

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin



Bericht

Report

Umgebungsdosimetrie am Transportbehälterlager Gorleben (TBL)

Ausführlicher Teilbericht über Messungen der Neutronen-Ortsdosisleistung
im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt und Klimaschutz

Auftrag vom 31. August 2011

393 00A I

Im Auftrag

Braunschweig, 2011-11-28

Siegel
Seal



Berichte ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Bericht darf nur unverändert weiterverbreitet werden.
Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.
*Reports without signature and seal are not valid. This Report may not be reproduced other than in full.
Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.*

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 2 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 2 of the Report dated 2011-11-28

Inhalt

Vorbemerkung.....	3
1. Referenzdosimetrie und Spektrometrie mit dem PTB Vielkugelspektrometer NEMUS	3
1.1 Das PTB Vielkugelspektrometer NEMUS	3
1.2 Analyse der Rohdaten	4
1.3 Durchführung der Messungen	5
1.3.1 Konzept zur Referenzdosimetrie am Bezugsort	5
1.3.2 Vorbereitende Messungen in der PTB	5
1.3.3 Messungen mit NEMUS am Betriebsgeländezaun des TBL.....	6
1.4 Spektrometrie und Umgebungsäquivalentdosisleistung	9
1.4.1 Entfaltung mit dem Programm MAXED.....	9
1.4.2 Bayes'sche Datenanalyse	12
1.4.3 Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung am Bezugsort	12
2. Ortsdosimetrie für Neutronenstrahlung	13
2.1 Das Ortsdosis-Messgerät.....	13
2.2 Konzept zur Bestimmung der Dosis am ungünstigsten Aufpunkt.....	14
2.3 Bestimmung der Anzeige durch den Neutronenuntergrund auf dem Gelände der PTB	14
2.4 Bestimmung des Maximums der Neutronen-Ortsdosisleistung am Betriebsgeländezaun des TBL	16
2.5 Neutronen-Ortsdosisleistung in verschiedenen Abständen vom Betriebsgeländezaun	20
2.6 Ergänzende Daten für die Dosimetrie am TBL	21
2.6.1 Dosismessungen mit dem LB6411.....	21
2.6.2 Dosismessungen mit dem NLWKN Neutronendosimeter	21
2.6.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Orte am TBL Zaun und auf größere Zeiträume	22
3. Zusammenfassung.....	23
Literaturangaben	24
A. Anhang	26
A.1 Neutronenspektrum.....	26
A.2.1 Messprotokolle für den LB6411 auf dem PTB Gelände	27
A.2.2 Messprotokolle für den LB6411 am Betriebsgeländezaun des TBL.....	28
A.3 Unsicherheitsbudget für den Dosis-Erhöpfungsfaktor.....	31
A.4 Unsicherheitsbudget für die maximale Dosisleistung am TBL Zaun	33

Vorbemerkung

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) wurde vom Land Niedersachsen, vertreten durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt und Klimaschutz, mit Dosismessungen am Transportbehälterlager Gorleben (TBL) beauftragt.

Die von der PTB durchgeführten Messungen wurden unabhängig von bisherigen Messungen durchgeführt, d.h. ohne Verwendung der durch andere Messverfahren bzw. von anderen Organisationen bisher ermittelten Dosiswerte und der dabei verwendeten Auswertemethoden.

Dieser Teilbericht enthält für die Messung der Neutronenstrahlung die ausführliche Beschreibung der eingesetzten Verfahren und eine Zusammenfassung aller Ergebnisse der Untersuchung. Die Messergebnisse werden hiermit vollständig und in nachvollziehbarer Form beschrieben. In Abschnitt 1 wird auf die Referenzdosimetrie und Spektrometrie eingegangen, mit der die Umgebungsäquivalentdosis in unmittelbarer Nähe des NLWKN Neutronendosimeters Nr. 12 am Messhaus 2 mit der geringstmöglichen Unsicherheit bestimmt wurde. Abschnitt 2 beschreibt dann die Untersuchungen zur Bestimmung des ungünstigsten Aufpunkts am Zaun des TBL, also dem Ort mit der maximalen Umgebungsäquivalentdosis, und gibt ergänzende Daten zur Dosimetrie am TBL.

Dieser Teilbericht ergänzt den Bericht der PTB vom 20.09.2011, der sich auf die kurze Beschreibung der eingesetzten Verfahren und eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung beschränkte. In einem separaten Teilbericht werden die Messungen der Gammastrahlung ausführlich beschrieben.

1. Referenzdosimetrie und Spektrometrie mit dem PTB Vielkugelspektrometer NEMUS

1.1 Das PTB Vielkugelspektrometer NEMUS

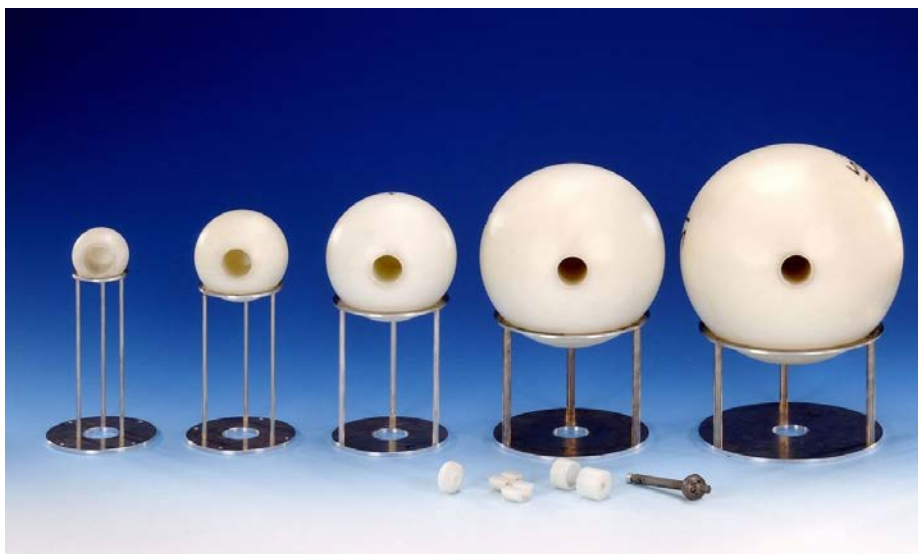


Abbildung 1: Vielkugelspektrometer NEMUS: Auswahl an Polyethylen-Kugeln, im Vordergrund ein mit ^3He Gas gefüllter Proportionalzähler vom Typ SP9.

Das Vielkugelspektrometer NEMUS (Typ Bonnerkugel-Spektrometer (Bramblett et al., 1960)) ist das Sekundärnormal der PTB zur Weitergabe der Einheit für die Umgebungsäquivalentdo-

sis für Neutronenstrahlung in unbekannten Strahlungsfeldern, wie zum Beispiel an Arbeitsplätzen und für die Neutronenkomponente der natürlichen Umgebungsstrahlung. NEMUS besteht aus einem Satz von Moderatorkugeln aus Polyethylen mit unterschiedlichen Durchmessern, und einem für thermische („langsame“) Neutronen empfindlichen Detektor im Zentrum jeder einzelnen Kugel (Wiegel and Alevra, 2002). Um das Neutronenstrahlungsfeld vollständig bis in den Energiebereich von Millielektronenvolt (meV) zu vermessen wird zusätzlich ein solcher Detektor ohne Moderatorkugel betrieben (hier als „nackter Detektor“ bezeichnet). In NEMUS werden als Detektoren kugelförmige, mit ^3He Gas gefüllte Proportionalzähler vom Typ SP9 der Fa. Centronic Ltd, England, benutzt. Am TBL wurde mit neun Kugeln mit den Durchmessern 3", 3.5", 4.5", 5", 6", 7", 8", 10" und 12" gemessen, sowie mit einem nackten Detektor. Die "-Zeichen an den Zahlen stehen für die Einheit *Inch* und spiegeln den amerikanischen Ursprung des Spektrometers wider. Die Moderatorkugeln haben Durchmesser von 7.62 cm bis 30.48 cm¹. Abbildung 1 zeigt eine Auswahl der verwendeten Kugeln, einen ^3He Proportionalzähler und Detektorfixierungsteile, ebenfalls aus Polyethylen.

Jede Kombination aus Moderatorkugel und Detektor hat ein unterschiedliches Energie-Ansprechvermögen auf von außen einfallende Neutronen. Die Neutronenflussdichte des äußeren Neutronenstrahlungsfeldes kann aus den Zählraten der verschiedenen Kugeln und deren bekannten Ansprechvermögen mithilfe mathematischer Entfaltungsverfahren (Reginatto, 2010) bestimmt werden. Die Umgebungsäquivalentdosisleistung wird anschließend durch Faltung des zuvor bestimmten Neutronenspektrums (Neutronenflussdichte als Funktion der Neutronenenergie) mit den Fluenz-zu-Umgebungsäquivalentdosis Konversionsfaktoren (ICRP, 1997) berechnet. Das Spektrometer ist unempfindlich gegenüber Gammastrahlung. Die Konversionsfaktoren schließen jedoch die Dosis von Gammastrahlung (sekundäre Gammastrahlung) ein, die durch Neutronen im Körper einer Person induziert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Neutronenspektrometrie mit Bonnerkugel-Spektrometern haben Alevra und Thomas (2003) gegeben.

1.2 Analyse der Rohdaten

Dieser Abschnitt beschreibt, wie man aus den mit NEMUS gemessenen Daten ("Rohdaten") die Eingabewerte für die mathematische Entfaltung gewinnt, die den zweiten Schritt der Datenanalyse darstellt.

Jedes Signal aus einem ^3He Proportionalzähler wird über einen ladungsempfindlichen Vorverstärker, einen Hauptverstärker in einen Analog-zu-Digital Konverter (ADC) eingespeist. Mit einem Vielkanalanalysator (MCA) wird das Pulshöhenspektrum der im ^3He Proportionalzähler deponierten Energien gemessen. Signale mit sehr kleinen Amplituden stammen von elektromagnetischem Rauschen und von Photonen, die von außen auf die Moderatorkugel treffen oder im Polyethylen von Neutronen produziert wurden. Es gibt eine klare Trennung zwischen diesen Ereignissen und denen, die von der äußeren Neutronenstrahlung herrühren. Für die Auswertung wird die Anzahl der pro Zeiteinheit von Neutronen im Zähler verursachten Ereignisse benötigt, also die Summe der Kanalinhalt oberhalb der gewählten Pulshöhenschwelle. Auf diese Weise erhält man für jede Kugel mit Durchmesser d eine gemessene Zählrate $\dot{N}(d)$.

¹ Bei allen Zahlenangaben in diesem Bericht wird der Punkt als Dezimaltrennzeichen verwendet. Die Zahlen in den Tabellen wurden in der Regel direkt aus Datenverarbeitungsprogrammen übernommen. Sie wurden für die Darstellung gerundet. Die Weiterverwendung der gerundeten Zahlen kann zu geringfügig anderen Ergebnissen führen.

1.3 Durchführung der Messungen

1.3.1 Konzept zur Referenzdosimetrie am Bezugsort

Zur Bestimmung der Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung² wurden zwei vom Ansatz her unterschiedliche Verfahren durchgeführt. Für das erste Verfahren wurden darüber hinaus zwei unterschiedliche mathematischen Methoden verwendet.

1. Aus den Netto-Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}$ wurde das Netto-Spektrum (das Spektrum der vom TBL ausgehenden Neutronen) ermittelt und daraus die Netto-Dosisleistung berechnet. Dabei wurde das Netto-Spektrum
 - a. mit dem Programm MAXED und
 - b. unter Verwendung Bayes'scher Methodenberechnet (Details siehe Abschnitt 1.4).
2. Mit Hilfe der Brutto-Zählraten $\dot{N}_{\text{TBL}}$ wurde das Brutto-Spektrum (das Gesamtspektrum am Messort, also die Summe aus den Beiträgen vom TBL und von kosmischer Strahlung) bestimmt. Daraus wurde die gesamte Dosis am Messort berechnet. Die Netto-Dosis ergibt sich dann nach Abzug der Dosis von kosmischer Strahlung, die separat auf dem PTB-Gelände gemessen wurde.

1.3.2 Vorbereitende Messungen in der PTB

Vom 4. bis 8. September 2011 wurden auf dem Gelände der PTB in Braunschweig auf einer Freifläche vorbereitende Messungen mit NEMUS durchgeführt. Diese Messungen hatten zwei Ziele:

1. Funktionsprüfung aller Komponenten von NEMUS.
2. Bestimmung der Anzeigen durch die natürliche Komponente der Neutronenstrahlung, d. h. der Neutronen aus der kosmischen Strahlung in einer Höhe von 74 m ü. NHN, einer geographischen Breite von 52°18'N und einem Luftdruck zwischen 991 hPa und 1006 hPa.

Die Höhe über Normalhöhennull (NHN), die geographische Breite und der Luftdruck sind die Parameter, die die Intensität der Neutronenkomponente aus der kosmischen Strahlung auf dem Erdboden bestimmen. Der Unterschied der Neutronenflussdichte in Abhängigkeit von der geografischen Breite ist für die kleine Differenz zwischen Braunschweig und Gorleben (TBL: 53° 3'N) vernachlässigbar. Der Unterschied in der Höhe (Höhe am Zaun des TBL ist 23 m ü. NHN) wird durch die kontinuierliche Messung des Luftdruckes berücksichtigt, ebenso wie der unterschiedliche Luftdruck auf Grund der unterschiedlichen Wetterlagen an den beiden Messorten. Somit ist der Luftdruck der einzige Parameter, der für die Skalierung der auf dem PTB Gelände gemessenen Neutronenflussdichte notwendig ist, um für die Messungen am TBL den Beitrag der kosmischen Strahlung zur Neutronen-Umgebungsäquivalentdosisleistung subtrahieren zu können.

² Mit *Netto-Zählrate*, *Netto-Spektrum* und *Netto-Umgebungsäquivalentdosis(leistung)* werden in diesem Bericht die Beiträge zur Zählrate, zum Spektrum und zur Umgebungsäquivalentdosis bezeichnet, die ausschließlich vom TBL stammen, bei denen also die Beiträge durch natürliche Strahlung oder Eigenuntergrund von Detektoren abgezogen wurden.

1.3.3 Messungen mit NEMUS am Betriebsgeländezaun des TBL

Die Messungen mit NEMUS am nördlichen Betriebsgeländezaun des TBL wurden vom 9. bis 13. September 2011 durchgeführt. Die unterschiedlich großen Kugeln wurden, jeweils mit einem ^3He Proportionalzählrohr bestückt, einzeln in Aluminiumkisten untergebracht zusammen mit einem Elektronikmodul (Hochspannungseinheit, Vorverstärker, Hauptverstärker und Diskriminator), siehe Abbildung 2, links, und mit Aluminiumständern in etwa 1 m Höhe über dem Boden aufgestellt (Abbildung 2, rechts). Der „Bezugsort“³ des NEMUS Spektrometers ist definiert bei 3.5 m westlich der Neutronen-Messstelle Nr. 12 des NLWKN.



Abbildung 2: Messaufbau mit NEMUS am nördlichen Zaun des TBL. Links: Blick in eine geöffnete Aluminiumkiste mit der 12" Kugel mit eingebautem ^3He Zähler und Elektronikmodul. Rechts: sechs parallel betriebene Kugeln in Aluminiumkisten unter dem Zelt, direkt am Zaun in 1 m Höhe über dem Boden. Auf dem Bild zusätzlich zu sehen: Kabeltrommeln für die Stromversorgung der Elektronikmodule (unter den roten Plastikplanen), links die 30 cm Messkugel des NLWKN (Messstelle Nr. 12) und im Hintergrund der PTB LB6411 (unter der blauen Plastikplane).



Abbildung 3: Messaufbau mit NEMUS am nördlichen Zaun des TBL (Fortsetzung). Links: Module für die Datenaufnahme im Messhaus 2: zwei 4-fach ADC, ein Vielkanalanalysator pro Datenzweig inkl. Ethernet-Switches. Rechts: Notebook mit dem Display von 6 Pulshöhenspektren.

³ In dem Bericht der PTB vom 20.09.2011 wurde der Begriff *Referenzort* benutzt. Da dieser Begriff in der Diskussion um die Messungen am TBL auch in einem anderen Sinn (und zwar als Ort, an dem kein Dosisbeitrag vom TBL nachgewiesen werden kann) genutzt wird, wird im vorliegenden Bericht der Begriff *Bezugsort* gewählt.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 7 zum Bericht vom 2011-11-28
Page 7 of the Report dated 2011-11-28

Von jeder Kiste wurden zwei Signalkabel in das Messhaus 2 geführt, in dem sich weitere Module für die Datenaufnahme befanden (Abbildung 3, links), und zwar 4-fach ADC, Vielkanalanalysatoren (einer pro Datenzweig) und Ethernet-Switches zur Zusammenfassung der Datenzweige zur Weiterleitung an einen Laptop mit der Datenaufnahmesoftware (Abbildung 3, rechts). Die Daten wurden als Pulshöhenspektren auf der Festplatte gespeichert.

Bei den Messungen auf dem PTB Gelände und am Zaun des TBL wurde parallel mit sechs Datenaufnahmeweigen gemessen. D. h. es waren immer sechs Kugeln parallel im Einsatz, wobei die 5" Kugel mit 12.7 cm Durchmesser die gesamte Messkampagne unverändert blieb. Alle anderen Kugeln wurden innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit ausgetauscht. Auf diese Weise kamen die oben genannten neun Kugeln und der nackte Detektor zum Einsatz.

Entsprechend den Erfahrungen bei früheren Messungen der Umgebungsstrahlung, wurden die Messzeiten der Einzelmessungen zu 7200 s festgelegt, wobei die Gesamtmesszeiten pro Kugel bis zu 80 h betrugen, abhängig von der beobachteten Zählrate. Die insgesamt 178 Einzelmessungen (je 7200 s) auf dem PTB Gelände sind mit relativen statistischen Unsicherheiten zwischen 10 % und 15 % behaftet. Die relativen statistischen Unsicherheiten der aus den Einzelmessungen gebildeten Mittelwerte liegen zwischen 1.8% und 3.8 %. Für die 201 Einzelmessungen am Zaun des TBL liegen die entsprechenden Werte der relativen statistischen Unsicherheiten zwischen 1 % und 7 % und für die Mittelwerte zwischen 0.3 % und 1.5 %. Die Berechnung aller Unsicherheiten erfolgte gemäß den Vorschriften des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM, 1995). Alle Unsicherheiten in diesem Bericht werden als Standardunsicherheiten angegeben (Erweiterungsfaktor $k = 1$).

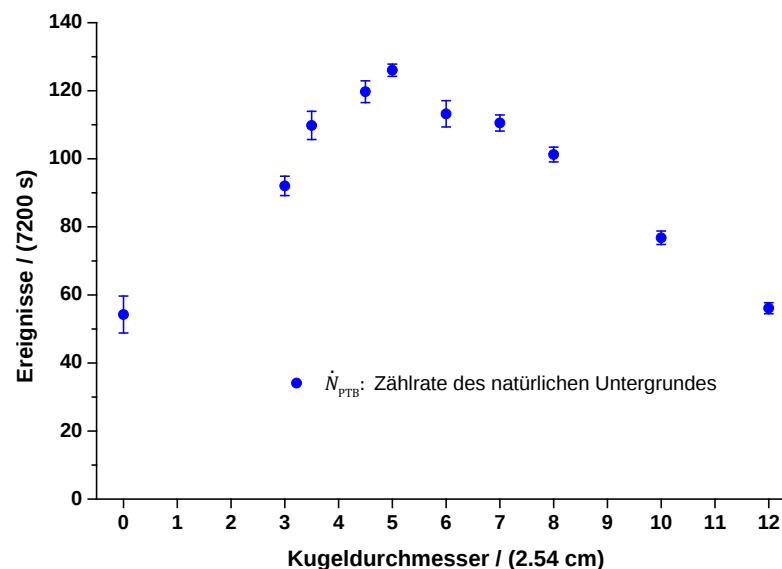


Abbildung 4: Neutronenereignisse $\dot{N}_{\text{PTB}}(d)$ pro 7200 s für die unterschiedlichen Kugeln des NEMUS Spektrometers, gemessen auf dem Gelände der PTB.

Ein wichtiges Werkzeug für die Beurteilung der Konsistenz der Messergebnisse mit den verschiedenen Kugeln ist die Darstellung der ermittelten Zählraten als Funktion des Kugeldurchmessers (Alevra and Thomas, 2003). Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Messungen mit NEMUS auf dem PTB Gelände. Um später den Beitrag der Neutronen aus der kosmischen Strahlung von den in Gorleben gemessenen Werten für jede Kugel einzeln abziehen zu können, wurden die in der PTB gemessenen Daten den Messbedingungen in Gorleben an-

gepasst. Wie oben ausgeführt geschieht dies durch eine Korrektur, die die Luftdruckdifferenz $\Delta p(d) = p_{\text{TBL}}(d) - p_{\text{PTB}}(d)$ während der Messzeiten der Kugel mit Durchmesser d am TBL und in der PTB berücksichtigt. Die auf die Messbedingung in Gorleben angepassten Messwerte des natürlichen Untergrundes berechnen sich nach:

$$\dot{N}'_{\text{PTB}}(d) = \dot{N}_{\text{PTB}}(d) \cdot (1 - \Delta p(d) \cdot \beta)$$

mit $\beta = 0.7 \text{ \%/hPa}$ (Leuthold et al. 2007, Rühm et al. 2009).

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Messungen am Betriebsgeländezaun des TBL. Dabei repräsentieren die Kreise die Messwerte $\dot{N}_{\text{TBL}}(d)$ ohne Abzug des Beitrags durch die natürliche Untergrundstrahlung. Die Quadrate sind die mit Hilfe der Werte $\dot{N}'_{\text{PTB}}(d)$ berechneten Netto-Zählraten:

$$\dot{N}'_{\text{TBL}}(d) = \dot{N}_{\text{TBL}}(d) - \dot{N}'_{\text{PTB}}(d) = \dot{N}_{\text{TBL}}(d) - [\dot{N}_{\text{PTB}}(d) \cdot (1 - \Delta p(d) \cdot \beta)].$$

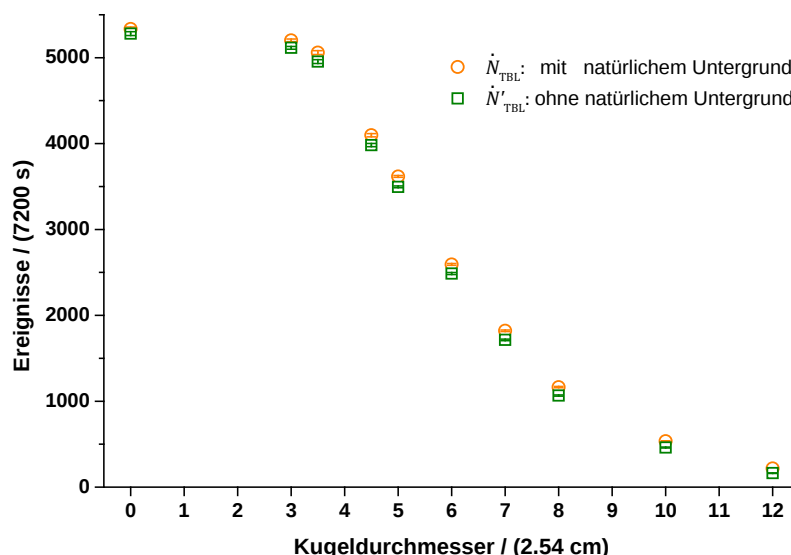


Abbildung 5: Neutronenereignisse pro 7200 s für die unterschiedlich großen Kugeln des NEMUS Spektrometers gemessen zwischen dem 9. und 13. September am Betriebsgeländezaun des TBL Gorleben. Orange Kreise: Messwerte $\dot{N}_{\text{TBL}}(d)$ ohne Korrektur auf den Beitrag durch die natürliche Untergrundstrahlung, grüne Quadrate: Netto-Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}(d)$ nach Abzug des auf den Luftdruck korrigierten Beitrags durch Neutronen aus der kosmischen Strahlung.

Der Luftdruckkorrekturfaktor $F(d) = (1 - \Delta p(d) \cdot \beta)$ hat Werte zwischen 0.94 und 1.00. Die in den Abbildungen 4 und 5 gezeigten Daten sind in Tabelle 1 als Zahlenwerte zusammengestellt.

Mit dem nackten Detektor wurden keine vorbereitenden Messungen auf dem PTB Gelände durchgeführt, sondern es wurden ältere Messungen genutzt (ebenfalls auf dem PTB Gelände durchgeführt), um einen Wert für die Untergrundanzeige des nackten Detektors zu gewinnen. Der Netto-Zählrate für den nackten Detektor wurde daher eine, im Vergleich zu den anderen Kugeln, große relative Unsicherheit von 10 % zugewiesen. Die Standardunsicherheiten der übrigen Nettozählraten wurden gemäß GUM berechnet. Sie betragen zwischen 1.5 % und 3.8 %.

Tabelle 1: Zählraten $\dot{N}(d)$ mit Standardunsicherheiten $s(\dot{N})$, Luftdruck p für die Messungen am TBL und in der PTB sowie Luftdruck-Korrektur $F(d)$ und Netto-Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}(d)$ mit Standardunsicherheiten $s(\dot{N}'_{\text{TBL}})$.

Kugel- name	$d /$ cm	Messungen am TBL			Messungen in der PTB			$F(d)$	Netto-Daten	
		$\dot{N}_{\text{TBL}}(d) /$ (2h) ⁻¹	$s(\dot{N}_{\text{TBL}}) /$ (2h) ⁻¹	$p_{\text{TBL}} /$ hPa	$\dot{N}_{\text{PTB}}(d) /$ (2h) ⁻¹	$s(\dot{N}_{\text{PTB}}) /$ (2h) ⁻¹	$p_{\text{TBL}} /$ hPa		$\dot{N}'_{\text{TBL}}(d) /$ (2h) ⁻¹	$s(\dot{N}'_{\text{TBL}}) /$ (2h) ⁻¹
nackt	---	5335	22.05	1001.0	54.2	5.42	---	1.00	5280.9	22.7
3"	7.62	5202	15.80	1004.6	92.0	2.85	997.3	0.95	5115.2	16.0
3.5"	8.89	5060	22.04	1002.9	109.8	4.15	995.6	0.95	4955.5	22.4
4.5"	11.43	4098	18.50	1002.9	119.7	3.20	997.3	0.96	3982.7	18.8
5"	12.70	3618	10.47	1004.0	126.0	1.81	998.5	0.96	3496.4	10.6
6"	15.24	2593	10.87	1004.6	113.2	3.87	995.6	0.94	2487.1	11.5
7"	17.78	1821	8.89	1002.0	110.5	2.37	996.5	0.96	1714.3	9.2
8"	20.32	1165	7.27	1004.6	101.3	2.16	1000.5	0.97	1066.5	7.6
10"	25.40	535	4.83	1002.0	76.8	1.98	996.5	0.96	461.4	5.2
12"	30.48	218	3.15	1004.6	56.1	1.61	1000.5	0.97	163.5	3.5

1.4 Spektrometrie und Umgebungsäquivalentdosisleistung

Die mit den NEMUS Daten (Zählraten $\dot{N}_{\text{TBL}}(d)$ der verschiedenen Kugeln) gewonnene Umgebungsäquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ wurde mit zwei unterschiedlichen Analyseverfahren bestimmt, die im Folgenden beschrieben werden. Zum Einen die Entfaltung der NEMUS Messdaten zur Bestimmung der spektralen Neutronenfluenz (kurz Spektrum genannt) und anschließende Faltung dieses Spektrums mit den Fluenz-zu-Umgebungsäquivalentdosis Konversionsfaktoren. Zum Anderen die Datenanalyse der NEMUS Messdaten mit Bayes'schen Methoden, bei denen mit Hilfe von Modellparametern direkt die Umgebungsäquivalentdosis bestimmt wird.

1.4.1 Entfaltung mit dem Programm MAXED

Das Entfalteprogramm MAXED (Reginatto and Goldhagen, 1999; Reginatto, Goldhagen and Neumann, 2002) basiert auf dem Prinzip der "Maximum Entropie". Als Eingabe werden drei Informationen benötigt: die Messdaten in Form von Zählraten, hier die in Tabelle 1 aufgeführten Werte $\dot{N}_{\text{TBL}}(d)$ bzw. $\dot{N}'_{\text{TBL}}(d)$ (inklusive der Standardunsicherheiten), die Antwortfunktion des Spektrometers und ein Startspektrum (*default spectrum* genannt), das eventuelle Vorinformationen enthält, z. B. aus vorliegenden Teilchentransportrechnungen. Das Ergebnis des Programms ist das gesuchte Spektrum des Neutronenstrahlungsfeldes. Die für das NEMUS Spektrometer berechneten Antwortfunktionen wurden experimentell vollständig validiert (Alevra *et al.*, 1992; Thomas *et al.*, 1994; Wiegel *et al.*, 1994) und somit liefert das Spektrometer eine auf die Primärnormale der PTB rückführbare Neutronenflussdichte.

In den folgenden Spektren und Tabellen sind, soweit nicht anders vermerkt, Neutronenflussdichten in der Einheit $\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ und die Umgebungsäquivalentdosisleistung in der Einheit nSv h^{-1} angegeben. Im vorangegangenen Teil des Berichts wurden die Zählraten als Ereignisse pro 7200 s (pro 2 Stunden) angegeben.

In den Abbildungen 6 bis 8 sind die durch die Entfaltung bestimmten Spektren grafisch dargestellt. Dabei wird die energieabhängige Neutronenflussdichte in der in der Neutronenspekt-

rometrie üblichen "Lethargie-Darstellung" aufgetragen: Auf der Ordinate ist auf einer linearen Skala die Flussdichte pro logarithmischem Energieintervall, also die Größe

$$\varphi_E \cdot E = \frac{d\varphi(E)}{dE} \cdot E = \frac{d\varphi(E)}{d \ln(E)}$$

als Funktion der Neutronenenergie E aufgetragen, wobei die Energieskala eine logarithmische Einteilung hat. Der Vorteil dieser Darstellung ist, dass die Fläche unter der Kurve proportional zur Flussdichte im entsprechenden Energieintervall ist.

Wie in Abschnitt 1.3.1 beschrieben, wurden zwei unterschiedliche Verfahren gewählt, um aus den Neutronenspektren die Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung zu bestimmen. Aus den Netto-Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}$ wurde das Netto-Spektrum (das Spektrum der vom TBL ausgehenden Neutronen) ermittelt. Zusätzlich wurde mit Hilfe der Brutto-Zählraten $\dot{N}_{\text{TBL}}$ das Brutto-Spektrum (das Gesamtspektrum am Messort, also die Summe aus den Beiträgen vom TBL und von kosmischer Strahlung) bestimmt.

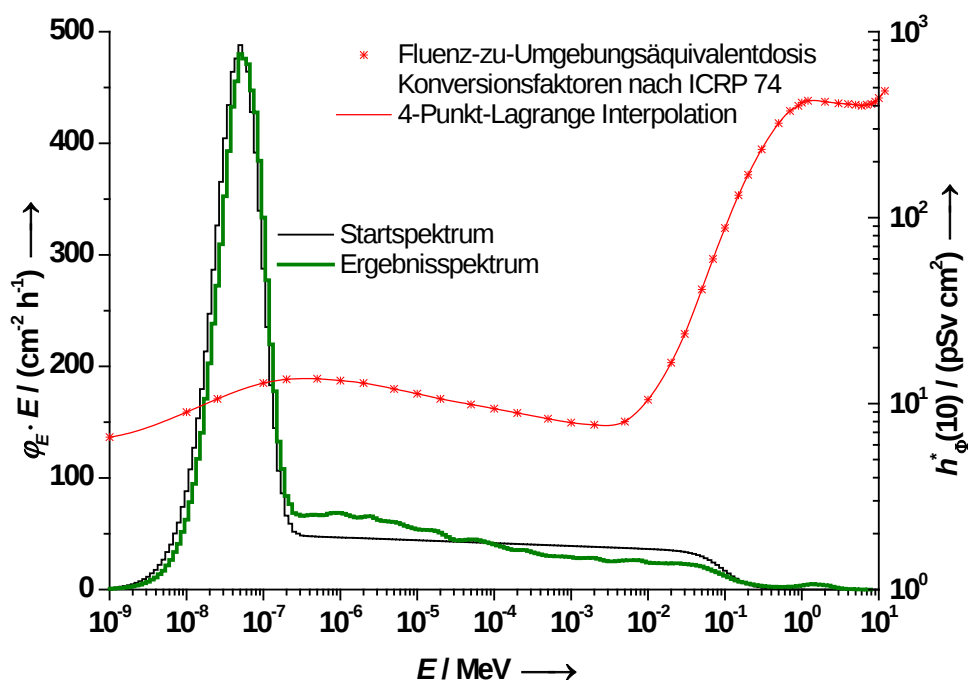


Abbildung 6: Spektrum der Neutronenstrahlung nach Abzug der kosmischen Strahlung, entfaltet mit den Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}(d)$. Das Diagramm zeigt das Startspektrum (schwarz) und das Ergebnisspektrum (grün), linke Ordinate. Die roten Sterne und Kurve sind die Fluenz-zu-Umgebungsäquivalentdosis Konversionsfaktoren nach ICRP 74 und die kontinuierliche Funktion entsprechend der Interpolationsvorschrift, rechte Ordinate.

Das Netto-Spektrum der Neutronenstrahlung, also der von der Halle des TBL ausgehenden Neutronen, ist in Abbildung 6 gezeigt. Für diese Entfaltung der Netto-Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}(d)$ wurde als Startspektrum das Ergebnis einer früheren Berechnung des Neutronenspektrums außerhalb einer Lagerhalle verwendet (Wortmann and Stratmann, 2004), da durch die Abschirmwirkung des Walls, der die Strahlung um mehrere Größenordnungen abschwächt, keine direkten Neutronen am Messort erwartet werden. Das Ergebnisspektrum (im Anhang A-1 sind die zugrunde liegenden Zahlenwerte aufgeführt) ist die Grundlage zur Berechnung der von den Castoren in der TBL-Halle erzeugten Umgebungsäquivalentdosisleistung am Bezugspunkt des Spektrometers (3.5 m westlich der Neutronenmessstelle Nr. 12), siehe unten.

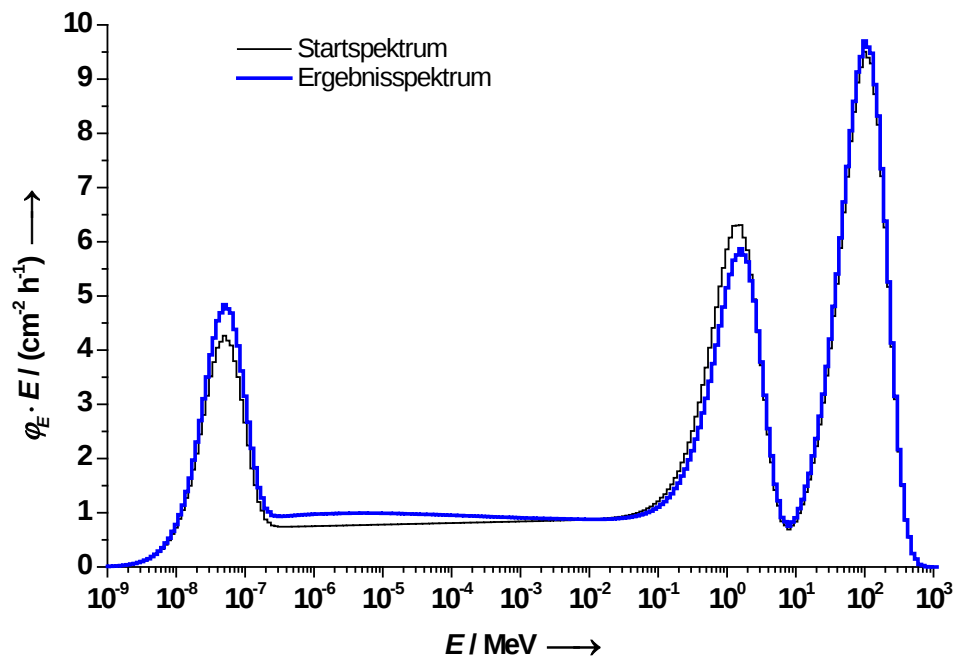


Abbildung 7: Spektrum der Neutronenkomponente der kosmischen Strahlung auf dem PTB Gelände, entfaltet mit den Zählraten $\dot{N}_{\text{PTB}}(d)$. Das Diagramm zeigt das Startspektrum (schwarz) und das Ergebnisspektrum (blau).

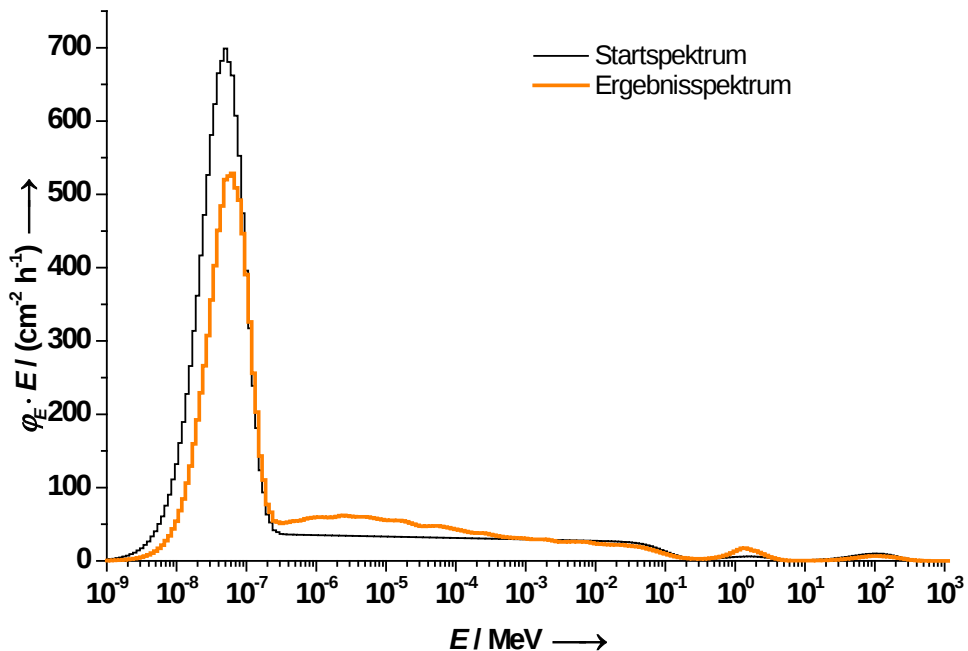


Abbildung 8: Spektrum der gesamten Neutronenstrahlung am Messort am TBL Zaun (also einschließlich kosmischer Strahlung), entfaltet mit den Zählraten $\dot{N}_{\text{TBL}}(d)$ aus Abbildung 5. Das Diagramm zeigt das Startspektrum (schwarz) und das Ergebnisspektrum (orange).

Das Spektrum der Neutronenkomponente der kosmischen Strahlung auf dem PTB Gelände zwischen dem 4. und 8. September 2011 ist in Abbildung 7 gezeigt. Als Startspektrum wurde das Spektrum einer Messung auf dem PTB Gelände im Jahr 2005 verwendet. Aus Zeitgründen wurden nur die am TBL zum Einsatz kommenden Kugeln benutzt. Dies ermöglichte die

Funktionskontrolle und die Bestimmung des Anteils an den Zählraten, die von kosmischer Strahlung verursacht wurden. Für die genaue Messung des Neutronenspektrums für den gesamten Energiebereich, also auch oberhalb von etwa 10 MeV, werden weitere, "modifizierte" Kugeln des NEMUS Spektrometers benötigt (Wiegel and Alevra, 2002). Die sehr gute Übereinstimmung des Ergebnisses mit dem Startspektrum zeigt, dass die Ergebnisse der verwendeten Kugeln mit denen früherer Messungen konsistent sind.

In Abbildung 8 ist das Spektrum der Summe der Neutronenstrahlung von den Castoren in der Halle des TBL einschließlich des Untergrundes aus der kosmischen Strahlung dargestellt. Das hier verwendete Startspektrum ist die Summe aus den Startspektren, die zu den in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigten Ergebnissen führen.

1.4.2 Bayes'sche Datenanalyse

Die Bayes'sche Datenanalyse (Sivia and Skilling, 2006) der Netto-Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}(d)$ wurde als zweite, unabhängige Methode durchgeführt, (Methode 1b in Abschnitt 1.3.1). Dabei wurde die von Reginatto (2006 und 2009) beschriebene Vorgehensweise befolgt unter Verwendung eines Modells für das erwartete Spektrum, das einen thermischen Peak, eine intermediäre Region und einen Evaporations-Peak erlaubt. Die Bayes'sche Analyse liefert als Ergebnis eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die Umgebungsäquivalentdosisleistung (Abbildung 9). Deren wahrscheinlichster Wert ist das gesuchte Ergebnis, die Breite der Funktion ist gleichzeitig ein Maß für die Standardunsicherheit. Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden werden weiter unten miteinander verglichen.

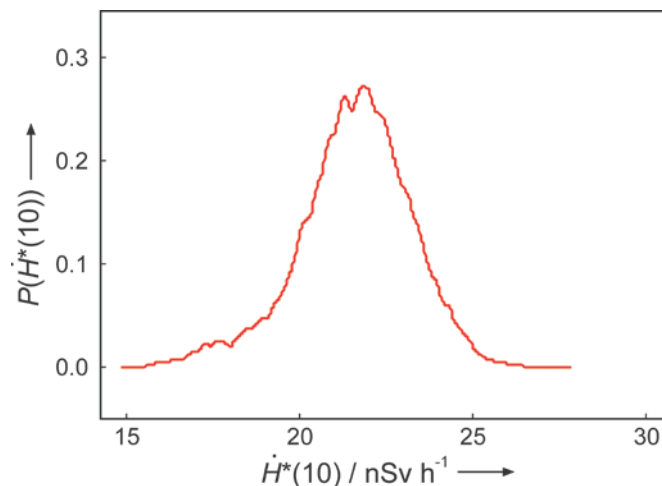


Abbildung 9: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Netto-Dosisleistung am Ort des NEMUS Spektrometers, ermittelt aus der Bayes'schen Datenanalyse. Daraus ergibt sich ein wahrscheinlichster Wert von 21.6 nSv/h mit einer Standardunsicherheit von 1.7 nSv/h.

1.4.3 Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung am Bezugsort

Für die Berechnung der Umgebungsäquivalentdosisleistung wird die vorgegebene Interpolationsvorschrift der tabellierten Fluenz-zu-Umgebungsäquivalentdosis Konversionsfaktoren nach ICRP 74 (ICRP, 1997) benutzt (siehe Abb. 6). Die starke Energieabhängigkeit der Konversionsfaktoren führt dazu, dass der am TBL Zaun beobachtete, und gegenüber der Neutronenstrahlung natürlichen Ursprungs deutlich erhöhte Anteil von niederenergetischen Neutronen (also mit Energien unterhalb von etwa 100 keV) relativ wenig zur Dosisleistung beiträgt.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 13 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 13 of the Report dated 2011-11-28

Die Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung für den Bezugsort des NEMUS Spektrometers wurde mit unterschiedlichen Methoden aus den Spektren berechnet, siehe Abschnitt 1.3.1.

Methode 1a: Die Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung wird aus dem in Abbildung 6 gezeigten Netto-Spektrum berechnet, das mit MAXED entfaltet wurde mit den Netto-Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}(d)$ als Eingabedaten.

Methode 1b: Die Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung wird mit dem in Abschnitt 1.4.2 beschriebenen Verfahren berechnet, wobei die Netto-Zählraten $\dot{N}'_{\text{TBL}}(d)$ als Eingabedaten genutzt wurden. Sie ergibt den mit der Bayes'schen Methode bestimmten Wert aus der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.

Methode 2: Die Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung wird berechnet als Differenz des Wertes für das Gesamtspektrum am TBL (aus dem in Abbildung 8 gezeigten Spektrum berechnet, das mit MAXED aus den Gesamt-Zählraten $\dot{N}_{\text{TBL}}(d)$ entfaltet wurde), und dem Wert für das Spektrum kosmischer Neutronen (aus dem in Abbildung 7 gezeigten Spektrum berechnet, das mit MAXED aus den auf dem PTB Gelände gemessenen Zählraten $\dot{N}_{\text{PTB}}(d)$ entfaltet wurde).

Alle drei Methoden liefern konsistente Werte, wie aus Tabelle 2 ersichtlich. Als wahrscheinlichster Wert wird der Mittelwert der drei Ergebnisse verwendet. Da die Bayes'sche Datenanalyse die einzige Methode ist, die zu einer aussagekräftigen Unsicherheit führt, wird dieser Wert dem Endergebnis als Unsicherheit zugewiesen.

Tabelle 2: Netto-Umgebungsäquivalentdosisleistung, berechnet nach verschiedenen Methoden

Methode	$\dot{H}^*(10) / \text{nSv h}^{-1}$	$s(\dot{H}^*(10)) / \text{nSv h}^{-1}$
1a	21.2	
1b	21.6	1.7
2	19.7	
Mittelwert	20.8	1.7

2. Ortsdosimetrie für Neutronenstrahlung

2.1 Das Ortsdosis-Messgerät

Das verwendete Messgerät ist vom Typ *Neutronensonde LB6411* (Seriennummer 113969-1068) in Verbindung mit dem batteriebetriebenen Anzeigegerät/Datenlogger *UMo LB123* (Seriennummer 111797-1853) des Herstellers Berthold Technologies GmbH. Das Messgerät wurde vorab in den Referenzstrahlungsfeldern der PTB entsprechend der Norm ISO 8529 kalibriert. Der Kalibrierfaktor für das Strahlungsfeld einer ^{252}Cf Neutronenquelle beträgt $N_{\text{Cf}} = 0.976 \pm 0.013$ und der Nulleffekt (Anzeige ohne Vorhandensein von Strahlung) ist kleiner als 2 nSv/h (Kalibrierschein 6.5-12/10 vom 27.07.2010). Der Nenngebrauchsbereich des Geräts wird vom Hersteller mit 30 nSv/h bis 100 mSv/h angegeben. Für die Bestimmung der Netto-Dosisleistung am TBL Zaun muss der Anteil der natürlichen Strahlung subtrahiert werden. Dieser Anteil liegt außerhalb des Nenngebrauchsbereichs (siehe Abschnitt 2.3). Diese

Messungen verlangen daher besondere Sorgfalt und machen zusätzliche Untersuchungen zum Nulleffekt des verwendeten Messgeräts erforderlich.

Mit dem LB6411 wurden Messungen an verschiedenen Orten entlang des Betriebsgeländezauns des TBL durchgeführt, um die Stelle mit der maximalen Umgebungsäquivalentdosisleistung zu bestimmen. Weitere Messungen, senkrecht zur Zaunrichtung, dienten der Abklärung der Abhängigkeit der Dosiswerte vom Abstand von der TBL Halle. Die Messdauer an jedem Ort betrug mindestens 4 Stunden. Sie wurde aufgeteilt in Intervalle von 20 Minuten, um aus der Schwankung der Messergebnisse in diesen Intervallen die statistische Unsicherheit des Anzeigewerts zu bestimmen.

2.2 Konzept zur Bestimmung der Dosis am ungünstigsten Aufpunkt

Zur Bestimmung der Netto-Dosisleistung am ungünstigsten Aufpunkt wurde das Messgerät zu Relativmessungen benutzt, d. h. die Netto-Anzeigen wurden auf die mit NEMUS ermittelte Dosisleistung am Bezugsort bei $a = +3.5$ m (siehe Abschnitt 1) normiert. Dieses Verfahren führt zu den geringsten Messunsicherheiten, da – im Gegensatz zur "absoluten" Dosismessung – die Unsicherheiten des Kalibrierfaktors und des spektrumbezogenen Korrekturfaktors keine Rolle spielen.

2.3 Bestimmung der Anzeige durch den Neutronenuntergrund auf dem Gelände der PTB

Vor der Messkampagne am Betriebsgeländezaun des TBL wurde auf dem Gelände der PTB die Anzeige des Geräts in Bodennähe (siehe Anhang A.2.1, linke Spalte) und nach der Messkampagne in 1 m Höhe über dem Erdboden bestimmt (siehe Anhang A.2.1, rechte Spalte). Die in der PTB angezeigten Werte werden zum überwiegenden Teil durch die Neutronen aus der kosmischen Strahlung und zu einem geringen Teil vom Nulleffekt des Gerätes verursacht.

Im Datenlogger *UMo LB123* wurde eine feste Integrationszeit eingestellt, nach deren Ablauf der dann ermittelte Wert im internen Speicher abgelegt wird. Anschließend beginnt automatisch eine neue Integrationsphase. Die Einzelwerte der Messung am 02.09.2011 sind die Ergebnisse einer Integrationszeit von 1000 s. Aus diesen Werten werden der Mittelwert, die Standardabweichung der Einzelwerte und die Standardabweichung des Mittelwertes berechnet. Exemplarisch sind in Tabelle 3 die Daten aus Anhang A.2.1, linke Spalte, mit der entsprechenden Analyse aufgeführt.

Der Mittelwert der Anzeige ist $M_{\text{PTB}_1} = (7.6 \pm 0.8) \text{ nSv h}^{-1}$, gebildet aus den Einzelmessungen Nummer 5 bis 17. Dies ist einer von drei Werten, die auf dem Gelände der PTB bestimmt wurden, die Tabelle 4 fasst die drei Messreihen zusammen (die Messungen am 14.09. und vom 14.09 bis 15.09. wurden mit einer Integrationszeit von 1200 s durchgeführt).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 15 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 15 of the Report dated 2011-11-28

Tabelle 3: Analyse aus mehreren Einzelmessungen mit dem LB 6411 gemessen auf dem Gelände der PTB Braunschweig am 02.09.2011, entnommen aus Anhang A-2.1, linke Spalte.

Datum	Uhrzeit	lfd. Nr.	Anzeige M μSv/h	Bemerkung
02.09.2011	08:26:00			
02.09.2011	08:42:40	1	0.006	Gerät direkt auf Gras, später umgekippt. daher nicht verwertbar!
02.09.2011	08:59:20	2	0.009	
02.09.2011	09:16:00	3	0.002	
02.09.2011	09:32:40	4	0.004	
02.09.2011	09:49:20	5	0.009	Gerät auf Brett auf Boden
02.09.2011	10:06:00	6	0.006	
02.09.2011	10:22:40	7	0.009	
02.09.2011	10:39:20	8	0.008	
02.09.2011	10:56:00	9	0.008	
02.09.2011	11:12:40	10	0.006	
02.09.2011	11:29:20	11	0.006	
02.09.2011	11:46:00	12	0.001	
02.09.2011	12:02:40	13	0.005	
02.09.2011	12:19:20	14	0.008	
02.09.2011	12:36:00	15	0.011	
02.09.2011	12:52:40	16	0.011	
02.09.2011	13:09:20	17	0.011	
Mittelwert:			0.0076	μSv/h
Streuung:			0.0028	μSv/h
Anz. Messungen:			13	
Standardabweichung d. MW:			0.0008	μSv/h
relative Standardabweichung:			10.4 %	

Tabelle 4: Ortsdosisleistungs-Messungen mit dem LB6411 auf dem Gelände der PTB.

Startdatum	Startzeit	t / min	Messreihe	$M_{PTB} / \text{nSv h}^{-1}$	$s(M_{PTB}) / \text{nSv h}^{-1}$
02.09.2011	09:32	217.7	PTB_1	7.6	0.8
14.09.2011	12:01	240.0	PTB_2	6.1	0.6
14.09.2011	16:04	1020.0	PTB_3	8.0	0.4

Der mit den Unsicherheiten gewichtete Mittelwert der Anzeige aus den drei Messreihen ergibt die Untergrundanzeige (zum geringen Teil der Eigennulleffekt des Geräts und im Wesentlichen durch Neutronen aus der kosmischen Strahlung) $M_{PTB} = (7.4 \pm 0.3) \text{ nSv h}^{-1}$. Bei der Analyse der Netto-Dosisleistung am Betriebsgeländezaun des TBL wird dieser Wert⁴ als Untergrund subtrahiert. Die Auswirkung des geringfügig anderen mittleren Luftdrucks bei den Messungen in der PTB ($p_{PTB} = (1003.7 \pm 0.4) \text{ hPa}$) und am TBL ($p_{TBL} = (1003.3 \pm 0.3) \text{ hPa}$) kann vernachlässigt werden.

⁴ Im Bericht vom 20.09.2011 wurde hierfür die bereits mit dem Kalibrierfaktor N_{CF} multiplizierte Anzeige von 7,2 nSv/h angegeben. Aus Konsistenzgründen innerhalb dieses Teilberichts werden die Anzeigen ohne Berücksichtigung des Kalibrierfaktors genutzt.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 16 zum Bericht vom 2011-11-28
Page 16 of the Report dated 2011-11-28

Der Messwert M_{PTB} ist deutlich geringer als die tatsächliche Neutronen-Umgebungsäquivalentdosisleistung auf dem PTB Gelände, die ca. 11 nSv h^{-1} beträgt. Dies ist auf das bekannte Unteransprechvermögen des LB6411 für Neutronen mit mehr als 10 MeV zurück zu führen, deren Anteil an der Dosisleistung etwa 50% beträgt.

2.4 Bestimmung des Maximums der Neutronen-Ortsdosisleistung am Betriebsgeländezaun des TBL

Der Ort mit der maximalen Umgebungsäquivalentdosisleistung am Betriebsgeländezaun auf der Nordseite in einer Höhe von 1 m über dem Boden wurde mit dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Neutronen-Ortsdosisleistungsmessgerät bestimmt. Das Gerät wurde auf einen Aluminiumständer gestellt mit der Ausrichtung wie in Abbildung 10 dargestellt. Es wurde zeitweise entweder mit einem Sonnenschirm beschattet oder mit Plastikfolie abgedeckt um das System gegen Aufheizung durch Sonneneinstrahlung oder gegen Regen zu schützen.



Abbildung 10: Messaufbau mit dem von der PTB eingesetzten Neutronen-Ortsdosisleistungsmessgerät LB6411 zusammen mit dem Anzeigerät/Datenlogger UMo LB123 (rechts) in unmittelbarer Nähe der Neutronendosis-Messstelle Nr. 12 (weiße Kugel). Der weiße Quader auf der linken Seite ist ein Messgerät für Gammastrahlung.

Abbildung 11 zeigt die Luftbildaufnahme eines Teils der Nordseite des TBL Betriebsgeländes [Quelle: Google Earth]. Die Neutronendosis-Messstelle Nr. 12 des NLWKN wurde als Nullpunkt (0 m) für die im Weiteren verwendeten Entfernungsangaben festgelegt. Der rote Balken in Abbildung 11 kennzeichnet den Bereich -20 m bis +120 m, in dem mit dem LB6411 gemessen wurde. Der gelbe Balken kennzeichnet den Bereich, in dem Messungen der Gammastrahlung durchgeführt wurden (siehe PTB Bericht vom 20.09.2011). Der „Bezugsort“ des NEMUS Spektrometers ist 3.5 m westlich des Nullpunktes, also bei $a = +3.5 \text{ m}$ (gelber Kreis).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 17 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 17 of the Report dated 2011-11-28

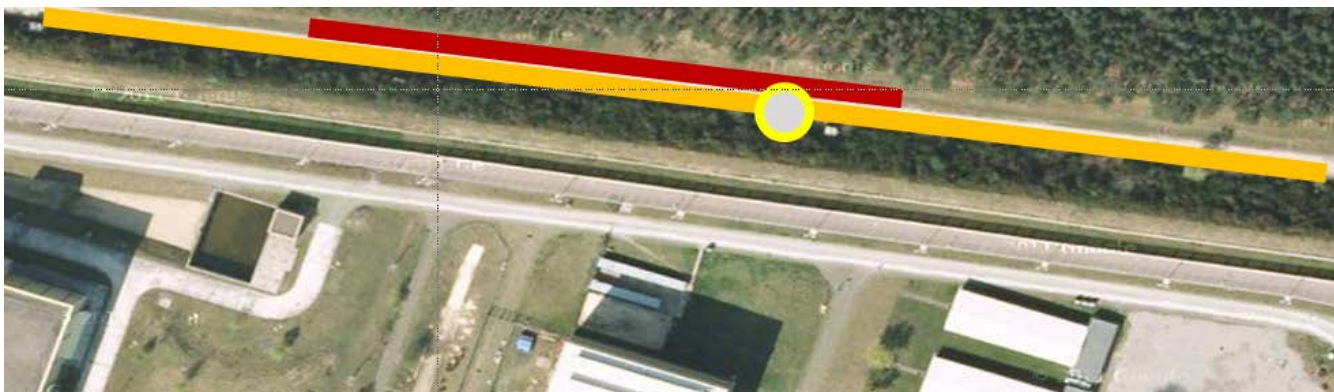


Abbildung 11: Messpositionen relativ zur Messstelle Nr. 12 an der Nordseite des TBL Betriebsgeländes. Der Ort des NEMUS Spektrometers ist durch den gelben Kreis gekennzeichnet. Rechts davon ist das Messhaus 2 als kleines weißes Rechteck zu erkennen.

Zur Suche nach dem Maximum der Dosisleistung entlang des Zaunes wurden Messungen an mehreren Messorten im oben angegebenen Bereich durchgeführt. Nach Beendigung einer Messreihe wurde das Anzeigergerät UMo LB123 an einen Laptop über eine optische RS232 Schnittstelle angeschlossen (siehe Abbildung 12). Mit Hilfe eines Terminalprogramms wurden die Daten auf dem Monitor angezeigt und gleichzeitig fortlaufend in eine Datei geschrieben und gespeichert. Der vollständige Inhalt dieser Datei ist in Anhang A.2.2 abgedruckt. Eine neue Datenübertragung beginnt mit der Seriennummer des LB123, dem Text „Gespeicherte Daten“ und dem Datum und der Uhrzeit des Datenabrufs. Es folgen das Datum des ersten Messintervalls und dann die Liste mit Nummer, Uhrzeit des Endes des Messintervalls und der Ortsdosisleistung in diesem Intervall in der Einheit Mikrosievert pro Stunde ($\mu\text{Sv/h}$).

Aus den Einzelwerten der Tabelle im Anhang A.2.2 lassen sich für jeden Ort Mittelwerte und deren Standardabweichungen berechnen. Tabelle 5 listet die Ergebnisse aller Messungen entlang des Zaunes auf. Auf Grund des verwendeten Verfahrens sind systematische Unsicherheiten vernachlässigbar und die Standardmessunsicherheit entspricht der angegebenen statischen Unsicherheit.

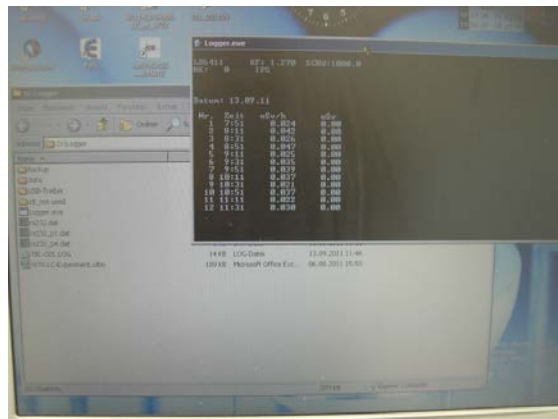


Abbildung 12: Links: Anschluss des Anzeigeräts/Datenlogger UMo LB123 über eine optische RS232 Schnittstelle an einen Laptop. Rechts: Anzeige der transferierten Daten auf dem Laptop-Monitor.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 18 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 18 of the Report dated 2011-11-28

Tabelle 5: Anzeigen M des LB6411 für die Messungen entlang des nördlichen Zauns des TBL und Netto-Anzeigen M' , also abzüglich M_{PTB} , als Funktion des Abstandes a zum Nullpunkt. Die letzten beiden Spalten geben das Verhältnis der Anzeigen $r(a)$ relativ zum Mittelwert der Ergebnisse bei $a = 3,5$ m an. Angegeben ist jeweils die entsprechende statistische Unsicherheit s .

				Anzeigen		Netto-Anzeigen			
a / m	Startdatum	Startzeit	t / min	$M_{\text{TBL}} / \text{nSv h}^{-1}$	$s(M_{\text{TBL}}) / \text{nSv h}^{-1}$	$M'_{\text{TBL}} / \text{nSv h}^{-1}$	$s(M'_{\text{TBL}}) / \text{nSv h}^{-1}$	$r(a)$	$s(r(a))$
-20	11.09.2011	16:54	240	26.1	2.0	18.7	2.1	0.86	0.07
1	11.09.2011	21:27	580	28.4	1.1	21.0	1.2	0.97	0.04
3.5	09.09.2011	19:52	680	29.4	1.1	22.0	1.1	1.01	0.04
3.5	10.09.2011	20:28	640	28.9	0.8	21.5	0.9	0.99	0.03
13	09.09.2011	13:13	380	32.3	1.8	24.9	1.8	1.14	0.06
13	11.09.2011	07:32	260	28.8	1.2	21.4	1.3	0.99	0.04
20	10.09.2011	07:29	260	31.2	1.2	23.8	1.2	1.09	0.04
30	12.09.2011	21:09	600	33.6	0.9	26.2	0.9	1.20	0.03
40	10.09.2011	12:09	240	32.2	1.0	24.8	1.0	1.14	0.03
40	11.09.2011	12:15	260	32.6	1.4	25.2	1.4	1.16	0.05
60	12.09.2011	16:19	260	32.6	1.9	25.2	1.9	1.16	0.07
80	10.09.2011	16:30	220	27.2	1.7	19.8	1.8	0.91	0.06
120	13.09.2011	12:07	240	20.1	1.3	12.7	1.3	0.58	0.04

Der Mittelwert der beiden bei $a = 3.5$ m gemessenen Netto-Anzeigen (gelb unterlegt in Tabelle 5) ist $\langle M'_{\text{TBL}}(3.5 \text{ m}) \rangle = (21.8 \pm 0.7) \text{ nSv h}^{-1}$. Daraus berechnen sich die in der vorletzten Spalte der Tabelle 5 aufgeführten und in Abbildung 13 dargestellten Werte für die relative Nettodosis zu:

$$r(a) = M'_{\text{TBL}}(a) / \langle M'_{\text{TBL}}(3.5 \text{ m}) \rangle$$

Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass der Ort mit der maximalen Umgebungsäquivalentdosisleistung am Betriebsgeländezaun auf der Nordseite in einer Höhe von 1 m über dem Boden im Bereich zwischen +30 m und +60 m westlich der Neutronen-Messstelle Nr. 12 liegt. Um den Zahlenwert des Maximums mit der geringstmöglichen Unsicherheit zu bestimmen, wurde folgendes Verfahren gewählt.

1. Bestimmung des Erhöhungsfaktors $F := \max(r(a))$ im Maximum relativ zum Bezugsort des NEMUS Spektrometers bei 3,5 m.
2. Multiplikation der mit NEMUS bestimmten Umgebungsäquivalentdosisleistung mit dem unter 1. bestimmten Faktor F .

Der Erhöhungsfaktor F wird berechnet aus dem Mittelwert der Messungen zwischen +30 m und +60 m, die die höchsten Werte ergeben haben (in Tabelle 5 blau unterlegt und in Abbildung 13 zusätzlich markiert), dividiert durch den Mittelwert bei 3.5 m. Die Berechnung der Standardunsicherheit für diesen Faktor wird nach den Vorschriften des GUM berechnet. Dafür wird das Programm „GUM Workbench Pro, Vers. 2.4.1.388“ der Fa. Metrodata GmbH verwendet. Anhang A.3 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung inkl. der Modellgleichung und dem vollständigen Unsicherheitsbudget.

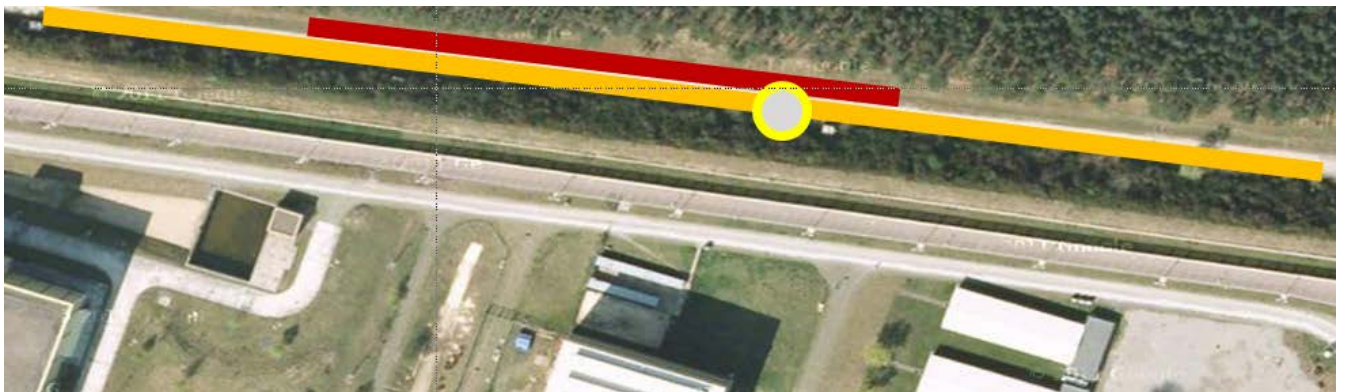
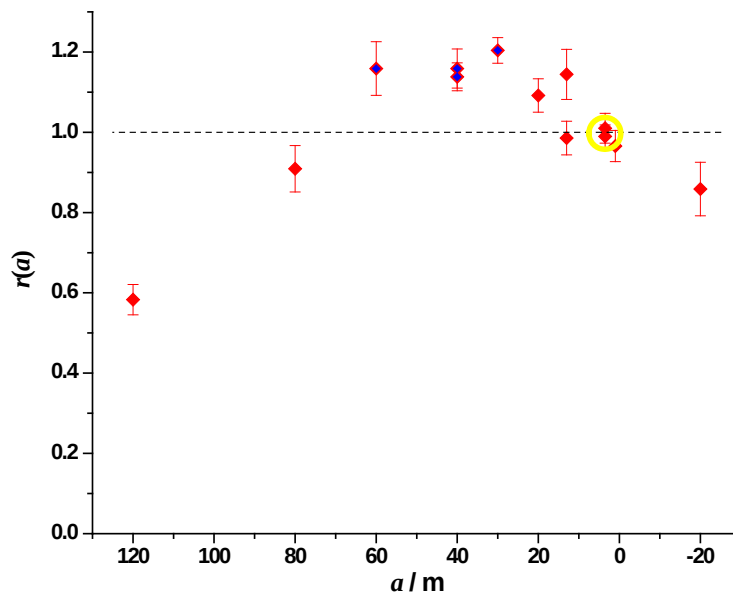


Abbildung 13: Relative Netto-Dosis r als Funktion des Abstands a zur Neutronen-Messstelle Nr. 12. Die Werte wurden normiert auf die Netto-Dosis am Ort des NEMUS Spektrometers ($a = 3.5$ m). Zur Veranschaulichung zeigt der untere Teil der Abbildung die Lage der Messpositionen an der Nordseite des TBL Betriebsgeländes.

Der Erhöhungsfaktor ist $F = 1.165 \pm 0.048$. Die maximale Umgebungsäquivalentdosisleistung am nördlichen Betriebsgeländezaun des TBL in 1 m Höhe über dem Erdboden berechnet sich aus dem Produkt von Erhöhungsfaktor F und der mit NEMUS gemessenen Umgebungsäquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)_{\text{TBL}} = (20.8 \pm 1.7) \text{ nSv h}^{-1}$ (siehe Abschnitt 1.4.3) zu

$$\dot{H}^*(10)_{\text{TBL, max}} = F \cdot \dot{H}^*(10)_{\text{TBL}} = (24.2 \pm 2.2) \text{ nSv h}^{-1}.$$

Auch für $\dot{H}^*(10)_{\text{TBL, max}}$ wurde das Unsicherheitsbudget gemäß GUM berechnet, siehe Anhang A.4.

Wie zu erwarten (siehe Tabelle 5), sind wegen des geringen Abstandes von 3.5 m zwischen Neutronendosis-Messstelle Nr. 12 und dem Bezugsort des NEMUS Spektrometers keine Unterschiede in der Umgebungsäquivalentdosisleistung zwischen diesen Orten feststellbar.

2.5 Neutronen-Ortsdosisleistung in verschiedenen Abständen vom Betriebsgeländezaun

Die Messungen senkrecht zur Zaunrichtung wurden in etwa in der Verlängerung der Achse der TBL Halle, d.h. bei $a = 13$ m (Abstand von der Neutronen-Messstelle Nr. 12) durchgeführt, wobei das oben beschriebene Verfahren genutzt wurde.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 als Funktion des Abstands x vom Zaun aufgelistet. Die relative Umgebungsäquivalentdosis (normiert auf den Abstand $x = 0$ m) ist in Abbildung 14 graphisch dargestellt. Die Messungen als Funktion des Abstandes vom Zaun zeigen eine leichte und stetige Abnahme der Umgebungsäquivalentdosisleistung mit wachsender Entfernung vom Zaun des TBL. In 15 m Entfernung vom Zaun wurde noch 92% der am Zaun vorhandenen Netto-Dosis beobachtet.

Tabelle 6: Anzeigen M des LB6411 bei $a = 13$ m (etwa in der Verlängerung der Achse der TBL Halle) und Netto-Anzeigen M' , also abzüglich M_{PTB} , bei verschiedenen Abständen x vom nördlichen Zaun des TBL (positive Werte für Messungen in Richtung Norden). Die vorletzte Spalte gibt das Verhältnis der Anzeigen $r(x)$ relativ zum Mittelwert der Ergebnisse bei $x = 0$ m an. Angeben sind jeweils die entsprechenden statistischen Unsicherheiten s .

				Anzeigen		Netto-Anzeigen			
x / m	Startdatum	Startzeit	t / min	$M_{\text{TBL}} / \text{nSv h}^{-1}$	$s(M_{\text{TBL}}) / \text{nSv h}^{-1}$	$M'_{\text{TBL}} / \text{nSv h}^{-1}$	$s(M'_{\text{TBL}}) / \text{nSv h}^{-1}$	$r(x)$	$s(r(x))$
-3	13.09.2011	07:31	240	32.1	2.5	24.7	2.5	1.07	0.11
0	09.09.2011	13:13	380	32.3	1.8	24.9	1.8	1.07	0.08
0	11.09.2011	07:32	260	28.8	1.2	21.4	1.3	0.93	0.05
10	12.09.2011	07:35	240	29.9	1.4	22.5	1.4	0.97	0.06
15	12.09.2011	12:08	240	28.7	1.3	21.3	1.3	0.92	0.06

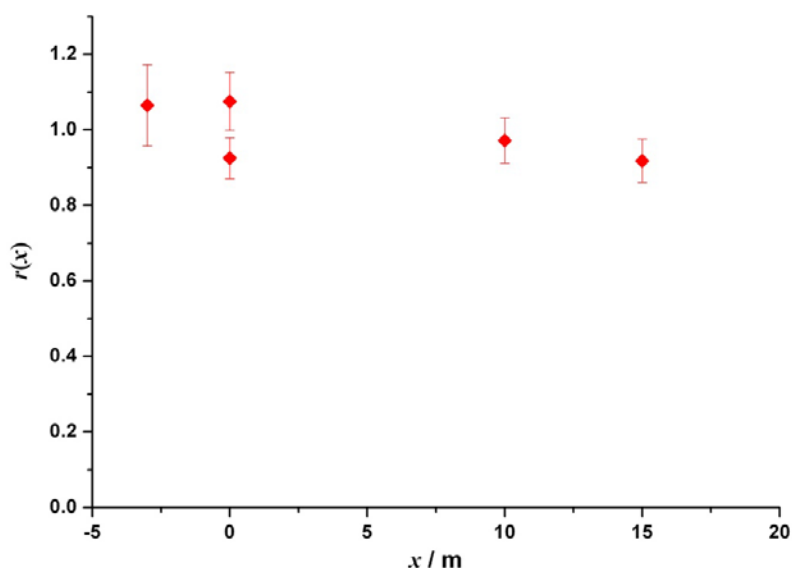


Abbildung 14: Relative Netto-Dosis r als Funktion des Abstands x vom Zaun bei $a = 13$ m (etwa in der Verlängerung der Achse der TBL Halle). Die Werte wurden normiert auf die Netto-Dosis bei Position $x = 0$ m.

2.6 Ergänzende Daten für die Dosimetrie am TBL

2.6.1 Dosismessungen mit dem LB6411

Die Umgebungsäquivalentdosisleistung beim Abstand a von der Messstelle Nr. 12 kann aus der Anzeige des LB6411 bestimmt werden:

$$\dot{H}^*(10)_{\text{TBL}} = (M_{\text{TBL}} - M_{\text{PTB}}) \cdot N_{\text{Cf}} \cdot k_{\text{S}}$$

mit dem Kalibrierfaktor N_{Cf} und dem "feldspezifischen Korrektionsfaktor" k_{S} , der den Einfluss der Unterschiede in den Neutronenspektren bei der Kalibrierung (Spektrum einer ^{252}Cf -Neutronenquelle) und bei der Messung am TBL berücksichtigt. Dieser Korrektionsfaktor ergibt sich durch die Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens des LB6411. $M_{\text{PTB}} = (7.4 \pm 0.3) \text{ nSv h}^{-1}$ ist der Mittelwert der Anzeigen der Messungen auf dem Gelände der PTB. Es wurde keine Luftdruckkorrektur für M_{PTB} durchgeführt, da sich dieser Faktor in der im Folgenden berechneten relativen Nettodosis nur mit weniger als 1% auswirkt.

Aus den Messungen mit dem LB6411 und mit NEMUS bei $a = 3.5 \text{ m}$ wird der feldspezifische Korrektionsfaktor k_{S} wie folgt ermittelt:

$$k_{\text{S}} = \dot{H}^*(10)_{\text{TBL}} / [(M_{\text{TBL}} - M_{\text{PTB}}) \cdot N_{\text{Cf}}]$$

Daraus ergibt sich $k_{\text{S}}(\text{LB6411, Cf}) = 0.98$ mit einer relativen Standardunsicherheit von etwa 10 %.

Dieses Messverfahren kann auch für ein anderes Gerät vom Typ LB6411 benutzt werden, sofern es mit ^{252}Cf kalibriert wurde und die Untergrundanzeige sorgfältig bestimmt wurde.

2.6.2 Dosismessungen mit dem NLWKN Neutronendosimeter

Der Aufbau der 12" Kugel des NEMUS Spektrometers entspricht dem des NLWKN Neutronendosimeters. Die Moderatoren sind aus Polyethylen mit einem Durchmesser von 30 cm, lediglich der Nachweis der thermalisierten (im Moderator abgebremsten) Neutronen geschieht mit einem ^3He Proportionalzähler (NEMUS) bzw. mit ^6LiF Festkörperdetektoren (NLWKN). Daraus ergeben sich zwar deutliche Unterschiede in der Nachweiswahrscheinlichkeit, jedoch nur geringe Unterschiede in der Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens. Die beobachteten Anzeigen der 12" Kugel bei Messungen am TBL Zaun und in der PTB können daher benutzt werden, um das Ansprechvermögen des NLWKN Neutronendosimeters für kosmische Strahlung und den feldspezifischen Korrektionsfaktor zu ermitteln.

Der Kalibrierfaktor der 12" Kugel für das Strahlungsfeld einer ^{252}Cf Neutronenquelle beträgt $N_{\text{Cf}} = 274 \pm 4 \text{ pSv pro Puls}$. Der Nulleffekt (Anzeige ohne Vorhandensein von Strahlung) ist vernachlässigbar, wie Messungen im Untergrundlabor UDO der PTB gezeigt haben. Die Messungen am TBL Zaun ergaben eine Zählrate von 109 h^{-1} (siehe Tabelle 1), was einer Dosisleistungsanzeige von 29.9 nSv/h entspricht. Die Messungen in der PTB ergaben eine Zählrate von 28.1 h^{-1} , was einer Dosisleistungsanzeige von 7.7 nSv/h entspricht. Als Nettowerte am TBL Zaun ergeben sich (korrigiert bezüglich Luftdruckänderungen, siehe Tabelle 1) eine Zählrate von 81.8 h^{-1} und eine Dosisleistungsanzeige von 22.4 nSv/h . Der mit dem NEMUS Spektrometer bestimmte Wert für die Netto-Dosisleistung ist 20.8 nSv/h (Abschnitt 1.4.3). Daraus ergibt sich der feldspezifische Korrektionsfaktor $k_{\text{S}}(12" \text{ Kugel, Cf}) = 0.93$ für das Nettospektrum am Bezugsort ($a = 3.5 \text{ m}$) mit einer relativen Standardunsicherheit von etwa 10 %.

Unter der Voraussetzung, dass das NLWKN Dosimeter ebenfalls im Strahlungsfeld einer ^{252}Cf Neutronenquelle kalibriert wird, ergibt sich, mit der Jahresstundenzahl von 8760 h hochgerechnet auf ein Jahr, eine Anzeige von 0.067 mSv für kosmische Strahlung. Dieser Wert kann dann von der mit diesem Dosimeter ermittelten Jahresdosis als natürlicher Untergrund abgezogen werden. Der für die 12" Kugel bestimmte Wert von 0.93 des feldspezifischen Korrekturfaktors für das Nettospektrum am Bezugsort kann dann auch für das NLWKN Neutronendosimeter genutzt werden.

2.6.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Orte am TBL Zaun und auf größere Zeiträume

Auf Grund der geometrischen Verhältnisse hinter dem langgestreckten Wall am nördlichen Zaun des TBL und der physikalischen Vorgänge beim "Skyshine" ist davon auszugehen, dass das am Bezugsort gemessene Neutronenspektrum für den gesamten, hier untersuchten Bereich entlang des Zauns repräsentativ ist. Somit sind die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelten Daten generell für Messungen in diesem Bereich nutzbar.

Die Neutronenflussdichte der kosmischen Strahlung auf dem Erdboden zeigt über längere Zeiträume nur geringe Schwankungen (siehe Neutron Monitor Database www.nmdb.eu). Die über Zeiträume von 6 oder 12 Monaten gemittelte Flussdichte schwankt dabei nur um wenige Prozent, da sie vom mittleren Luftdruck im entsprechenden Zeitraum abhängt. Längerfristig verändert sie sich auch mit dem 11-jährigen Sonnenzyklus, wobei die Schwankungen innerhalb von 2-3 Jahren im Bereich von etwa $\pm 3\%$ ebenfalls klein sind. Daraus ergibt sich, dass die mittel- und langfristigen Veränderungen der natürlichen Komponente der Neutronenstrahlung innerhalb der Unsicherheiten der Dosisermittlung vernachlässigt werden können.

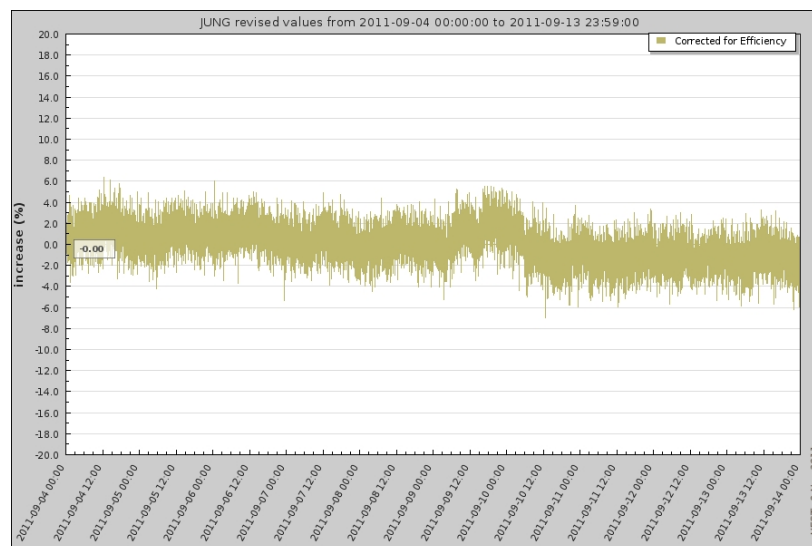


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der Sonnenaktivität während der Messkampagnen. Aufgetragen ist die Zählrate des Neutronenmonitors auf dem Jungfraujoch (siehe NMDB database www.nmdb.eu).

Kurzfristige Schwankungen der Neutronenflussdichte der kosmischen Strahlung (innerhalb von Stunden oder Tagen) können größer sein (bis 30%). Sie werden durch Luftdruckschwankungen verursacht und dadurch berücksichtigt, dass der Luftdruck während der Messungen in PTB und am TBL andauernd gemessen wurde und die Messungen, sofern erforderlich, auf einen mittleren Luftdruck korrigiert wurden. Zusätzlich zeigen die Messdaten der weltweit sta-

tionierten Neutronenmonitore für Höhenstrahlung (Abbildung 15 zeigt als Beispiel den Monitor auf dem Jungfrauoch), dass während der Messzeit keine ungewöhnlichen kurzzeitigen Schwankungen der Sonnenaktivität und somit der Intensität der Höhenstrahlung auftraten.

3. Zusammenfassung

In den über etwa 4 Tage andauernden Messungen am Betriebsgeländezaun des TBL wurde trotz erheblicher Schwankungen der Umgebungsparameter (Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlagsmenge, Luftdruck) kein Einfluss dieser Parameter auf das Messergebnis für die Neutronenstrahlung vom TBL festgestellt. Unter der Voraussetzung, dass keine Veränderungen bezüglich Strahlenquellen (Anzahl und Aufstellungsort der Transportbehälter) und Abschirmung vorgenommen werden, und dass das Abklingen der Aktivität in den Behältern über diesen Zeitraum vernachlässigbar ist, können somit die Werte der vom TBL verursachten Umgebungsäquivalentdosisleistung durch Neutronenstrahlung (in nSv/h) mit Hilfe der Jahresstundenzahl von 8760 h auf ein Jahr hochgerechnet werden.

Die Umgebungsäquivalentdosis, die durch die vom TBL ausgehende Neutronenstrahlung am ungünstigsten Aufpunkt am Betriebsgeländezaun des TBL (also dem Ort mit der maximalen Umgebungsäquivalentdosisleistung) verursacht wird, beträgt (0.212 ± 0.019) Milli-Sievert pro Jahr. Dieser Ort liegt etwa 40 m westlich von der Neutronendosis-Messstelle Nr. 12.

Alle in diesem Bericht angegebenen Unsicherheiten sind Standard-Messunsicherheiten. Für die Dosiswerte wurden sie gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ ermittelt. Für die Spektrometrie ist dieses Verfahren nicht anwendbar. Hier wurde eine Bayes'sche Analyse durchgeführt. Der Wert der Messgröße liegt dann im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 68 % im zugeordneten Überdeckungsintervall.

Literaturangaben

- Alevra, A.V., Cosack, M., Hunt, J.B., Thomas, D.J. and Schraube, H., 1992. Experimental determination of the response of four Bonner sphere sets to monoenergetic neutrons (II). *Radiat. Prot. Dosim.* 40, 91-102.
- Alevra A.V. and Thomas D.J., 2003. Neutron Spectrometry in Mixed Fields: Multisphere Spectrometers. *Radiat. Prot. Dosim.* 107, 37-72.
- Bramblett, R.L., Ewing, R.I., Bonner, T.W., 1960. A new type of neutron spectrometer. *Nucl. Instr. and Meth.* 9, 1-12.
- GUM, International Organization for Standardization, 1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva 1995, ISBN 92-67-10188-9.
- ICRP, International Commission on Radiological Protection, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP publication 74. *Annals of the ICRP Volume 26/3*, Oxford, Pergamon Press.
- Klett, A., Burgkhardt, B., 1997. The new rem counter LB 6411: measurements of ambient dose equivalent $H^*(10)$ according to ICRP60 with high sensitivity. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44, 757-759.
- Leuthold G., Mares V, Rühm W., Weitzenegger E. and Paretzke H. G., 2007. Long-term measurements of cosmic ray neutrons by means of a Bonn spectrometer at mountain altitudes – First results, *Radiat. Prot. Dosim.* 126, 506-511.
- Reginatto, M. and Goldhagen, P., 1999. MAXED, A Computer Code For Maximum Entropy Deconvolution Of Multisphere Neutron Spectrometer Data. *Health Phys.* 77, 579 –583.
- Reginatto M., Goldhagen P. and Neumann S., 2002. Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED. *Nucl. Instr. and Meth. A* 476, 242–246.
- Reginatto, M., 2006. Bayesian approach for quantifying the uncertainty of neutron doses derived from spectrometric measurements. *Radiat. Prot. Dosim.* 121, 64-69.
- Reginatto, M., 2009. What can we learn about the spectrum of high-energy stray neutron fields from Bonner sphere measurements? *Radiat. Meas.* 44, 692-699.
- Reginatto, M., 2010. Overview of spectral unfolding techniques and uncertainty estimation. *Radiation Measurements* 45, 1323-1329.
- Rühm W., Mares V, Pioch C., Weitzenegger E., Vockenroth R. and Paretzke H. G., 2009. Measurements of secondary neutrons from cosmic radiation with a Bonner sphere spectrometer at 79° N, *Radiat. Environ. Biophys.* 48, 125-133.
- Sivia D.S. and Skilling J., 2006. *Data Analysis – A Bayesian Tutorial*, second ed., Oxford University Press, Oxford.
- Thomas, D.J., Alevra, A.V., Hunt, J.B. and Schraube, H., 1994. Experimental determination of the response of four Bonner sphere sets to thermal neutrons. *Radiat. Prot. Dosim.* 54, 25-31.
- Wiegel, B. , Alevra, A.V. and Siebert, B.R.L., 1994. Calculations of the Response Functions of Bonner Spheres with a Spherical ^3He Proportional Counter Using a Realistic Detector Model. Report PTB-N-21, ISBN 3-89429-563-5.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 25 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 25 of the Report dated 2011-11-28

Wiegel B. and Alevra A.V., 2002. NEMUS – The PTB Neutron Multisphere Spectrometer: Bonner Spheres and More, Nucl. Instr. And Meth. A476, 36-41.

Wortmann B. and Stratmann W., 2004. Calculation of radiation exposure of the environment of interim storage facilities for the dry storage of spent fuel in dual-purpose casks. Proceedings of PATRAM 2004: 14. international symposium on the packaging and transportation of radioactive materials, Berlin (Germany), 20-24 Sep 2004. Available at <https://www.etde.org/etdeweb/purl.cover.jsp?purl=/20773328-wMFdnm/>

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 26 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 26 of the Report dated 2011-11-28

A. Anhang

A.1 Neutronenspektrum

Neutronenspektrum aus Abbildung 6 (grüne Kurve). Aufgeführt sind hier die linke Intervallgrenze $E_{l,i}$ eines Intervalls und die Flussdichte pro Intervall dividiert durch die Intervallbreite, $d\varphi(E)/dE$.

E_l MeV	$d\varphi(E)/dE$ $\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{MeV}^{-1}$	E_l MeV	$d\varphi(E)/dE$ $\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{MeV}^{-1}$	E_l MeV	$d\varphi(E)/dE$ $\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{MeV}^{-1}$	E_l MeV	$d\varphi(E)/dE$ $\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{MeV}^{-1}$
9.441E-10	6.942E+08	2.985E-07	2.087E+08	9.441E-05	4.047E+05	2.985E-02	7.209E+02
1.059E-09	7.995E+08	3.350E-07	1.872E+08	1.059E-04	3.515E+05	3.350E-02	6.337E+02
1.189E-09	8.748E+08	3.758E-07	1.677E+08	1.189E-04	3.049E+05	3.758E-02	5.554E+02
1.334E-09	1.007E+09	4.217E-07	1.503E+08	1.334E-04	2.642E+05	4.217E-02	4.800E+02
1.496E-09	1.104E+09	4.732E-07	1.336E+08	1.496E-04	2.290E+05	4.732E-02	4.135E+02
1.679E-09	1.271E+09	5.309E-07	1.183E+08	1.679E-04	1.995E+05	5.309E-02	3.457E+02
1.884E-09	1.394E+09	5.957E-07	1.058E+08	1.884E-04	1.767E+05	5.957E-02	2.888E+02
2.113E-09	1.601E+09	6.683E-07	9.619E+07	2.113E-04	1.587E+05	6.683E-02	2.368E+02
2.371E-09	1.754E+09	7.499E-07	8.643E+07	2.371E-04	1.409E+05	7.499E-02	1.942E+02
2.661E-09	2.009E+09	8.414E-07	7.718E+07	2.661E-04	1.226E+05	8.414E-02	1.563E+02
2.985E-09	2.196E+09	9.441E-07	6.871E+07	2.985E-04	1.057E+05	9.441E-02	1.241E+02
3.350E-09	2.503E+09	1.059E-06	6.053E+07	3.350E-04	9.143E+04	1.059E-01	9.734E+01
3.758E-09	2.727E+09	1.189E-06	5.301E+07	3.758E-04	7.946E+04	1.189E-01	7.436E+01
4.217E-09	3.098E+09	1.334E-06	4.648E+07	4.217E-04	6.909E+04	1.334E-01	5.762E+01
4.732E-09	3.381E+09	1.496E-06	4.080E+07	4.732E-04	6.031E+04	1.496E-01	4.416E+01
5.309E-09	3.847E+09	1.679E-06	3.623E+07	5.309E-04	5.332E+04	1.679E-01	3.542E+01
5.957E-09	4.201E+09	1.884E-06	3.260E+07	5.957E-04	4.726E+04	1.884E-01	2.683E+01
6.683E-09	4.749E+09	2.113E-06	2.939E+07	6.683E-04	4.197E+04	2.113E-01	2.129E+01
7.499E-09	5.164E+09	2.371E-06	2.614E+07	7.499E-04	3.726E+04	2.371E-01	1.584E+01
8.414E-09	5.793E+09	2.661E-06	2.273E+07	8.414E-04	3.304E+04	2.661E-01	1.283E+01
9.441E-09	6.271E+09	2.985E-06	1.971E+07	9.441E-04	2.907E+04	2.985E-01	9.678E+00
1.059E-08	6.983E+09	3.350E-06	1.734E+07	1.059E-03	2.525E+04	3.350E-01	7.960E+00
1.189E-08	7.525E+09	3.758E-06	1.539E+07	1.189E-03	2.230E+04	3.758E-01	6.247E+00
1.334E-08	8.297E+09	4.217E-06	1.363E+07	1.334E-03	1.996E+04	4.217E-01	5.653E+00
1.496E-08	8.868E+09	4.732E-06	1.208E+07	1.496E-03	1.790E+04	4.732E-01	4.717E+00
1.679E-08	9.620E+09	5.309E-06	1.062E+07	1.679E-03	1.602E+04	5.309E-01	4.284E+00
1.884E-08	1.016E+10	5.957E-06	9.267E+06	1.884E-03	1.421E+04	5.957E-01	3.782E+00
2.113E-08	1.065E+10	6.683E-06	8.073E+06	2.113E-03	1.235E+04	6.683E-01	3.750E+00
2.371E-08	1.085E+10	7.499E-06	7.047E+06	2.371E-03	1.064E+04	7.499E-01	3.436E+00
2.661E-08	1.098E+10	8.414E-06	6.154E+06	2.661E-03	9.152E+03	8.414E-01	3.600E+00
2.985E-08	1.115E+10	9.441E-06	5.396E+06	2.985E-03	7.981E+03	9.441E-01	3.554E+00
3.350E-08	1.108E+10	1.059E-05	4.776E+06	3.350E-03	7.126E+03	1.059E+00	3.837E+00
3.758E-08	1.087E+10	1.189E-05	4.243E+06	3.758E-03	6.427E+03	1.189E+00	3.667E+00
4.217E-08	1.020E+10	1.334E-05	3.775E+06	4.217E-03	5.799E+03	1.334E+00	3.563E+00
4.732E-08	9.577E+09	1.496E-05	3.353E+06	4.732E-03	5.211E+03	1.496E+00	2.878E+00
5.309E-08	8.462E+09	1.679E-05	2.953E+06	5.309E-03	4.671E+03	1.679E+00	2.485E+00
5.957E-08	7.463E+09	1.884E-05	2.557E+06	5.957E-03	4.176E+03	1.884E+00	1.959E+00
6.683E-08	6.320E+09	2.113E-05	2.194E+06	6.683E-03	3.732E+03	2.113E+00	1.586E+00
7.499E-08	5.384E+09	2.371E-05	1.880E+06	7.499E-03	3.301E+03	2.371E+00	1.049E+00
8.414E-08	4.312E+09	2.661E-05	1.612E+06	8.414E-03	2.841E+03	2.661E+00	6.429E-01
9.441E-08	3.335E+09	2.985E-05	1.397E+06	9.441E-03	2.426E+03	2.985E+00	3.515E-01
1.059E-07	2.471E+09	3.350E-05	1.239E+06	1.059E-02	2.127E+03	3.350E+00	2.166E-01
1.189E-07	1.746E+09	3.758E-05	1.112E+06	1.189E-02	1.886E+03	3.758E+00	1.457E-01
1.334E-07	1.258E+09	4.217E-05	1.000E+06	1.334E-02	1.671E+03	4.217E+00	1.081E-01
1.496E-07	8.369E+08	4.732E-05	8.974E+05	1.496E-02	1.487E+03	4.732E+00	6.223E-02
1.679E-07	6.078E+08	5.309E-05	8.008E+05	1.679E-02	1.316E+03	5.309E+00	3.302E-02
1.884E-07	4.209E+08	5.957E-05	7.029E+05	1.884E-02	1.170E+03	5.957E+00	1.589E-02
2.113E-07	3.423E+08	6.683E-05	6.129E+05	2.113E-02	1.054E+03	6.683E+00	8.085E-03
2.371E-07	2.729E+08	7.499E-05	5.345E+05	2.371E-02	9.407E+02	7.499E+00	3.289E-03
2.661E-07	2.389E+08	8.414E-05	4.652E+05	2.661E-02	8.202E+02	8.414E+00	---

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 27 zum Bericht vom 2011-11-28
Page 27 of the Report dated 2011-11-28

A.2.1 Messprotokolle für den LB6411 auf dem PTB Gelände

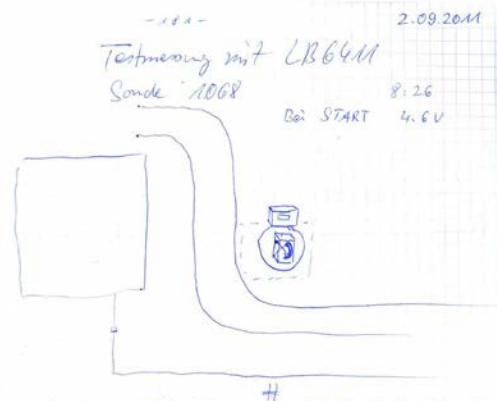
Messdaten des LB 6411 in Verbindung mit der Datenlogger-Einheit UMo LB123 gemessen auf dem Gelände der PTB Braunschweig am 02.09.2011 und am 14./15.09.2011.

2.09.2011

Testmessung mit LB6411

Sonde 10068

Bei START 8:26 4.6V



Analog Speicher T=1000 s

#	0.006 µSv/h	direkt auf Geh.
1	0.009	
2	0.009	
3	0.002	
4	0.004	
5	0.009	mit Beh.
6	0.006	15 0.011
7	0.009	16 0.011
8	0.008	17 0.011
9	0.008	
10	0.008	4.4V
11	0.008	13.04
12	0.001	
13	0.005	
14	0.008	

$\bar{x} = 0.00706 \mu\text{Sv/h}$
 $S_x = 0.00297$
 $S_{\bar{x}} = 0.00072$

LB 123	Ser. # 1853

Gespeicherte Daten	

14.09.11 16:03	V. 1.04
LB6411	KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0	IPS
Datum: 14.09.11	
Nr.	Zeit uSv/h uSv
1	12:21 0.010 0.00
2	12:41 0.005 0.00
3	13:01 0.006 0.00
4	13:21 0.006 0.00
5	13:41 0.006 0.00
6	14:01 0.010 0.00
7	14:21 0.007 0.00
8	14:41 0.004 0.00
9	15:01 0.006 0.00
10	15:21 0.004 0.00
11	15:41 0.005 0.00
12	16:01 0.004 0.00
LB 123 Ser. # 1853	

Gespeicherte Daten	

15.09.11 09:07	V. 1.04
LB6411	KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0	IPS
Datum: 14.09.11	
Nr.	Zeit uSv/h uSv
1	16:24 0.010 0.00
2	16:44 0.003 0.00
3	17:04 0.004 0.00
4	17:24 0.008 0.00
5	17:44 0.006 0.00

6	18:04	0.012	0.00
7	18:24	0.005	0.00
8	18:44	0.012	0.00
9	19:04	0.008	0.00
10	19:24	0.013	0.00
11	19:44	0.004	0.00
12	20:04	0.006	0.00
13	20:24	0.006	0.00
14	20:44	0.010	0.00
15	21:04	0.010	0.00
16	21:24	0.006	0.00
17	21:44	0.012	0.00
18	22:04	0.008	0.00
19	22:24	0.006	0.00
20	22:44	0.012	0.00
21	23:04	0.007	0.00
22	23:24	0.005	0.00
23	23:44	0.010	0.00
Datum: 15.09.11			
Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
24	0:04	0.014	0.00
25	0:24	0.008	0.00
26	0:44	0.006	0.00
27	1:04	0.008	0.00
28	1:24	0.008	0.00
29	1:44	0.013	0.00
30	2:04	0.012	0.00
31	2:24	0.007	0.00
32	2:44	0.013	0.00
33	3:04	0.008	0.00
34	3:24	0.004	0.00
35	3:44	0.005	0.00
36	4:04	0.004	0.00
37	4:24	0.010	0.00
38	4:44	0.004	0.00
39	5:04	0.006	0.00
40	5:24	0.005	0.00
41	5:44	0.006	0.00
42	6:04	0.010	0.00
43	6:24	0.012	0.00
44	6:44	0.003	0.00
45	7:04	0.008	0.00
46	7:24	0.007	0.00
47	7:44	0.008	0.00
48	8:04	0.006	0.00
49	8:24	0.006	0.00
50	8:44	0.014	0.00
51	9:04	0.012	0.00

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 28 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 28 of the Report dated 2011-11-28

A.2.2 Messprotokolle für den LB6411 am Betriebsgeländezaun des TBL

Messdaten des LB 6411 in Verbindung mit der Datenlogger-Einheit UMo LB123 gemessen am Betriebsgeländezaun des TBL vom 09.09.2011 bis 13.09.2011.

LB 123				Ser. # 1853			

Gespeicherte Daten							

09.09.11 19:35				V. 1.04			
LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0							
NE: 0 IPS							
Datum: 09.09.11							
Nr.	Zeit	uSv/h	uSv	Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	12:31	0.031	0.00	34	0:12	0.035	0.00
2	13:13	0.029	0.00	35	0:32	0.035	0.00
3	13:33	0.038	0.00	36	0:52	0.020	0.00
4	13:53	0.029	0.00	37	1:12	0.042	0.00
5	14:13	0.035	0.00	38	1:32	0.035	0.00
6	14:33	0.036	0.00	39	1:52	0.024	0.00
7	14:53	0.022	0.00	40	2:12	0.024	0.00
8	15:13	0.016	0.00	41	2:32	0.028	0.00
9	15:33	0.041	0.00	42	2:52	0.028	0.00
10	15:53	0.025	0.00	43	3:12	0.026	0.00
11	16:13	0.034	0.00	44	3:32	0.028	0.00
12	16:33	0.037	0.00	45	3:52	0.021	0.00
13	16:53	0.030	0.00	46	4:12	0.030	0.00
14	17:13	0.040	0.00	47	4:32	0.033	0.00
15	17:33	0.025	0.00	48	4:52	0.033	0.00
16	17:53	0.044	0.00	49	5:12	0.031	0.00
17	18:13	0.022	0.00	50	5:32	0.028	0.00
18	18:33	0.037	0.00	51	5:52	0.025	0.00
19	18:53	0.025	0.00	52	6:12	0.024	0.00
20	19:13	0.042	0.00	53	6:32	0.035	0.00
21	19:33	0.039	0.00	54	6:52	0.018	0.00
				55	7:12	0.031	0.00
LB 123				Ser. # 1853			

Gespeicherte Daten							

10.09.11 11:57				V. 1.04			
LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0							
NE: 0 IPS							
Datum: 10.09.11							
Nr.	Zeit	uSv/h	uSv	Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	7:49	0.034	0.00	1	16:50	0.028	0.00
2	8:09	0.026	0.00	2	17:10	0.026	0.00
3	8:29	0.029	0.00	3	17:30	0.026	0.00
4	8:49	0.023	0.00	4	17:50	0.042	0.00
5	9:09	0.032	0.00	5	18:10	0.031	0.00
6	9:29	0.035	0.00	6	18:30	0.022	0.00
7	9:49	0.035	0.00	7	18:50	0.026	0.00
8	10:09	0.034	0.00	8	19:10	0.024	0.00
9	10:29	0.032	0.00	9	19:30	0.026	0.00
10	10:49	0.031	0.00	10	19:50	0.020	0.00
11	11:09	0.030	0.00	11	20:10	0.028	0.00
12	11:29	0.038	0.00				
13	11:49	0.026	0.00				
LB 123				Ser. # 1853			

Gespeicherte Daten							

10.09.11 16:20				V. 1.04			
LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0							
NE: 0 IPS							
Datum: 10.09.11							
Nr.	Zeit	uSv/h	uSv	Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	12:29	0.033	0.00	11	0:08	0.034	0.00
2	12:49	0.031	0.00	12	0:28	0.035	0.00
3	13:09	0.031	0.00	13	0:48	0.030	0.00
4	13:29	0.033	0.00	14	1:08	0.030	0.00
5	13:49	0.036	0.00	15	1:28	0.031	0.00
6	14:09	0.035	0.00	16	1:48	0.037	0.00
7	14:29	0.035	0.00	17	2:08	0.029	0.00
8	14:49	0.030	0.00	18	2:28	0.021	0.00
9	15:09	0.035	0.00	19	2:48	0.029	0.00
10	15:29	0.024	0.00	20	3:08	0.035	0.00
11	15:49	0.029	0.00	21	3:28	0.024	0.00
12	16:09	0.034	0.00	22	3:48	0.029	0.00
				23	4:08	0.031	0.00
				24	4:28	0.024	0.00
				25	4:48	0.030	0.00
				26	5:08	0.026	0.00
				27	5:28	0.023	0.00
				28	5:48	0.037	0.00
				29	6:08	0.031	0.00
				30	6:28	0.036	0.00
				31	6:48	0.031	0.00
				32	7:08	0.028	0.00
LB 123				Ser. # 1853			

Gespeicherte Daten							

11.09.11 11:56				V. 1.04			

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 29 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 29 of the Report dated 2011-11-28

Messdaten des LB 6411 in Verbindung mit der Datenlogger-Einheit UMo LB123 gemessen am Betriebsgeländezaun des TBL vom 09.09.2011 bis 13.09.2011 (Fortsetzung).

LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0 IPS

Datum: 11.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	7:52	0.020	0.00
2	8:12	0.032	0.00
0.024	0.00		
4	8:52	0.031	0.00
5	9:12	0.029	0.00
6	9:32	0.035	0.00
7	9:52	0.028	0.00
8	10:12	0.029	0.00
9	10:32	0.036	0.00
10	10:52	0.026	0.00
11	11:12	0.029	0.00
12	11:32	0.025	0.00
13	11:52	0.031	0.00

LB 123 Ser. # 1853

Gespeicherte Daten

11.09.11 16:46 V. 1.04

LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0 IPS

Datum: 11.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	12:35	0.030	0.00
2	12:55	0.038	0.00
3	13:15	0.038	0.00
4	13:35	0.026	0.00
5	13:55	0.030	0.00
6	14:15	0.025	0.00
7	14:35	0.034	0.00
8	14:55	0.032	0.00
9	15:15	0.028	0.00
10	15:35	0.035	0.00
11	15:55	0.038	0.00
12	16:15	0.030	0.00
13	16:35	0.040	0.00

LB 123 Ser. # 1853

Gespeicherte Daten

11.09.11 21:06 V. 1.04

LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0 IPS

Datum: 11.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	17:14	0.028	0.00
2	17:34	0.043	0.00
3	17:54	0.029	0.00
4	18:14	0.021	0.00
5	18:34	0.019	0.00
6	18:54	0.034	0.00
7	19:14	0.019	0.00
8	19:34	0.025	0.00
9	19:54	0.026	0.00
10	20:14	0.024	0.00
11	20:34	0.019	0.00
12	20:54	0.026	0.00

LB 123 Ser. # 1853

Gespeicherte Daten

12.09.11 07:17 V. 1.04

LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0 IPS

Datum: 11.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	21:47	0.019	0.00
2	22:07	0.017	0.00
3	22:27	0.024	0.00
4	22:47	0.030	0.00
5	23:07	0.033	0.00
6	23:27	0.034	0.00
7	23:47	0.028	0.00

Datum: 12.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
8	0:07	0.037	0.00
9	0:27	0.028	0.00
10	0:47	0.019	0.00
11	1:07	0.033	0.00
12	1:27	0.021	0.00
13	1:47	0.040	0.00
14	2:07	0.026	0.00
15	2:27	0.038	0.00
16	2:47	0.030	0.00
17	3:07	0.026	0.00
18	3:27	0.031	0.00
19	3:47	0.026	0.00
20	4:07	0.026	0.00
21	4:27	0.031	0.00
22	4:47	0.025	0.00
23	5:07	0.029	0.00
24	5:27	0.018	0.00
25	5:47	0.028	0.00
26	6:07	0.038	0.00
27	6:27	0.035	0.00
28	6:47	0.025	0.00
29	7:07	0.029	0.00

LB 123 Ser. # 1853

Gespeicherte Daten

12.09.11 11:46 V. 1.04

LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0 IPS

Datum: 12.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	7:55	0.026	0.00
2	8:15	0.037	0.00
3	8:35	0.033	0.00
4	8:55	0.026	0.00
5	9:15	0.029	0.00
6	9:35	0.033	0.00
7	9:55	0.023	0.00
8	10:15	0.022	0.00
9	10:35	0.034	0.00
10	10:55	0.033	0.00
11	11:15	0.032	0.00
12	11:35	0.031	0.00

LB 123 Ser. # 1853

Gespeicherte Daten

12.09.11 16:15 V. 1.04

LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0 IPS

Datum: 12.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	12:28	0.026	0.00
2	12:48	0.031	0.00

3	13:08	0.024	0.00
4	13:28	0.030	0.00
5	13:48	0.034	0.00
6	14:08	0.026	0.00
7	14:28	0.030	0.00
8	14:48	0.019	0.00
9	15:08	0.034	0.00
10	15:28	0.026	0.00
11	15:48	0.032	0.00
12	16:08	0.032	0.00

LB 123 Ser. # 1853

Gespeicherte Daten

12.09.11 20:52 V. 1.04

LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0 IPS

Datum: 12.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	16:39	0.031	0.00
2	16:59	0.035	0.00
3	17:19	0.032	0.00
4	17:39	0.031	0.00
5	17:59	0.034	0.00
6	18:19	0.040	0.00
7	18:39	0.033	0.00
8	18:59	0.019	0.00
9	19:19	0.022	0.00
10	19:39	0.038	0.00
11	19:59	0.043	0.00
12	20:19	0.028	0.00
13	20:39	0.038	0.00

LB 123 Ser. # 1853

Gespeicherte Daten

13.09.11 07:18 V. 1.04

LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0
NE: 0 IPS

Datum: 12.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
1	21:29	0.042	0.00
2	21:49	0.037	0.00
3	22:09	0.038	0.00
4	22:29	0.035	0.00
5	22:49	0.031	0.00
6	23:09	0.037	0.00
7	23:29	0.031	0.00
8	23:49	0.028	0.00

Datum: 13.09.11

Nr.	Zeit	uSv/h	uSv
9	0:09	0.028	0.00
10	0:29	0.026	0.00
11	0:49	0.029	0.00
12	1:09	0.032	0.00
13	1:29	0.048	0.00
14	1:49	0.037	0.00
15	2:09	0.035	0.00
16	2:29	0.031	0.00
17	2:49	0.035	0.00
18	3:09	0.028	0.00
19	3:29	0.033	0.00
20	3:49	0.032	0.00
21	4:09	0.029	0.00
22	4:29	0.032	0.00
23	4:49	0.037	0.00
24	5:09	0.042	0.00
25	5:29	0.031	0.00
26	5:49	0.032	0.00
27	6:09	0.028	0.00
28	6:29	0.033	0.00

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 30 zum Bericht vom 2011-11-28

Page 30 of the Report dated 2011-11-28

Messdaten des LB 6411 in Verbindung mit der Datenlogger-Einheit UMo LB123 gemessen am Betriebsgeländezaun des TBL vom 09.09.2011 bis 13.09.2011 (Fortsetzung).

29 6:49 0.035 0.00	7 9:51 0.039 0.00	2 12:27 0.019 0.00
30 7:09 0.036 0.00	8 10:11 0.037 0.00	3 12:37 0.019 0.00
	9 10:31 0.021 0.00	4 12:47 0.013 0.00
	10 10:51 0.037 0.00	5 12:57 0.023 0.00
	11 11:11 0.022 0.00	6 13:07 0.017 0.00
	12 11:31 0.030 0.00	7 13:17 0.021 0.00
LB 123 Ser. # 1853		8 13:27 0.021 0.00
-----		9 13:37 0.013 0.00
Gespeicherte Daten		10 13:47 0.010 0.00
13.09.11 11:46 V. 1.04	LB 123 Ser. # 1853	11 13:57 0.025 0.00
	-----	12 14:07 0.021 0.00
	Gespeicherte Daten	13 14:17 0.013 0.00
	-----	14 14:27 0.025 0.00
LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0	13.09.11 16:36 V. 1.04	15 14:37 0.015 0.00
NE: 0 IPS		16 14:47 0.015 0.00
		17 14:57 0.021 0.00
Datum: 13.09.11	LB6411 KF: 1.270 SCHW:1000.0	18 15:07 0.023 0.00
	NE: 0 IPS	19 15:17 0.013 0.00
		20 15:27 0.030 0.00
Nr. Zeit uSv/h uSv	Datum: 13.09.11	21 15:37 0.013 0.00
1 7:51 0.024 0.00		22 15:47 0.036 0.00
2 8:11 0.042 0.00		23 15:57 0.023 0.00
3 8:31 0.026 0.00		24 16:07 0.028 0.0
4 8:51 0.047 0.00		
5 9:11 0.025 0.00		
6 9:31 0.035 0.00	Nr. Zeit uSv/h uSv	
	1 12:17 0.025 0.00	

A.3 Unsicherheitsbudget für den Dosis-Erhöpfungsfaktor

Berechnung des Faktors zur Bestimmung der maximalen Dosisleistung am Zaun aus den Messungen mit dem NEMUS Spektrometer und dem LB6411		
Berechnung des Faktors zur Bestimmung der maximalen Dosisleistung am Zaun aus den Messungen mit dem NEMUS Spektrometer und dem LB6411		
Modellgleichung: $F = ((1/4) * (M2_1 + M2_2 + M2_3 + M2_4) - M_{PTB}) / ((1/2) * (M1_1 + M1_2) - M_{PTB})$		
Liste der Größen:		
Größe	Einheit	Definition
F		Faktor zur Berechnung der maximalen Dosisleistung am Zaun
M2 ₁	nSv/h	Messwert des LB6411 bei a = 30 m
M2 ₂	nSv/h	Messwert des LB6411 bei a = 40 m
M2 ₃	nSv/h	Messwert des LB6411 bei a = 40 m
M2 ₄	nSv/h	Messwert des LB6411 bei a = 60 m
M _{PTB}	nSv/h	Untergrundanzeige (Eigennulleffekt und Anzeige durch kosmische Neutronen) des LB6411 in der PTB ohne Vorhandensein von zusätzlichen Neutronenquellen
M1 ₁	nSv/h	Messwert Nr. 1 des LB6411 bei a = 3.5 m (Messort NEMUS Spektrometer)
M1 ₂	nSv/h	Messwert Nr. 2 des LB6411 bei a = 3.5 m (Messort NEMUS Spektrometer)
M2₁: Typ B Normalverteilung Wert: 33.6 nSv/h Erweiterte Messunsicherheit: 0.891 nSv/h Erweiterungsfaktor: 1		
M2₂: Typ B Normalverteilung Wert: 32.166 nSv/h Erweiterte Messunsicherheit: 0.983 nSv/h Erweiterungsfaktor: 1		
M2₃: Typ B Normalverteilung Wert: 32.615 nSv/h Erweiterte Messunsicherheit: 1.370 nSv/h Erweiterungsfaktor: 1		
M2₄: Typ B Normalverteilung Wert: 32.615 nSv/h Erweiterte Messunsicherheit: 1.882 nSv/h Erweiterungsfaktor: 1		
M_{PTB}: Typ B Normalverteilung Wert: 7.4 nSv/h Erweiterte Messunsicherheit: 0.3 nSv/h Erweiterungsfaktor: 1		
M1₁: Typ B Normalverteilung Wert: 29.382 nSv/h Erweiterte Messunsicherheit: 1.080 nSv/h Erweiterungsfaktor: 1		
Datum: 27.10.2011	Datei: Maximal_faktor_kommentiert.smu	Seite 1 von 2

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 32 zum Bericht vom 2011-11-28
Page 32 of the Report dated 2011-11-28

		Berechnung des Faktors zur Bestimmung der maximalen Dosisleistung am Zaun aus den Messungen mit dem NEMUS Spektrometer und dem LB6411				
M1₂:		Typ B Normalverteilung Wert: 28.937 nSv/h Erweiterte Messunsicherheit: 0.831 nSv/h Erweiterungsfaktor: 1				
Messunsicherheits-Budgets:						
F:		Faktor zu Berechnung der maximalen Dosisleistung am Zaun				
Größe	Wert	Std.-Mess-unsicherheit	Verteilung	Sensitivitäts-koeffizient	Unsicher-heitsbeitrag	Index
M2 ₁	33.600 nSv/h	0.891 nSv/h	Normal	0.011	0.010	4.6 %
M2 ₂	32.166 nSv/h	0.983 nSv/h	Normal	0.011	0.011	5.6 %
M2 ₃	32.62 nSv/h	1.37 nSv/h	Normal	0.011	0.016	10.8 %
M2 ₄	32.62 nSv/h	1.88 nSv/h	Normal	0.011	0.022	20.5 %
M _{PTB}	7.400 nSv/h	0.300 nSv/h	Normal	7.6·10 ⁻³	2.3·10 ⁻³	0.2 %
M1 ₁	29.38 nSv/h	1.08 nSv/h	Normal	-0.027	-0.029	36.6 %
M1 ₂	28.937 nSv/h	0.831 nSv/h	Normal	-0.027	-0.022	21.7 %
F	1.1650	0.0478				

Ergebnisse:				
Größe	Wert	Erw.-Mess-unsicherheit	Erweiter-ungsfaktor	Überdeckungs-wahrscheinlichkeit
F	1.165	0.048	1.00	manuell

Datum: 27.10.2011	Datei: Maximal_faktor_kommentiert.smu	Seite 2 von 2
-------------------	---------------------------------------	---------------

A.4 Unsicherheitsbudget für die maximale Dosisleistung am TBL Zaun

Berechnung der maximalen Dosisleistung am Zaun des TBL aus dem Messwert des Bonnerkugel-Spektrometers																																																			
Berechnung der maximalen Dosisleistung am Zaun des TBL aus dem Messwert des Bonnerkugel-Spektrometers Modellgleichung: $H_{\text{Max}} = F \cdot H_{\text{Ref}}$ Liste der Größen: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Größe</th> <th>Einheit</th> <th>Definition</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H_{Max}</td> <td>nSv/h</td> <td>Maximale Neutronendosisleistung am Zaun des TBL</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> <td>Faktor zur Berechnung der maximalen Dosisleistung am Zaun</td> </tr> <tr> <td>H_{Ref}</td> <td>nSv/h</td> <td>Mit NEMUS Spektrometer gemessene Neutronendosisleistung</td> </tr> </tbody> </table> F: Typ B Normalverteilung Wert: 1.165 Erweiterte Messunsicherheit: 0.0478 Erweiterungsfaktor: 1 Faktor aus den Messungen mit dem LB6411 am Bezugspunkt des NEMUS Spektrometers und am Ort mit der maximalen Dosisleistung am Zaun. Dieser Faktor ist das Ergebnis aus der Berechnung "Maximal faktor kommentiert.smu" H_{Ref}: Typ B Normalverteilung Wert: 20.8 nSv/h Erweiterte Messunsicherheit: 1.7 nSv/h Erweiterungsfaktor: 1 Umgebungsäquivalentdosisleistung durch Neutronen am Messort (Bezugspunkt) des NEMUS Spektrometers bestimmt mit dem NEMUS Spektrometer Messunsicherheits-Budgets: H_{Max}: Maximale Neutronendosisleistung am Zaun des TBL <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Größe</th> <th>Wert</th> <th>Std.-Mess-unsicherheit</th> <th>Verteilung</th> <th>Sensitivitäts-koeffizient</th> <th>Unsicher-heitsbeitrag</th> <th>Index</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F</td> <td>1.1650</td> <td>0.0478</td> <td>Normal</td> <td>21</td> <td>0.99 nSv/h</td> <td>20.1 %</td> </tr> <tr> <td>H_{Ref}</td> <td>20.80 nSv/h</td> <td>1.70 nSv/h</td> <td>Normal</td> <td>1.2</td> <td>2.0 nSv/h</td> <td>79.9 %</td> </tr> <tr> <td>H_{Max}</td> <td>24.23 nSv/h</td> <td>2.22 nSv/h</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> Maximale Dosisleistung am Zaun des TBL berechnet aus dem Ergebnis der NEMUS Messung mit dem Faktor F aus den Messungen mit dem LB6411 am Ort der NEMUS Messung und am Ort mit der maximalen Dosisleistung Ergebnisse: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Größe</th> <th>Wert</th> <th>Erw.-Mess-unsicherheit</th> <th>Erweiter-ungsfaktor</th> <th>Überdeckungs-wahrscheinlichkeit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H_{Max}</td> <td>24.2 nSv/h</td> <td>2.2 nSv/h</td> <td>1.00</td> <td>manuell</td> </tr> </tbody> </table>		Größe	Einheit	Definition	H_{Max}	nSv/h	Maximale Neutronendosisleistung am Zaun des TBL	F		Faktor zur Berechnung der maximalen Dosisleistung am Zaun	H_{Ref}	nSv/h	Mit NEMUS Spektrometer gemessene Neutronendosisleistung	Größe	Wert	Std.-Mess-unsicherheit	Verteilung	Sensitivitäts-koeffizient	Unsicher-heitsbeitrag	Index	F	1.1650	0.0478	Normal	21	0.99 nSv/h	20.1 %	H_{Ref}	20.80 nSv/h	1.70 nSv/h	Normal	1.2	2.0 nSv/h	79.9 %	H_{Max}	24.23 nSv/h	2.22 nSv/h					Größe	Wert	Erw.-Mess-unsicherheit	Erweiter-ungsfaktor	Überdeckungs-wahrscheinlichkeit	H_{Max}	24.2 nSv/h	2.2 nSv/h	1.00	manuell
Größe	Einheit	Definition																																																	
H_{Max}	nSv/h	Maximale Neutronendosisleistung am Zaun des TBL																																																	
F		Faktor zur Berechnung der maximalen Dosisleistung am Zaun																																																	
H_{Ref}	nSv/h	Mit NEMUS Spektrometer gemessene Neutronendosisleistung																																																	
Größe	Wert	Std.-Mess-unsicherheit	Verteilung	Sensitivitäts-koeffizient	Unsicher-heitsbeitrag	Index																																													
F	1.1650	0.0478	Normal	21	0.99 nSv/h	20.1 %																																													
H_{Ref}	20.80 nSv/h	1.70 nSv/h	Normal	1.2	2.0 nSv/h	79.9 %																																													
H_{Max}	24.23 nSv/h	2.22 nSv/h																																																	
Größe	Wert	Erw.-Mess-unsicherheit	Erweiter-ungsfaktor	Überdeckungs-wahrscheinlichkeit																																															
H_{Max}	24.2 nSv/h	2.2 nSv/h	1.00	manuell																																															
Datum: 27.10.2011	Datei: Maximal_dosis_kommentiert.smu	Seite 1 von 1																																																	

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 34 zum Bericht vom 2011-11-28
Page 34 of the Report dated 2011-11-28

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Zur Sicherstellung der weltweiten Einheitlichkeit der Maßeinheiten arbeitet die PTB mit anderen nationalen metrologischen Instituten auf regionaler europäischer Ebene in EURAMET und auf internationaler Ebene im Rahmen der Meterkonvention zusammen. Dieses Ziel wird durch einen intensiven Austausch von Forschungsergebnissen und durch umfangreiche internationale Vergleichsmessungen erreicht.

The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Technology. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

PTB cooperates with other national metrology institutes - at the regional European level within EURAMET and at the international level within the framework of the Metre Convention - with the aim of ensuring the worldwide coherence of the measurement units. This aim is achieved by an intensive exchange of the results of research work and by comprehensive international comparison measurements.