

## Dosisleistungsabschätzung bei einem Versandstück (Ra-223+) und Ermittlung der Transportkennzahl



Industrie Service

**Mehr Sicherheit.  
Mehr Wert.**

von: *Dr. rer. nat. Michael Bittner, Dipl.-Ing.(BA) Jens Richter*  
*Abteilung Strahlenschutz, TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Leipzig*

Der Transportindex oder die Transportkennzahl für ein Versandstück wird nach den ADR-Bestimmungen ermittelt. Danach ist die höchste Dosisleistung in mSv/h in einem Abstand von 1 m von der Außenfläche des Versandstückes oder der Palette zu bestimmen. Dieser Wert ist mit 100 zu multiplizieren, die so definierte Zahl wird als Transportkennzahl bezeichnet. Wenn die größte gemessene Oberfläche der Palette kleiner 1 m<sup>2</sup> ist, ist als Multiplikationsfaktor der Wert 1 anzusetzen. Zur Bewertung der bestehenden Verteilung der Äquivalentdosisleistung um das Versandstück sind Berechnungen der Photonen-Dosisleistung erforderlich. Bei komplexen Anordnungen radioaktiver Strahler bzw. Geometrien von Versandstücken wird die Berechnung mittels stochastischer Simulationsverfahren, wie Monte-Carlo-Simulation mit dem Code MCNP5 (Version: 1.51) [L04], absolviert. Für die Simulationen mit MCNP5 wurde ein dreidimensionales Modell des Versandstückes, welches alle relevanten Strahlenquellen beinhaltet, erstellt.

## 1. Ausgangsdaten

Das Radionuklid Ra-223+ (Xofigo, früher Alpharadin) wird für medizinische Anwendungen hergestellt, konfektioniert, verpackt und versendet. Die Einzelmenge der radioaktiven Substanz Ra-223+ von maximal 14 MBq, die als Flüssigkeit in einem Volumen von ca. 6 ml vorliegt, wird in verschlossenen Vials ( $\varnothing$ : 2,5 cm, Höhe: ca. 3,5 cm) und in einem Bleicontainer mit einer vorgesehenen Wandstärke aus Blei von 4,5 mm zur Abschirmung der äußeren Strahlung konfektioniert [L01]. Dieser Bleicontainer wurde in eine quaderförmige Styropor-Box mit den Außenmaßen 14 cm x 14 cm x 10 cm eingebracht und zusätzlich in einen Karton verpackt. Für ein derartiges Versandstück liegen Berechnungen und Messungen der Äquivalent-Dosisleistung um das Versandstück vor [L01]. Im gegenwärtigen Routinebetrieb werden Bleicontainer mit einer Wandstärke von 6 mm in einer quaderförmigen Styropor-Box (18,5 cm x 18,5 cm x 17,5 cm) eingesetzt. Für die gewählten Ausgangsdaten wurde die Äquivalentdosisleistung berechnet und mit den Messergebnissen der Dosisleistung verglichen.

Zur Berechnung der Äquivalent-Dosisleistung wurden alle Gamma-Linien des Zerfalls von Ra-223 mit nicht vernachlässigbarer Intensität (etwa  $\approx 1\%$ ) sowie aller wesentlichen Gamma-Linien der Zerfälle der Töchternuklide berücksichtigt.

## 2. Ermittlung der Dosisleistung um ein Versandstück mit Ra-223+

Vor den Monte-Carlo-Simulationen mittels MCNP5 [L04] wurde ausgehend von den Gammalinien des Zerfalls von Ra-223 und dessen radioaktiven Töchter (Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207) die Gammadosisleistungskonstante für diesen Zerfall ermittelt, um mit einfachen bzw. auch komplexeren Betrachtungen die Dosisleistung um das jeweilige Versandstück oder die gewählte Anordnung von Versandstücken über das Abstandsquadratgesetz zu bestimmen. Unter Berücksichtigung aller Photonen-Linien der Zerfallskette wurde ein Wert von  $0,061 \text{ mSv/h m}^2/\text{GBq}$  für die Gammadosisleistung berechnet [L03]. Dieser ist in die weiteren Betrachtungen mit eingeflossen.

## 3. Ergebnisse der Dosisleistungsberechnungen

Die ersten Berechnungsergebnisse der MC-Simulation zeigen die Mesh-Tally-Plots für die Dosisleistungsverteilung [mSv/h] in und um das Versandstück entsprechend der Berechnungsmodelle BVS02 und BVS12 für Ra-223+ (inklusive der Gamma-Strahlung aller radioaktiven Töchter) ohne Blei-Container bzw. mit 4,5 mm Blei-Abschirmung.

Die Darstellungen der Dosisleistungsverteilungen (Abb. 01 a-d) verdeutlichen eindrucksvoll, wie durch den Blei-Container mit der Dicke von 4,5 mm Blei die Gammadosisleistung im Nahbereich der radioaktiven Substanz (grüner Farbbereich um Faktor 4, blauer Farbbereich um ca. Faktor 10) reduziert wird. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass selbst bei einem Blei-Container von 4,5 mm Dicke eine Gammadosisleistung bis über  $500 \mu\text{Sv/h}$  auf dessen Oberfläche erwartet werden muss.

Die vorgestellten Berechnungsergebnisse für den unmittelbaren Nahbereich der radioaktiven Quelle (Ra-223+) sind nur ein Aspekt des Strahlenschutzes. Für den Schutz des Personals wesentlicher sind die vorherrschenden Werte für die Gamma-Dosisleistung auf der Oberfläche des Versandstücks und in dessen unmittelbarer Umgebung (ca. 10 cm von der Oberfläche entfernt).

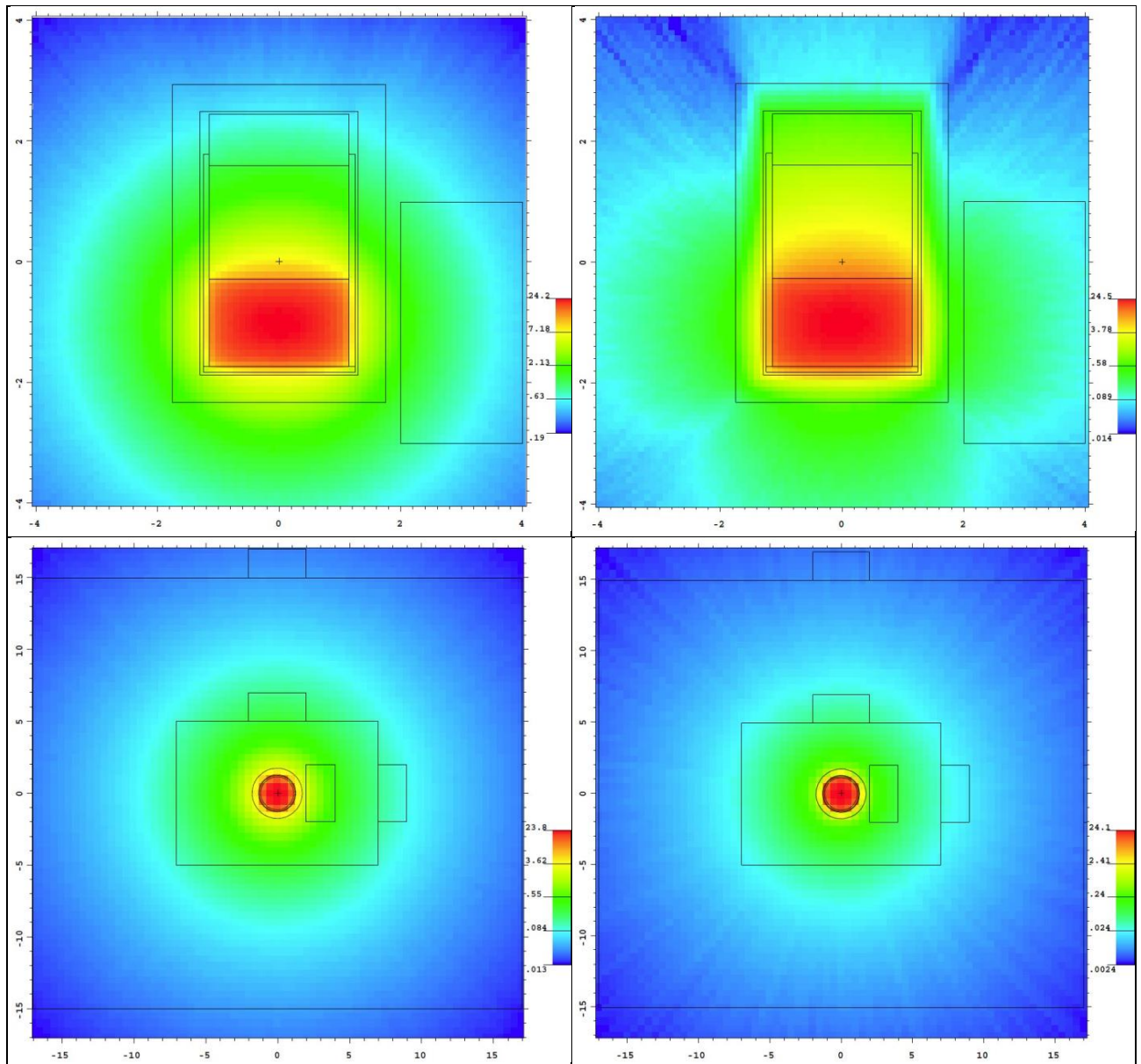


Abb. 01 a-d Dosisleistungsverteilung [mSv/h] in der xz-Schnittebene (oben) bzw. in der xy-Ebene (unten) durch das Zentrum der radioaktiven Flüssigkeit (rote Fläche) für die Berechnung BVS02 ohne Blei-Container (li.) und BVS12 mit 4,5 mm Blei (re.).

Für die beiden Modelle (BVS03 bzw. BVS13) wurden analoge Berechnungen hinsichtlich der aus den Beta-Zerfällen der Töchternuklide Pb-211 und Tl-207 resultierenden Bremsstrahlung durchgeführt. Trotz der jeweils hohen Intensitäten der Zerfälle und der beachtlichen maximalen Elektronenenergien (1,378 bzw. 1,436 MeV) liegt die aus der Bremsstrahlung herrührende Dosisleistung um etwa zwei Größenordnungen unter der Gammadosisleistung. Die Berechnungsergebnisse zu den betreffenden Modellen sind in Abb. 02 enthalten.

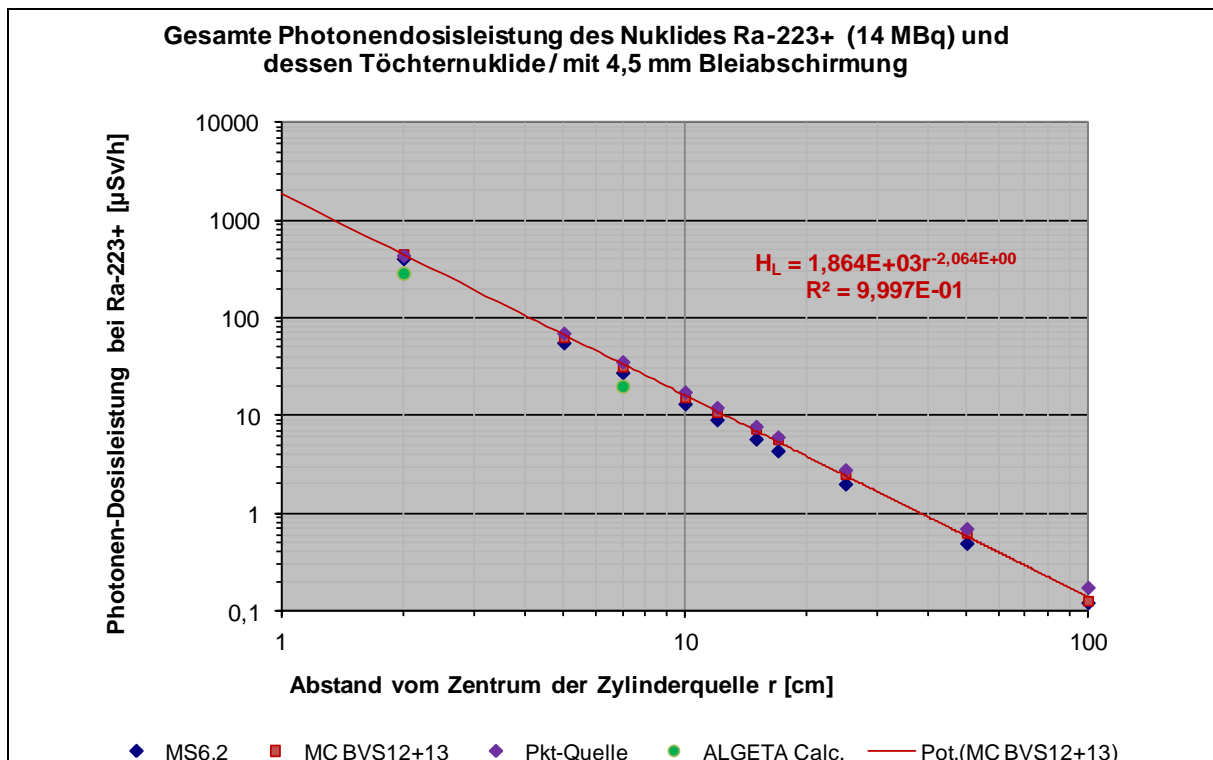


Abb. 02 Photonendosisleistung für die Modelle BVS12 und BVS13 (mit 4,5 mm Blei-Abschirmung) im Vergleich zu den vorgelegten Berechnungsergebnissen [L01] und zur Berechnung mit Microshield 6.2

Die Resultate aus den Berechnungen sind Ausgangswerte für die Betrachtungen zum Strahlenschutz für beruflich strahlenexponiertes Personal, das während seiner Tätigkeit Umgang mit den Versandstücken (Berühren der Oberflächen, Aufenthalt in unmittelbarer Nähe usw.) hat. In Tabelle 01 sind die Dosis-Abschätzungen für das Personal aufgeführt, das sich im Abstand von ca. 50 cm zu den Versandstücken aufhält und ggf. kurzzeitig das Versandstück berührt (min. Abstand: 5 cm, Aufenthaltszeit 0,1 für Hände).

Arbeit, Umgang	Abstand [cm]	Aufenth.-Faktor	Ohne Blei	4,5 mm Pb	9,0 mm Pb
Strahlenschutzgröße			Dosisleistung [µSv/h]		
Berühren des Versandstückes (Organdosis f. Hände)	5 cm	0,1	320	63,3	26,7
Aufenthalt in Nähe des Versandstückes (Personal)	50 cm	1	3,2	0,63	0,26
Strahlenschutzgröße			Dosis [mSv] pro Jahr		
Berühren des Versandstückes (Organdosis f. Hände)	5 cm	0,1	64	12	5,5
Aufenthalt in Nähe des Versandstückes (Personal)	50 cm	1	6,5	1,3	0,5

Tab. 01 Bewertung des Strahlenschutzes für beruflich strahlenexponiertes Personal.

Bei den betrachteten Versandstücken sind bei dem geplanten Umgang mit radioaktiven Stoffen (Ra-223+ in Styropor-Box) mit den unterschiedlichen Blei-Abschirmungen (ohne Blei, mit 4,5 mm bzw. 9 mm Blei-Container) die Forderungen des Strahlenschutzes hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte für beruflich strahlenexponiertes Personal nach § 54, 55 StrlSchV [L02] erfüllt.

#### **4. Berechnung der Dosisleistung um eine Palette**

Die betrachteten Versandstücke, die das Radionuklid Ra-223 mit einer Aktivität von 14 MBq enthalten, sollen auf einer 240 Versandstücke fassenden Palette (60 cm x 112 cm x 70 cm) verpackt und versendet werden [L01]. Um die Anforderungen an den Transport, den Transportindex gemäß der ADR-Transportregularien zu ermitteln [L05], muss die Äquivalent-Dosisleistung um die gesamte Palette bestimmt werden. Dazu liegen ebenso Abschätzungen der Gamma-Dosisleistung vor, woraus die entsprechende Transportkennzahl für die gesamte Palette mit 240 Versandstücken mit einer Gesamtaktivität des Radionuklids Ra-223 von 3,36 GBq bestimmt wird [L01].

Die gesamte Palette wurde als Gitter aus (8 x 6 x 5) Versandstücken modelliert, wobei von der Modellierung einzelner Versandstücke (Styropor-Boxen) ausgegangen wurde. Die geometrische Anordnung wurde hinsichtlich der Modellierung der Vials und des etwas gröberen Rasters der Dosisleistungsverteilung einfacher durchgeführt. Dazu wurden drei Modelle (ZBP02, ZBP12, ZBP14) entwickelt, um für das Radionuklid Ra-223 die Verteilung der Äquivalent-Dosisleistung in der näheren Umgebung ( $\leq 1$  m) um die Palette zu ermitteln. Dies erfolgte in Abhängigkeit von der verwendeten Blei-Abschirmdicke (0; 4,5 mm oder 9,0 mm Blei) der 240 Container.

Für die Bewertung der Äquivalent-Dosisleistung auf der Paletten-Oberfläche sind Darstellungen für die Außenflächen der Palette von entscheidender Bedeutung (Abb. 03 a-d – siehe umseitig).

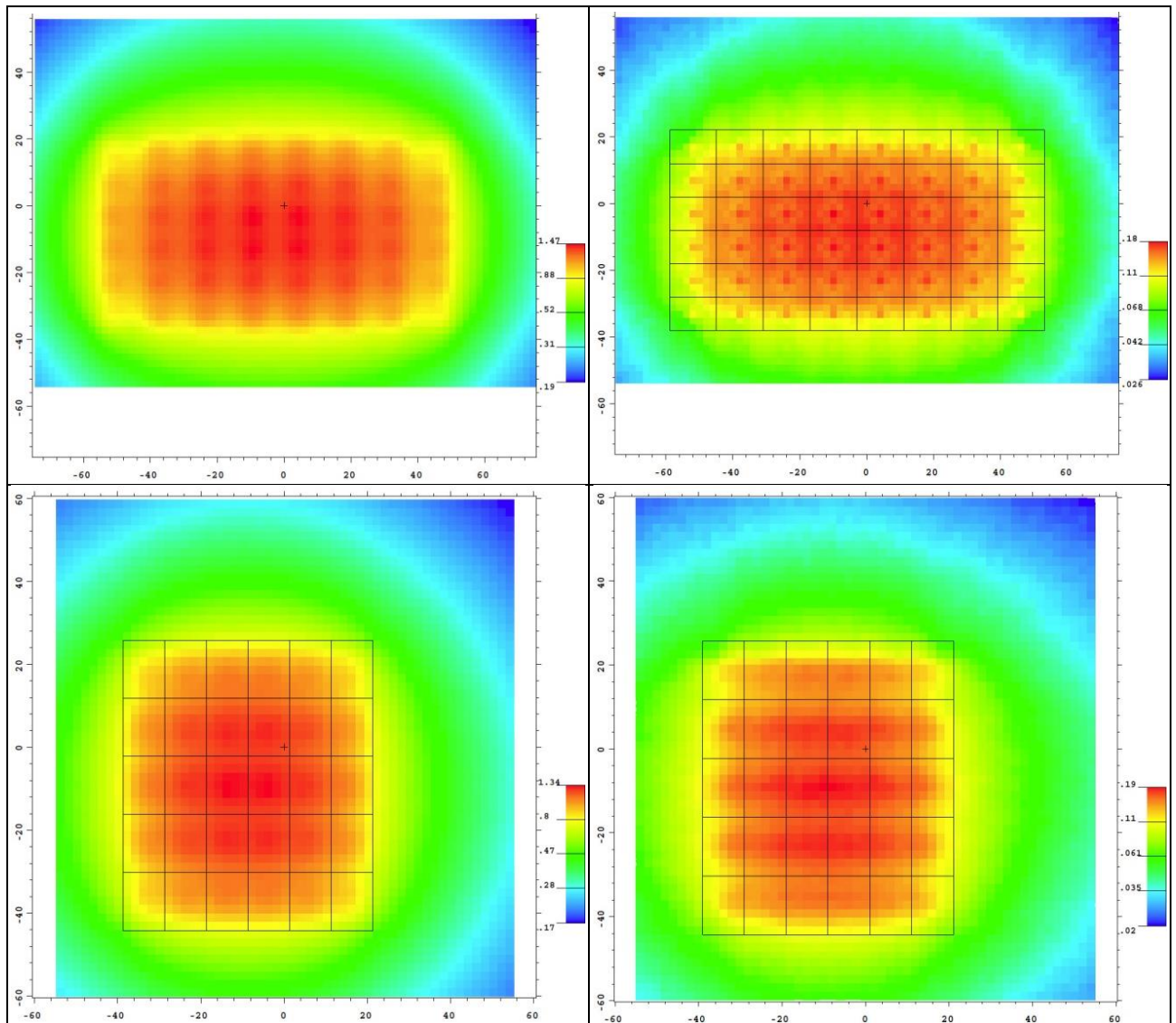


Abb. 03 a-d Verteilung der Dosisleistung [mSv/h] auf drei Paletten-Oberflächen: Draufsicht (xy-Ebene, oben) und Stirnseite (yz-Ebene, unten) für die Modelle ZBP02 (li.) u. ZBP12 (re.).

Aus den Berechnungen ergibt sich die Verteilung der Photonen-Dosisleistung um die Palette in Abhängigkeit vom Abstand zur der jeweiligen Paletten-Oberfläche für die drei Raumrichtungen. Erwartungsgemäß ergibt sich der jeweils größte Wert für die Dosisleistung an der Längsseite der Paletten-Oberfläche (xz-Ebene), da in y-Richtung das Versandstück seine geringste Ausdehnung (10 cm) hat und somit der kleinste Abstand zu den Vials, die das Radionuklid Ra-223+ in flüssiger Form (Xofigo) enthalten, besteht.

Zum Vergleich der Berechnungsergebnisse für alle drei Modelle (ZBP02, ZBP12 und ZBP14) sind die Dosisleistungswerte als Funktion des Abstandes von der Paletten-Oberfläche für die y-Richtung als kritischste Werte, die auch für die Bestimmung der Transportkennzahl relevant sind, in Abb. 04 aufgetragen.



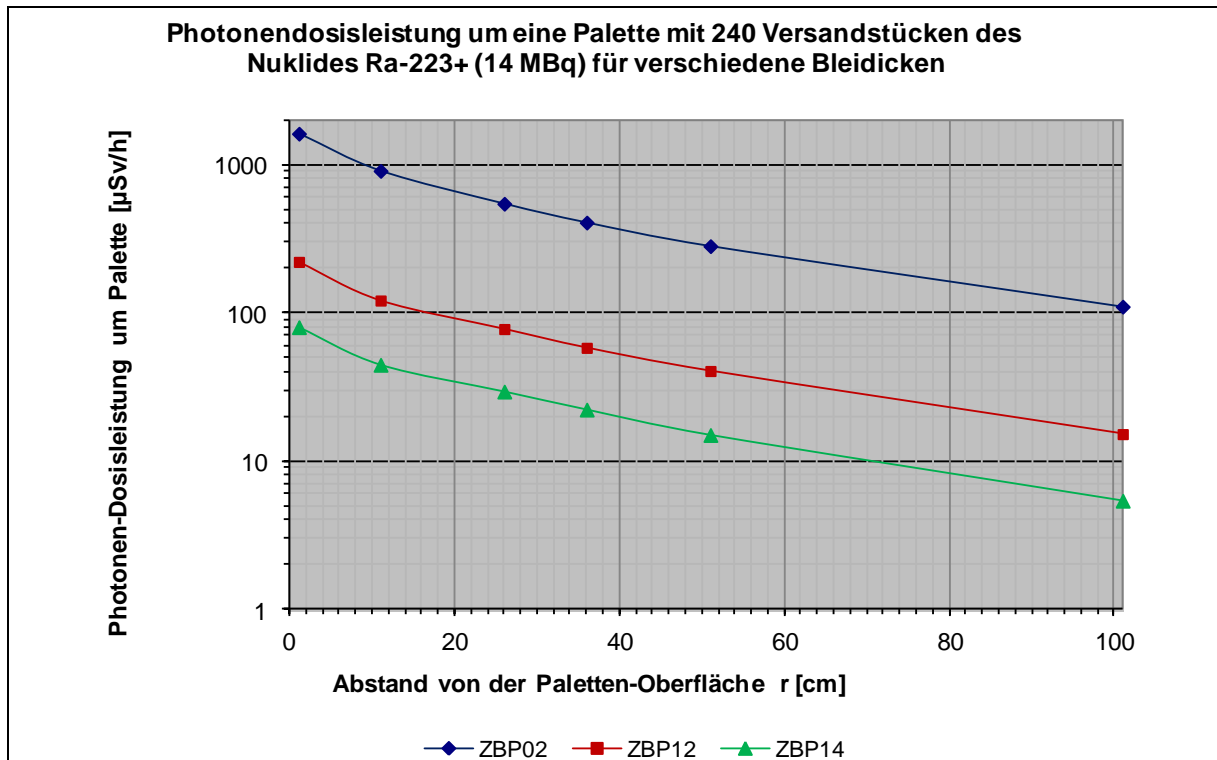


Abb. 04 Photonendosisleistung als Funktion vom Abstand zur Paletten-Oberfläche (y-Richtung) für die Modelle ZBP02 (ohne Blei), ZBP12 (4,5 mm Blei) und ZBP14 (9 mm Blei) zur Bestimmung der jeweiligen Transportkennzahl.

Die Berechnungsergebnisse für die Maximalwerte der Äquivalent-Dosisleistung auf der Oberfläche der Transportpalette (Längsseite) und deren Abhängigkeit vom Abstand zur Paletten-Oberfläche zeigt ein plausibles Verhalten. Das gilt für alle betrachteten Bleidicken der Container zur Abschirmung der, beim Zerfall von Ra-223+, emittierten Gamma-Strahlung.

## 5. Bestimmung der Transportkennzahl (ADR)

Die Transportkennzahl für jede Umverpackung, jeden Container usw. ergibt sich entweder durch die Summe der Transportkennzahlen aller enthaltenen Versandstücke oder durch direkte Messung der Dosisleistung. In Tab. 02 ist die Bestimmung von Transportkennzahl und Kategorie nach [L05] zusammengestellt.

Bestimmung der Transportkennzahl	ohne Blei-Container	mit 4,5 mm-Blei-Container	mit 9 mm-Blei-Container
Dosisleistung [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	aktuell	aktuell	aktuell
Dosisleistung am Vial/Blei	6448	452	155
Dosisleistung an Palette	1620	221	80
Dosisleistung in 1 m Abstand von der Paletten-Oberfläche	120	15,3	5,4
Transportkennzahl	12	1,6	0,6
max. Dosisleist. an Palette	< 10.000	< 500	< 500
Kategorien	III - Gelb	III - Gelb	II - Gelb

Tab. 02 Vergleich der ermittelten Transportkennzahlen und Kategorien der Versandstücke/Paletten

Bei Verwendung eines Blei-Containers mit 9 mm Bleidicke ergibt sich eine maximale Dosisleistung auf der Oberfläche der Palette von 80  $\mu\text{Sv/h}$ . Dies führt zu einer Transportkennzahl von 0,6 und bei einer Dosisleistung von 5,4  $\mu\text{Sv/h}$  in 1 m Abstand von der Palette zur Kategorie II – Gelb, also damit zur nächst kleineren Kategorie.

## 6. Zusammenfassung

Für den Zerfall des Radionuklids Ra-223+ wurde ausgehend von den Photonen-Linien aller Zerfälle die Gammadosisleistungskonstante 0,061  $\text{mSv/h m}^2/\text{GBq}$  ermittelt, um mit einfachen Betrachtungen (z. B. Modell der Punktquelle) die Dosisleistung um das jeweilige Versandstück berechnen zu können. Aus den weiterführenden Berechnungen ergibt sich eine Zehntelwertdicke für die Bleiabschirmung von ca. 8,1 mm.

Nach den Abschätzungen zur effektiven Dosis und der Organdosis (Hände) für beruflich strahlenexponiertes Personal, das beim vorgesehenen Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen mit den Versandstücken (Oberfläche) in Kontakt kommt, sind die Forderungen des Strahlenschutzes hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte nach §§ 54, 55 StrlSchV erfüllt. Schon aufgrund des Minimierungsgebotes sollte dennoch mindestens ein 4,5 mm Blei-Container für die Verpackung des Radionuklids Ra-223+ Verwendung finden.

Mit den zu vorliegenden Unterlagen [L01] zur Berechnung der Transportkennzahl und der Transportkategorie für die Palette der 240 Versandstücke mit dem Radionuklid Ra-223+ (14 MBq) und den entwickelten Berechnungsmodellen wurde die Äquivalentdosisleistung im Abstand von 1 m zu der Palette möglichst genau berechnet. Damit konnte die Transportkategorie der Palette nach den ADR-Regularien [L05] korrekt ermittelt werden. Für die Versandstücke mit 4,5 mm Blei-Container ist für den Transport der Palette die Kategorie III – Gelb erforderlich, für einen 9 mm Blei-Container wäre hingegen II – Gelb ausreichend.



Literatur:

- L01 ALGETA: Calculation of Transportindex for Pallet of Alphanadin vom 19.05.2010
- L02 Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20.07.2001 (BGBl. I, S. 1714), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)
- L03 IRCU-Report 47, Measurements of Dose Equivalents from Photon and Electron Radiations, International Commission of Radiation Units and Measurements, Bethesda/Maryland, USA (1992)
- L04 LANL: Manual of Monte-Carlo-Simulation code MCNP5 (Version 1.51), Los Alamos NL, 2008
- L05 ADR 2013 mit Gefahrgutvorschriftensammlung, 29. Auflage, Stand: Juni 2013, von Klaus Ridder und Jörg Holzhäuser, ISBN 978-3-609-68553-3 Bestimmung der Transportkennzahl (TI) S.824 ff