Korrektionsfaktor für Klima und Langzeit .....	5
5.3	Korrektionsfaktor für Energie und Winkel .....	6
5.4	Standardunsicherheit der Ortsdosis .....	6
6	Ermittlung der Untergrunddosis $H_U$ .....	6
6.1	Untergrunddosis .....	7
6.2	Standardunsicherheit der Untergrunddosis .....	7
7	Ermittlung der Nettodosis $\Delta H$ .....	7
7.1	Nettodosis .....	8
7.2	Standardunsicherheit der Nettodosis .....	8
7.3	Erkennungs- und Nachweisgrenze der Nettodosis .....	8
8	Dokumentation .....	9
9	Besonderheiten .....	10
10	Bewertung des Verfahrens .....	10
11	Literaturzusammenstellung .....	10
A1	Anhang 1: Berechnungsweg .....	11
A1.1	Ortsdosis .....	11
A1.2	Standardunsicherheit der Ortsdosis .....	12
A1.3	Untergrunddosis .....	12
A1.4	Nettodosis .....	13
A1.5	Standardunsicherheit der Nettodosis .....	14
A1.6	Erkennungs- und Nachweisgrenze der Nettodosis .....	14
A2	Anhang 2: Berechnungsbeispiel .....	16
A2.1	Charakterisierung der Auslegeorte und Untergrunddosis .....	16
A2.2	Ortsdosis und ihre Unsicherheit .....	17
A2.3	Nettodosis und ihre Unsicherheit .....	18
A2.4	Erkennungsgrenze der Nettodosis .....	18
A2.5	Nachweisgrenze der Nettodosis .....	19
A3	Formelzeichen .....	21



## 1 Zweck der Überwachungsmaßnahme

Zweck der Überwachungsmaßnahme ist die Kontrolle der Gamma-Ortsdosis in der Umgebung kerntechnischer Anlagen mit dem Ziel, etwaige durch den Betrieb der betreffenden Anlage bedingte Erhöhungen festzustellen. Nach der Richtlinie für Emissions- und Immissionsüberwachung (REI) [1] ist grundsätzlich die Erhöhung gegenüber der Untergrunddosis, das heißt eine **Nettodosis**, zu bestimmen. Die Untergrunddosis wird durch das unbeeinflusste Strahlungsfeld (terrestrische und kosmische Strahlung sowie ggf. ein Beitrag des globalen Fallouts) verursacht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Energie- und Richtungs-verteilungen der natürlichen und der von der Anlage verursachten Strahlungsfelder stark unterscheiden können.

Die Überwachung umfasst sowohl die Kontrolle am Zaun der Anlage auf Einhaltung des Grenzwertes der effektiven Dosis  $E$  von 1 mSv/a entsprechend § 46 der Strahlenschutzverordnung [2], ggf. unter Berücksichtigung der Kontrolle der Einhaltung des entsprechenden Dosisgrenzwertes von 0,3 mSv/a für die durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser bedingten Strahlenexpositionen des Menschen (§ 47) in der Umgebung der kerntechnischen Anlage.

## 2 Messgröße und Maßeinheit

Die Messgröße der Ortsdosis für durchdringende Strahlung wie Gammastrahlung ist die Umgebungsäquivalentdosis  $H^*(10)$ . Die Umgebungsäquivalentdosis  $H^*(10)$  stellt im Allgemeinen einen konservativen Schätzwert für die effektive Dosis  $E$  einer Person beim Aufenthalt am Auslegeort dar [3]. Da im bestimmungsgemäßen Betrieb kerntechnischer Anlagen nur sehr geringe Dosiswerte zu erwarten sind, ist eine Umrechnung der Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  in die effektive Dosis  $E$  nicht erforderlich.

Die Maßeinheit für  $H^*(10)$  ist das Sievert [Sv].

Da für den Zusammenhang zwischen Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}$  und Äquivalentdosis  $H$

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

gilt, wird die benötigte Umgebungsäquivalentdosis  $H^*(10)$  mittels integrierender Dosimeter entsprechend

$$H^*(10) = \int_{T_1}^{T_2} \dot{H}^*(10) dt \quad (2)$$

bestimmt, wobei der zeitliche Verlauf von  $\dot{H}^*(10)$  am Auslegeort innerhalb der betrachteten Überwachungszeitspanne zwischen  $T_1$  und  $T_2$  bei akkumulierenden Dosimetern im Allgemeinen unbekannt ist. Im weiteren Text wird im Interesse der Vereinfachung der Schreibweise  $H$  an Stelle von  $H^*(10)$  verwendet.

Die zu bestimmende Nettodosis  $\Delta H$  am Auslegeort ergibt sich aus der Differenz von Ortsdosis  $H$  und der vom Betrieb der kerntechnischen Anlage unbeeinflussten Untergrunddosis  $H_U$  entsprechend der Beziehung

$$\Delta H = H - H_U \quad (3)$$

## 3 Messbereich, Messunsicherheit und geforderte Nachweisgrenze

Der Messbereich der auszuwählenden Dosimeter muss sowohl den Anforderungen des bestimmungsgemäßen Betriebs, d. h. der Messung von sehr geringen Ortsdosen (§§ 46, 47 der StrlSchV [2]), als auch denen bei einem eventuellen Störfall/Unfall mit deutlich höheren Dosiswerten entsprechen.

Die DIN 25483 [4] schreibt als Mindestanforderung einen Messbereich von 0,1 mSv bis 1 Sv vor. Durch Anwendung spezieller Auswertungsvarianten für den Störfall/Unfall kann gewährleistet werden, dass mit dem eingesetzten System auch der in der REI geforderte Messbereichs-Endwert von 10 Sv erreichbar ist.



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

**Blatt: 3.1.1.1**  
 Seite: 3 von 22  
 Stand: Februar 2014

Für die relative Gesamt-Standardunsicherheit des Dosimetriesystems wird in [4] ein Maximalwert von  $\pm 25\%$  zugelassen. In der REI ist als erforderliche Nachweisgrenze für die Nettodosis  $\Delta H$  ein Wert von 0,1 mSv/a festgelegt.

#### **4 Empfohlenes Messverfahren**

##### 4.1 Voraussetzungen

Die anfallenden Mess- und Auswertungsaufgaben erfolgen in der Regel nicht an einer Stelle, sondern werden in organisatorischer Abstimmung und Kooperation von überwachender und messender Stelle durchgeführt.

Als überwachende Stelle wird diejenige bezeichnet, die für die Auswahl des Dosimetriesystems, die Festlegung der Auslegeorte und der Überwachungszeitspanne verantwortlich ist. In ihrem Zuständigkeitsbereich liegt die Auslegung und Einsammlung der Dosimeter, sowie die Endauswertung und Interpretation der Ortsdosiswerte.

Die messende Stelle, im folgenden Messstelle genannt, ist für die Messtechnik, für die Kalibrierung und Qualitätssicherung des Dosimetriesystems und die Auswertung der Dosimeter verantwortlich. Die Messstelle übermittelt die gemessenen Dosiswerte mit ihren Messunsicherheiten an die überwachende Stelle.

##### 4.2 Anzahl der eingesetzten Dosimeter

Die vorgeschriebene Anzahl von Dosimetern, die durch den Betreiber der kerntechnischen Anlage bzw. die unabhängige Messstelle auszulegen sind, ergibt sich aus den Festlegungen der REI (siehe Tab. 1). Bei den kerntechnischen Anlagen gemäß den Anhängen B, C1 und C2 ist jeweils die Anzahl der zusätzlichen Neutronendosimeter mitangegeben. Messverfahren mit Neutronendosimetern werden jedoch im Rahmen dieses Loses Blattes nicht behandelt.

Über diese vorgeschriebene Dosimeteranzahl hinaus können an interessierenden Auslegeorten weitere Dosimeter, z. B. für spezielle oder temporäre Überwachungsaufgaben ausgelegt werden.

Tab. 1: Anzahl der in der REI geforderten Festkörperdosimeter im bestimmungsgemäßen Betrieb

<b>kerntechnische Anlage</b>	<b>Anhang</b>	<b>Betreiber</b>	<b>unabhängige Messstelle</b>
Kernkraftwerk	A	50 Stück, davon 12 am Zaun	30 Stück, davon 12 am Zaun
Brennelement-fabrik	B	12 Stück am Zaun zusätzlich 6 - 12 Neutronendosimeter	12 Stück am Zaun zusätzlich 6 - 12 Neutronendosimeter
Zwischenlager (Trockenlager)	C1	6 - 8 Stück am Zaun zusätzlich 6 - 8 Neutronendosimeter	4 Stück am Zaun, zusätzlich 4 Neutronendosimeter
Endlager	C2	10 - 12 Stück am Zaun zusätzlich 6 - 12 Neutronendosimeter	10 - 12 Stück am Zaun zusätzlich 4 Neutronendosimeter
Sonderfälle	D	keine Festlegung in der REI, für jede Anlage gesondert festzulegen	



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

**Blatt: 3.1.1.1**

Seite: 4 von 22

Stand: Februar 2014

#### 4.3 Auswahl der Auslegeorte

Für die Messungen am Zaun der Anlage empfiehlt sich im Allgemeinen eine äquidistante Auslegung der Dosimeter. Sofern Bereiche mit erhöhter Direktstrahlung bestehen, ist eine lokale Verdichtung der Auslegeorte, ggf. durch Erhöhung der Anzahl eingesetzter Dosimeter, sinnvoll.

Die Festkörperdosimeter des Betreibers sollten in der Umgebung der Anlage unter Beachtung der Festlegungen der REI und entsprechend den örtlichen Gegebenheiten ausgelegt werden. Zweckmäßig sind Auslegeorte bei Messstationen, die zur Messung der Gammadosisleistung sowie zur Aerosolprobenentnahme dienen. Empfehlenswert ist eine Verdichtung der Auslegeorte in den Hauptausbreitungsrichtungen. Aber auch an voraussichtlich gering belasteten Auslegeorten sollten Dosimeter positioniert werden. Die Festkörperdosimeter der unabhängigen Messstelle sollten vor allem bei den nächstgelegenen Ortschaften ausgelegt werden.

Die Dosimeter sollten hinsichtlich äußerer Strahlung aus der Luft den oberen Halbraum erfassen und zur repräsentativen Messung der Gamma-Bodenstrahlung über einer ebenen Fläche ausgelegt sein. Eine Positionierung der Dosimeter in 1 m Höhe über dem Erdboden und mit mindestens 20 m Abstand zu Büschen und Bäumen ist wünschenswert, weil andere Messverfahren (z. B. In-situ-Gammaspektrometrie, Ortsdosisleistungsmessung) auf diese Bedingungen abgestimmt sind. In der Praxis sind diese idealen Bedingungen nur selten einzuhalten. Außerdem ist eine Positionierung außerhalb des Zugriffsbereiches überaus sinnvoll, um Dosimeterverluste durch Diebstahl zu begrenzen.

Zur Gewährleistung gleichbleibender Verhältnisse sollen die Auslegeorte und die Auslegungsart für die Festkörperdosimeter nicht verändert werden. Orte mit voraussehbarer Änderung der Umgebungsstrahlung (z. B. durch Straßenbau, insbesondere bei Verwendung von Urgestein oder Hochofenschlacke, oder durch Errichtung von Gebäuden in unmittelbarer Nähe) sind zu vermeiden. Auch eine Auslegung nahe an Lagerhallen (z. B. für den landwirtschaftlichen Bedarf mit wechselnden Mengen von Phosphatdünger) oder über stark gedüngten Flächen (Änderung des Strahlungsfeldes durch Mineraldüngeraufbringung und Unterpflügen) sollte vermieden werden. Ebenfalls sollte Strahlungsabschirmung z. B. durch Hauswände oder überstehende Dächer ausgeschlossen werden. Falls das Dosimeter eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit besitzt und ein gerichtetes Strahlungsfeld vorliegt, ist eine stets gleiche Ausrichtung am ausgewählten Auslegeort notwendig.

Die Auslegeorte sind so auszuwählen, dass der klimatische Einfluss auf die Dosimeter möglichst gering und vergleichbar ist. Orte mit extremer Temperaturbelastung sollten vermieden werden.

#### 4.4 Aufbau des Dosimeters und äußere Umhüllung

Ein Dosimeter besteht aus einem oder mehreren Detektoren, umschlossen von einer Kapsel, in der ggf. Filtermaterialien angeordnet sind. Diese Kapsel befindet sich in einer wasserdichten, witterungsbeständigen, aktivitätsarmen und, falls notwendig, lichtundurchlässigen Umhüllung. Das Dosimeter muss auf der Kapsel oder der Umhüllung dauerhaft und unverwechselbar gekennzeichnet sein.

Das Dosimeter kann direkt oder mit einer zusätzlichen äußeren Umhüllung ausgelegt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Abschirmwirkung der äußeren Hülle für das zu überwachende Strahlungsfeld keinen wesentlichen Einfluss auf den Ortsdosisleistungswert ausübt. Als Außenhülle kann zum Beispiel ein stabiler Behälter dienen, in dem das Dosimeter befestigt wird. Dadurch ist das Dosimeter vor direkter Sonnenbestrahlung und vor Wärmestau bzw. Kondenswasserbildung durch Hinterlüftung geschützt und Niederschlägen nicht direkt ausgesetzt. In der Praxis haben sich verschiedene Behältnisse, z. B. Plastikrohre (siehe z. B. DIN 25483 [4] Anlage A) oder vogelhausähnliche Kästchen bewährt.

#### 4.5 Planung der Expositionszeit

Aus den Überwachungsanforderungen ergibt sich, dass zumindest einmal pro Jahr ein Auswechseln der Dosimeter erfolgen muss. Dabei braucht der Wechsel nicht entsprechend dem Kalenderjahr zu erfolgen. Kürzere



Expositionszeiten als 12 Monate, die eine bessere zeitliche Zuordnung von eventuellen Dosiserhöhungen gestatten, sind möglich und für bestimmte Messaufgaben in der betrieblichen Überwachung sinnvoll.

#### 4.6 Einsetzbare Dosimetriesysteme

Für die Umgebungsüberwachung sind nur solche Festkörperdosimetriesysteme geeignet, welche die in Kapitel 3 und in DIN 25483 [4] angeführten Anforderungen erfüllen.

Die nachfolgend aufgeführten Festkörperdetektoren, ggf. mit entsprechender Energiekompensationsfilterung, sind für die Ortsdosisbestimmung zu empfehlen:

- Thermolumineszenzdetektoren:  $^{nat}\text{LiF}$ ,  $^7\text{LiF}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jeweils mit spezieller Dotierung.
- Detektoren auf der Basis der optisch stimulierten Lumineszenz (OSL):  $\text{BeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jeweils mit spezieller Dotierung.
- Photolumineszenzdetektoren in Form von Flachglasdosimetern.

### 5 Ermittlung der Ortsdosis $H$

Hier wird das prinzipielle Bestimmungsverfahren aus der Sicht des Anwenders dargestellt. Die einzelnen Berechnungsschritte, die zu den hier angegebenen Gleichungen führen, sind im Anhang 1 zusammengestellt und erläutert.

Die Ortsdosis  $H_j$  ergibt sich für den Ort  $j$  unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren für den Klimaeinfluss  $k_{K,j}$  und für Energie und Winkel  $k_{E,\beta,j}$  aus dem Dosimetermesswert  $H_{m,j}$  nach folgender Beziehung:

$$H_j = k_{K,j} \cdot k_{E,\beta,j} \cdot H_{m,j} \quad (4)$$

Die einzelnen Terme in Gleichung (4) werden im Folgenden erläutert.

#### 5.1 Dosismesswert

Die Messstelle berechnet den Dosismesswert  $H_{m,j}$  aus dem linearitätskorrigierten (Korrekturfaktor  $k_L$ ), mittleren Messwert  $\bar{H}_j^m$  der eingesetzten Detektoren und dem Messwertanteil  $H_H^m$ , der während der Dosimeterhandhabung außerhalb der Überwachungszeitspanne entsteht, nach folgender Beziehung:

$$H_{m,j} = k_L \cdot \bar{H}_j^m - H_H^m \quad (5)$$

$H_H^m$  kann bei Kenntnis der Handhabungszeit und der Dosisleistung während der Handhabungszeit berechnet werden. Labortypische Werte der Dosisleistung während der Handhabungszeit sind durch Messungen mit dem gleichen Dosimetriesystem über lange Zeiträume zu bestimmen. Sind solche Werte nicht bekannt, kann der in DIN 25483 [4] empfohlene mittlere Wert der Dosisleistung von  $2 \mu\text{Sv/d}$  benutzt werden. In die von der Messstelle anzugebende Unsicherheit  $u(H_{m,j})$  geht die Länge der Handhabungszeitspanne wesentlich ein.

#### 5.2 Korrekturfaktor für Klima und Langzeit

Der Korrekturfaktor  $k_{K,j}$  soll den Einfluss von Witterungsbedingungen am Auslegeort  $j$  und von langen Expositionszeiten (Langzeitstabilität) auf den Dosimetermesswert korrigieren. Diese Einflüsse werden allgemein als „Fading“ bzw. „Build-up“ bezeichnet. Anstelle eines individuellen Korrekturfaktors  $k_{K,j}$  für jeden Auslegeort  $j$  ist es im allgemeinen ausreichend, einen mittleren Korrekturfaktor für eine größere Gruppe von Ortsdosimetern zu benutzen, der an einem repräsentativen Auslegeort ermittelt wird. Dazu wird empfohlen, vorbestrahlte Dosimeter (siehe auch DIN 25483 [4]) wiederholt über die Überwachungszeitspannen auszulegen, bis langjährige Erfahrungen vorliegen. Von der Messstelle können auch Korrekturfaktoren für typische Auslegeorte (z. B. sonniger oder schattiger Auslegeort) ermittelt werden. Wird nicht zwischen sonnigen und schattigen Auslegeorten unterschieden, obwohl beides vorkommt, ist ein mittlerer  $k_K$ -Faktor mit einer höheren Standardunsicherheit anzunehmen. Im Allgemeinen beträgt die Abweichung des  $k_K$ -Faktors von 1 nicht mehr



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

**Blatt: 3.1.1.1**

Seite: 6 von 22

Stand: Februar 2014

als 5%. An Auslegeorten mit extremen Klimabedingungen, wie z. B. auf Flachdächern oder in besonnten Innenhöfen, ist der  $k_K$ -Faktor für diese Auslegeorte und seine Standardunsicherheit gesondert zu betrachten. Hier kann der  $k_K$ -Faktor auch um mehr als 10 % von 1 abweichen. Die Auswahl des für den Auslegeort des Dosimeters zutreffenden Korrektionsfaktors  $k_K$  obliegt der überwachenden Stelle mit ihren Ortskenntnissen.

### 5.3 Korrektionsfaktor für Energie und Winkel

Die Auswahl des für den Auslegeort  $j$  des Dosimeters geeigneten Korrektionsfaktors  $k_{E,\beta,j}$  für Energie und Winkel (siehe auch DIN 25483 [4]) setzt voraus, dass sowohl die Energie- und Richtungsabhängigkeit des Ansprechvermögens des Dosimeters als auch das Photonenenergiespektrum und die Richtungsverteilung am Auslegeort bekannt sind. Es wird daher empfohlen,  $k_{E,\beta}$  aus den entsprechenden Daten für das Ansprechvermögen der verwendeten Dosimeter aus den Werten für die Energie- und Richtungsverteilung bei der Kalibrierbestrahlung bzw. der Exposition am Auslegeort durch eine Faltung zu ermitteln. Ist das zu messende Feld in seiner spektralen Energieverteilung vergleichbar mit dem Kalibrierungsspektrum (Cs-137-Gammastrahlung), kann  $k_{E,\beta}=1$  gesetzt werden. Für Strahlungsfelder, die durch natürlichen Untergrund hervorgerufen werden sind für die empfohlenen Dosimeter  $k_{E,\beta}$ -Werte zu erwarten, die sich von 1 nur unwesentlich unterscheiden. Lediglich bei Strahlungsfeldern mit einem hohen Anteil von Photonen im Energiebereich zwischen etwa 30 und 150 keV kann sich  $k_{E,\beta}$  von 1 unterscheiden, wenn das verwendete Dosimeter in diesem Energiebereich ein deutlich von dem Kalibrierstrahlungsfeld abweichendes Ansprechvermögen hat.

### 5.4 Standardunsicherheit der Ortsdosis

Entsprechend Gleichung (4) für die Ortsdosis ergibt sich deren Gesamt-Standardunsicherheit  $u(H_j)$  zu

$$u(H_j) = \sqrt{u^2(k_{K,j}) \cdot [k_{E,\beta} \cdot H_{m,j}]^2 + u^2(k_{E,\beta}) \cdot [k_{K,j} \cdot H_{m,j}]^2 + u^2(H_{m,j}) \cdot [k_{K,j} \cdot k_{E,\beta}]^2} \quad (6)$$

$u(H_j)$  = Standardunsicherheit der Ortsdosis  $H_j$

$u(k_{K,j})$  = Standardunsicherheit des Korrektionsfaktors für Klima und Langzeit

$u(k_{E,\beta})$  = Standardunsicherheit des Korrektionsfaktors für Energie und Winkel

$u(H_{m,j})$  = Standardunsicherheit des Dosismesswertes

Die verschiedenen Unsicherheitsbeiträge können durch ein Unsicherheitsbudget veranschaulicht werden (siehe DIN 25483 [4] oder Tab. 5 des Berechnungsbeispiels im Anhang A2). Die Gesamtstandardunsicherheit darf 25 % nicht überschreiten. Hier wirkt sich die Teilunsicherheit von  $k_{E,\beta}$  bei unbekanntem Feld am stärksten aus. Bei Messungen mit verschiedenen Dosimetriesystemen stimmen die Dosiswerte innerhalb der Unsicherheit  $u(H_j)$  überein.

## 6 Ermittlung der Untergrunddosis $H_U$

Der Anteil der Ortsdosis am Auslegeort  $j$ , der unbeeinflusst vom Betrieb der kerntechnischen Anlage gemessen wird, die Untergrunddosis  $H_{U,j}$ , wird zum überwiegenden Teil durch die kosmische und die terrestrische Strahlung, ggf. auch durch den Einfluss des globalen Fallouts, verursacht. Die  $H_U$ -Werte aus dem Überwachungsgebiet unterliegen zeitlichen und örtlichen Schwankungen, so dass geeignete Verfahren zu verwenden sind, um repräsentative Daten für diese Untergrunddosis zu erhalten.

Der Idealfall für die Bestimmung von  $H_{U,j}$  ist die Erhebung von Ortsdosiswerten an den Auslegeorten im geplanten Überwachungsgebiet über längere Zeit (Jahre) vor Inbetriebnahme der Anlage. In diesem Fall liegen vom Betrieb der Anlage unbeeinflusste  $H_{U,j}$ -Werte mit ihren natürlichen Schwankungen vor. Werden die  $H_{U,j}$ -Werte erst nach Inbetriebnahme der Anlage ermittelt oder liegen nur sehr wenige, gemessene  $H_{U,j}$ -Werte vor, die nicht von den Auslegeorten des Überwachungsprogrammes stammen oder keine sichere Angabe der natürlichen Schwankungen gestatten, muss eine rechnerische Abschätzung der  $H_{U,j}$ -Werte und ihrer Messunsicherheit erfolgen. Liegen für einen Auslegeort Ortsdosiswerte über einen längeren Zeitraum vor, dürfen solche Ortsdosiswerte, die einen Einfluss der überwachten Anlage zeigen, jedoch nicht für die Berechnung der Untergrunddosis verwendet werden.



Die einzelnen Berechnungsschritte des in Kap. 6.1 und 6.2 dargestellten Bestimmungsverfahrens sind im Anhang 1 zusammengestellt und erläutert.

### 6.1 Untergrunddosis

Für einen Auslegeort  $j$ , an dem die Ortsdosis nicht durch die Anlage beeinflusst wird, gilt:  $H_{U,j} = H_j$ .

Unter Berücksichtigung von Gleichung (4) folgt mit den Korrekturfaktoren  $k_{K,j,y}$  und  $k_{E,\beta,U,j}$  für den jeweiligen Auslegeort  $j$  und die Überwachungszeitspanne  $y$ :

$$H_{U,j,y} = k_{K,j,y} \cdot k_{E,\beta,U,j} \cdot H_{m,U,j,y} \quad (7)$$

Der Korrekturfaktor  $k_{E,\beta,U,j}$  am Auslegeort  $j$  wird für alle Überwachungszeitspannen gleich angenommen, da nur das natürliche Strahlungsfeld zum Dosiswert beiträgt. Dies setzt auch voraus, dass die Verhältnisse am Messort gleich bleiben (siehe auch Kap. 4.3). Der Korrekturfaktor  $k_{K,j,y}$  ist nicht vom Strahlungsfeld abhängig, weshalb auf den Index  $U$  verzichtet werden kann. Der Mittelwert der Untergrunddosis des durch die Anlage unbeeinflussten Auslegeortes  $j$  über  $z$  Überwachungszeitspannen errechnet sich zu:

$$\bar{H}_{U,j} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{y=1}^z H_{U,j,y} \quad (8)$$

Die auslegeortspezifische Untergrunddosis unterliegt zeitlichen Schwankungen. Auch ist der Mittelwert der Gesamtheit der von der Anlage unbeeinflussten Messwerte (in der Praxis kann dafür die Gesamtheit der von der Direktstrahlung unbeeinflussten Messwerte genommen werden) aufgrund von natürlichen Schwankungen von Jahr zu Jahr etwas unterschiedlich. Signifikante Abweichungen vom langzeitigen Mittelwert bedürfen der näheren Untersuchung. Eine aufwändige Methode, solche zeitlichen Schwankungen zu berücksichtigen, ist im Blatt 3.4.1 [5] der Loseblattsammlung beschrieben.

### 6.2 Standardunsicherheit der Untergrunddosis

Entsprechend Gleichung (8) lässt sich die Standardunsicherheit der Untergrunddosis berechnen zu:

$$u(\bar{H}_{U,j}) = \pm \frac{1}{z} \sqrt{\sum_y^z u^2(H_{U,j,y})} \quad (9)$$

Liegen für die einzelnen Überwachungszeitspannen  $y$  keine Unsicherheiten  $u(H_{U,j,y})$  vor, kann unter der Voraussetzung, dass die Unsicherheit des Korrekturfaktors für Energie und Winkel klein ist, die Unsicherheit der Untergrunddosis für ein ausreichend hohes  $z$  in guter Näherung bestimmt werden zu

$$u(\bar{H}_{U,j}) = \pm \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^z (H_{U,j,y} - \bar{H}_{U,j})^2}{z-1}} \quad (9a)$$

Diese Unsicherheit enthält nicht nur die Teilmessunsicherheit des Dosimetriesystems, sondern auch die zeitlichen Schwankungen der Untergrunddosis am Auslegeort  $j$ .

## 7 Ermittlung der Nettodosis $\Delta H$

Das Überwachungsziel ist die Angabe der Dosis, die zusätzlich zur unbeeinflussten Untergrunddosis  $H_U$  durch den bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlage oder durch einen Störfall/Unfall hervorgerufen wurde. Die Berechnung dieser Nettodosis  $\Delta H$  setzt die Kenntnis der am Auslegeort vorliegenden durch den Betrieb der Anlage unbeeinflussten Untergrunddosis  $H_U$  voraus. Darüber hinaus sind die Betriebsdaten der Anlage, Einflüsse der meteorologischen Bedingungen, ggf. bauliche Änderungen in der Umgebung der Auslegeorte, sowie zeitliche Änderungen des terrestrischen und kosmischen Strahlungsfeldes zu berücksichtigen. Daher sollte die Berechnung der Nettodosis durch die überwachende Stelle ausgeführt werden.

Die einzelnen Berechnungsschritte des in Kap. 7.1 bis 7.3 dargestellten Bestimmungsverfahrens sind im Anhang 1 zusammengestellt und erläutert.

### 7.1 Nettodosis

Der nach Gleichung (8) ermittelte Untergrunddosiswert  $\bar{H}_{U,j}$  beinhaltet den Korrektionsfaktor  $k_{E,\beta,U,j}$ . Diese Korrektion muss zunächst rückgängig gemacht werden. Der daraus erhaltene in der aktuellen Überwachungszeitspanne a zu erwartende Dosismesswertanteil durch die Untergrunddosis wird vom klimakorrigierten aktuellen Dosismesswert subtrahiert. Die Differenz, d.h. der Messwertanteil durch die Anlage, ist dann mit dem für diesen Messwertanteil gültigen Korrektionsfaktor  $k_{E,\beta,\Delta,j,a}$  zu multiplizieren.

Auf der Grundlage der Beziehung (3) ergibt sich die Nettodosis  $\Delta H_{j,a}$  am Auslegeort j in der Überwachungszeitspanne a zu:

$$\Delta H_{j,a} = k_{E,\beta,\Delta,j,a} \cdot \left( k_{K,j,a} \cdot H_{m,j,a} - \frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}} \right) \quad (10)$$

### 7.2 Standardunsicherheit der Nettodosis

Entsprechend Gleichung (10) kann die Standardunsicherheit der Nettodosis berechnet werden zu:

$$u^2(\Delta H_{j,a}) = u^2(k_{E,\beta,\Delta,j,a}) \cdot \left[ k_{K,j,a} \cdot H_{m,j,a} - \frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}} \right]^2 + u^2(k_{K,j,a}) \cdot [k_{E,\beta,\Delta,j,a} \cdot H_{m,j,a}]^2 + u^2(H_{m,j,a}) \cdot [k_{E,\beta,\Delta,j,a} \cdot k_{K,j,a}]^2 + u^2\left(\frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}}\right) \cdot [k_{E,\beta,\Delta,j,a}]^2 \quad (11)$$

Die Unsicherheit des Korrektionsfaktors für Energie und Winkel  $u(k_{E,\beta,\Delta,j,a})$  ist für die Überwachungszeitspanne a durch die überwachende Stelle festzulegen. Die Unsicherheit  $u(k_{K,j,a})$  ist entsprechend den Klimabedingungen am Auslegeort j in der aktuellen Überwachungszeitspanne a zu wählen.

### 7.3 Erkennungs- und Nachweisgrenze der Nettodosis

Ein Dosisbeitrag von der Anlage kann nur dann vorliegen, wenn die ermittelte Nettodosis über der Erkennungsgrenze liegt. Die Erkennungsgrenze  $\Delta H_{j,a}^*$  für den Auslegeort j in der aktuellen Überwachungszeitspanne a wird unter Verwendung der Standardunsicherheit  $u(\Delta H_{j,a})$  für die Nettodosis nach folgender Gleichung auf der Grundlage von DIN 25482-10 [6] und analog zu DIN 25482-11 [7] für ein Vertrauensniveau von 95 % bestimmt:

$$\Delta H_{j,a}^* = 1,645 \cdot u(\Delta H_{j,a} = 0) \quad (12)$$

Für die Bedingung  $\Delta H_{j,a} = 0$  vereinfacht sich die Gleichung (11). Das erste Glied entfällt. Zur Nachprüfung, ob die von der REI geforderte Nachweisgrenze für die Auslegeorte eingehalten wird, muss diese wie hier angegeben ermittelt werden. Dazu wird die vorher ermittelte Erkennungsgrenze benötigt. Die Nachweisgrenze  $\delta_{\Delta}^*$  für  $\Delta H_{j,a}$  errechnet sich dann nach folgender Gleichung für ein Vertrauensniveau von 95 %:

$$\delta_{\Delta}^* = \Delta H_{j,a}^* + 1,645 \cdot u(\delta_{\Delta}^*) \quad (13)$$





Diese Gleichung kann zweckmäßigerweise durch eine Iteration mit dem Anfangswert für die Standardunsicherheit bei der Nachweisgrenze von  $u(\delta_{\Delta}^*) = u(2\Delta H_{j,a}^*)$  gelöst werden. Ein Iterationsschritt ist im Allgemeinen ausreichend. Im Anhang 3 werden die Iterationsschritte am Beispiel gezeigt.

Da die Berechnung der Werte in den Anlagen A1 und A2 auf der Basis o. g. DIN erfolgte, sind sie weiterhin gültig, denn die angewandte Methodik ist absolut kompatibel zu der DIN ISO 11929 [8].

Wird die geforderte Nachweisgrenze nicht erreicht, müssen Maßnahmen sowohl im Messverfahren (z. B. Auswahl des Dosimetriesystems) wie auch im Verfahrensablauf (z. B. Auslegeortauswahl, Überwachungszeitspanne, Verkürzung der Handhabungszeitspanne) getroffen werden.

## **8 Dokumentation**

Die Dokumentation sollte außer der Nennung des verwendeten Dosimetriesystems und der Angaben der Orts- und Nettodosen an den verschiedenen Auslegeorten auch Angaben zur Charakterisierung der Auslegeorte und zur Messwertermittlung enthalten. (zur Dokumentation von Messergebnissen siehe auch DIN 25483 [4])

Angaben zur Charakterisierung eines Auslegeortes:

- Koordinaten im Messnetz bezogen auf die Anlage
- Topographische Beschreibung und klimatische Bedingungen
- Auslegungsvariante des Dosimeters (Umhüllung, Befestigungsart, Höhe, ggf. Ausrichtung)
- Ergebnisse von Dosisleistungsmessungen bzw. von In-situ-Gammaspektrometrie
- Angabe der Jahresdosis vor Inbetriebnahme der Anlage
- Messwerte aus früheren Überwachungszeitspannen

Angaben zur Messwertermittlung:

- Länge der Überwachungszeitspanne
- Länge der Handhabungszeitspanne
- Angaben zu Mess- und Auswertebedingungen, insbesondere Änderungen
- Originalmesswerte sowie benutzte Korrektionsfaktoren und Kalibrierfaktoren
- genutzte Berechnungsverfahren zur Ermittlung von Orts-, Untergrund- und Nettodosen

Umfang und Aufbewahrungsfristen für derartige Daten sollten, sofern nicht durch behördliche Auflagen festgelegt, zwischen überwachender und messender Stelle vereinbart werden, um ggf. auch Originalmesswerte o. ä. für nachträgliche, weitergehende Auswertungen zur Verfügung zu haben.



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

**Blatt: 3.1.1.1**

Seite: 10 von 22

Stand: Februar 2014

## 9 Besonderheiten

Besteht die Möglichkeit, dass auf Grund der Art der kerntechnischen Anlage an allen oder an bestimmten Auslegeorten nicht nur Photonen- sondern auch Neutronenstrahlung auftritt, müssen neutronenunempfindliche Detektoren eingesetzt werden. Eine Verfälschung des Messwertes der Gamma-Ortsdosis durch Betastrahlung kann mit Hilfe einer geeigneten Abdeckung der Detektoren des Dosimeters verhindert werden.

## 10 Bewertung des Verfahrens

Mit Festkörperdosimetern, wie zum Beispiel verschiedenen Thermolumineszenzdosimetern oder dem Flachglas-RPL-Dosimeter, ist eine Überwachung der Gamma-Ortsdosis in der Umgebung kerntechnischer Anlagen mit ausreichender Empfindlichkeit und Messgenauigkeit im erforderlichen Dosisbereich durchführbar. Für dieses Verfahren ist die Kenntnis der Bedingungen am Auslegeort notwendig, um aus dem Messwert des Dosimeters unter Anwendung verschiedener Korrekturfaktoren die Ortsdosis zu berechnen. **Die Bestimmung der Ortsdosis  $H_{j,a}$  ist bei Expositionszeiten der Dosimeter von einem Jahr mit einer relativen Standardunsicherheit von rund 20 % möglich.**

Die von der REI geforderte zusätzliche Angabe der durch die kerntechnische Anlage verursachten Dosis wird möglich, wenn ein durch Messungen oder geeignete Abschätzungen gewonnener Wert für die unbeeinflusste Untergrunddosis am betreffenden Auslegeort vorliegt. Die Ermittlung der Nettodosis  $\Delta H_{j,a}$  aus aktueller Ortsdosis abzüglich der unbeeinflussten Untergrunddosis führt im Normalbetrieb der kerntechnischen Anlage immer zu sehr kleinen, auch negativen  $\Delta H_j$ -Werten. Die in der REI [1] geforderte Nachweisgrenze von 0,1 mSv/a für die Nettodosis wird nur dann erreicht, wenn bei geringer Schwankung der Untergrunddosis die Unsicherheiten für die Korrekturfaktoren klein gehalten werden können.

**Die Ergebnisse der Berechnung der Nettodosis nach dem hier beschriebenen Verfahren lassen Zweifel aufkommen, ob die in der REI geforderte Nachweisgrenze in der Praxis immer erreichbar ist.**

## 11 Literaturzusammenstellung

- [1] Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen, GMBI. Nr. 14-17, S. 253 vom 23. März 2006
- [2] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrISchV), vom 20.07.2001, BGBl 2001 Teil 1 Nr.38, S. 1714 - 1846
- [3] DIN 6814-3: Begriffe in der Radiologischen Technik - Teil 3: Dosisgrößen und Dosisseinheiten, Kapitel 5.3, Ausgabe 2001-01, Beuth-Verlag
- [4] DIN 25 483: Verfahren zur Umgebungsüberwachung mit integrierenden Festkörperdosimetern, Ausgabe 2000-09, Beuth-Verlag
- [5] B. Bucher, F. Cartier, H. Völke, Bestimmung der Nettodosisleistung mittels Thermolumineszenz-Umgebungsdosimetern und automatischen Dosisleistungsmessnetzen, Blatt 3.4.1, in Empfehlungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität, Loseblattsammlung des Arbeitskreises Umweltüberwachung, Fachverband für Strahlenschutz e.V. (Hrsg.), FS-78-15-AKU, ISSN 1013-4506, Dezember 2007, www.fs-ev.de LB
- [6] DIN 25482-10: Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, Teil 10: Allgemeine Anwendungen, Ausgabe: 2000-05, Beuth-Verlag
- [7] DIN 25482-11: Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, Teil 11: Messungen mit Albedodosimetern, Ausgabe: 2003-02, Beuth-Verlag
- [8] DIN ISO 11929:2011-01 Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung - Grundlagen und Anwendungen (ISO 11929:2010), Beuth-Verlag



## A1 Anhang 1: Berechnungsweg

In diesem Anhang werden zusätzlich zu der Darstellung der Ermittlung der Nettodosis in den Kapiteln 5 bis 7 einzelne Berechnungsschritte angegeben und erläutert. Bei den Formeln (a) bis (z) dieses Anhangs sind die Nummern der Formeln, die auch im Hauptteil auftreten, zusätzlich angegeben.

### A1.1 Ortsdosis

Da der Dosimetermesswert  $H_{m,j}$  sowohl durch die Exposition in der Umgebung als auch während der Handhabung entsteht, muss die sogenannte Handhabungsdosis  $H_H$  (Dosisbeitrag entstanden in den Lagerzeiten zwischen „Nullstellung“ des Dosimeters und Beginn der Exposition am Auslegeort j, sowie zwischen Ende der Exposition und Auswertung des Dosimeters) ermittelt und berücksichtigt werden. Der mittlere Dosismesswert  $\bar{H}_j^m$  ist bezüglich Nichtlinearität des Dosimetriesystems und unter Verwendung der den Bedingungen am Auslegeort entsprechenden Korrekturfaktoren für Energie und Winkel, sowie Klima und Langzeit zu korrigieren.

Die Berechnung der Ortsdosis für den Auslegeort j erfolgt gemäß Gl. 4 der DIN 25483 nach der Beziehung:

$$H_j = k_{K,j} \cdot k_L \cdot k_{E,\beta,j} \cdot \bar{H}_j^m - H_H \quad (a)$$

mit  $k_L$  = Linearitätskorrektur des Dosimetriesystems,  
 $k_{K,j}$  = Korrekturfaktor für Klima und Langzeit für den Auslegeort j,  
 $k_{E,\beta,j}$  = Korrekturfaktor für Energie und Winkel,  
 $\bar{H}_j^m$  = gemittelter Messwert der eingesetzten Detektoren.  
 $H_H$  = Handhabungsdosis

Der Dosismesswert  $H_j^m$  eines Detektors ergibt sich aus der Differenz zwischen der Dosimeteranzeige A und der Nullanzeige  $A_0$  des Detektors, die mit dem Kalibrierfaktor  $N_k$  - normiert auf die Photonenenergie der Kalibrierungsbestrahlung (nach DIN 25483 [4] Cs-137) - multipliziert wird, nach:

$$H_j^m = N_k (A - A_0) \quad (b)$$

Zur Berechnung der Unsicherheit des Dosismesswertes eines Detektors werden die Standardunsicherheit der Dosis unbestrahlter Dosimeter (Nulldosis) und die relative Standardunsicherheit  $r_k$  im Dosisbereich der Kalibrierdosis  $H_k$  benötigt:

$$u(H_j^m) = \sqrt{u_0^2 + (r_k \cdot H_j^m)^2} \quad (c)$$

mit  $u_0$  = Standardunsicherheit der Dosis unbestrahlter Dosimeter (Nulldosis)  
 $H_j^m$  = Dosismesswert des Detektors.  
 $r_k$  = relative Standardunsicherheit im Dosisbereich der Kalibrierdosis  $H_k$

Die Unsicherheit des Mittelwertes zweier Detektoren eines Dosimeters lässt sich berechnen zu

$$u(\bar{H}_j^m) = \frac{1}{2} \sqrt{u_0^2 + (r_k \cdot H_{j,1}^m)^2 + u_0^2 + (r_k \cdot H_{j,2}^m)^2} \quad (d)$$



Die Exposition des Dosimeters während der Handhabungszeit  $t_H$  bewirkt einen Messwertanteil  $H_H^m$ , der aus der Handhabungszeit  $t_H$  und einer mittleren, mit dem gleichen Dosimetriesystem bestimmten Dosisleistung  $\dot{H}_H^m$  für reine Untergrundstrahlung nach der Beziehung

$$H_H^m = t_H \cdot \dot{H}_H^m \quad (e)$$

bestimmt werden kann. Unter Berücksichtigung von  $k_L$  ergibt sich der bezüglich des Handhabungsdosisanteils und der Nichtlinearität der Dosimeteranzeige korrigierte Messwert  $H_{m,j}$  des Dosimeters nach

$$H_{m,j} = k_L \cdot \bar{H}_j^m - t_H \cdot \dot{H}_H^m \quad (5) \quad (f)$$

Die Unsicherheit  $u(H_{m,j})$  wird berechnet zu

$$u(H_{m,j}) = \sqrt{u^2(k_L) \cdot \bar{H}_j^{m2} + u^2(\bar{H}_j^m) \cdot k_L^2 + u^2(t_H) \cdot \dot{H}_H^{m2} + u^2(\dot{H}_H^m) \cdot t_H^2} \quad (g)$$

Da die Handhabungsdosis gemäß DIN 25483 [4] höchstens 10% der Ortsdosis betragen darf, können zur Vereinfachung die Korrekturfaktoren  $k_{E,\beta,H}$  und  $k_{K,H}$  der Handhabungsdosis gleich denen am Messort j gesetzt werden. Somit ergibt sich die Ortsdosis aus den Gleichungen (a), (e) und (f) zu

$$H_j = k_{K,j} \cdot k_{E,\beta,j} \cdot H_{m,j} \quad (4) \quad (h)$$

Durch die Berücksichtigung der Korrekturfaktoren  $k_K$  und  $k_{E,\beta}$  folgt für die Ortsdosis  $H_j$ , dass sie innerhalb ihrer Messunsicherheit mit den Werten anderer Dosimetriesysteme übereinstimmen muss.

#### A1.2 Standardunsicherheit der Ortsdosis

Die Gesamt-Standardunsicherheit der Ortsdosis  $u(H_j)$  berechnet sich nach

$$u(H_j) = \sqrt{u^2(k_{K,j}) \cdot [k_{E,\beta} \cdot H_{m,j}]^2 + u^2(k_{E,\beta}) \cdot [k_{K,j} \cdot H_{m,j}]^2 + u^2(H_{m,j}) \cdot [k_{K,j} \cdot k_{E,\beta}]^2} \quad (6) \quad (i)$$

Gemäß dieser Beziehung lässt sich  $u(H_j)$  auch mit einem Unsicherheitsbudget entsprechend DIN 25483 [4] (Tabelle D.2) bestimmen. Dafür werden die Teilstandardunsicherheiten und die Sensitivitätskoeffizienten (siehe auch Tab. 5 im Berechnungsbeispiel) benötigt.

#### A1.3 Untergrunddosis

Die Ortsdosis  $H_j$  am Auslegeort j setzt sich aus der Untergrunddosis  $H_{U,j}$  und der Nettodosis  $\Delta H_j$  zusammen. Deshalb ist zunächst die Untergrunddosis  $H_{U,j}$  am Auslegeort zu ermitteln.

Für einen Auslegeort, an dem die Ortsdosis nicht durch die Anlage beeinflusst wird, gilt  $H_j = H_{U,j}$ . Unter Berücksichtigung von Gleichung (f) folgt mit den Korrekturfaktoren  $k_{K,j,y}$  und  $k_{E,\beta,U,j}$  für den jeweiligen Auslegeort j und die Überwachungszeitspanne y:

$$H_{U,j,y} = k_{K,j,y} \cdot k_{E,\beta,U,j} \cdot H_{m,U,j,y} \quad (7) \quad (j)$$

Der Korrekturfaktor  $k_{E,\beta,U,j}$  am Auslegeort j wird für alle Überwachungszeitspannen gleich angenommen, da nur das natürliche Strahlungsfeld (Untergrunddosis) zum Dosiswert beiträgt. Der Mittelwert der Untergrunddosis des durch die Anlage unbeeinflussten Auslegeortes j über z Überwachungszeitspannen errechnet sich zu

$$\bar{H}_{U,j} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{y=1}^z H_{U,j,y} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{y=1}^z k_{E,\beta,U,j} \cdot k_{K,j,y} \cdot H_{m,U,j,y} = k_{E,\beta,U,j} \cdot \frac{1}{z} \cdot \sum_{y=1}^z k_{K,j,y} \cdot H_{m,U,j,y} \quad (8) \quad (k)$$

und die zugehörige Standardunsicherheit zu

$$u(\bar{H}_{U,j}) = \pm \frac{1}{z} \sqrt{\sum_y^z u^2(H_{U,j,y})} = \pm \frac{1}{z} \sqrt{\sum_y^z u^2(k_{E,\beta,U,j} \cdot k_{K,j,y} \cdot H_{m,U,j,y})} \quad (9) \text{ (l)}$$

Sind für die einzelnen Überwachungszeitspannen  $y$  die Messunsicherheiten nicht bekannt, kann die Unsicherheit der Untergrunddosis für ein ausreichend hohes  $z$  in guter Näherung bestimmt werden zu

$$u(\bar{H}_{U,j}) = \pm \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^z (H_{U,j,y} - \bar{H}_{U,j})^2}{z-1}} \quad (9a) \text{ (m)}$$

#### A1.4 Nettodosis

Aus den ermittelten Ortsdosen  $H_j$  und den zuordenbaren Werten für  $H_{U,j}$  ist die Nettodosis  $\Delta H_j$  für den Ausleageort  $j$  durch Subtraktion zu berechnen:

$$\Delta H_j = H_j - H_{U,j} \quad (3) \text{ (n)}$$

Für die Messwerte gilt entsprechend:

$$\Delta H_{m,j} = H_{m,j} - H_{m,U,j} \quad (o)$$

Damit ergibt sich folgender Berechnungsweg für die Nettodosis:

Unter der Voraussetzung, dass der Mittelwert der Ortsdosis  $\bar{H}_{U,j}$  ein guter Erwartungswert für die Untergrunddosis  $H_{U,j,a}$  in der aktuellen Überwachungsperiode  $a$  ist, gilt für den Dosismesswert  $H_{m,U,j,a}$  der Untergrunddosis nach Gleichung (j):

$$H_{m,U,j,a} = \frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{K,j,a} \cdot k_{E,\beta,U,j}} \quad (p)$$

Entsprechend gilt für die Nettodosis:

$$\Delta H_{m,j,a} = \frac{\Delta H_{j,a}}{k_{K,j,a} \cdot k_{E,\beta,\Delta,j,a}}, \quad (q)$$

wobei  $k_{E,\beta,\Delta,j,a}$  der Korrektionsfaktor für Energie und Winkel für die durch den Betrieb der Anlage verursachten Nettodosis in der aktuellen Überwachungszeitspanne  $a$  darstellt. Ferner wird angenommen, dass der Korrektionsfaktor  $k_{E,\beta,U,j}$  für Untergrundstrahlung über alle Überwachungszeitspannen  $z$  einschließlich der aktuellen Überwachungszeitspanne  $a$  konstant ist.

Aus den Gleichungen (n), (o) und (p) folgt schließlich über

$$\frac{\Delta H_{j,a}}{k_{K,j,a} \cdot k_{E,\beta,\Delta,j,a}} = H_{m,j,a} - \frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{K,j,a} \cdot k_{E,\beta,U,j}} \quad (r)$$

die allgemeine Gleichung zur Ermittlung der Nettodosis

$$\Delta H_{j,a} = k_{E,\beta,\Delta,j,a} \cdot \left( k_{K,j,a} \cdot H_{m,j,a} - \frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}} \right) \quad (10) \text{ (s)}$$



Dabei ist  $\frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}}$  der mit  $k_{K,j,y}$  korrigierte Messwertanteil  $H_{m,U,j,y}$  durch die Untergrunddosis.

#### A1.5 Standardunsicherheit der Nettodosis

Die Standardunsicherheit der Nettodosis ergibt sich zu

$$u^2(\Delta H_{j,a}) = u^2(k_{E,\beta,\Delta,j,a}) \cdot \left[ k_{K,j,a} \cdot H_{m,j,a} - \frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}} \right]^2 + u^2(k_{K,j,a}) \cdot [k_{E,\beta,\Delta,j,a} \cdot H_{m,j,a}]^2 + u^2(H_{m,j,a}) \cdot [k_{E,\beta,\Delta,j,a} \cdot k_{K,j,a}]^2 + u^2\left(\frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}}\right) \cdot [k_{E,\beta,\Delta,j,a}]^2 \quad (11) \text{ (t)}$$

Die Unsicherheit des Korrekturfaktors für Energie und Winkel  $u(k_{E,\beta,\Delta,j,a})$  ist für die Überwachungszeitspanne a durch die überwachende Stelle festzulegen. Die Unsicherheit  $u(k_{K,j,a})$  ist entsprechend den Klimabedingungen am Auslegeort j in der Überwachungszeitspanne a zu wählen. Da  $k_{E,\beta,U,j}$  für alle Überwachungszeitspannen y als konstant angenommen wird (siehe A1.3), gilt:

$$u^2\left(\frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}}\right) = \frac{1}{(k_{E,\beta,U,j})^2} \cdot u^2(\bar{H}_{U,j})$$

Die Unsicherheit  $u(\bar{H}_{U,j})$  kann mit Hilfe von Gleichung (9)(l) oder (9a)(m) bestimmt werden.

#### A1.6 Erkennungs- und Nachweisgrenze der Nettodosis

Zur Berechnung der Nachweisgrenze der Nettodosis  $\Delta H_{j,a}$  muss zunächst die Erkennungsgrenze  $\Delta H_{j,a}^*$  nach folgender Gleichung für ein Vertrauensniveau von 95 % bestimmt werden:

$$\Delta H_{j,a}^* = 1,645 \cdot u(\Delta H_{j,a} = 0) \quad (12) \text{ (u)}$$

Damit die Bedingung  $\Delta H_{j,a} = 0$  erfüllt ist, muss gemäß Gl. (o) gelten:

$$H_{m,j,a} = H_{m,U,j,a} \quad (v)$$

Die Standardunsicherheit  $u(\Delta H_{j,a} = 0)$  wird nach Gl. (t) bestimmt, wobei der nach Gl. (p) berechnete Dosismesswert  $H_{m,U,j,a}$  der Untergrunddosis einzusetzen ist. Die Unsicherheit  $u(H_{m,U,j,a})$  lässt sich mit Hilfe von Gl. (g) berechnen. Für die Bedingung  $\Delta H_{j,a} = 0$  entfällt das erste Glied in Gleichung (t).

Die Nachweisgrenze  $\delta_{\Delta}^*$  für die Nettodosis  $\Delta H_{j,a}$  errechnet sich dann nach folgender Gleichung für ein Vertrauensniveau von 95 %:

$$\delta_{\Delta}^* = \Delta H_{j,a}^* + 1,645 \cdot u(\delta_{\Delta}^*) \quad (13) \text{ (w)}$$

Diese Gleichung kann nur durch Iteration gelöst werden. Als Anfangswert für die Nachweisgrenze wird  $\delta_{\Delta}^* = 2\Delta H_{j,a}^*$  gesetzt. Für die Iterationsschritte ist jeweils die Ermittlung der Standardunsicherheit beim Näherungswert der Nachweisgrenze  $u(\delta_{\Delta}^*)$  erforderlich. Aus dem Näherungswert der Nachweisgrenze werden



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

**Blatt: 3.1.1.1**

Seite: 15 von 22

Stand: Februar 2014

rückwärts die dazugehörigen Ausgangswerte und danach wieder vorwärts die Standardunsicherheit beim Näherungswert der Nachweisgrenze ermittelt.

Zunächst wird der korrigierte Messwert an der Nachweisgrenze  $H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*}$  berechnet. Dies geschieht unter Verwendung von Gleichung (10)(s) durch Auflöser nach  $H_{m,j,a}$ :

$$H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*} = \frac{1}{k_{K,j,a}} \cdot \left( \frac{\delta_{\Delta}^*}{k_{E,\beta,\Delta,j,a}} + \frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}} \right) \quad (x)$$

Für  $\delta_{\Delta}^*$  wird bei der ersten Iteration der o.g. Startwert eingesetzt. Die Unsicherheit für den korrigierten Messwert  $H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*}$  wird berechnet gemäß der Gleichung (g):

$$u(H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*}) = \sqrt{u^2(k_L) \cdot \bar{H}_{j,a,\delta_{\Delta}^*}^m + u^2(\bar{H}_{j,a,\delta_{\Delta}^*}^m) \cdot k_L^2 + u^2(t_H) \cdot \dot{H}_H^m + u^2(\dot{H}_H^m) \cdot t_H^2} \quad (y)$$

Der unkorrigierte Messwert an der Nachweisgrenze lässt sich durch Auflösen von Gl. (5)(f) nach  $\bar{H}_{j,a,\delta_{\Delta}^*}^m$  bestimmen:

$$\bar{H}_{j,a,\delta_{\Delta}^*}^m = \frac{1}{k_L} \cdot (H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*} + t_H \cdot \dot{H}_H^m) \quad (z)$$

Die Unsicherheit des unkorrigierten Messwertes setzt sich zusammen aus der Standardunsicherheit unbestrahlter Detektoren  $u_0$  und der relativen Standardunsicherheit  $r_k$  des Messwertes bei der Kalibrierdosis multipliziert mit dem unkorrigierten Messwert:

$$u(\bar{H}_{j,a,\delta_{\Delta}^*}^m) = \sqrt{u_0^2 + (r_k \cdot \bar{H}_{j,a,\delta_{\Delta}^*}^m)^2} \quad (aa)$$

Aus den Einzelwerten lässt sich die Unsicherheit  $u(\delta_{\Delta}^*)$  beim ersten Näherungswert der Nachweisgrenze (Startwert) und daraus die Nachweisgrenze  $\delta_{\Delta}^*$  berechnen.



**A2 Anhang 2: Berechnungsbeispiel**

Im Folgenden wird ein Beispiel zur Berechnung der Nettodosis gegeben. Das Beispiel geht von einer Anlage mit 10 Auslegeorten aus. Die Überwachungszeitspanne ist ein Jahr.

Alle Tabellen sind zur besseren Übersichtlichkeit in gleicher Weise aufgebaut. Die erste Zeile enthält eine laufende Spaltennummer für jede neu auftretende Variable. Die zweite Zeile der Tabelle gibt die Variable an. Zeile drei jeder Tabelle enthält die zur Variable gehörende Maßeinheit. Sind die Zahlenwerte einer Spalte berechnete Werte, so ist die Nummer der verwendeten Gleichung in der vierten Zeile eingetragen. Kommt eine Spalte in mehreren Tabellen vor, hat sie jeweils die gleiche Spaltennummer.

**A2.1 Charakterisierung der Auslegeorte und Untergrunddosis**

Die überwachende Stelle hat aufgrund der Klimabedingungen für jeden Auslegeort den geeigneten Korrektionsfaktor  $k_{K,j}$  für Klima und Langzeit festgelegt (Spalten 2 und 3). Diese Korrektionsfaktoren und ihre Unsicherheiten wurden in Langzeitversuchen mit vorbestrahlten Dosimetern von der Messstelle experimentell ermittelt. Der Korrektionsfaktor für Energie und Winkel  $k_{E,\beta,U,j}$  der Untergrunddosis wird ebenfalls festgelegt. Da die Eigenschaften des Strahlungsfeldes am Auslegeort in der aktuellen Überwachungszeitspanne zunächst als unbekannt anzunehmen sind, wird in Tab. 2 der Korrektionsfaktor für Energie und Winkel  $k_{E,\beta,j} = k_{E,U,\beta,j}$  gesetzt und dessen Unsicherheit mit 20% angenommen. Der Korrektionsfaktor  $k_{E,\beta,A_j,a}$  zur Berechnung der Nettodosis wird vorläufig, an den Auslegeorten 2, 3, 8 und 9 aufgrund von Messergebnissen aus vorhergehenden Überwachungszeitspannen, festgelegt.

Tab. 2: Charakterisierung der Auslegeorte

1		2	3	4	5	6	7	8	9
	Klima- bedingungen	$k_{K,j}$	$u(k_{K,j})$	$k_{E,\beta,U,j}$	$u(k_{E,\beta,U,j})$	$k_{E,\beta,j}$	$u(k_{E,\beta,j})$	$k_{E,\beta,A_j,a}$	$u(k_{E,\beta,A_j,a})$
Gleichung									
Auslegeort 1	schattig	1,03	0,015	1	0,05	1	0,2	1	0,2
Auslegeort 2	sonnig	1,05	0,02	1	0,05	1	0,2	1,1	0,1
Auslegeort 3	schattig	1,03	0,015	1	0,05	1	0,2	1,1	0,1
Auslegeort 4	schattig	1,03	0,015	1	0,05	1	0,2	1	0,2
Auslegeort 5	sonnig	1,05	0,02	1	0,05	1	0,2	1	0,2
Auslegeort 6	sonnig	1,05	0,02	1	0,05	1	0,2	1	0,2
Auslegeort 7	sonnig	1,05	0,02	1	0,05	1	0,2	1	0,1
Auslegeort 8	schattig	1,03	0,015	1	0,05	1	0,2	0,95	0,1
Auslegeort 9	schattig	1,03	0,015	1	0,05	1	0,2	0,95	0,1
Auslegeort 10	schattig	1,03	0,015	1	0,05	1	0,2	1	0,2

Aufgrund von Nullpegelmessungen und Messungen aus Überwachungszeiträumen, in denen das Strahlungsfeld am Auslegeort nicht von der Anlage beeinflusst war, liegen bereits sieben Messergebnisse ( $y=1$  bis 7) vor (Spalten 10 bis 16), aus denen die Untergrunddosis  $\bar{H}_{U,j}$  nach Gleichung (8)(k) berechnet werden kann. Da für diese Überwachungszeiträume keine Standardunsicherheiten der Dosiswerte vorliegen, wird Gleichung (9a)(m) benutzt.





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

**Blatt: 3.1.1.1**

Seite: 17 von 22

Stand: Februar 2014

Tab. 3: Berechnung der Untergrunddosis  $\bar{H}_{U,j}$  für die Überwachungszeiträume  $y=1$  bis 7

1	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	$H_{U,j,1}$	$H_{U,j,2}$	$H_{U,j,3}$	$H_{U,j,4}$	$H_{U,j,5}$	$H_{U,j,6}$	$H_{U,j,7}$	$\bar{H}_{U,j}$	$u(\bar{H}_{U,j})$	$u(\bar{H}_{U,j})$
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	%
Gleichung								(8)(k)	(9a)(m)	
Auslegeort 1	0,54	0,53	0,55	0,55	0,57	0,60	0,58	0,56	0,024	4%
Auslegeort 2	0,67 <sup>2)</sup>	0,55	0,58	0,57	0,58	<sup>1)</sup>	0,60	0,58	0,018	3%
Auslegeort 3	0,57	0,68 <sup>2)</sup>	0,59	0,61	0,62	0,64	0,60	0,61	0,024	4%
Auslegeort 4	0,56	0,56	<sup>1)</sup>	0,59	0,59	0,61	0,58	0,58	0,019	3%
Auslegeort 5	0,58	0,56	0,58	0,59	0,59	0,61	0,59	0,59	0,015	3%
Auslegeort 6	0,55	0,55	<sup>1)</sup>	0,59	0,60	0,57	0,59	0,58	0,020	3%
Auslegeort 7	0,57	0,57	<sup>1)</sup>	0,59	0,61	0,62	0,60	0,59	0,021	3%
Auslegeort 8	0,56	0,78 <sup>2)</sup>	0,58	0,57	0,59	0,58	0,58	0,58	0,010	2%
Auslegeort 9	0,64	0,65	0,67	0,63	0,80 <sup>2)</sup>	0,64	0,66	0,65	0,015	2%
Auslegeort 10	0,56	0,57	0,60	0,61	0,62	0,61	0,59	0,59	0,022	4%

<sup>1)</sup> Dosimeter fehlt

<sup>2)</sup> wird für Berechnung von  $\bar{H}_{U,j}$  nicht verwendet, da Beitrag durch die kerntechnische Anlage

#### A2.2 Ortsdosis und ihre Unsicherheit

Die Messstelle wertet die Dosimeter aus und liefert den Dosismesswert gemäß Gleichung (5)(f) mit seiner Standardunsicherheit (Spalten 20 und 21). Mit den Werten der Spalten 2, 3, 6 und 7 kann die Ortsdosis  $H_j$  (Spalte 22) und deren Unsicherheit (Spalte 23) mit Gleichung (4)(h) bzw. (6)(i) berechnet werden.

Tab. 4: Berechnung der Ortsdosis  $H_j$

1	20	21	2	3	6	7	22	23	24
	$H_{m,j}$	$u(H_{m,j})$	$k_{K,j}$	$u(k_{K,j})$	$k_{E,\beta,j}$	$u(k_{E,\beta,j})$	$H_j$	$u(H_j)$	$u(H_j)$
	mSv	mSv					mSv	mSv	%
Gleichung	(5)(f)	(g)					(4)(h)	(6)(i)	
Auslegeort 1	0,57	0,025	1,03	0,015	1	0,2	0,59	0,12	20%
Auslegeort 2	0,60	0,026	1,05	0,02	1	0,2	0,63	0,13	21%
Auslegeort 3	0,61	0,026	1,03	0,015	1	0,2	0,63	0,13	21%
Auslegeort 4	0,59	0,026	1,03	0,015	1	0,2	0,61	0,12	20%
Auslegeort 5	0,60	0,026	1,05	0,02	1	0,2	0,63	0,13	21%
Auslegeort 6	0,68	0,027	1,05	0,02	1	0,2	0,71	0,15	21%
Auslegeort 7	0,61	0,026	1,05	0,02	1	0,2	0,64	0,13	20%
Auslegeort 8	0,62	0,026	1,03	0,015	1	0,2	0,64	0,13	20%
Auslegeort 9	0,71	0,028	1,03	0,015	1	0,2	0,73	0,15	21%
Auslegeort 10	0,57	0,025	1,03	0,015	1	0,2	0,59	0,12	20%

Den größten Beitrag zur Unsicherheit der Ortsdosis liefert die Unsicherheit des Korrektionsfaktors für Energie und Winkel. Dies macht das Unsicherheitsbudget (Tab. 5) deutlich.



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

Blatt: 3.1.1.1

Seite: 18 von 22

Stand: Februar 2014

Tab. 5: Unsicherheitsbudget für Auslegeort 1 nach Gleichung (6)(i)

Größe		Teilstandardunsicherheit	Sensitivitätskoeffizient (partielle Ableitung von Gleichung (6)(g))	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag
$k_{K,j}$	1,03	0,015	$[k_{E,\beta} \cdot H_{m,j}]$	0,57 mSv	0,00855 mSv
$k_{E,\beta,j}$	1	0,2	$[k_{K,j} \cdot H_{m,j}]$	0,59 mSv	0,118 mSv
$H_{m,j}$	0,57 mSv	0,019 mSv	$[k_{K,j} \cdot k_{E,\beta}]$	1,03	0,020 mSv
$H_j$	0,59 mSv				
$u(H_j)$					0,12 mSv

A2.3 Nettodosis und ihre Unsicherheit

Damit kann die Nettodosis nach Gleichung (10)(s) für die aktuelle Überwachungszeitspanne berechnet werden. Die überwachende Stelle muss den Korrektionsfaktor für Energie und Winkel für die Nettodosis festlegen (Spalte 8). Der Korrektionsfaktor für Energie und Winkel wird für das unbeeinflusste Strahlungsfeld an den Auslegeorten gleich 1 gesetzt und dessen Unsicherheit mit 5% angenommen.

Tab. 6: Berechnung der Nettodosis

1	17	20	2	6	7	8	9	25	26	27
	$\bar{H}_{U,j}$	$H_{m,j}$	$k_{K,j}$	$k_{E,\beta,U,j}$	$u(k_{E,\beta,U,j})$	$k_{E,\beta,\Delta j,a}$	$u(k_{E,\beta,\Delta j,a})$	$\Delta H_{j,a}$	$u(\Delta H_{j,a})$	$u(\Delta H_{j,a})$
	mSv	mSv						mSv	mSv	%
	(8)(k)							(10)(s)	(11)(t)	
Auslegeort 1	0,57	0,018	1,03	1	0,05	1	0,2	0,027	0,038	137%
Auslegeort 2	0,60	0,019	1,05	1	0,05	1,1	0,1	0,059	0,040	66%
Auslegeort 3	0,61	0,019	1,03	1	0,05	1,1	0,1	0,026	0,042	158%
Auslegeort 4	0,59	0,018	1,03	1	0,05	1	0,2	0,026	0,035	135%
Auslegeort 5	0,60	0,019	1,05	1	0,05	1	0,2	0,044	0,036	80%
Auslegeort 6	0,68	0,021	1,05	1	0,05	1	0,2	0,138	0,048	33%
Auslegeort 7	0,61	0,019	1,05	1	0,05	1	0,2	0,047	0,039	81%
Auslegeort 8	0,62	0,019	1,03	1	0,05	0,95	0,1	0,056	0,032	49%
Auslegeort 9	0,71	0,022	1,03	1	0,05	0,95	0,1	0,079	0,035	42%
Auslegeort 10	0,57	0,018	1,03	1	0,05	1	0,2	-0,007	0,036	>200%

A2.4 Erkennungsgrenze der Nettodosis

Die Erkennungsgrenze der Nettodosis wird nach Gleichung (12)(u) berechnet. Dazu muss zuerst nach Gleichung (11)(t) die Unsicherheit für den Fall berechnet werden, dass kein zusätzlicher Dosisbeitrag (Nettodosis) durch die Anlage vorliegt ( $\Delta H_{j,a}=0$ ). An 4 Auslegeorten liegt die in Spalte 25 berechnete Nettodosis  $\Delta H_{j,a}$  über der Erkennungsgrenze.

Tab. 7: Berechnung der Erkennungsgrenze der Nettodosis

1	28	29	30	25
	$k_{1-\alpha}$	$u(\Delta H_{j,a}=0)$ mSv	$\Delta H_{j,a}^*$ mSv	$\Delta H_{j,a}$ mSv
Gleichung		(11)(t)	(12)(u)	(10)(s)
Auslegeort 1	1,645	0,037	0,061	0,027
Auslegeort 2	1,645	0,038	0,063	0,059
Auslegeort 3	1,645	0,042	0,069	0,026
Auslegeort 4	1,645	0,034	0,056	0,026
Auslegeort 5	1,645	0,033	0,054	0,044
Auslegeort 6	1,645	0,036	0,059	<b>0,138</b>
Auslegeort 7	1,645	0,036	0,059	0,047
Auslegeort 8	1,645	0,028	0,046	<b>0,056</b>
Auslegeort 9	1,645	0,031	0,051	<b>0,079</b>
Auslegeort 10	1,645	0,037	0,061	-0,007

### A2.5 Nachweisgrenze der Nettodosis

Die für das Berechnungsbeispiel (Tab. 9) erforderlichen Parameterwerte wurden von der Messstelle wie folgt mitgeteilt:

$u_0 = 0,02$ mSv	$t_H = 15$ d	$u(t_H) = 1$ d
$r_k = 0,019$	$\dot{H}_H^m = 0,002$ mSv/d	$u(\dot{H}_H^m) = 0,0003$ mSv/d
	$k_L = 1$	$u(k_L) = 0,02$

Die Unsicherheit  $u(\delta_{\Delta}^*)$  an der Nachweisgrenze wird dann nach Gl. (11)(t) berechnet. Tab. 9 enthält die Einzelwerte für den 1. Iterationsschritt. In Tab. 8 ist das Unsicherheitsbudget für die Berechnung der Unsicherheit an der Nachweisgrenze dargestellt. Danach kann die Nachweisgrenze  $\delta_{\Delta}^*$  gemäß Gl. (13)(u) ermittelt werden. Das Verfahren konvergiert. Der erste Iterationsschritt ändert, wie Tab. 10 zeigt, das Ergebnis um weniger als 4 %. Das Ergebnis der 1. Iteration (Spalte 38) ist der Startwert für die 2. Iteration.

Tab. 8: Unsicherheitsbudget zur Berechnung der Unsicherheit an der Nachweisgrenze der Nettodosis (berechnet für den Auslegeort 1)

Größe	Wert	Sensitivitätskoeffizient (partielle Ableitung von Gleichung (10)(s))	Sensitivitäts- koeffizient	Unsicherheitsbei- trag
$u(k_{E,\beta,\Delta,j,a})$	0,2	$\left[ k_{K,j,a} \cdot H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*} - \frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}} \right]$	0,122 mSv	0,0244 mSv
$u(k_{K,j,a})$	0,015	$[k_{E,\beta,\Delta,j,a} \cdot H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*}]$	0,662 mSv	0,0099 mSv
$u(H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*})$	0,028 mSv	$[k_{E,\beta,\Delta,j,a} \cdot k_{K,j,a}]$	1,03	0,0289 mSv
$u\left(\frac{\bar{H}_{U,j}}{k_{E,\beta,U,j}}\right) = \frac{1}{k_{E,\beta,U,j}} \cdot u(\bar{H}_{U,j})$	0,024 mSv	$[k_{E,\beta,\Delta,j,a}]$	1	0,0245 mSv
$u(\delta_{\Delta}^*)$				0,0462 mSv

Die Nachweisgrenze der Nettodosis wird im Wesentlichen durch drei nahezu gleichgroße Unsicherheitsbeiträge bestimmt, nämlich der Unsicherheit des Korrekturfaktors für Energie und Winkel



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

**Blatt: 3.1.1.1**

Seite: 20 von 22

Stand: Februar 2014

$u(k_{E,\beta,\Delta,j,a})$ , die Unsicherheit der Untergrunddosis  $u(\bar{H}_{U,j})$  und die Unsicherheit des Dosismesswertes an der Nachweisgrenze  $u(H_{m,j,a,\delta_\Delta^*})$  (siehe letzte Spalte Tab. 8).

Tab. 9: Berechnung der Nachweisgrenze der Nettodosis durch Iteration, Einzelwerte des ersten Iterationsschrittes

1	30	31	32	33	34	35	36	37	38
	$\Delta H_{j,a}^*$ mSv	$k_{I-\beta}$	Startwert mSv	$H_{m,j,a,\delta_\Delta^*}$ mSv	$\bar{H}_{j,a,\delta_\Delta^*}^m$ mSv	$u(\bar{H}_{j,a,\delta_\Delta^*}^m)$ mSv	$u(H_{m,j,a,\delta_\Delta^*})$ mSv	$u(\delta_\Delta^*)$ mSv	$\delta_\Delta^*$ mSv
Gleichung	(12)(u)			(x)			(y)	(11)(t)	(13)(w)
Auslegeort 1	0,061	1,645	0,122	0,662	0,692	0,024	0,028	0,0462	0,137
Auslegeort 2	0,063	1,645	0,126	0,658	0,688	0,024	0,028	0,0423	0,133
Auslegeort 3	0,069	1,645	0,138	0,709	0,739	0,024	0,029	0,0457	0,144
Auslegeort 4	0,056	1,645	0,112	0,673	0,703	0,024	0,028	0,0428	0,126
Auslegeort 5	0,054	1,645	0,108	0,661	0,691	0,024	0,028	0,0417	0,123
Auslegeort 6	0,059	1,645	0,118	0,661	0,691	0,024	0,028	0,0447	0,132
Auslegeort 7	0,059	1,645	0,118	0,677	0,707	0,024	0,028	0,0453	0,134
Auslegeort 8	0,046	1,645	0,092	0,654	0,684	0,024	0,028	0,0320	0,099
Auslegeort 9	0,051	1,645	0,102	0,734	0,764	0,025	0,029	0,0354	0,109
Auslegeort 10	0,061	1,645	0,122	0,695	0,725	0,024	0,029	0,0455	0,136

Tab. 10: Ergebnisse der Iterationsschritte

1	38	39	40	41
	$\delta_\Delta^*$ 1.Iterations- schritt mSv	$\delta_\Delta^*$ 2.Iterations- schritt mSv	$\delta_\Delta^*$ 3.Iterations- schritt mSv	$\delta_\Delta^*$ 4.Iterations- schritt mSv
Gleichung	(13)(w)	(13)(w)	(13)(w)	(13)(w)
Auslegeort 1	0,137	0,140	0,141	0,141
Auslegeort 2	0,133	0,133	0,133	0,133
Auslegeort 3	0,144	0,145	0,145	0,145
Auslegeort 4	0,126	0,129	0,130	0,130
Auslegeort 5	0,123	0,126	0,126	0,126
Auslegeort 6	0,132	0,136	0,136	0,136
Auslegeort 7	0,134	0,137	0,138	0,138
Auslegeort 8	0,099	0,099	0,099	0,099
Auslegeort 9	0,109	0,110	0,110	0,110
Auslegeort 10	0,136	0,139	0,139	0,140

Die in Tab. 10 dargestellten Rechenergebnisse zeigen, dass zur Berechnung der Nachweisgrenze maximal zwei Iterationsschritte ausreichen können. Die in der REI [1] geforderte Nachweisgrenze von 0,1 mSv/a für die Nettodosis wird nur am Auslegeort 8 erreicht. Das Unsicherheitsbudget (Tab. 8) zeigt, dass drei Komponenten wesentlich die Unsicherheit bestimmen. Da die Unsicherheit  $u(H_{m,j,a,\delta_\Delta^*})$  von Gl. (y) vor allem vom Messwert abhängt, kann die Nachweisgrenze im Wesentlichen nur durch Verringerung der Unsicherheiten  $u(k_{E,\beta,\Delta,j,a})$  und  $u(\bar{H}_{U,j})$  verbessert werden.



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

Blatt: 3.1.1.1

Seite: 21 von 22

Stand: Februar 2014

**A3 Formelzeichen**

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$a$	Index für die aktuelle Überwachungszeitspanne	-
$A$	Dosimeteranzeige	-
$A_0$	Dosimeteranzeige eines unbestrahlten Dosimeters	-
$\Delta H_{j,a}$	Nettodosis am Auslegeort $j$	mSv
$\Delta H_{j,a}^*$	Erkennungsgrenze der Nettodosis	mSv
$\delta_{\Delta}^*$	Nachweisgrenze der Nettodosis	mSv
$\dot{H}_H^m$	Mit Dosimetern ermittelte Ortsdosisleistung während der Handhabungszeitspanne	mSv/d
$H_j$	Ortsdosis am Auslegeort $j$	mSv
$H_j^m$	Dosismesswert eines Detektors	mSv
$\bar{H}_j^m$	mittlerer Dosismesswert der Detektoren eines Dosimeters	mSv
$H_{m,j}$	Korrigierter Messwert der Ortsdosis	mSv
$\bar{H}_{j,a,\delta_{\Delta}^*}^m$	Unkorrigierter Messwert an der Nachweisgrenze	mSv
$H_k$	Kalibrierdosis zur Ermittlung von $N_k$	mSv
$H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*}$	Korrigierter Messwert an der Nachweisgrenze	mSv
$H_{m,U,j,a}$	Korrigierter Messwert der Untergrunddosis am Auslegeort $j$	mSv
$\bar{H}_{U,j}$	Mittelwert der Untergrunddosis am Auslegeort $j$	mSv
$j$	Index des Auslegeortes	-
$k_{1-\alpha}$	Erweiterungsfaktor	-
$k_{1-\beta}$	Erweiterungsfaktor	-
$k_{E,\beta,j}$	Korrektionsfaktor für Energie und Winkel	-
$k_{E,\beta,\Delta,j,a}$	Korrektionsfaktor für Energie und Winkel der Nettodosis am Auslegeort $j$	-
$k_{E,\beta,U,j}$	Korrektionsfaktor für Energie und Winkel der Untergrunddosis am Auslegeort $j$	-
$k_{K,j}$	Korrektionsfaktor für Klima und Langzeit	-
$k_L$	Korrektionsfaktor für Linearität	-
$N_k$	Kalibrierfaktor	mSv
$r_k$	Relative Standardunsicherheit im Dosisbereich der Kalibrierdosis zur Ermittlung von $N_k$	-
$t_H$	Dauer der Handhabungszeitspanne	d
$u_0$	Standardunsicherheit unbestrahlter Detektoren	mSv
$u(\Delta H_{j,a})$	Unsicherheit der Nettodosis am Auslegeort $j$	mSv
$u(\delta_{\Delta}^*)$	Unsicherheit an der Nachweisgrenze	mSv
$u(H_j)$	Unsicherheit der Ortsdosis am Auslegeort $j$	mSv
$u(H_j^m)$	Unsicherheit des Dosismesswertes eines Detektors	mSv
$u(\bar{H}_j^m)$	Unsicherheit des mittleren Dosismesswertes der Detektoren eines Dosimeters	mSv
$u(H_{m,j})$	Unsicherheit des korrigierten Messwertes der Ortsdosis	mSv
$u(\bar{H}_{j,a,\delta_{\Delta}^*}^m)$	Unsicherheit des unkorrigierten Messwerts an der Nachweisgrenze	mSv
$u(H_{m,j,a,\delta_{\Delta}^*})$	Unsicherheit des korrigierten Messwerts an der Nachweisgrenze	mSv
$u(\bar{H}_{U,j})$	Unsicherheit des Mittelwertes der Untergrunddosis am Auslegeort $j$	mSv



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

**Blatt: 3.1.1.1**

Seite: 22 von 22

Stand: Februar 2014

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$u(k_L)$	Unsicherheit des Korrektionsfaktors für Linearität	-
$u(k_{E,\beta,j})$	Unsicherheit des Korrektionsfaktors für Energie und Winkel	-
$u(k_{E,\beta,U,j})$	Unsicherheit des Korrektionsfaktors für Energie und Winkel der Untergrunddosis am Auslegeort j	-
$u(k_{E,\beta,\Delta,j,a})$	Unsicherheit des Korrektionsfaktors für Energie und Winkel der Nettodosis am Auslegeort j	-
$u(k_{K,j})$	Unsicherheit des Korrektionsfaktors für Klima und Langzeit	-
y	Index Überwachungszeitspanne	-
z	Anzahl der Überwachungszeitspannen	-