



Greenpeace e.V. · 22745 Hamburg

Messungen von Neutronen-Strahlung an Behältern vom Typ CASTOR HAW-20/28

Messungen durchgeführt in Dannenberg, 28-29. März 2001

Bericht für Greenpeace Deutschland e.V.

Dr. Helmut Hirsch, Hannover, 03.04.2001

Inhalt:

Zusammenfassung	2
1. Einleitung	3
2. Eingesetzte Messtechnik	4
3. Messergebnisse	4
4. Diskussion der Ergebnisse	6
5. Einhaltung des verkehrsrechtlichen Grenzwertes in 2 m Abstand	7
Anhang 1: Zusammenstellung der Messergebnisse	9
Anhang 2: Zur Umrechnung von Messwerten auf andere Entfernungen	12

Zusammenfassung

Am 28. und 29. März 2001 wurden in Dannenberg Messungen der Neutronen-Strahlung in der Umgebung der sechs Behälter vom Typ CASTOR HAW-20/28 durchgeführt, die von La Hague nach Gorleben transportiert wurden.

Die Konzentration auf Neutronen-Strahlung erfolgte, weil diese im Strahlungsfeld der fraglichen Behälter gegenüber der Gamma-Strahlung dominiert.

Die Messungen erfolgten mit einer Neutronen-sonde vom Typ LB 6411 und dem dazugehörigen Monitor UMo LB 123 der Firma EG&G Berthold. Dieses Gerät ist für die Erfassung des CASTOR-typischen Neutronen-Spektrums gut geeignet.

Die wichtigsten Messergebnisse:

Auch in relativ großem Abstand von den CASTOR-Behältern traten Neutronen-Dosisleistungen auf, die deutlich über dem natürlichen Hintergrund liegen.

Eine Messung in 80 m Entfernung, bei einem Wohnhaus, zeigte beispielsweise rd. das Zwanzigfache des natürlichen Neutronen-Hintergrundes. Der Messwert lag damit etwa im Bereich der natürlichen Strahlenbelastung durch sämtliche Strahlenarten bzw. etwas höher.

Die Strahlungsintensität (nur Neutronen) in rd. 24 m Entfernung seitlich vom Zug liegt bei einem Vielfachen der natürlichen Strahlenbelastung durch sämtliche Strahlenarten.

Die Einhaltung des verkehrsrechtlichen Grenzwertes in 2 m Abstand vom Transportfahrzeug wurde durch Abschätzung überprüft. Eine Messung in diesem Abstand war nicht möglich.

Es zeigte sich, dass die Einhaltung von der Annahme über die biologische Wirksamkeit der Neutronen-Strahlung abhängig ist. Die Bandbreite der wissenschaftlichen Positionen zum sogen. "Wichtungsfaktor", der diese Wirksamkeit beschreibt, geht von 15 bis 75. Bei Ansatz von 15 bis 25 wird der Grenzwert voraussichtlich eingehalten, im Bereich von 25 bis 75 wird er überschritten.

1. Einleitung

In der Zeit vom 26. bis 29. März 2001 fand ein Transport von hochradioaktiven verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen aus der Wiederaufarbeitungsanlage La Hague (Frankreich) ins Zwischenlager Gorleben statt.

Es wurden sechs Behälter vom Typ CASTOR HAW-20/28 transportiert. Ein solcher Behälter kann entweder 20 oder 28 HAW-Glaskokillen aufnehmen. Das Gewicht einer Kokille (einschl. Stahlumhüllung) beträgt rund 500 kg¹. Lt. Pressemeldungen lag das Gesamtgewicht der Beladung bei 85 t Atommüll; dies deutet darauf hin, dass sämtliche Behälter mit 28 Kokillen befüllt waren.

Die Behälter gelangten per Bahn, auf ca. 20 m langen Spezialwaggons, nach Deutschland. Endpunkt der Bahnfahrt war Dannenberg, wo für die letzte Etappe des Transportes, zum Zwischenlager, eine Umladung auf Tieflader-LKW erfolgte.

Behälter vom Typ CASTOR oder einem vergleichbaren Typ, die mit abgebrannten Brennelementen aus Atomkraftwerken oder mit HAW aus der Wiederaufarbeitung beladen sind, senden Neutronen- und Gamma-Strahlung aus. (Im Inneren des Behälters werden außerdem Alpha- und Beta-Strahlung frei, die durch die Behälterwände vollständig abgeschirmt werden.)

Um Daten über die Intensität der Neutronen-Strahlung in der Umgebung der Behälter zu erhalten, die den realen Bedingungen beim Transport entsprechen, führte der Berichtersteller im Auftrag von Greenpeace mit einem Neutronenmessgerät von Greenpeace am 28. und 29. März Messungen in Dannenberg durch.

Die ausschließliche Konzentration auf Neutronen-Strahlung erfolgte aus zwei Gründen:

Bei Ermittlung der Gesamtdosisleistung (Äquivalentdosisleistung) nach den gültigen Vorschriften (EURATOM 96/29, nach der Empfehlung 60 der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP) dominiert die Neutronen-Strahlung in der Umgebung eines befüllten CASTOR HAW-20/28 gegenüber der Gamma-Strahlung (etwa im Verhältnis 4 : 1)². Beim Transport von abgebranntem Kernbrennstoff überwiegt dagegen in den meisten Fällen die Gamma-Strahlung³.

Neuere wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen, dass die biologische Wirksamkeit der Neutronen-Strahlung, ausgedrückt durch den sogen. Wichtungsfaktor, nach ICRP 60 möglicherweise deutlich unterschätzt wird, Neutronen-Strahlung also gefährlicher ist, als bisher offiziell angenommen. Die Bedeutung der Neutronen-Strahlung wird damit für alle Transporte von HAW und bestrahlten Brennelementen erhöht.

Die Messungen fanden bei der Einfahrt des Zuges in Dannenberg sowie während des Verladens auf LKW statt.

¹ Specifications of Vitrified Residues Produced from Reprocessing at UP2 or UP3-A La Hague Plants, 2nd Series; Cogema, Branche Retraitement, July 1986

² Börst, F.-M. et al.: Strahlungsmessungen an Transport- und Lagerbehältern zur Beförderung von hochaktiven Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung und von bestrahlten Brennelementen; Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-ET-32/00, Salzgitter 2000, Tabelle 3

³ Schwarz, G.: Sicherheitsanalyse zur bestimmungsgemäßen Beförderung von radioaktiven Abfällen und bestrahlten Brennelementen in der Region Gorleben; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS-A-2814, August 2000, Abbildung 7

2. Eingesetzte Messtechnik

Die Messungen wurden mit einer Neutronensonde vom Typ LB 6411 sowie dem dazugehörigen Universellen Monitor für den Strahlenschutz Typ UMo LB 123 der Firma EG&G Berthold durchgeführt. Die Geräte waren voll funktionstüchtig (Überprüfung durch den Hersteller im Februar 2001.)

Die Neutronensonde LB 6411 besteht aus einem zylindrischen Proportionalzählrohr, das mit He-3 gefüllt und von einer Moderatorkugel aus Polyäthylen umgeben ist. Das Zählrohr ist hauptsächlich für thermische (langsame) Neutronen empfindlich. Damit auch Neutronen höherer Energie nachgewiesen werden können, müssen diese im Moderator abgebremst werden. Dies geschieht durch Kollision schneller Neutronen mit Atomkernen im Moderatormaterial, wobei die Neutronen Energie verlieren.

Das Ansprechvermögen auf Neutronen eines breiten Energie-Spektrums wurde so optimiert, dass die Zählrate für jede Neutronenenergie möglichst gut der Äquivalentdosisleistung proportional ist⁴.

Das Gerät ist gut für Messungen im Neutronenfeld von CASTOR-Behältern geeignet. Es unterschätzt die Dosisleistung bei der vorliegenden Energieverteilung systematisch um 10 – 20 %⁵. Diese bekannte Abweichung kann bei der Auswertung der Ergebnisse korrigiert werden.

Es wurde in Impulsen pro Sekunden (IPS) gemessen. Zur Ermittlung der Neutronen-Äquivalentdosisleistung nach ICRP 60 in $\mu\text{Sv/h}$ (entsprechend einem Wichtungsfaktor für Neutronen von ca. 15) sind die Ergebnisse in IPS mit dem Faktor 1,27 zu multiplizieren. Weiterhin sind die Ergebnisse zur Korrektur der o.g. systematischen Unterschätzung durch 0,85 zu teilen. Die Umrechnung auf andere Wichtungsfaktoren ist durch einfache Multiplikation möglich (s. unten).

3. Messergebnisse

Die Intensität der natürlichen Neutronen-Hintergrundstrahlung auf dem Dannenberger Bahnhof wurde durch Nullmessungen am 27. März 2001 ermittelt. Sie lag im Bereich von 0,004 bis 0,006 Impulsen pro Sekunden (IPS).

Bei der Ermittlung der Neutronen-Strahlung an den Behältern war eine freie Auswahl der Messpunkte nach messtechnischen Gesichtspunkten sowie eine exakte Ortsbestimmung nicht möglich. Die Messungen erfolgten an zwei Orten:

“Haus”: Aus einem Fenster im ersten Stock eines am Bahngleis gelegenen Hauses, rd. 100m westlich vom Verladebahnhof. Der Abstand zu den Schienen lag bei ca. 24 m⁶. Aufgrund der Geometrie des Fensters konnte bei der Messung ein Winkel von 114° ohne Abschirmung durch Wände erfasst werden, entsprechend einer Strecke von ca. 70 m auf

⁴ Neutronensonde LB 64 11 – Betriebsanleitung; EG&G Berthold, 1. Ausgabe, Dezember 1995

⁵ Heimlich, F.H. (Hrsg.): Messungen im Neutronen- und Gamma-Strahlungsfeld eines beladenen CASTOR-IIa-Behälters im Transportbehälterlager Gorleben und Vergleich der Messergebnisse für Neutronen mit Monte-Carlo-Rechnungen; BfS-ET-24/97, Salzgitter 1997

⁶ 24,2 m nach Angabe der Fachgruppe Radioaktivität der Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg. Der Berichtersteller konnte diesen Wert durch Schätzung, optimiert durch Orientierung an der Länge von Polizeifahrzeugen im Gleisbereich u.ä., bestätigen.

den Schienen. Die Messungen wurden am 28.03. zwischen 20:00 und 21:00 Uhr durchgeführt.

“Wiese”: Auf einer Wiese neben dem Verladebahnhof. Eine Annäherung auf bis zu ca. 20 m an die Behälter war möglich, und zwar im Bereich des zweiten und dritten Behälters (von Osten gezählt). Auf der Wiese konnten auch Messungen in größeren Abständen durchgeführt werden (bis zu ca. 80 m von den Behältern). Das gesamte Gelände liegt um knapp einen Meter tiefer als der Verladebahnhof. Die Messungen erfolgten in der Zeit zwischen 23:30 und 00:15 am 28. und 29.03.2001.

Die Messwerte werden hier zusammenfassend referiert. Sie sind im Einzelnen im Anhang 1 zusammengestellt.

Messungen vom Haus:

Während des Rangierens des Zuges westlich vom Haus war der vorderste Waggon etwa 40 m vom Haus entfernt. Das Messgerät befand sich auf einer gedachten Linie mit etwa 30° Abweichung von der Längsachse des Zuges, also ziemlich nahe der Längsrichtung. Grundsätzlich ist in Längsrichtung nach früheren Messungen, u.a. auch solchen des Berichterstaters⁷, erheblich geringere Strahlungsintensität zu erwarten als in radialer Richtung.

Durch die Rangiertätigkeit änderten sich die Positionen der Behälter (mit Ausnahme des ersten) von Messung zu Messung.

Trotz dieser ungünstigen Geometrie und der relativ großen Entfernung wurden Werte im Bereich von 0,012 bis 0,07 IPS gemessen, d.h. Werte, die deutlich (maximal um mehr als den Faktor 10) über der Nullmessung lagen. Der Messfehler lag zwischen $\pm 20\%$ und $\pm 70\%$.

Weiterhin war eine Messung während der Vorbeifahrt des Zuges möglich. Diese erfolgte mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,8 m/sec innerhalb von 150 Sekunden. Um einen belastbaren Wert mit niedriger Fehlerbreite zu erhalten und in der begrenzten Zeit Umschaltvorgänge am Messgerät zu vermeiden, wurde die mittlere Strahlungsintensität während der gesamten Vorbeifahrt gemessen. Der Messzeitraum begann mit der Passage des vorderen Endes des ersten Waggons an dem der Messstelle zunächst gelegenen Gleispunkt und endete mit der Passage des hinteren Endes des sechsten Waggons an der gleichen Stelle.

Der Mittelwert der Strahlung für die Vorbeifahrt lag bei 1,4 IPS, bei einem Messfehler von $\pm 7\%$. Eine Differenzierung nach Behältern war unter den gegebenen Umständen nicht möglich. Auffällig war jedoch, dass der Wert bei der Vorbeifahrt des ersten Behälters deutlich niedriger war (ca. 0,7 IPS). Auch bei der Vorbeifahrt des zweiten lag er noch unter dem Mittelwert lag (ca. 1,2 IPS).

Messungen von der Wiese:

Die Messungen wurden überwiegend in ca. 1 m Höhe über dem Boden durchgeführt, um den abschirmenden Effekt der Böschung zumindest teilweise auszugleichen. In rd. 20 m Abstand vom Verladebahnhof, auf dem sich Fahrzeuge, Container u.ä. befanden, bei denen eine gewisse Abschirmwirkung angenommen werden muss, wurden 0,6 bis 0,7 IPS gemessen, bei einem Messfehler von rd. $\pm 10\%$.

⁷ Hirsch, H.: Neutronen-Messungen beim CASTOR-Transport 1997; Vortrag auf dem internationalen Kongress 'Die Wirkung niedriger Strahlendosen', Universität Münster, 19. – 21. März 1998

Die Messwerte fallen mit größerem Abstand nur allmählich ab. In ca. 80 m Entfernung, wenige Meter von einem Wohnhaus entfernt, wurden noch 0,11 IPS (Messfehler rd. $\pm 25\%$) festgestellt.

4. Diskussion der Ergebnisse

Die biologische Wirksamkeit einer Strahlungsart wird durch den sogen. Wichtungsfaktor angegeben – je größer dieser ist, desto größer (bei gegebener Energiedosis) die Äquivalentdosis und damit die Schadwirkung.

Zur Zeit wird in Deutschland von Behörden und Betreibern von Atomanlagen für Neutronen, wie sie von CASTOR-Behältern ausgesandt werden, nach ICRP 60 ein Wichtungsfaktor von ca. 15 angesetzt. (Im Einzelnen werden Neutronen unterschiedlicher Energie auch unterschiedliche Wichtungsfaktoren zugeordnet; der Wert 15 entspricht in etwa einem typischen CASTOR-Energiespektrum.)

Unter Berücksichtigung neuerer Experimente an Tieren und Zellkulturen, sowie der Häufigkeit von Krebs bei fliegendem Personal (die Höhenstrahlung besteht zu einem wesentlichen Anteil aus Neutronen) hat der Marburger Nuklearmediziner Prof. Dr. Horst Kuni dagegen festgestellt, dass der Wichtungsfaktor nach ICRP 60 deutlich zu niedrig ist. Kuni schlägt den Wert 75 für den Wichtungsfaktor vor, wobei allerdings noch keine Garantie besteht, dass dieser Faktor tatsächlich auf der sicheren Seite liegt⁸.

Auf die Position von Kuni und anderen Wissenschaftlern, dass darüber hinaus die Wirksamkeit sämtlicher Strahlungsarten zu niedrig beurteilt wird und daher pauschal die Grenzwerte gesenkt werden müssten, kann im Rahmen dieses Messberichtes nicht weiter eingegangen werden. Ebenso wird auf eine weitere Diskussion der angemessenen Wahl des Wichtungsfaktors verzichtet. Die folgende Diskussion berücksichtigt das vom Wichtungsfaktor 15 bis zum Faktor 75 reichende Spektrum der wissenschaftlichen Positionen.

Die Ermittlung der Dosisleistung nach ICRP 60 aus den Messwerten erfolgt, wie schon dargestellt, durch Multiplikation mit dem geräteeigenen Kalibrierfaktor von $1,27 \mu\text{Sv/h}$ pro Impuls pro Sekunde sowie durch Division mit 0,85, um den systematischen Messfehler bei CASTOR-Neutronen auszugleichen. Zur Umrechnung auf einen Wichtungsfaktor von 75 ist lediglich eine weitere Multiplikation mit 5 erforderlich.

Die mittlere Dosisleistung in rd. 24 m Entfernung neben dem Zug lag demzufolge bei ca. $2,1 \mu\text{Sv/h}$ (Wichtungsfaktor $w_R = 15$) bzw. ca. $10,5 \mu\text{Sv/h}$ ($w_R = 75$). Da die Strahlung des ersten Behälters (evtl. auch des zweiten) deutlich niedriger war als der Mittelwert, sind zumindest bei den folgenden fünf Behältern höhere Werte anzunehmen. Eine grobe Schätzung ergibt eine Strahlungsintensität von ca. 1,6 IPS, d.h. Dosisleistungen bis zu $2,4 \mu\text{Sv/h}$ ($w_R = 15$) bzw. $12 \mu\text{Sv/h}$ ($w_R = 75$), unter der Annahme, dass diese fünf Behälter einheitliche Strahlungsintensität aufwiesen⁹.

⁸ Siehe dazu z.B.: Kuni, H.: Wichtungsfaktoren; in: Strahlengefahr für Mensch und Umwelt; Berichte des Otto Hug Strahleninstitutes Nr. 21-22, April 2000

⁹ Aufgrund der gegebenen Messanordnung konnte diese Annahme nicht überprüft werden. Eine exakte Übereinstimmung ist keinesfalls anzunehmen; Schwankungen im Bereich von zumindest $\pm 10\%$ erscheinen plausibel. Die tatsächliche Dosisleistung bei dem am stärksten strahlenden Behälter lag daher voraussichtlich noch höher als die angegebenen $2,4$ bzw. $12 \mu\text{Sv/h}$.

Beim Rangieren treten in ca. 40 m Entfernung, etwa in Längsrichtung des Zuges (Abweichung rd. 30°), Dosisleistungen von bis zu rd. 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ ($w_R = 15$) bzw. 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ ($w_R = 75$) auf.

Im Gelände um den Verladebahnhof liegt die Dosisleistung noch in 80 m Entfernung bei rund 0,16 $\mu\text{Sv/h}$ ($w_R = 15$) bzw. 0,8 $\mu\text{Sv/h}$ ($w_R = 75$).

Auch in relativ großen Entfernungen liegt die Neutronen-Strahlung somit selbst bei Ansatz eines niedrigen Wichtungsfaktors im Bereich der natürlichen Strahlenbelastung durch sämtliche Strahlenarten (ca. 0,1 $\mu\text{Sv/h}$) bzw. höher.

Anhand der verschiedenen, hier angegebenen Dosisleistungen kann durch Multiplikation mit der anzunehmenden Aufenthaltsdauer leicht die gesamte Strahlenbelastung ermittelt werden, denen Personen an den entsprechenden Orten jeweils ausgesetzt sind. Darauf wird hier nicht weiter eingegangen.

5. Einhaltung des verkehrsrechtlichen Grenzwertes in 2 m Abstand

Entsprechend den geltenden Transportvorschriften darf in 2 m Abstand von der Oberfläche des Transportfahrzeuges eine Dosisleistung von 100 $\mu\text{Sv/h}$ nicht überschritten werden.

Es ist bekannt, dass dieser Grenzwert bei dem bereits länger im Zwischenlager Gorleben befindlichen CASTOR HAW-20/28 schon bei Annahme eines Wichtungsfaktors von 15 zu mehr als 50 % ausgeschöpft wird (für die Summe von Neutronen- und Gamma-Strahlung)¹⁰. Hier soll mittels grober Abschätzungen versucht werden, festzustellen, ob bzw. inwieweit dieser offenbar kritische Grenzwert bei den Ende März 2001 nach Gorleben transportierten Behältern eingehalten wurde.

Ausgegangen wird dabei von dem oben angegebenen Wert der maximalen Strahlungsintensität in 24 m Entfernung (1,6 IPS).

Eine Umrechnung auf 2 m Entfernung ist nur mit erheblichen Ungenauigkeiten möglich. Sie wurde auf drei verschiedene Methoden durchgeführt:

1. Abnahme der Dosisleistung mit dem Kehrwert der Entfernung. Damit wird der Unterschied der Dosisleistung zwischen 24 m und 2 m auf jeden Fall unterschätzt, die Dosisleistung in 2 m Entfernung somit ebenfalls. Ergebnis: $12 \times 1,67 = \text{ca. } 19 \text{ IPS}$.
2. Abnahme der Dosisleistung entsprechend Messungen des BfS an einem anderen gefüllten CASTOR HAW-20/28¹¹, d.h. ca. um den Faktor 20: $20 \times 1,6 = \text{ca. } 32 \text{ IPS}$.
3. Abnahme der Dosisleistung nach einer Näherungsformel entsprechend den geometrischen Gegebenheiten – ca. 50 IPS.

Genauere Angaben zu den durchgeführten Abschätzungen sind in Anhang 2 zusammengestellt.

¹⁰ GRS-A-2814 (Fußnote 3), Abbildung 12

¹¹ BfS-ET-32/00 (Fußnote 2), Abbildung 9

Unter Berücksichtigung der großen Schwierigkeiten, die damit verbunden sind, in einem komplexen Strahlenfeld Rückschlüsse von großen Entfernungen auf kleine durchzuführen, ist die Übereinstimmung der drei Abschätzung als gut anzusehen. Für die weiteren Überlegungen wird der gerundete Mittelwert der ersten und dritten Methode zugrundegelegt, der im übrigen etwa dem Ergebnis der zweiten entspricht (35 IPS). Dabei ist eine Fehlerbandbreite von ca. $\pm 50\%$ anzunehmen.

Bei der Überprüfung, ob der Grenzwert eingehalten wird, ist auch die Gamma-Dosisleistung zu berücksichtigen. Diese kann anhand des oben angegebenen Verhältnisses zur Neutronenstrahlung (1 : 4 bei Wichtungsfaktor 15) abgeschätzt werden und liegt in 2 m Entfernung ungefähr bei 13 $\mu\text{Sv/h}$.

Es ergeben sich folgende Werte für die Äquivalent-Dosisleistung in 2 m Entfernung von den stärker strahlenden Behältern, angegeben in $\mu\text{Sv/h}$ (gerundet auf ganze Zahlen):

Wichtungsfaktor	Neutronen-Dosisleistung	Gesamt-Dosisleistung
15	52	65
25	87	100
50	174	187
75	261	274

Dabei entspricht der Wichtungsfaktor 15 den derzeit gültigen Vorschriften, der Faktor 75 den neuesten Erkenntnissen gemäß Prof. Kuni. Die beiden Werte dazwischen wurden gewählt, um zu prüfen, inwieweit bereits geringere Revisionen des derzeitigen Faktors in Richtung auf größere biologischen Wirkung zu Überschreitungen von Grenzwerten führen.

Es wird deutlich, dass bereits relativ geringe Erhöhungen des Wichtungsfaktors dazu führen, dass der Grenzwert erreicht bzw. überschritten würde. Nur für einen kleinen Bereich des Spektrums der derzeitigen wissenschaftlichen Positionen kann von seiner Einhaltung ausgegangen werden.

Anhang 1: Zusammenstellung der Messergebnisse

Nullmessungen (natürlicher Neutronen-Hintergrund):

Messungen vom 27. und 28.03.2001, vormittags, am Messort "Haus".

Nr.	Abstd. (m)	Anordnung	Messwert (IPS)	Messdauer (sek)	Messfehler (%)	Bemerkungen
1	--	--	0,005	3600	24,3	--
2	--	--	0,004	7200	18,9	--
3	--	--	0,006	3600	21,3	--
4	--	--	0,004	3600	26,7	--

Messungen während des Rangierens:

Messungen vom 28.03.2001 zwischen 20:00 und 21:00 Uhr, Messort "Haus".
Der Messpunkt war ca. 40 m vom vordersten Waggon entfernt, auf einer Linie, die etwa 30° von der Längsachse des Zuges abwich.

Der vorderste (östlichste) Behälter war während der Messungen stationär. Die anderen wurden rangiert und befanden sich in unterschiedlichen Entfernungen hinter dem ersten Behälter, so dass teilweise nur dieser zum Messergebnis beitragen konnte.

Aufgrund des zunehmenden Abstandes dürften auch sonst die Beiträge der Behälter hinter dem zweiten vernachlässigbar sein. Deren Position wird in der Tabelle nicht im Einzelnen vermerkt.

Die Messdauer war grundsätzlich auf 200 Sekunden eingestellt, wurde jedoch öfter gekürzt, um bestimmte Konfigurationen der Behälter möglichst unverfälscht zu erfassen. Es ist ersichtlich, dass der erste Behälter allein deutlich niedrigere Werte liefert.

Nr.	Abstd. (m)	Anordnung	Messwert (IPS)	Messdauer (sek)	Messfehler (%)	Bemerkungen
5	40	s.o.	0,015	200	57,7	Überw. nur erster Beh.
6	40	s.o.	0,02	115	70,7	Nur erster Beh.
7	40	s.o.	0,07	68	44,7	Zwei vorderste Beh.
8	40	s.o.	0,012	164	70,7	Nur erster Beh.
9	40	s.o.	0,03	200	40,8	Zwei vorderste Beh.
10	40	s.o.	0,03	200	37,8	Zwei Behälter +

11	40	s.o.	0,04	120	44,7	Zwei Behälter +
12	40	s.o.	0,05	200	30,2	Zwei Behälter +
13	40	s.o.	0,05	200	31,6	Zwei Behälter +
14	40	s.o.	0,05	400	21,3	Zwei Behälter +

Messung bei Vorbeifahrt des Zuges:

Während der Vorbeifahrt des Zuges am Messpunkt "Haus" wurde eine Messung durchgeführt, in der Zeit des Durchganges an jenem Punkt des Gleises, der dem Messgerät am Nächsten lag (von Vorderende erster Waggon bis Hinterende sechster Waggon). Die Waggon mit den CASTOR-Behältern waren dabei direkt aneinander befestigt, ohne andere Waggon zum Abstandhalten dazwischen. Der Zug fuhr mit ca. 0,8 m/sec in 150 Sekunden vorbei.

Nr.	Abstd. (m)	Anordnung	Messwert (IPS)	Messdauer (sek)	Messfehler (%)	Bemerkungen
15	24,2	s.o.	1,4	150	7,1	Bei erstem Beh. 0,7 IPS, bei zweitem 1,2 IPS

Messungen am Ort "Wiese":

Am 28./29.03.2001 in der Zeit von 23:30 bis 00:15 wurden Messungen auf der Wiese südlich des Verladebahnhofes durchgeführt. Die gesamte Wiese liegt knapp 1 m tiefer als der Bahnhof. Um die dadurch bedingte Abschirmung zumindest teilweise auszugleichen, wurde meist in rd. 1 m Höhe gemessen.

Während der Messungen waren die Verladearbeiten im Gange, jedoch wurde in der angegebenen Zeit kein Behälter hochgehoben. Die Wiese lag im Bereich des zweiten und dritten Behälters (von Osten gesehen).

Die Messzeiten wurden gewählt, um einerseits möglichst geringe Messfehler zu erzielen, andererseits an möglichst vielen Punkten messen zu können, da mit Störungen der Messung jederzeit gerechnet werden musste.

Nr.	Abstd. (m)	Anordnung	Messwert (IPS)	Messdauer (sek)	Messfehler (%)	Bemerkungen
16	20	Mitte	0,57	140	11,2	Gerät am Erdboden
17	20	Mitte	0,64	140	10,6	1 m Höhe
18	20	Ostrand	0,7	140	10,2	Gut 1 m Höhe
19	18	Westrand	0,61	140	10,8	Gut 1 m Höhe
20	20	Mitte	0,59	140	11,0	Gut 1 m Höhe
21	30	Mitte	0,41	150	12,7	1 m Höhe

22	40	Mitte	0,28	150	15,4	1 m Höhe
23	50	Mitte	0,15	150	20,4	1 m Höhe
24	60	Mitte	0,22	150	17,4	1 m Höhe
25	70	Mitte	0,15	150	21,3	1 m Höhe
26	80	Mitte	0,11	150	24,3	1 m Höhe

Anhang 2: Zur Umrechnung von Messwerten auf andere Entfernungen

Im Nahbereich eines bzw. von mehreren Behältern nimmt die Strahlungsintensität proportional zum Kehrwert des Abstandes ab ($1/r$ -Verhalten). In Abständen, die groß sind im Vergleich zur Länge des Behälters bzw. der Behälter-Anordnung erfolgt die Abnahme dagegen proportional zum Quadrat des Abstandes ($1/r^2$ -Verhalten).

In dem Bereich ab wenige Meter von der Behälteroberfläche bis zu rd. 100 m gilt im Falle der sechs transportierten CASTOR-Behälter ein Verhalten, das eine Mischung der beiden genannten Formeln darstellt.

Eine genaue Berechnung der Strahlungswerte nahe bei den Behältern ist anhand von Messwerten aus 20 m Entfernung und mehr nicht möglich. Erschwerend wirkt, dass die Behälter komplizierte Konfigurationen einnehmen (mit Abständen nebeneinander, beim Rangieren und Verladen auch noch seitlich versetzt).

Außerdem beeinflusst die Umgebung durch Streuung der Neutronen die real auftretenden Werte. Bebauung, Polizeifahrzeuge (insb. Wasserwerfer aufgrund der moderierenden Wirkung von Wasser), größere Menschenansammlungen usw. verändern das Neutronenfeld, ebenso der Erdboden, insb. bei größerer Feuchtigkeit.

Daher wurden grobe Abschätzungen nach drei verschiedenen Methoden durchgeführt. Auf diese Weise kann ein ungenauer, aber belastbarer Wert für den Nahbereich der Behälter ermittelt werden. Dabei wird der Abstand zwischen Behälteroberfläche und Oberfläche des Transportfahrzeuges nicht berücksichtigt; bei der gegebenen Genauigkeit hat dies nur minimalen Einfluss.

Die erste Methode beruht auf der Annahme, dass im gesamten Bereich zwischen 2 m und 24 m Entfernung das $1/r$ -Verhalten exakt gilt. De facto wird dies in diesem Abstandsbereich nicht mehr der Fall sein. Das $1/r$ -Verhalten entspricht gegenüber dem $1/r^2$ -Verhalten einem geringeren Abfall (bzw., von 24 m aus gesehen, einem geringeren Anstieg) der Strahlungsintensität, unterschätzt also auf jeden Fall den abzuschätzenden Wert.

Für die zweite Methode wurden Messwerte des BfS an einem anderen CASTOR HAW-20/28 herangezogen (Quelle: S. Fußnote 10) und daraus das Verhältnis zwischen der Intensität in 2 m Entfernung und jener in 24 m Entfernung ermittelt. Da dazu lediglich eine Graphik zur Verfügung steht, ist dies bereits mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet. Außerdem wurde diese Messung nur an einem einzigen Behälter durchgeführt, der sich in einer anderen Konfiguration befand (stehend im Zwischenlager Gorleben). Von der Beladung her sind dagegen keine allzu großen Abweichungen zu den sechs Ende März 2001 transportierten Behältern zu erwarten. Zusammenfassend kann bei dieser Methode nicht festgestellt werden, ob sie eher zu Über- oder zu Unterschätzung führt.

Die dritte Methode besteht aus dem Einsatz einer einfachen geometrisch-analytischen Abschätzung, die eine begründete Kombination von $1/r$ - sowie $1/r^2$ -Verhalten gestattet. Die CASTOR-Behälter werden dabei als Flächen-Strahlungsquelle angesehen¹², deren Länge im gegebenen Fall mit 70 m (entsprechend dem freien Messwinkel des Gerätes)

¹² Goedecke, R.: Bericht über die Messung der Dosisbelastung durch Neutronenstrahlung aus drei Brennelement-Transportbehältern vom Typ CASTOR V/19; im Auftrag von Greenpeace e.V., Hamburg, 1997

und deren Breite mit 2,5 m (Behälterdurchmesser) angenommen wurde. Dabei ist zu berücksichtigen, dass tatsächlich keine durchgängige Flächenquelle vorhanden ist; die Behälter mit gut 6 m Länge liegen auf Waggons mit rd. 20 m Länge, so dass erhebliche Abstände bestehen. Um dem Rechnung zu tragen, wurde das Endergebnis halbiert. Die Wahl dieses Korrekturfaktors ist nicht völlig frei von Willkür. Auch mit ihr werden die Messwerte in 2 m Entfernung mit hoher Wahrscheinlichkeit immer noch überschätzt. Außerdem kommt der Einfluss der Streuung der Neutronen am Erdboden, Polizeifahrzeugen usw. dazu, der hier nicht abgeschätzt werden kann.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle drei eingesetzten Methoden stark fehlerbehaftet sind, wobei die erste Methode jedenfalls zu einer Unterschätzung, die dritte zu einer Überschätzung führt.