



### Überwachung der Neutronen-Ortsdosis mit Festkörperdosimetern

Bearbeiter: J. Bieringer, Bundesamt für Strahlenschutz, Freiburg  
B. Burgkhardt, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Ch. Salfeld, Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover  
M. Vilgis, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

#### Inhaltsverzeichnis

1	Zweck der Überwachungsmaßnahme .....	2
2	Messgröße und Maßeinheit.....	2
3	Geforderte Nachweisgrenze.....	3
4	Auslegeorte .....	3
4.1	Anzahl der eingesetzten Dosimeter.....	3
4.2	Auswahl der Auslegeorte .....	3
5	Empfohlenes Messverfahren.....	4
5.1	Prinzip der Messung und Messverfahren .....	4
5.1.1	Das Moderator-Prinzip .....	4
5.1.2	Die Messung thermischer Neutronen .....	5
5.2	Anforderungen an die Detektoren und Messgeräte.....	6
5.2.1	Anforderung an den Moderator .....	6
5.2.2	Anforderungen an Thermolumineszenz(TL)-Dosimetriesysteme .....	6
5.2.3	Anforderungen an Kernspur(KS)-Dosimetriesysteme mit Konvertern .....	7
5.3	Ermittlung des Neutronenkalibrierfaktors $N_n$ .....	8
6	Berechnungsverfahren .....	8
6.1	Ermittlung der Neutronen-Ortsdosis $H_n^*(10)$ .....	8
6.2	Ermittlung der Untergrundanzeige $M_{n,U}$ .....	9
6.3	Ermittlung der Netto-Neutronen-Ortsdosis $\Delta H_n^*(10)$ .....	10
6.4	Messunsicherheit.....	10
6.5	Erkennungs- und Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis .....	13
7	Berechnungsbeispiel .....	14
7.1	Thermolumineszenz(TL)-System .....	14
7.1.1	Neutronendosisanzeige und ihre Unsicherheit.....	14
7.1.2	Untergrundanzeige und Unsicherheit .....	15
7.1.3	Netto-Neutronen-Ortsdosis und ihre Unsicherheit .....	16
7.1.4	Erkennungsgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis .....	16
7.1.5	Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis .....	17
7.2	Kernspur(KS)-System .....	19
7.2.1	Neutronendosisanzeige und ihre Unsicherheit.....	19
7.2.2	Untergrundanzeige und Unsicherheit .....	20
7.2.3	Netto-Neutronen-Ortsdosis und ihre Unsicherheit .....	20
7.2.4	Erkennungsgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis .....	21
7.2.5	Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis .....	21
8	Dokumentation .....	22
9	Verzeichnis der erforderlichen Geräte .....	23
9.1	Moderatoren .....	23
9.2	Thermolumineszenz(TL)-Auswertegeräte und -Detektormaterial .....	23
9.3	Kernspur(KS)-Auswertegeräte und -Detektormaterial .....	23
10	Bewertung des Verfahrens .....	23
11	Literatur .....	24
12	Formelzeichen .....	26



## 1 Zweck der Überwachungsmaßnahme

Zweck der Überwachungsmaßnahme ist die Kontrolle der Neutronen-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 Neutronen-Untergrunddosis ist der Beitrag zur Neutronen-Ortsdosis, der nicht von der zu überwachenden Anlage herrührt und im Allgemeinen durch die Höhenstrahlung verursacht wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Energie- und Richtungsverteilung der Untergrundstrahlung und des von der Anlage verursachten Strahlungsfeldes stark unterscheiden können.

Die Kontrolle der Neutronen-Ortsdosis aus Direktstrahlung ist Bestandteil der Überwachung der Anlage auf Einhaltung des Grenzwertes der effektiven Dosis  $E$  von 1,0 mSv/a entsprechend § 46 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [2].

## 2 Messgröße und Maßeinheit

Die Messgröße der Neutronen-Ortsdosis ist die Umgebungsäquivalentdosis  $H^*(10)$ , die auch für Gammastrahlung  $>15$  keV gilt. 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 Neutronen-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 die Schreibweise  $H_n^*(10)$  für die Umgebungsäquivalentdosis durch Neutronen verwendet. Die zu bestimmende Nettodosis  $\Delta H_n^*(10)$  am Auslegeort ergibt sich aus der Differenz von Ortsdosis  $H_n^*(10)$  und der vom Betrieb der kerntechnischen Anlage unbeeinflussten Untergrunddosis  $H_{n,U}^*(10)$  entsprechend der Beziehung:

$$\Delta H_n^*(10) = H_n^*(10) - H_{n,U}^*(10) \quad (3)$$

Anmerkung: Im Berechnungsverfahren selbst wird nicht die Untergrunddosis sondern die durch die Untergrundstrahlung verursachte Detektoranzeige verwendet.



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

Blatt: 3.1.2.1  
Seite: 3 von 26  
Stand: August 2007

### 3 Geforderte Nachweisgrenze

In der REI ist als erforderliche Nachweisgrenze für die Nettodosis  $\Delta H$  ein Wert von 0,5 mSv/a festgelegt. Die Nachweisgrenze ist entsprechend DIN 25482-10 [4] zu ermitteln.

### 4 Auslegeorte

#### 4.1 Anzahl der eingesetzten Dosimeter

Die Anzahl von Dosimetern, die durch den Betreiber der kerntechnischen Anlage und die unabhängige Messstelle aufzustellen sind, ergibt sich aus den Forderungen der StrlSchV [2] in Verbindung mit der REI [1]. In deren Anhängen B (Tabellen B.1 und B.2) und C (Tabellen C.1.1, C.1.2, C.2.1 und C.2.2) sind die Vorschläge im Detail ausgeführt. Die zuständige Behörde kann abweichende Regelungen zulassen. In Tabelle 1 sind die Vorgaben, bezogen auf die Überwachung am Betriebsgeländezaun zusammengefasst. Über die dort genannten Zahlen hinaus ist es empfehlenswert, jeweils ein zusätzliches Dosimeter an einem Referenzort (siehe Kap. 4.2) auszulegen.

*Vor dem Hintergrund der Kontrollfunktion ist es sinnvoll, wenn die Dosimeter der unabhängigen Messstelle und des Betreibers von verschiedenen Auswertestellen ausgewertet werden.*

Tab. 1: Anzahl der in der REI geforderten Neutronen-Ortsdosimeter zur Messung der Neutronen-Ortsdosis im bestimmungsgemäßen Betrieb und die Anzahl von Gamma-Dosimetern am Betriebsgeländezaun zum Vergleich

Kerntechn. Anlage	Anhang	Betreiber	Unabhängige Messstelle
Kernkraftwerk	A	keine	keine
Brennelementfabrik	B	6 - 12 Neutronen-Ortsdosimeter, zusätzlich 12 Gamma-Ortsdosimeter	6 - 12 Neutronen-Ortsdosimeter, zusätzlich 12 Gamma-Ortsdosimeter
Zwischenlager (Trockenlager)	C.1	6 - 8 Neutronen-Ortsdosimeter, 6 - 8 Gammaortsdosimeter	4 Neutronen-Ortsdosimeter, 4 Gamma-Ortsdosimeter
Endlager	C.2	6 - 12 Neutronen-Ortsdosimeter* ) , 10 - 12 Gamma-Ortsdosimeter	4 Neutronen-Ortsdosimeter* ) , 10 - 12 Gamma-Ortsdosimeter
Sonderfälle	D	keine Festlegung in der REI, für jede Anlage gesondert festzulegen	

\* ) nur in Fällen, in denen ein Beitrag der Neutronen zu messen ist, z.B. wenn HAW oder bestrahlte Brennelemente eingelagert werden

#### 4.2 Auswahl der Auslegeorte

Die Messung der Ortsdosis soll die Überwachung der Dosisbeiträge aus der Direktstrahlung der Anlagen gewährleisten, insbesondere die Überwachung des Grenzwertes nach §46 der StrlSchV an der Grenze des Betriebsgeländes (Betriebsgeländezaun). Es empfiehlt sich im Allgemeinen eine äquidistante Auslegung der Dosimeter. Vorrangig sind diejenigen Orte zu berücksichtigen, an denen die höchste Dosis zu erwarten ist. Bei einer Brennelementfabrik sind dies die Stellen am Betriebsgeländezaun mit dem kleinsten Abstand zum UF<sub>6</sub>-Lager bzw. Lager für MOX-Brennelemente, bei einem Brennelementzwischenlager die Stellen mit dem kleinsten Abstand zum Lager. Sofern Bereiche mit erhöhter Direktstrahlung bestehen oder zu erwarten sind, ist eine lokale Verdichtung der Auslegeorte, ggf. durch Erhöhung der Anzahl eingesetzter Dosimeter sinnvoll. Dies können auch Orte am Betriebsgeländezaun sein, in deren Nähe Transportfahrzeuge mit bestrahlten Brennelementen längere Zeit stehen.

Entsprechend den Vorgaben der REI soll an denselben Orten sowohl die Neutronen-Ortsdosis als auch die Gamma-Ortsdosis gemessen werden. Sind entsprechend der Tabelle C.1.1 (Brennelementzwischenlager)



Dosisleistungsmessgeräte installiert, sollte an mindestens einem dieser Orte auch ein integrierendes Dosimeter ausgelegt werden.

Die Dosimeter erfassen Dosisbeiträge durch Direktstrahlung aus der Anlage und Streustrahlung (durch Streuung an Luftmolekülen - sog. skyshine - und anderen Materialien wie Erdboden, Erdwälle und dgl.). Die Dosimeter sollen in einer Höhe von 80-100cm über dem Erdboden auf möglichst flachem Gelände positioniert werden. Befinden sich in der direkten Sichtlinie zur Anlage Hindernisse (z.B. Erdwall), so kann die Positionierung in einer größeren Höhe (z.B. auf einem Messhaus) oder vor dem Hindernis angezeigt sein. Zur Gewährleistung gleichbleibender Expositionsbedingungen ist das Dosimeter mit einer fest verankerten Halterung zu fixieren. Das Dosimeter ist mit seiner Vorzugsrichtung zur Strahlenquelle hin auszurichten. Befindet sich das Dosimeter in einem Messhaus, so ist darauf zu achten, dass die Baumaterialien einen möglichst geringen Einfluss auf das Energiespektrum und den Neutronenfluss haben. Untersuchungen der Temperaturverhältnisse bei Sonneneinstrahlung auf eine weiße PE-Moderatorkugel von 30 cm Durchmesser haben gezeigt, dass im Innern der Kugel der Temperaturverlauf durch die große Masse verzögert und über die Zeit ausgeglichen wird. Die Innentemperatur überschreitet die maximale Lufttemperatur nicht [5].

Der Referenzmessort dient zur Bestimmung des natürlichen Untergrundes. Er sollte sich außerhalb des Einflussbereichs der Anlage befinden. Das Dosimeter am Referenzmessort sollte in gleicher Weise wie die Dosimeter an der Anlage positioniert werden (Höhe, Halterung und dgl.).

Das Messprogramm der unabhängigen Messstelle dient der Ergänzung und Kontrolle des Betreiber-messprogramms (siehe auch Tabelle 1). Deshalb sollten einerseits sich ergänzende Messorte gewählt werden (z.B. wenn eine lokale Verdichtung angezeigt ist), andererseits sind zum Vergleich der Messwerte die Dosimeter des Betreibers und der unabhängigen Messstelle an mindestens einem gemeinsamen Messort auszulegen.

## **5 Empfohlenes Messverfahren**

### **5.1 Prinzip der Messung und Messverfahren**

#### **5.1.1 Das Moderator-Prinzip**

Zur Messung der Umgebungs-Äquivalentdosis  $H_n^*(10)$  durch Neutronen in der Umgebungsüberwachung werden häufig Moderator-Äquivalentdosimeter (kurz Moderator-dosimeter) eingesetzt. Der Moderator dient der Abbremsung (Moderation) von Neutronen in einem weiten Energiebereich bis zu thermischen Neutronen, die mit einem hochempfindlichen Detektor für thermische Neutronen im Zentrum des Moderators nachgewiesen werden (siehe Abb. 1).

$$H_n^*(10) = N_n(TL) \cdot M_{n_{th}} \quad (4a)$$

$$H_n^*(10) = N_n(KS) \cdot D_{n_{th}} \quad (4b)$$

$H_n^*(10)$	Umgebungs-Äquivalentdosis durch Neutronen
$N_n(TL)$	Neutronenkalibrierfaktor für TL-Dosimetriesysteme
$M_{n_{th}}$	Anzeige des TL-Detektors für thermische Neutronen
$N_n(KS)$	Neutronenkalibrierfaktor für KS-Dosimetriesysteme
$D_{n_{th}}$	Spurendichteanzeige des KS-Detektors für thermische Neutronen

Die Anzeige des thermischen Detektors in einem geeigneten Moderator ist in einem weiten Energiebereich weitgehend unabhängig von der Neutronenenergie (siehe Kapitel 5.2.1). Die Ermittlung des Neutronenkalibrierfaktors erfolgt an einer kalibrierten Radionuklid-Neutronenquelle (siehe Kapitel 5.4).

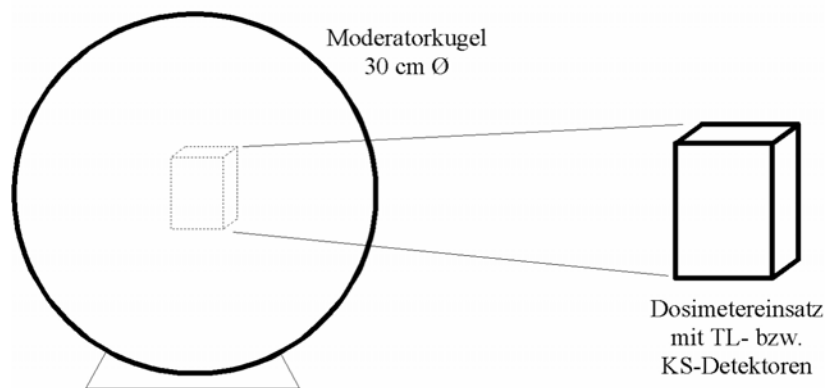


Abb. 1: Moderatorkugel und Dosimereinsatz

### 5.1.2 Die Messung thermischer Neutronen

Folgende Kernreaktionen mit einem hohen Wirkungsquerschnitt insbesondere für thermische Neutronen werden in den Detektoren der Moderatorodosimeter genutzt:  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  ( $E_\alpha = 2,05 \text{ MeV}$ ,  $E_{\text{H}} = 2,73 \text{ MeV}$ ) und  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  ( $E_\alpha = 1,47 \text{ MeV}$ ,  $E_{\text{Li}} = 0,84 \text{ MeV}$ ) sowie  ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$  ( $E_p = 0,58 \text{ MeV}$ ).

In Neutronendosisleistungsmessern werden üblicherweise  $\text{BF}_3$ - und  ${}^3\text{He}$ -Zählrohre in Moderatoren eingesetzt [6], [7]. Als passive Detektoren, d.h. Detektoren, die nicht am Messort sondern bei einer Messstelle nach einer längeren Expositionszeitspanne ausgewertet werden können, kommen neutronenempfindliche Thermolumineszenz-Detektoren (TL-Detektoren) und Kernspurdetektoren (KS-Detektoren) mit einem Lithium- oder Bor-Konverter zum Nachweis von neutroneninduzierten Teilchen zur Anwendung [8], [9].

Thermolumineszenz(TL)-Detektoren (üblicherweise  $\text{LiF}$ , selten auch  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) einer neutronen- und photonenempfindlichen Charge (NG) mit hohen Anteilen an den Isotopen  ${}^6\text{Li}$  und/oder  ${}^{10}\text{B}$  und einer nur photonenempfindlichen Charge (G) mit stark abgereicherten Anteilen dieser Isotope (es verbleiben hauptsächlich  ${}^7\text{Li}$ - und  ${}^{11}\text{B}$ -Isotope) werden zu einem TL-Detektorpaar zusammengestellt. Nach einer Kalibrierung mit  ${}^{137}\text{Cs}$ -Photonen errechnet sich die Anzeige für thermische Neutronen  $M_{n_{th}}$  in der Dosiseneinheit mSv aus der Differenz der Anzeigen des (NG)- und (G)- Detektors und der durch Tritium verursachten Nullanzeige des (NG)-Detektors.

$$M_{n_{th}} = M(NG) - M(G) - M_{tri} \quad (5a)$$

mit

- $M_{n_{th}}$  Anzeige des TL-Detektors für thermische Neutronen
- $M(NG)$  Anzeige des neutronen- und photonenempfindlichen Detektors
- $M(G)$  Anzeige des photonenempfindlichen Detektors
- $M_{tri}$  Anzeige durch Tritium im Detektor, die während der Expositionszeit zu erwarten wäre (siehe Gl. 6a)

Bei Kernspur(KS)-Detektoren in Kombination mit einem Lithium- oder Bor-Konverter ist die Spurendichte  $D_{n_{th}}$  des geätzten Detektors ein Maß für die thermische Neutronenflussdichte.

$$D_{n_{th}} = D_K - D_0 - D_{kon} \quad (5b)$$



mit

$D_{n_{th}}$	Anzeige des KS-Detektors für thermische Neutronen
$D_K$	Spurendichte des KS-Detektors mit Konverter
$D_0$	Spurendichte eines Detektorteils ohne Konverter
$D_{kon}$	Spurendichte, die durch Kontaminationen des Konverters während der Expositionszeit zu erwarten wäre (siehe Gl. 6b)

## 5.2 Anforderungen an die Detektoren und Messgeräte

### 5.2.1 Anforderung an den Moderator

Die Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  an einem Ort ist von der Richtung der einfallenden Strahlung unabhängig [3]. Neutronen-Ortsdosimeter sollten deshalb ein möglichst richtungsunabhängiges Ansprechvermögen besitzen, was durch einen kugelförmigen Moderator am ehesten erreicht wird. Eine Kugel mit einem Durchmesser von 30 cm, bestehend aus wasserstoffreichem Material (z.B. Polyethylen PE), führt zu einer ausreichenden Energieunabhängigkeit des  $H^*(10)$ -Ansprechvermögens [10], [11]. Aber auch kugelförmige Moderatoren von 25 cm Durchmesser mit Cd-Filtern sind entwickelt worden, die bevorzugt bei aktiven Messverfahren eingesetzt werden [7].

Beim Einsatz des Neutronen-Ortsdosimeters an Beschleunigern mit Neutronen-Strahlungsfeldern sehr hoher Energie und an Bord von Langstrecken-Flugzeugen sollten die Moderatoren mit einem Kupfer- oder Bleieinsatz zur Erweiterung des Energiebereiches oberhalb der Neutronenenergien von 15 MeV versehen sein [12], [13]

Der Moderator sollte so konstruiert sein, dass die Detektoren wetterfest und diebstahlgeschützt untergebracht und trotzdem leicht austauschbar sind. Kommerziell erhältliche Moderatoren sind im Verzeichnis der erforderlichen Geräte (s. Kap. 9) aufgeführt.

### 5.2.2 Anforderungen an Thermolumineszenz(TL)-Dosimetriesysteme

TL-Dosimetriesysteme zur Neutronen-Ortsdosismessung mit  ${}^6\text{LiF}/{}^7\text{LiF}$ -Detektorpaaren müssen die Anforderungen nach DIN 25483 [14] erfüllen. Dort wird auch empfohlen, zur Verringerung der Messunsicherheit und der Nachweisgrenze sowie aus Redundanzgründen mindestens zwei Detektorpärchen in einem Moderator dosimeter zu verwenden.

Es wird empfohlen, fabrikneue  ${}^6\text{LiF}$ -Detektoren zu verwenden.

Bei gebrauchten Detektoren ist zu beachten, dass bei der  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ -Kernreaktion Tritium im Detektor entsteht, dort fest eingebaut wird und mit einer Halbwertszeit von 12 Jahren unter Betaemission zerfällt. Dies erhöht die Nullanzeige des Detektors insbesondere bei langfristigem Einsatz [15]. Zur Bestimmung der sich aus durch Tritium ergebenden Dosisanzeige  $M_{tri}$  wird empfohlen, möglichst alle TL-Detektorpaare vor ihrem Einsatz einmalig ohne Moderator über den vorgesehenen Überwachungszeitraum an einem Ort ohne Beitrag durch thermische Neutronen zu lagern und auszuwerten.

Nach Gleichung (5a) ergibt sich  $M_{tri}$  zu:

$$M_{tri} = n \cdot [M(NG) - M(G)]_{M_{n_{th}}=0} \quad (6a)$$

n Korrektionsfaktor für die unterschiedliche Dauer der Lagerungszeit zur Bestimmung der Anzeige des Detektorpaares durch Tritium einerseits und der tatsächlichen Expositionszeit beim Einsatz der Detektoren andererseits.



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

Blatt: 3.1.2.1  
Seite: 7 von 26  
Stand: August 2007

Es wird empfohlen, Detektoren mit  $M_{tri}$  größer Erkennungsgrenze nicht für die Neutronen-Ortsdosimetrie einzusetzen. Dann kann  $M_{tri}$  Null gesetzt werden.

Ein Vergleich gängiger TL-Dosimetriesysteme zum Nachweis kleiner Neutronendosen findet sich in [16].

### 5.2.3 Anforderungen an Kernspur(KS)-Dosimetriesysteme mit Konvertern

Häufig eingesetzte Detektormaterialien sind Polycarbonat und Polyalyldiglykolkarbonat. Bei Polycarbonatfolien lässt sich durch das Ätzregime ein an den Konverter angepasstes Energiefenster festlegen und damit die Neutronen-Nachweisgrenze des Detektors im Moderator verbessern [17]. Bei der Bereitstellung der Detektoren ist insbesondere auf eine geringe und möglichst für größere Materialmengen konstante Untergrund-Spuredichte unter den gewählten Ätzbedingungen zu achten. Die Untergrund-Spuredichte erhöht sich mit der Lagerungsdauer. Eine zusätzliche Erhöhung der Untergrund-Spuredichte durch Radon und Radonfolgeprodukte wird durch eine staub- und radonarme Lagerung vermieden. Aus Redundanzgründen sowie zur Verringerung der Messunsicherheit und der Nachweisgrenze wird empfohlen, mindestens zwei KS-Detektoren in einem Moderator dosimeter zu verwenden. Es hat sich bewährt, bei der Beschaffung von Polycarbonatfolien die Lieferung von fabrikneuen, originalverpackten Rollen zu vereinbaren und diese unmittelbar nach der Lieferung in Blätter zu schneiden, die sich in radondichte Alu-Verbundfolien einschweißen lassen.

Durch Sättigungseffekte besteht eine Nichtlinearität zwischen Spuredichte und der Fluenz thermischer Neutronen. Deshalb ist der dynamische Messbereich von Kernspur-Detektoren auf zwei Größenordnungen beschränkt. Die Messbereichsgrenzen können durch die Verwendung von Konvertern verschiedener Lithium- bzw. Bor-Konzentrationen und durch das Ätzregime angepasst werden.

Die (n,α)-Konverterschicht muss auf einer nicht Neutronen absorbierenden stabilen Unterlage so aufgebaut sein, dass einerseits die neutroneninduzierten Teilchen ohne nennenswerte Selbstabsorption den Konverter verlassen können, andererseits sich die Schicht beim Gebrauch nicht lösen kann. Die Sättigungsschichtdicke für eine optimierte Ausbeute beträgt dabei etwa 100 µm. Ein konstanter, enger Abstand (<0,5 mm) zum Detektor, jedoch kein direkter Kontakt ist anzustreben.

Die Kontamination des Konverters mit natürlichen radioaktiven Substanzen sollte äußerst gering sein. Durchaus gängige Kontaminationen von 10 mBq  $^{228}\text{Ra}$  erzeugen eine Untergrund-Spuredichte entsprechend einer Neutronen-Äquivalentdosis von 250 µSv innerhalb von 3 Monaten, die das Verfahren unbrauchbar machen [18]. Zur Bestimmung der sich durch Kontamination ergebenden Spuredichte  $D_{kon}$  wird empfohlen, Kernspur-Detektoren mit den Konvertern, jedoch ohne Moderator, über den vorgesehenen Überwachungszeitraum an einem Ort ohne Beitrag durch thermische Neutronen zu lagern und auszuwerten.

Nach Gleichung (5b) ergibt sich  $D_{kon}$  zu:

$$D_{kon} = n \cdot [D_K - D_0]_{D_{nth}=0} \quad (6b)$$

n Korrektionsfaktor für die unterschiedliche Dauer der Lagerungszeit zur Bestimmung der Anzeige der Detektoren durch Kontamination des Konverters einerseits und der tatsächlichen Expositionszeit beim Einsatz der Detektoren andererseits.

Die sich aus Gleichung (6b) ergebene Spuredichte  $D_{kon}$  wird für die Ermittlung der Neutronen-Ortsdosis nur verwendet, wenn  $D_{kon}$  die Erkennungsgrenze überschreitet (siehe Kap. 6.1).

Von den kommerziellen Konvertern sind zur Zeit die BE-10-Konverter von Kodak am ehesten geeignet (siehe Verzeichnis der erforderlichen Geräte in Kap. 9).



### 5.3 Ermittlung des Neutronenkalibrierfaktors $N_n$

Die Bestimmung des Neutronenkalibrierfaktors  $N_n$  eines Moderatorodosimeters ist gleich für TL- und KS-Detektoren und erfolgt unter Referenzbedingungen in einem Neutronenfeld bekannter Energie und Fluenz. Es wird empfohlen, die Kalibrierung einheitlich auf das Spaltneutronenspektrum einer  $^{252}\text{Cf}$ -Quelle zu beziehen. Bei der Kalibrierung errechnet sich die Neutronen-Ortsdosis  $H^*(10)_{\text{Kal}}$  am Messort aus der Fluenz  $\Phi_{\text{Kal}}$  und dem Konversionsfaktor  $h^*$  zur Umrechnung der Fluenz in die Neutronen-Äquivalentdosis.

$$H^*(10)_{\text{Kal}} = h^* \cdot \Phi_{\text{Kal}} \quad (7)$$

Die Kalibrierung erfolgt in Vorzugsrichtung, bei der die flache Seite des Detektors senkrecht zur Einstrahlrichtung steht. Der Kugelmittelpunkt ist Bezugspunkt.

Aus Gleichung (4a,b) ergibt sich der jeweilige Neutronen Kalibrierfaktor zu:

$$N_n(\text{TL}) = H^*(10)_{\text{Kal}} / M_{\text{nth}} \quad (8a)$$

bzw: 
$$N_n(\text{KS}) = H^*(10)_{\text{Kal}} / D_{\text{nth}} \quad (8b)$$

Die Einheit des Neutronenkalibrierfaktors ist für TL-Detektoren dimensionslos, wenn  $M_{\text{th}}$  in Einheiten der Photonen-Umgebungsäquivalentdosis erfolgt und hat für KS-Detektoren die Einheit  $\text{Sv}\cdot\text{cm}^2$ . Bei der Kalibrierung mit Neutronen einer anderen Energie ist der ermittelte Neutronenkalibrierfaktor mit Hilfe eines einmalig bestimmten Korrektionsfaktors auf den für ein  $^{252}\text{Cf}$ -Spektrum zu korrigieren. Der Kalibrierfaktor eines Moderatorodosimeters ist zum Beispiel im ungestörten Neutronenfeld einer Am-Be-Quelle um etwa 30% höher als in dem einer  $^{252}\text{Cf}$ -Quelle.

## 6 Berechnungsverfahren

Das hier vorgestellte Berechnungsverfahren beschränkt sich auf die Ermittlung der Neutronen-Ortsdosis. Beim Einsatz von TL-Detektoren ergibt sich auch ein Anzeigewert für Photonen, der der Photonendosis im Moderator entspricht. Dieser Wert kann wegen der Absorption der Photonen im Moderator nur unter eingeschränkten Bedingungen als die Umgebungs-Äquivalentdosis für Photonen am Auslegeort verwendet werden und wird deshalb hier auch nicht dazu herangezogen.

### 6.1 Ermittlung der Neutronen-Ortsdosis $H_n^*(10)$

Alle nachfolgenden Gleichungen gelten für einen einheitlichen Zeitraum, üblicherweise ein halbes Jahr. Die Ergebnisse für abweichende Überwachungszeiträume sind auf einen einheitlichen zu normieren.

Aus den Gleichungen (4a) und (5a) ergibt sich die Gleichung zur Dosisermittlung für ein TL-Detektorpärchen in einem Moderatorodosimeter zu:

$$H_{n,i}^*(10) = N_n(\text{TL}) \cdot M_{n,i} = N_n(\text{TL}) \cdot [M_i(\text{NG}) - M_i(\text{G}) - M_{\text{tri},i}] \quad (9a)$$

Bei Verwendung von mehreren (Anzahl  $z$ ) TL-Detektorpärchen gilt:

$$H_n^*(10) = N_n(\text{TL}) \cdot \bar{M}_n \quad (9b)$$

$$\text{mit } \bar{M}_n = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z M_{n,i} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z [M_i(\text{NG}) - M_i(\text{G}) - M_{\text{tri},i}] \quad (9c)$$

$H_n^*(10)$	Umgebungs-Äquivalentdosis durch Neutronen
$N_n(\text{TL})$	Neutronenkalibrierfaktor für TL-Dosimetriesysteme
$M(\text{NG})$	Anzeige des neutronen- und photonenempfindlichen TL-Detektors
$M(\text{G})$	Anzeige des photonenempfindlichen TL-Detektors
$M_{\text{tri}}^{(1)}$	Dosisanzeige durch Tritium im TL-Detektor (siehe Kap.5.2.2)





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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 9 von 26  
 Stand: August 2007

$M_n$  Neutronendosisanzeige eines TL-Detektorpärchens  
 $\overline{M}_n$  Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer (z) TL-Detektorpärchen

Mit Gleichung (4b) und (5b) gilt analog für KS-Detektoren:

$$H_{n,i}^*(10) = N_n(KS) \cdot D_{n,i} = N_n(KS) \cdot [D_{K,i} - D_0 - D_{kon,i}] \quad (9d)$$

Bei Verwendung von mehreren (z) KS-Detektoren gilt:

$$H_n^*(10) = N_n(KS) \cdot \overline{D}_n \quad (9e)$$

$$\text{mit } \overline{D}_n = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z D_{n,i} = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=1}^z [D_{K,i} - D_0 - D_{kon,i}] \quad (9f)$$

$H_n^*(10)$  Umgebungs-Äquivalentdosis durch Neutronen  
 $N_n(KS)$  Neutronenkalibrierfaktor für KS-Dosimetriesysteme  
 $D_K$  Spurendichte des KS-Detektors mit Konverter  
 $D_0$  Spurendichteanzeige unbestrahlter KS-Detektoren ohne Konverter  
 $D_{kon}^{1)}$  Dosisanzeige durch Kontamination der Konverter im KS-Detektor (siehe Kap.5.2.3)  
 $D_n$  Spurendichteanzeige des KS-Detektors für thermische Neutronen  
 $\overline{D}_n$  Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer (z) KS-Detektoren  
 z Anzahl der verwendeten TL-Detektorpärchen bzw. KS-Detektoren

<sup>1)</sup> Diese Dosisanzeigen werden nur subtrahiert, wenn sie über der Erkennungsgrenze liegen.

## 6.2 Ermittlung der Untergrundanzeige $M_{n,U}$

Vorbemerkung: Das Messziel hier ist nicht die Ermittlung des wissenschaftlich korrekten Wertes des Beitrages der Neutronenäquivalentdosis (Untergrunddosis), der nicht durch den Betrieb der zu überwachenden Anlage herrührt, sondern lediglich die Ermittlung der entsprechenden Anzeige durch Neutronen in Dosisseinheiten (hier Untergrundanzeige genannt), da nur diese zur Ermittlung der Nettodosis benötigt wird (siehe Kap.6.3). In den folgenden Berechnungen und im Berechnungsbeispiel tritt nur noch die Untergrundanzeige auf.

Die Untergrundanzeige  $M_{n,U}$  beschränkt sich im Gegensatz zur Photonen-Ortsdosis auf die kosmische Komponente. Eine terrestrische Komponente liegt nicht vor. Die Jahresortsdosis durch kosmische Neutronenstrahlung beträgt weniger als 0,1 mSv in Meereshöhe; sie steigt mit der Höhe über NN und ist abhängig von der geographischen Breite [19], [20], [21]. Der Wert der Untergrundanzeige unterscheidet sich vom Wert der Untergrunddosis nur durch die hohe Unsicherheit der Messwerte auf Grund der Energieabhängigkeit des Dosimeters gegenüber der Neutronen-Untergrundstrahlung.

Es ist auch zu prüfen, ob ein Beitrag zur Neutronen-Ortsdosis durch eine benachbarte Anlage vorliegt, der bei der Ermittlung der durch die kerntechnische Anlage verursachten Neutronen-Ortsdosis berücksichtigt werden muss.

Es wird empfohlen, die TL-Detektorpaare bzw. die KS-Detektoren mit Konverter über den vorgesehenen Überwachungszeitraum an einem Ort nicht erhöhter Neutronen-Ortsdosisleistung (Referenzmessort) in Moderatorokugeln zu exponieren.

Unter Verwendung von Gl. (5a) gilt für TL-Dosimetriesysteme:

$$M_{n,U,i} = M_{U,i}(NG) - M_{U,i}(G) - M_{tri,i} \quad (10a)$$



Bei Verwendung von mehreren ( $y$ ) TL-Detektorpärchen gilt:

$$\bar{M}_{n,U} = \frac{1}{y} \cdot \sum_{i=1}^y M_{n,U,i} = \frac{1}{y} \cdot \sum_{i=1}^y [M_{U,i}(NG) - M_{U,i}(G) - M_{tri,i}] \quad (10b)$$

Für KS-Dosimetriesysteme gilt gemäß Gl. (5b):

$$D_{n,U} = D_{U,K,i} - D_0 - D_{kon,i} \quad (10c)$$

Bei Verwendung von mehreren ( $y$ ) KS-Detektoren gilt:

$$\bar{D}_{n,U} = \frac{1}{y} \cdot \sum_{i=1}^y D_{n,U,i} = \frac{1}{y} \cdot \sum_{i=1}^y [D_{U,K,i} - D_0 - D_{kon,i}] \quad (10d)$$

### 6.3 Ermittlung der Netto-Neutronen-Ortsdosis $\Delta H_n^*(10)$

Die Netto-Neutronen-Ortsdosis  $\Delta H_n^*(10)$  wird durch die Anlage verursacht. Sie ermittelt sich wie folgt für TL-Detektoren

$$\Delta H_n^*(10) = N_n(TL) \cdot (\bar{M}_n - \bar{M}_{n,U}) \quad (11a)$$

und wie folgt für KS-Detektoren

$$\Delta H_n^*(10) = N_n(KS) \cdot (\bar{D}_n - \bar{D}_{n,U}) \quad (11b)$$

- $\Delta H_n^*(10)$  Netto-Neutronen-Ortsdosis
- $N_n(TL)$  Neutronenkalibrierfaktor für TL-Dosimetriesysteme
- $\bar{M}_n$  Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer TL-Detektorpärchen
- $\bar{M}_{n,U}$  Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer TL-Detektorpärchen (Untergrundanzeige)
- $N_n(KS)$  Neutronenkalibrierfaktor für KS-Dosimetriesysteme
- $\bar{D}_n$  Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer KS-Detektoren
- $\bar{D}_{n,U}$  Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer KS-Detektoren (Untergrundanzeige)

Wegen der geringen natürlichen Neutronendosis, die im Allgemeinen unterhalb der Nachweisgrenze der Systeme liegt, ist ein Unterschied zwischen  $\Delta H_n^*(10)$  und  $H_n^*(10)$  am gleichen Messort im Bereich von 0,02 mSv in einem halben Jahr zu erwarten. Liegt die Untergrundanzeige  $\bar{M}_{n,U}$  unterhalb der Erkennungsgrenze der Dosimetriesysteme, dann wird die Untergrundanzeige auf Null gesetzt.

Anmerkung: Die auswertende Stelle ermittelt  $H_n^*(10)$ . Es obliegt der auslegenden Stelle unter Verwendung von  $\bar{M}_{n,U}$ -Werten an Referenzorten und Berücksichtigung der Messunsicherheiten die Netto-Neutronen-Äquivalentdosis  $\Delta H_n^*(10)$  zu ermitteln.

### 6.4 Messunsicherheit

Nach den Normen [22] und [23] werden zur Ermittlung der Standardmessunsicherheiten Modellfunktionen herangezogen. Die Gleichungen (11a) und (11b) sind die Modellfunktionen für die Bestimmung von  $u(\Delta H_n^*(10))$ . Die Gesamt-Messunsicherheit der Neutronendosis  $H_n$  setzt sich zusammen aus den Teil-Messunsicherheiten der Eingangsparameter Kalibrierfaktor, Detektoranzeige und Untergrundanzeige.



Die Teil-Standardunsicherheit des Kalibrierfaktors  $N_n$  liefert unabhängig vom verwendeten Detektorsystem einen relevanten Beitrag zur Gesamt-Standardunsicherheit von  $\Delta H^*(10)$ . Die Kugelform des Moderators bedingt einen Standardunsicherheits-Beitrag durch die Richtungsabhängigkeit von weniger als  $\pm 0,1$  [24]. Maßgebend ist die Energieabhängigkeit des Moderatorodosimeters gegenüber monoenergetischen Neutronen. In praktischen Strahlenfeldern kann jedoch der Neutronenkalibrierfaktor mit einer Standardunsicherheit für die Energie- und Richtungsabhängigkeit von etwa  $\pm 0,30$  ermittelt werden [7].

Je besser die Neutronen-Ansprechfunktionen des Moderatorodosimeters und das Neutronenspektrum durch die Anlage bekannt sind und berücksichtigt werden können, desto geringer wird der Einfluss der Energieabhängigkeit auf die Messunsicherheit der gemessenen Neutronen-Ortsdosis sein.

Die Teilbeiträge durch die Unsicherheiten der Detektoranzeigen müssen für TL-Dosimetriesysteme und KS-Dosimetriesysteme separat betrachtet werden.

Für TL-Dosimetriesysteme gilt:

Die Teil-Standardunsicherheit  $u(M)$  der Anzeigen  $M(NG)$ ,  $M(G)$  und  $M_U$  wird durch eine statistische Auswertung von Messungen bestimmt. Die Standardunsicherheit  $u_0$  und die relative Standardunsicherheit  $r_k$  ergeben sich aus der Standardabweichung des Mittelwerts der Anzeige unbestrahlter bzw. mit 10 mSv Photonendosis bestrahlter Detektorgruppen für das jeweils eingesetzte TL-Dosimetriesystem. Dafür werden repräsentative Gruppen von wenigstens 10 Detektoren gleich behandelt und ausgewertet. Die Standardabweichung der Anzeigen dieser Gruppe ist dann repräsentativ für die Standardunsicherheit einer Einzelmessung für die mittlere Anzeige dieser Gruppe.

Die Standardunsicherheit  $u(M)$  einer Detektor-Anzeige in Abhängigkeit von der Anzeige  $M$  lässt sich in guter Näherung durch eine Gleichung mit zwei konstanten Parametern beschreiben:

$$u(M_x) = \sqrt{u_{0,x}^2 + (r_{k,x} \cdot M_x)^2} \quad \text{mit } x = (NG) \text{ oder } (G) \quad (12a)$$

- $u(M_x)$  Standardunsicherheit  $u(M)$  der Detektor-Anzeige
- $u_{0,x}$  Standardunsicherheit unbestrahlter Detektoren
- $r_{k,x}$  relative Standardunsicherheit bestrahlter Detektoren bei einer Photonendosis von 10 mSv
- $M_x$  Detektoranzeige
- $NG$  neutronen- und photonenempfindlicher Detektor
- $G$  photonenempfindlicher Detektor

Mit den Gleichungen (12a) und (9c) lässt sich damit die Standardunsicherheit  $u(\bar{M}_n)$  ermitteln.

$$u(M_{n,i}) = \sqrt{u^2(M_i(NG)) + u^2(M_i(G)) + u^2(M_{tri,i})} \quad (12b)$$

Bei Verwendung von mehreren ( $z$ ) TL-Detektorpärchen gilt:

$$u(\bar{M}_n) = \frac{1}{z} \sqrt{\sum_{i=1}^z u^2(M_{n,i})} = \frac{1}{z} \sqrt{\sum_{i=1}^z u^2(M_i(NG)) + u^2(M_i(G)) + u^2(M_{tri,i})} \quad (12c)$$

Die Messunsicherheit der Ortsdosis  $H_n^*(10)$  nach Gl. (9b) kann damit bestimmt werden zu:

$$u(H_n^*(10)) = \sqrt{u^2(N_n(TL)) \cdot \bar{M}_n^2 + u^2(\bar{M}_n) \cdot N_n^2(TL)} \quad (13a)$$



Die Standardunsicherheit  $u(\bar{M}_{n,U})$  der Untergrundanzeige am Referenzort kann auf Basis der Gl. (10a) in Verbindung mit Gl. (12a) analog zu Gl. (12b) und (12c) bestimmt werden.

Anm.: Wird die Untergrundanzeige auf anderem Weg, z.B. Literaturangaben, bestimmt, ist die zugehörige Standardunsicherheit abzuschätzen.

Die Gesamtmessunsicherheit für die Nettodosis  $\Delta H_n^*(10)$  nach Gl. (11a) beträgt damit:

$$u(\Delta H_n^*(10)) = \sqrt{u^2(N_n(TL)) \cdot (\bar{M}_n - \bar{M}_{n,U})^2 + N_n^2(TL) \cdot [u^2(\bar{M}_n) + u^2(\bar{M}_{n,U})]} \quad (14a)$$

Für KS-Dosimetriesysteme gilt:

Bei der Ermittlung der Gesamt-Messunsicherheit der Neutronendosis  $H_n^*(10)$  werden bei KS-Dosimetriesystemen die Teil-Messunsicherheiten  $u(D)$  der Anzeigen  $D_K$  und  $D_U$  als Erwartungswert des Poisson-Prozesses  $N^{1/2}$  mit  $N$  als Anzahl der gezählten Spuren bestimmt. Die Teilstandardunsicherheit  $u(D_0)$  wird als empirische Standardabweichung der mittleren Kernspurdichte  $D_0$  aus der Kernspurdichte einer ausreichenden Anzahl (*mind. 10*) während des Überwachungszeitraumes unbestrahlt gelagerter Detektoren ermittelt.  $u(D_0)$  beinhaltet sowohl Unsicherheiten durch die jeweilige Detektorqualität und das Ätzverfahren als auch den Erwartungswert des Poisson-Prozesses  $N_0^{1/2}$  mit  $N_0$  als Anzahl der gezählten Spuren. Zur Ermittlung der relativen Standardunsicherheit  $r_{k,x}$  wird eine Gruppe von mindestens 10 Detektoren entsprechend einer Spurendichte von etwa  $1000 \text{ cm}^{-2}$  bestrahlt, ausgewertet und abzüglich des Erwartungswerts des Poisson-Prozesses  $N_x^{1/2}$  die Standardabweichung bestimmt.

Die Standardunsicherheit  $u(D)$  einer Detektor-Anzeige in Abhängigkeit von der Anzeige  $D$  lässt sich in guter Näherung durch folgende Gleichung beschreiben:

$$u(D) = \sqrt{\frac{D}{A} + u^2(D_0) + (r_k \cdot D)^2} \quad (12d)$$

mit

$u(D)$  Standardunsicherheit der Detektor-Anzeige  $D$

$D_x$  Detektoranzeige

$A$  Zählfläche des Detektors

$u(D_0)$  Standardunsicherheit unbestrahlter Detektoren

$r_k$  relative Standardunsicherheit bestrahlter Detektoren bei einer Spurendichte von etwa  $1000 \text{ cm}^{-2}$  abzüglich des Erwartungswerts des Poisson-Prozesses  $N_x^{1/2}$

Mit den Gleichungen (12d) und (9f) lässt sich damit die Standardunsicherheit  $u(\bar{D}_n)$  ermitteln.

$$u(D_{n,i}) = \sqrt{u^2(D_{K,i}) + u^2(D_0) + u^2(D_{kon,i})} \quad (12e)$$

Bei Verwendung von mehreren ( $z$ ) KS-Detektorpärchen gilt:

$$u(\bar{D}_n) = \frac{1}{z} \sqrt{\sum_{i=1}^z u^2(D_{n,i})} = \frac{1}{z} \sqrt{\sum_{i=1}^z u^2(D_{K,i}) + u^2(D_0) + u^2(D_{kon,i})} \quad (12f)$$



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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 13 von 26  
 Stand: August 2007

Die Messunsicherheit der Ortsdosis  $H_n^*(10)$  nach Gl. (9e) kann damit bestimmt werden zu:

$$u(H_n^*(10)) = \sqrt{u^2(N_n(KS)) \cdot \bar{D}_n^2 + u^2(\bar{D}_n) \cdot N_n^2(KS)} \quad (13b)$$

Die Standardunsicherheit  $u(\bar{D}_{n,U})$  der Untergrundanzeige am Referenzort kann auf Basis der Gleichung (10b) in Verbindung mit Gl. (12b) analog zu Gl. (13b) bestimmt werden.

Anm.: Wird die Untergrundanzeige auf anderem Weg, z.B. Literaturangaben, bestimmt, ist die zugehörige Standardunsicherheit abzuschätzen.

Damit ergibt sich für Gesamtmessunsicherheit  $\Delta H_n^*(10)$  der Nettodosis:

$$u(\Delta H_n^*(10)) = \sqrt{u^2(N_n(KS)) \cdot (\bar{D}_n - \bar{D}_{n,U})^2 + N_n^2(KS) \cdot [u^2(\bar{D}_n) + u^2(\bar{D}_{n,U})]} \quad (14b)$$

Die Kernspurdetektoren erlauben die Dosisermittlung ohne den Einfluss der natürlichen und evtl. zusätzlichen Photonenstrahlung, im Gegensatz zu TL-Detektoren, bei denen die Messunsicherheit und damit die Nachweisgrenze u. a. vom Photonenanteil des Strahlungsfeldes abhängen.

### 6.5 Erkennungs- und Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis

Nach DIN 25482-10 [4] errechnet sich die Erkennungsgrenze  $X^*$  aus dem Faktor  $k_{(1-\alpha)}$  und der Messunsicherheit  $u(\Delta H_n^*(10))$  an der Stelle  $\Delta H_n^*(10) = 0$ .

$$X^* = k_{(1-\alpha)} \cdot u(\Delta H = 0) \quad (15)$$

$X^*$  Erkennungsgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis

$\alpha$  Wahrscheinlichkeit des Fehlers erster Art. Es soll der Wert  $\alpha = 0,05$  gewählt werden.

$k_{(1-\alpha)}$  oberes einseitiges Quantil der Messwerte, für  $\alpha = 0,05$  ist  $k_{(1-\alpha)} = 1,65$

$u(\Delta H=0)$  Standardunsicherheit für eine Netto-Neutronen-Ortsdosis gleich Null

Für die Erkennungsgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis, ermittelt mit TL-Detektoren, ergibt sich aus Gleichung (14a) und einer Netto-Neutronen-Ortsdosis gleich Null ( $\bar{M}_n - \bar{M}_{n,U} \stackrel{!}{=} 0$ ):

$$X^* = 1,65 \cdot \sqrt{N_n^2(TL) \cdot [u^2(\bar{M}_n(\Delta H = 0)) + u^2(\bar{M}_{n,U})]} \quad (16a)$$

mit

$$\bar{M}_n(\Delta H = 0) = M(NG) - M(G) - M_{n,U} - M_{tri} \stackrel{!}{=} 0 \quad (16b)$$

Die Erkennungsgrenze, ermittelt mit KS-Detektoren, errechnet sich entsprechend aus Gleichung (14b) und einer Netto-Neutronen-Ortsdosis gleich Null wie folgt:

$$X^* = 1,65 \cdot \sqrt{N_n^2(KS) \cdot [u^2(\bar{D}_n(\Delta H = 0)) + u^2(\bar{D}_{n,U})]} \quad (16c)$$

mit

$$\bar{D}_n(\Delta H = 0) = D_K - D_{n,U} - D_0 - D_{kon} \stackrel{!}{=} 0 \quad (16d)$$



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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 14 von 26  
 Stand: August 2007

Des Weiteren errechnet sich die Nachweisgrenze  $\zeta^*$  aus der Erkennungsgrenze  $X^*$  sowie aus dem Faktor  $k_{(1-\beta)}$  und der Messunsicherheit  $u(\zeta^*)$  an der Stelle  $\zeta^*$ .

$$\zeta^* = X^* + k_{(1-\beta)} \cdot u(\zeta^*) \quad (17)$$

- $\zeta^*$  Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis
- $X^*$  Erkennungsgrenze
- $\beta$  Wahrscheinlichkeit des Fehlers zweiter Art. Es soll der Wert  $\beta = 0,05$  gewählt werden.
- $k_{(1-\beta)}$  unteres einseitiges Quantil der Messwerte, für  $\beta = 0,05$  ist  $k_{(1-\beta)} = 1,65$

Die inverse Gleichung (17) kann im Allgemeinen durch Iteration, nach [25] zweckmäßigerweise mit dem Anfangswert für die Standardmessunsicherheit bei der Nachweisgrenze von

$$\zeta_0^* = 2 \cdot X^* \quad (18)$$

gelöst werden.

## 7 Berechnungsbeispiel

Im Folgenden wird ein Beispiel zur Berechnung der Netto-Neutronen-Ortsdosis gegeben. Das Beispiel geht von einer Anlage mit 10 Auslegeorten aus. Für die Untergrundanzeige ist ein Referenzort gewählt. 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.

### 7.1 Thermolumineszenz(TL)-System

Als Dosimetriesystem wird eine 30cm-Kugel mit 3 Detektorpaaren und folgenden Standardparametern verwendet:

$r_k = 0,015$	Relative Standardunsicherheit im Dosisbereich der Kalibrierdosis zur Ermittlung von $N_k$ , für (NG)- und (G)-Detektoren gleich
$u_0 = 0,02$ mSv	Standardunsicherheit unbestrahlter Detektoren, für (NG)- und (G)-Detektoren gleich
$N_n(\text{TL}) = 0,8$	Neutronenkalibrierfaktor für TL-Dosimetriesysteme
$u(N_n(\text{TL})) = 0,2$	Standardunsicherheit des Neutronenkalibrierfaktors für TL-Dosimetriesysteme

#### 7.1.1 Neutronendosisanzeige und ihre Unsicherheit

Die Messstelle wertet die Dosimeter aus und liefert die Dosisanzeigen, aus denen gemäß Gleichung (5a) die Neutronendosisanzeige  $M_{n,i}$  für jedes TL-Detektorpärchen berechnet wird. Der arithmetische Mittelwert der drei Einzelwerte (Tab. 2, Sp. 5, 9, 13) ist dann gemäß Gleichung (9c) die Neutronendosisanzeige  $\bar{M}_n$  (Sp. 14) für den entsprechenden Auslegeort.



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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 15 von 26  
 Stand: August 2007

Tab. 2: Berechnung der Neutronendosisanzeige  $\bar{M}_n$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
	$M(NG)$	$M(G)$	$M_{tri}$	$M_{n,i}$	$M(NG)$	$M(G)$	$M_{tri}$	$M_{n,i}$	$M(NG)$	$M(G)$	$M_{tri}$	$M_{n,i}$	$\bar{M}_n$	
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	
Gl.	(5a)				(5a)				(5a)				(9c)	
Auslegeort	1	0,35	0,29	0,00	0,060	0,34	0,30	0,00	0,040	0,33	0,29	0,00	0,040	0,047
	2	0,30	0,27	0,00	0,030	0,30	0,28	0,00	0,020	0,32	0,29	0,00	0,030	0,027
	3	0,34	0,30	0,00	0,040	0,35	0,31	0,00	0,040	0,34	0,30	0,00	0,040	0,040
	4	0,64	0,37	0,00	0,270	0,64	0,38	0,00	0,260	0,66	0,37	0,00	0,290	0,273
	5	0,30	0,27	0,00	0,030	0,30	0,25	0,00	0,050	0,29	0,26	0,00	0,030	0,037
	6	0,25	0,24	0,00	0,010	0,25	0,23	0,00	0,020	0,24	0,24	0,00	0,000	0,010
	7	0,31	0,27	0,00	0,040	0,31	0,26	0,00	0,050	0,31	0,26	0,00	0,050	0,047
	8	2,04	1,15	0,00	0,890	1,95	1,09	0,00	0,860	2,11	1,13	0,00	0,980	0,910
	9	1,05	0,27	0,00	0,780	1,03	0,27	0,00	0,760	1,06	0,26	0,00	0,800	0,780
	10	4,01	3,92	0,00	0,090	4,05	3,70	0,00	0,350	3,98	3,97	0,00	0,010	0,150

In Tabelle 3 wird die Standardunsicherheit der Anzeige jedes einzelnen Detektors mit Hilfe der Gl. (12a), die Standardunsicherheit der Neutronendosisanzeige eines Detektorpärchens gemäß Gleichung (12b) und die Standardunsicherheit des Mittelwertes der Neutronenanzeigen gemäß Gleichung (12c) berechnet.

Tab. 3: Unsicherheit der Neutronendosisanzeige  $u(\bar{M}_n)$

1	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
	$u(M(NG))$	$u(M(G))$	$u(M_{tri})$	$u(M_{n,i})$	$u(M(NG))$	$u(M(G))$	$u(M_{tri})$	$u(M_{n,i})$	$u(M(NG))$	$u(M(G))$	$u(M_{tri})$	$u(M_{n,i})$	$u(\bar{M}_n)$	
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	
Gl.	(12a)	(12a)	(12a)	(12b)	(12a)	(12a)	(12a)	(12b)	(12a)	(12a)	(12a)	(12b)	(12c)	
Auslegeort	1	0,021	0,020	0,020	0,035	0,021	0,021	0,020	0,035	0,021	0,020	0,020	0,035	0,020
	2	0,021	0,020	0,020	0,035	0,021	0,020	0,020	0,035	0,021	0,020	0,020	0,035	0,020
	3	0,021	0,021	0,020	0,035	0,021	0,021	0,020	0,035	0,021	0,021	0,020	0,035	0,020
	4	0,022	0,021	0,020	0,036	0,022	0,021	0,020	0,036	0,022	0,021	0,020	0,036	0,021
	5	0,021	0,020	0,020	0,035	0,021	0,020	0,020	0,035	0,020	0,020	0,020	0,035	0,020
	6	0,020	0,020	0,020	0,035	0,020	0,020	0,020	0,035	0,020	0,020	0,020	0,035	0,020
	7	0,021	0,020	0,020	0,035	0,021	0,020	0,020	0,035	0,021	0,020	0,020	0,035	0,020
	8	0,037	0,026	0,020	0,049	0,035	0,026	0,020	0,048	0,037	0,026	0,020	0,050	0,028
	9	0,025	0,020	0,020	0,038	0,025	0,020	0,020	0,038	0,026	0,020	0,020	0,038	0,022
	10	0,063	0,062	0,020	0,091	0,064	0,059	0,020	0,089	0,063	0,063	0,020	0,091	0,052

7.1.2 Untergrundanzeige und Unsicherheit

Zur Bestimmung der Untergrundanzeige wurde im Beispiel nur eine Kugel mit drei Detektorpaaren am Referenzmessort aufgestellt. Die Untergrundanzeige der Detektorpaare wird gemäß Gleichung (10a) ermittelt, der Mittelwert der Untergrundanzeigen der Detektorpaare gemäß Gleichung (10b). Die entsprechenden Ergebnisse des Beispiels sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tab. 4: Untergrundanzeige  $\bar{M}_{n,U}$

1	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	$M(NG)$	$M(G)$	$M_{tri}$	$M_{n,U,i}$	$M(NG)$	$M(G)$	$M_{tri}$	$M_{n,U,i}$	$M(NG)$	$M(G)$	$M_{tri}$	$M_{n,U,i}$	$\bar{M}_{n,U}$
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv
Gl.	(10a)				(10a)				(10a)				(10b)
Ref.ort	0,27	0,28	0,00	-0,010	0,28	0,29	0,00	-0,010	0,29	0,28	0,00	0,010	-0,003



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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 16 von 26  
 Stand: August 2007

Die Ermittlung der Standardunsicherheiten der Untergrundanzeigen in Tab. 5 ist analog zu der in Tab. 3.

Tab. 5: Unsicherheit der Untergrundanzeige  $u(\bar{M}_{n,U})$

1	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
	$u(M(NG))$	$u(M(G))$	$u(M_{(r)})$	$u(M_{n,U,i})$	$u(M(NG))$	$u(M(G))$	$u(M_{(r)})$	$u(M_{n,U,i})$	$u(M(NG))$	$u(M(G))$	$u(M_{(r)})$	$u(M_{n,U,i})$	$u(\bar{M}_{n,U})$
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv
Gl.	(12a)	(12a)	(12a)	(12b)	(12a)	(12a)	(12a)	(12b)	(12a)	(12a)	(12a)	(12b)	(12c)
Ref.ort	0,020	0,020	0,020	0,035	0,020	0,020	0,020	0,035	0,020	0,020	0,020	0,035	0,020

Die Erkennungsgrenze der Untergrundanzeige kann mit Hilfe von Formel (16a) berechnet werden:  $X^*(\bar{M}_{n,U}) = 1,65 \cdot \sqrt{u^2(\bar{M}_{n,U})}$ . Da die gemessene Untergrundanzeige (Mittelwert der drei Detektorpaare, siehe Spalte 40) unterhalb der Erkennungsgrenze (hier: 0,033 mSv) liegt, wird  $\bar{M}_{n,U}$  gleich Null gesetzt (s. auch Kap. 6.2).

7.1.3 Netto-Neutronen-Ortsdosis und ihre Unsicherheit

Damit kann die Netto-Neutronen-Ortsdosis (Sp. 54) nach Gl. (11a) und die Unsicherheit (Sp. 55) nach Gl. (14a) berechnet werden.

Tab. 6: Berechnung der Netto-Neutronen-Ortsdosis

1	14	27	40	53	54	55
	$\bar{M}_n$	$u(\bar{M}_n)$	$\bar{M}_{n,U}$	$u(\bar{M}_{n,U})$	$\Delta H_n^*(10)$	$u(\Delta H_n^*(10))$
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv
Gleichung	(9c)	(12c)	(10b)	(12c)	(11a)	(14a)
Auslegeort 1	0,047	0,020	0,000 <sup>1)</sup>	0,020	0,038	0,025
Auslegeort 2	0,027	0,020	0,000	0,020	0,022	0,023
Auslegeort 3	0,040	0,020	0,000	0,020	0,032	0,024
Auslegeort 4	0,273	0,021	0,000	0,020	0,218	0,059
Auslegeort 5	0,037	0,020	0,000	0,020	0,030	0,024
Auslegeort 6	0,010	0,020	0,000	0,020	0,008	0,023
Auslegeort 7	0,047	0,020	0,000	0,020	0,038	0,025
Auslegeort 8	0,910	0,028	0,000	0,020	0,728	0,184
Auslegeort 9	0,780	0,022	0,000	0,020	0,624	0,158
Auslegeort 10	0,150	0,052	0,000	0,020	0,120	0,054

<sup>1)</sup> siehe Kap. 6.2 und 7.1.2

7.1.4 Erkennungsgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis

Anmerkung: Die Erkennungsgrenze für die Netto-Neutronen-Ortsdosis bei Verwendung von TL-Detektoren hängt von der Höhe der Photonendosis im Moderator ab und wird deshalb für jeden Auslegeort und nicht einheitlich für das Verfahren angegeben. Dies gilt auch für die Nachweisgrenze, die auf der Erkennungsgrenze basiert.



Tab. 7: Berechnung der Erkennungsgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis

1	27	53	56	54
	$u(\bar{M}_n(\Delta H = 0))$	$u(\bar{M}_{n,U})$	$X^*$	$\Delta H_n^*(10)$
	mSv	mSv	mSv	mSv
Gleichung	(12c)	(12c)	(16a)	(11a)
Auslegeort 1	0,020	0,020	0,037	0,038
Auslegeort 2	0,020	0,020	0,037	0,022
Auslegeort 3	0,020	0,020	0,037	0,032
Auslegeort 4	0,021	0,020	0,038	0,218
Auslegeort 5	0,020	0,020	0,037	0,030
Auslegeort 6	0,020	0,020	0,037	0,008
Auslegeort 7	0,020	0,020	0,037	0,038
Auslegeort 8	0,028	0,020	0,046	0,728
Auslegeort 9	0,022	0,020	0,039	0,624
Auslegeort 10	0,052	0,020	0,073	0,120

Es ist nun zu prüfen, ob die ermittelte Nettodosis oberhalb der Erkennungsgrenze liegt und somit ein Neutronen-Ortsdosisbeitrag durch die Anlage nicht auszuschließen ist. Die Berechnung erfolgt nach Gl. (16a). Die Nettodosis liegt damit bei den Auslegeorten 1, 4 und 7 bis 10 oberhalb der Erkennungsgrenze.

#### 7.1.5 Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis

Die Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis  $\zeta^*$  wird nach Gl. (17) iterativ berechnet. Der Startwert für  $\zeta^*$  wird üblicherweise mit  $\zeta_0^* = 2 \cdot X^*$  gem. Gl. (18) gewählt. Zunächst wird die Detektoranzeige  $M(NG, \zeta^*)$  des neutronen- und gammaempfindlichen Detektors (NG) benötigt, die zu einer Netto-Neutronen-Ortsdosis in Höhe von  $\zeta^*$  führt. Sie kann berechnet werden aus der Untergrundanzeige  $\bar{M}_{n,U}$ , der mittleren Anzeige der gammaempfindlichen Detektoren  $\bar{M}(G)$  (Mittelwert aus Sp. 3, 7, 11) am Auslegeort (Sp. 58) und der neutroneninduzierten Detektoranzeige  $M_n(\zeta^*) = \zeta^* / N_n$ . Mit Gl. (12a) kann daraus die zugehörige Unsicherheit  $u(M(NG, \zeta^*))$  (Sp. 61) berechnet werden, die für  $u(\zeta^*)$  benötigt wird (Sp. 62).

Mit  $M_n(\zeta^*) = M(NG, \zeta^*) - \bar{M}(G)$  und  $u(M_n(\zeta^*)) = \sqrt{u^2(M(NG, \zeta^*)) + u^2(\bar{M}(G))}$  kann  $u(\zeta^*)$  analog zu Gl. (14a) berechnet werden als

$$u(\zeta^*) = \sqrt{u^2(N_n(TL)) \cdot [M_n(\zeta^*) - \bar{M}_{n,U}]^2 + N_n^2(TL) \cdot [u^2(M_n(\zeta^*)) + u^2(\bar{M}_{n,U})]}.$$

Die Unsicherheit der mittleren Anzeige von z gammaempfindlichen Detektoren ist dabei

$$u(\bar{M}(G)) = \frac{1}{z} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^z u^2(M_i(G))}.$$



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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 18 von 26  
 Stand: August 2007

Tab. 8: Berechnung der Nachweisgrenze der Nettodosis, 1. Iterationsschritt

1	57	58	59	60	61	62	63
	$\zeta^*_0$	$\bar{M}(G)$	$u(\bar{M}(G))$	$M(NG\zeta^*)$	$u(M(NG\zeta^*))$	$u(\zeta^*)$	$\zeta^*_1$
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv
Gleichung					(12a)	(14a)	(17)
Auslegeort 1	0,074	0,293	0,012	0,386	0,021	0,031	0,088
Auslegeort 2	0,074	0,280	0,012	0,373	0,021	0,031	0,088
Auslegeort 3	0,074	0,303	0,012	0,396	0,021	0,031	0,088
Auslegeort 4	0,076	0,373	0,012	0,468	0,021	0,032	0,090
Auslegeort 5	0,074	0,260	0,012	0,353	0,021	0,031	0,088
Auslegeort 6	0,074	0,237	0,012	0,330	0,021	0,031	0,088
Auslegeort 7	0,074	0,263	0,012	0,356	0,021	0,031	0,088
Auslegeort 8	0,092	1,123	0,015	1,238	0,027	0,038	0,108
Auslegeort 9	0,078	0,267	0,012	0,365	0,021	0,032	0,091
Auslegeort 10	0,146	3,863	0,035	4,046	0,064	0,071	0,189

Anm.: In den Sp. 57 und 63 bezeichnet der Index die lfd. Nummer des Iterationsschritts.

Nach dem dritten Iterationsschritt (Tab. 9, Sp. 65) ändern sich die Werte nur noch geringfügig. Die mit der Iteration gewonnenen Werte der Nachweisgrenze sind im Berechnungsbeispiel etwa das 2,5-fache der Erkennungsgrenze. Da im Allgemeinen die erreichte Nachweisgrenze um den Faktor 5 bis 10 tiefer als die geforderte Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis von 0,5 mSv liegt, kann deshalb für eine schnelle Abschätzung  $\zeta^* \approx 3 \cdot X^*$  angenommen werden.

Tab. 9: Berechnung der Nachweisgrenze der Nettodosis, Iterationsschritte

1	63	64	65	66	67	68
	$\zeta^*_1$	$\zeta^*_2$	$\zeta^*_3$	$\zeta^*_4$	$\zeta^*_5$	$\zeta^*_6$
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv
Gleichung	(17)	(17)	(17)	(17)	(17)	(17)
Auslegeort 1	0,088	0,092	0,093	0,093	0,093	0,093
Auslegeort 2	0,088	0,092	0,093	0,093	0,093	0,093
Auslegeort 3	0,088	0,092	0,093	0,093	0,094	0,094
Auslegeort 4	0,090	0,094	0,095	0,095	0,095	0,095
Auslegeort 5	0,088	0,092	0,093	0,093	0,093	0,093
Auslegeort 6	0,088	0,092	0,093	0,093	0,093	0,093
Auslegeort 7	0,088	0,092	0,093	0,093	0,093	0,093
Auslegeort 8	0,108	0,112	0,113	0,114	0,114	0,114
Auslegeort 9	0,091	0,095	0,096	0,096	0,096	0,096
Auslegeort 10	0,189	0,200	0,203	0,204	0,204	0,204

Anm.: In den Sp. 63 bis 68 bezeichnet der Index die lfd. Nummer des Iterationsschritts.



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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 19 von 26  
 Stand: August 2007

7.2 Kernspur(KS)-System

Als Dosimetriesystem wird eine 30cm-Kugel mit 2 Kernspurdetektoren und folgenden Standardparametern verwendet:

$r_k = 0,080$	Relative Standardunsicherheit im Dosisbereich der Kalibrierdosis zur Ermittlung von $N_k$
$u_0 = 3 \text{ cm}^{-2}$	Standardunsicherheit der Spurendichte unbestrahlter Detektoren
$N_n(\text{KS}) = 4,5\text{E-}4 \text{ mSv}\cdot\text{cm}^2$	Neutronenkalibrierfaktor für KS-Dosimetriesysteme
$u(N_n(\text{KS})) = 9,0\text{E-}5 \text{ mSv}\cdot\text{cm}^2$	Standardunsicherheit des Neutronenkalibrierfaktors für KS-Dosimetriesysteme

7.2.1 Neutronendosisanzeige und ihre Unsicherheit

Die Messstelle wertet die Dosimeter aus und liefert die Dosisanzeigen (Spurendichten in  $\text{cm}^{-2}$ ), aus denen gemäß Gleichung (5b) die Neutronendosisanzeige  $D_{n,i}$  für jedes KS-Detektorpärchen berechnet wird. Der arithmetische Mittelwert der drei Einzelwerte (Tab. 10, Sp. 5, 9) ist dann gemäß Gleichung (9c) die Neutronendosisanzeige  $\bar{D}_n$  (Sp. 10) für den jeweiligen Auslegeort.

Tab. 10: Berechnung der Neutronendosisanzeige  $\bar{D}_n$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$D_{K,i}$	$D_0$	$D_{kon}$	$D_{n,i}$	$D_{K,i}$	$D_0$	$D_{kon}$	$D_{n,i}$	$\bar{D}_n$
	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$
Gleichung				(5b)				(5b)	(9f)
Auslegeort 1	92	5	15	72	79	5	16	58	65,0
Auslegeort 2	97	5	17	75	98	5	21	72	73,5
Auslegeort 3	94	5	29	60	91	5	11	75	67,5
Auslegeort 4	96	5	19	72	353	5	268	80	76,0
Auslegeort 5	112	5	16	91	365	5	332	28	59,5
Auslegeort 6	397	5	318	74	391	5	300	86	80,0
Auslegeort 7	470	7	20	443	435	5	25	405	424,0

In Tab. 11 wird die Standardunsicherheit der Anzeige jedes einzelnen Detektors mit Hilfe der Gl. (12d), die Standardunsicherheit der Neutronendosisanzeige eines Detektorpärchens gemäß Gleichung (12e) und die Standardunsicherheit des Mittelwertes der Neutronenanzeigen gemäß Gleichung (12f) berechnet.

Tab. 11: Unsicherheit der Neutronendosisanzeige  $u(\bar{D}_n)$

1	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	$u(D_{K,i})$	$u(D_0)$	$u(D_{kon})$	$u(D_{n,i})$	$u(D_{K,i})$	$u(D_0)$	$u(D_{kon})$	$u(D_{n,i})$	$u(\bar{D}_n)$
	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$	$\text{cm}^{-2}$
Gleichung	(12d)	(12d)	(12d)	(12e)	(12d)	(12d)	(12d)	(12e)	(12f)
Auslegeort 1	12,5	3,8	5,0	14,0	11,3	3,8	5,2	13,0	9,5
Auslegeort 2	12,9	3,8	5,3	14,4	13,0	3,8	5,7	14,7	10,3
Auslegeort 3	12,6	3,8	6,6	14,7	12,4	3,8	4,6	13,7	10,1
Auslegeort 4	12,8	3,8	5,5	14,4	34,1	3,8	27,1	43,7	23,0
Auslegeort 5	14,2	3,8	5,2	15,6	35,0	3,8	32,3	47,8	25,1
Auslegeort 6	37,6	3,8	31,2	49,0	37,1	3,8	29,7	47,7	34,2
Auslegeort 7	43,5	4,0	5,6	44,1	40,7	3,8	6,2	41,3	30,2



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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 20 von 26  
 Stand: August 2007

7.2.2 Untergrundanzeige und Unsicherheit

Zur Bestimmung der Untergrundanzeige wurden im Beispiel zwei Kugeln mit zwei Detektoren am Referenzmessort aufgestellt. Die Untergrundanzeige der Detektorpaare wird gemäß Gleichung (10c) ermittelt, der Mittelwert der Untergrundanzeigen der Detektorpaare gemäß Gleichung (10d). Die entsprechenden Ergebnisse des Beispiels sind in Tab. 12 zusammengestellt.

Tab. 12: Untergrundanzeige  $\bar{D}_{n,U}$

1	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	$D_{K,i}$	$D_0$	$D_{kon}$	$D_{n,U,i}$	$D_{K,i}$	$D_0$	$D_{kon}$	$D_{n,U,i}$	$\bar{D}_{n,U}$
	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>
Gleichung	(10c)				(10c)				(10d)
Referenzort1	66	6	18	42	48	6	17	25	33,5
Referenzort2	55	5	26	24	60	5	21	34	29,0
Mittelwert									31,3

Die Ermittlung der Standardunsicherheiten der Untergrundanzeigen in Tab. 13 ist analog zu der in Tab. 11.

Tab. 13: Unsicherheit der Untergrundanzeige  $u(\bar{D}_{n,U})$

1	29	30	31	32	33	34	35	36	37
	$u(D_{K,i})$	$u(D_0)$	$u(D_{kon})$	$u(D_{n,U,i})$	$u(D_{K,i})$	$u(D_0)$	$u(D_{kon})$	$u(D_{n,U,i})$	$u(\bar{D}_{n,U})$
	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>
Gleichung	(12d)	(12d)	(12d)	(12e)	(12d)	(12d)	(12d)	(12e)	(12f)
Referenzort1	10,1	3,9	5,4	12,1	8,5	3,9	5,3	10,7	8,1
Referenzort2	9,1	3,8	6,3	11,7	9,6	3,8	5,7	11,8	8,3
									5,8

Die Erkennungsgrenze der Untergrundanzeige ( $\bar{D}_{n,U} = 0$ ) kann berechnet werden zu:

$$X^*(\bar{D}_{n,U}) = 1,65 \cdot \sqrt{u^2(\bar{D}_{n,U} = 0)}$$

Da die gemessene Untergrundanzeige (Mittelwert der zwei Detektoren, siehe Spalte 28) über der Erkennungsgrenze (hier: 7.6 cm<sup>2</sup>) liegt, muss  $\bar{D}_{n,U}$  berücksichtigt werden (s. auch Kap. 6.2).

7.2.3 Netto-Neutronen-Ortsdosis und ihre Unsicherheit

Damit kann die Netto-Neutronen-Ortsdosis (Sp. 40) nach Gl. (11b) und die Unsicherheit (Sp. 41) nach Gl. (14b) berechnet werden.



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

Blatt: 3.1.2.1  
Seite: 21 von 26  
Stand: August 2007

Tab. 14: Berechnung der Netto-Neutronen-Ortsdosis

1	10	19	28	37	38	39	40	41
	$\bar{D}_n$	$u(\bar{D}_n)$	$\bar{D}_{n,U}$	$u(\bar{D}_{n,U})$	$H_n^*(10)$	$u(H_n^*(10))$	$\Delta H_n^*(10)$	$u(\Delta H_n^*(10))$
	cm <sup>-2</sup>	cm <sup>-2</sup>	cm <sup>-2</sup>	cm <sup>-2</sup>	mSv	mSv	mSv	mSv
Gleichung	(9f)	(12f)	(10d)	(12f)	(9e)	(13b)	(11b)	(14b)
Auslegeort 1	65,0	9,5	31,3	5,8	0,029	0,007	0,015	0,006
Auslegeort 2	73,5	10,3	31,3	5,8	0,033	0,008	0,019	0,007
Auslegeort 3	67,5	10,1	31,3	5,8	0,030	0,008	0,016	0,006
Auslegeort 4	76,0	23,0	31,3	5,8	0,034	0,012	0,020	0,011
Auslegeort 5	59,5	25,1	31,3	5,8	0,027	0,013	0,013	0,012
Auslegeort 6	80,0	34,2	31,3	5,8	0,036	0,017	0,022	0,016
Auslegeort 7	424,0	30,2	31,3	5,8	0,191	0,041	0,177	0,038

#### 7.2.4 Erkennungsgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis

Tab. 15: Berechnung der Erkennungsgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis

1	19	37	42	40
	$u(\bar{D}_n (\Delta H = 0))$	$u(\bar{D}_{n,U})$	$X^*$	$\Delta H_n^*(10)$
	cm <sup>-2</sup>	cm <sup>-2</sup>	mSv	mSv
Gleichung	(12f)	(12f)	(16c)	(11b)
Auslegeort 1	6,2	5,8	0,006	0,015
Auslegeort 2	6,6	5,8	0,007	0,019
Auslegeort 3	6,7	5,8	0,007	0,016
Auslegeort 4	20,0	5,8	0,015	0,020
Auslegeort 5	23,5	5,8	0,018	0,013
Auslegeort 6	30,9	5,8	0,023	0,022
Auslegeort 7	7,0	5,8	0,007	0,177

Es ist nun zu prüfen, ob die ermittelte Nettodosis oberhalb der Erkennungsgrenze liegt und somit ein Neutronen-Ortsdosisbeitrag durch die Anlage nicht auszuschließen ist. Die Berechnung erfolgt nach Gl. (16c). Die Nettodosis liegt damit bei den Auslegeorten 1 bis 4 und 7 oberhalb der Erkennungsgrenze.

#### 7.2.5 Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis

Die Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis  $\zeta^*$  wird nach Gl. (17) iterativ berechnet. Der Startwert für  $\zeta^*$  wird üblicherweise mit  $\zeta_0^* = 2 \cdot X^*$  gem. Gl. (18) gewählt. Zunächst wird die Detektoranzeige  $\bar{D}(K, \zeta^*)$  benötigt, die zu einer Netto-Neutronen-Ortsdosis in Höhe von  $\zeta^*$  führt.

Sie kann berechnet werden aus der Untergrundanzeige  $\bar{D}_{n,U}$ , der mittleren Nullanzeige  $D_0$  (Mittelwert aus Sp. 3 und 7) am Auslegeort (Sp. 44), der mittleren durch die Kontamination des Konverters verursachten Anzeige  $\bar{D}_{kon}$  und der neutroneninduzierten Detektoranzeige  $D_n(\zeta^*) = \zeta^* / N_n$ . Mit Gl. (12d) kann daraus die zugehörige Unsicherheit  $u(D_{K,\zeta^*})$  (Sp. 47) berechnet werden, die für  $u(\zeta^*)$  benötigt wird (Sp. 50).



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

Blatt: 3.1.2.1  
 Seite: 22 von 26  
 Stand: August 2007

Mit  $D_n(\zeta^*) = D(K, \zeta^*) - D_{n,U} - \bar{D}_0 - \bar{D}_{kon}$  und

$u(D_n(\zeta^*)) = \sqrt{u^2(D(K, \zeta^*) + D_{n,U}) + u^2(\bar{D}_0) + u^2(\bar{D}_{kon})}$  kann  $u(\zeta^*)$  analog zu Gl. (14b) berechnet werden als

$$u(\zeta^*) = \sqrt{u^2(N_n(KS)) \cdot [D_n(\zeta^*) - D_{n,U}]^2 + N_n^2(KS) \cdot [u^2(D_n(\zeta^*)) + u^2(D_{n,U})]}.$$

Tab. 16: Berechnung der Nachweisgrenze der Nettodosis, 1. Iterationsschritt

1	43	44	45	46	47	48	49	50	51
	$\zeta^*_0$	$\bar{D}_0$	$u(\bar{D}_0)$	$\bar{D}_{kon}$	$u(\bar{D}_{kon})$	$\bar{D}(K, \zeta^*)$	$u(\bar{D}_{K, \zeta^*})$	$u(\zeta^*)$	$\zeta^*_1$
	mSv	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	mSv	mSv
Gleichung								(14b)	(17)
Auslegeort 1	0,016	5,00	2,66	15,5	3,6	87,3	11,3	0,006	0,016
Auslegeort 2	0,018	5,00	2,66	19,0	3,9	95,3	12,0	0,007	0,018
Auslegeort 3	0,018	5,00	2,66	20,0	4,0	96,3	12,1	0,007	0,018
Auslegeort 4	0,036	5,00	2,66	143,5	13,8	259,8	25,4	0,013	0,037
Auslegeort 5	0,038	5,00	2,66	174,0	16,4	294,7	29,0	0,015	0,043
Auslegeort 6	0,052	5,00	2,66	309,0	21,6	460,8	41,7	0,021	0,058
Auslegeort 7	0,046	6,00	2,76	22,5	4,2	162,0	12,4	0,007	0,018

Anm.: In den Sp. 43 und 51 bezeichnet der Index die lfd. Nummer des Iterationsschritts.

Nach dem dritten Iterationsschritt (Tab. 17, Sp. 53) ändern sich die Werte nur noch geringfügig. Die mit der Iteration gewonnenen Werte der Nachweisgrenze sind im Berechnungsbeispiel das 2,5 bis 3-fache der Erkennungsgrenze. Da im Allgemeinen die erreichte Nachweisgrenze um den Faktor 5 bis 10 tiefer als die geforderte Nachweisgrenze der Netto-Neutronen-Ortsdosis von 0,5 mSv liegt, kann deshalb für eine schnelle Abschätzung  $\zeta^* \approx 3 \cdot X^*$  angenommen werden.

Tab. 17: Berechnung der Nachweisgrenze der Nettodosis, Iterationsschritte

1	51	52	53	54	55	56
	$\zeta^*_1$	$\zeta^*_2$	$\zeta^*_3$	$\zeta^*_4$	$\zeta^*_5$	$\zeta^*_6$
	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv	mSv
Gleichung	(17)	(17)	(17)	(17)	(17)	(17)
Auslegeort 1	0,016	0,017	0,018	0,018	0,018	0,018
Auslegeort 2	0,018	0,019	0,019	0,019	0,020	0,020
Auslegeort 3	0,018	0,019	0,019	0,020	0,020	0,020
Auslegeort 4	0,037	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
Auslegeort 5	0,043	0,045	0,045	0,046	0,046	0,046
Auslegeort 6	0,058	0,061	0,062	0,062	0,062	0,062
Auslegeort 7	0,018	0,019	0,020	0,020	0,020	0,020

Anm.: In den Sp. 51 bis 56 bezeichnet der Index die lfd. Nummer des Iterationsschritts.

## 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 [14])

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)
- 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 Korrekturfaktoren 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. Originalmesswerte, Kalibrier- und Korrekturfaktoren für nachträgliche, weitergehende Auswertungen zur Verfügung zu haben.

## **9 Verzeichnis der erforderlichen Geräte**

### **9.1 Moderatoren**

Modifizierte Moderator-kugel der Fa. PTW, D-79115 Freiburg  
Moderator-kugel LB 6412 der Fa. Berthold-Technologies, D-75312 Bad Wildbad

### **9.2 Thermolumineszenz(TL)-Auswertegeräte und -Detektormaterial**

Zur Zeit sind Auswertegeräte z.B. der Firmen Alnor und Bicon und Detektoren der Firmen Thermo und TL-Poland für die Neutronen-Ortsdosimetrie einsetzbar.

### **9.3 Kernspur(KS)-Auswertegeräte und -Detektormaterial**

Makrofol DE 1-4 (Bayer), Coloprint, D-67114 Limburgerhof  
Konverterfolie BN 1 Film, Dosirad, F-77185 Lognes  
Hochspannungsgenerator FG 5 der Fa. PTW, D-79115 Freiburg  
Ätzzellen und Ätzpakete der Fa. PTW, D-79115 Freiburg  
Bildauswertesystem LUCIA, Fa. Nikon

## **10 Bewertung des Verfahrens**

Mit Thermolumineszenzdosimetern oder Kernspur-Dosimetern ist eine Überwachung der Neutronen-Ortsdosis in der Umgebung kerntechnischer Anlagen mit ausreichender Empfindlichkeit und Messgenauigkeit im erforderlichen Dosisbereich durchführbar. Die Untergrunddosis durch natürliche Neutronenstrahlung kann im Allgemeinen vernachlässigt werden. Die in der REI [1] geforderte Nachweisgrenze von 0,5 mSv/a für die Netto-Neutronen Ortsdosis wird bei erhöhter Gamma-Ortsdosis auch mit Thermolumineszenzdosimetern problemlos erreicht.



## 11 Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen, GMBI. Nr. 14-17, 23. März 2006, Seite 254 ff.
- [2] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Artikel 2 § 3 Abs. 31 des Gesetzes vom 1. September 2005 (BGBl. I S. 2618);  
[http://bundesrecht.juris.de/strlschv\\_2001](http://bundesrecht.juris.de/strlschv_2001)
- [3] DIN 6814-3: Begriffe in der Radiologischen Technik - Teil 3: Dosisgrößen und Dosiseinheiten, Kapitel 5.3, Ausgabe 2001-01, Beuth-Verlag
- [4] DIN 25482-10: Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, Teil 10: Allgemeine Anwendungen, Ausgabe: 2000-05, Beuth-Verlag
- [5] Salfeld, H.C; Schulz,.; Messung des Temperaturverlaufs in einer 30 cm-Kugel aus weißem Polyetylen, Persönliche Mitteilung, 2000.
- [6] Cosack, M.; Lesiecki, H.; Dose Equivalent Survey Meters; Radiat. Prot. Dosim. 10(1-4), pp 111-119 (1985)
- [7] Burgkhardt, B.; Fieg, G.; Klett, A.; Plewnia, A.; Siebert, B.R.L.; The neutron fluence and H\*(10) response of the new LB6411 remcounter, Proceedings of the Eight Symposium on Neutron Dosimetry, Paris November 13 - 17, 1995, Rad. Prot. Dosim. Vol. 70, Nos 1-4, p. 361-364 (1997)
- [8] Burgkhardt, B.; Piesch, E.; Urban, M.; Measurement of the Neutron Dose Equivalent Component of the Natural Background using Electrochemically Etched Polycarbonate Detector and Boron-10 Radiator, Proc. 13th Int. Conf. on Solid State Nuclear Track Detectors, Roma 1985, Nuclear Tracks, Vol. 12, pp. 573-576, 1986
- [9] Burgkhardt, B.; Vilgis, M.; Kosbath, O.; Messung kleiner Neutronendosen in der Umgebungsüberwachung mit passiven Detektoren; Bericht KfK 5030, S. 144-146, 1992
- [10] Cosack, M.; Lesiecki, H.; Dependence of the Response of Eight Neutron Dose Equivalent Survey Meters with regard to the Energy and Direction of Incident Neutrons; In Forth Symposium on Neutron Dosimetry, Eur 7448, pp 407-420, CEC, Luxembourg (1981)
- [11] Wiegel, B.; Alevra, A. V.; NEMUS – the PTB Neutron Multisphere Spectrometer: Bonner spheres and more; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 476 (2002) 36-41
- [12] Wiegel, B.; Alevra, A. V.; Matzke, M.; Schrewe, U.J.; Wittstock, J.; Spectrometry using the PTB Neutron Multisphere Spectrometer (NEMUS) at flight altitudes and at ground level; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 476 (2002) 52-57
- [13] Fehrenbacher, G.; Festag, J.G.; Gunzert-Marx, D.; Schardt, F.; Gutermuth, F.; Radon, T.; Neutron Production at the GSI Fragment Separator, GSI Preprint 2002-32.
- [14] DIN 25 483: Verfahren zur Umgebungsüberwachung mit integrierenden Festkörperdosimetern, Ausgabe 2000-09, Beuth-Verlag
- [15] Burgkhardt, B.; Piesch, E.; Estimation of the Build-up of Zero Dose reading in 6LiF Thermoluminescence Dosimeters due to Neutron Produced Tritium, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 2, No. 2, pp. 105-107, 1982
- [16] Burgkhardt, B., Ambrosi, P., Rimpler, A.; Einsatz von Albedodosimetern zur Messung kleiner Dosen in gemischten Photonen-Neutronen-Strahlungsfeldern an Transportbehältern für hochradioaktiven Abfall. Bericht FZKA 6217 (Februar 2000)
- [17] Burgkhardt, B.; Kupschus, A.; Vilgis, M.; Piesch, E.; Dörschel, B.; Polycarbonate Track Etched Detectors for Quantitative Alpha Spectroscopy in Radon Environments; Proceedings in Radiation Protection Dosimetry Vol. 66 Nos. 1-4, pp. 331-334 (1996), Solid State Dosimetrie Conference, Budapest 10-14 Juli, 1995
- [18] Burgkhardt, B.; Hermsdorf, D.; Kadner, K.; Arnold, D.; Luszik-Bhadra, M.; Neumaier, S.; Experience in Long-term Neutron Dose Equivalent Measurements Using Etched-Track Detectors with (n,a) Converters in Moderators; 13th Internat. Conf. On Solid State Dosimetry (SSD 2001), Athinai, GR, July 9-13, 2001



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

Blatt: 3.1.2.1

Seite: 25 von 26

Stand: August 2007

- [19] M. Florek, J. Masarik, I. Szarka, D. Nikodemova, A. Hrabovcova: Natural neutron fluence rate and the equivalent dose in localities with different elevation and latitude. Radiation Protection Dosimetry 67, (1996), 187-192
- [20] A. Bouville, W.H. Lowder, Human Population Exposure to Cosmic Radiation. Radiation Protection Dosimetry 24, (1988), 293-299
- [21] Leitstellen für die Überwachung der Umweltradioaktivität: Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und zur Erfassung radioaktiver Emissionen aus kerntechnischen Anlagen, Loseblattsammlung, Stand: 1.10.2000, Hrsg.: BMU, Urban&Fischer Verlag, OD/ODL-GRUNDL-07
- [22] DIN 1319-3, Grundlagen der Meßtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit, Mai 1996
- [23] Guide to the expression of uncertainty in measurement International Organisation of Standardisation, 1993
- [24] Kosbath, O. ;Messungen mit einem passiven Neutronenortsdosimeter unter Verwendung von Kernspurdetektoren, Praxisbericht KT 88 St, August 1990
- [25] Michel, R.; Kirchhoff, K.; Nachweis-, Erkennungs- und Vertrauensgrenzen bei Kernstrahlungsmessungen, S. 130, FS-99-108-AKSIGMA, ISSN 1013-4506, TÜV-Verlag
- [26] DIN 25482-11: Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, Teil 11: Messungen mit Albedodosimetern, Ausgabe: 2003-02, Beuth-Verlag

---

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



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

Blatt: 3.1.2.1  
Seite: 26 von 26  
Stand: August 2007

**12 Formelzeichen**

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$A$	Zählfläche	cm <sup>2</sup>
$D_K$	Spurendichte des KS-Detektors mit Konverter	cm <sup>-2</sup>
$D_0$	Spurendichte eines Detektorteils ohne Konverter	cm <sup>-2</sup>
$D_{kon}$	Spurendichte für eine Lagerung ohne Beitrag durch therm. Neutronen, Dosisanzeige durch Kontamination der Konverter im KS-Detektor	cm <sup>-2</sup>
$D_n$	Spurendichteanzeige des KS-Detektors für thermische Neutronen	cm <sup>-2</sup>
$\bar{D}_n$	Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer KS-Detektoren	cm <sup>-2</sup>
$\bar{D}_{n,U}$	Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer KS-Detektoren (Untergrundanzeige)	cm <sup>-2</sup>
$D_{n_{th}}$	Spurendichteanzeige des KS-Detektors für thermische Neutronen	cm <sup>-2</sup>
$H_n^*(10)$	Umgebungs-Äquivalentdosis durch Neutronen	mSv
$\Delta H_n^*(10)$	Netto-Neutronen-Ortsdosis	mSv
$H^*(10)_{Kal}$	Neutronen-Ortsdosis bei der Kalibrierung	mSv
$h^*$	Konversionfaktor	
$\Phi_{Kal}$	Neutronenfluenz bei der Kalibrierung	
$k_{1-\alpha}$	Erweiterungsfaktor	-
$k_{1-\beta}$	Erweiterungsfaktor	-
$M$	Detektoranzeige	mSv
$M(NG)$	Anzeige des neutronen- und photonenempfindlichen Detektors	mSv
$M(G)$	Anzeige des photonenempfindlichen Detektors	mSv
$M_n$	Neutronendosisanzeige eines TL-Detektorpärchens	mSv
$\bar{M}_n$	Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer TL-Detektorpärchen	mSv
$\bar{M}_{n,U}$	Mittelwert der Neutronendosisanzeige mehrerer TL-Detektorpärchen (Untergrundanzeige)	mSv
$M_{n_{th}}$	Anzeige des TL-Detektors für thermische Neutronen	mSv
$M_{tri}$	Anzeige für eine Lagerung ohne Beitrag durch therm. Neutronen, Dosisanzeige durch Tritium im TL-Detektor	mSv
$n$	Korrektionsfaktor der unterschiedlichen Zeiten	-
$N$	Anzahl der gezählten Kernspuren	-
$N_n(TL)$	Neutronenkalibrierfaktor für TL-Dosimetriesysteme	-
$N_n(KS)$	Neutronenkalibrierfaktor für KS-Dosimetriesysteme	mSv·cm <sup>2</sup>
$r_k$	Relative Standardunsicherheit im Dosisbereich der Kalibrierdosis zur Ermittlung von $N_k$	-
$u_0$	Standardunsicherheit unbestrahlter Detektoren	mSv
$u(M_v)$	Standardunsicherheit $u(M)$ der Detektor-Anzeige	mSv
$u(N_n(TL))$	Standardunsicherheit des Neutronenkalibrierfaktor für TL-Dosimetriesysteme	-
$u(N_n(KS))$	Standardunsicherheit des Neutronenkalibrierfaktor für KS-Dosimetriesysteme	mSv·cm <sup>2</sup>
$u(H_n^*(10))$	Unsicherheit der Umgebungs-Äquivalentdosis durch Neutronen	mSv
$X^*$	Erkennungsgrenze	mSv
$\zeta^*$	Nachweisgrenze	mSv
$u(\zeta^*)$	Standardunsicherheit an der Nachweisgrenze	mSv