

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Behandlung der Tochternuklide im Rahmen der Herleitung von
Freigrenzen und Freigabewerten
- Vorhaben 3614S70051

Band 5

Auftragnehmer:
Brenk Systemplanung GmbH (BS)

Dr. R. Kunz
Dr. S. Thierfeldt

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und
Reaktorsicherheit (BMUB) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUB (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-133/18

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2018050314804

Salzgitter, Mai 2018

Behandlung der Tochternuklide im Rahmen der Herleitung von Freigrenzen und Freigabewerten

BS-Projekt-Nr. 1405-05
Forschungsvorhaben 3614S70051

erstellt im Auftrag des
Bundesamtes für Strahlenschutz
Neuherberg

durch die
Brenk Systemplanung GmbH (BS)
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

31. Mai 2016

Anmerkung:

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers (*BS*) wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (*Bundesamt für Strahlenschutz*) übereinstimmen.

Dieser Bericht wurde von folgenden Bearbeitern erstellt:

- Dr. Ralf Kunz
- Dr. Stefan Thierfeldt

Es wird versichert, dass dieser Bericht nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist.

ERSTELLUNG, PRÜFUNG UND FREIGABE

erstellt	geprüft	freigegeben
Projektleiter	Geschäftsbereichsleiter	Geschäftsführung

Inhaltsverzeichnis:

Seite:

1.	Einleitung	1
2.	Vorgehensweisen zur Einbeziehung von Tochternukliden	1
2.1	Grundlagen	1
2.1.1	Möglichkeiten der Einbeziehung von Tochternukliden	1
2.1.2	Konsequenzen aus dem Erreichen des radioaktiven Gleichgewichts (1. Fall).....	2
2.1.3	Konsequenzen aus der Einbeziehung von Tochternukliden außerhalb des radioaktiven Gleichgewichts (2. Fall).....	2
2.2	Vorgehensweise in RS-G-1.7, RP 89 und RP 113	2
2.2.1	Vorgehensweise in RS-G-1.7.....	3
2.2.2	Vorgehensweise in RP 89	5
2.2.3	Vorgehensweise in RP 113	7
2.3	Vergleich der Vorgehensweisen zur Behandlung von Tochternukliden	8
2.3.1	Berücksichtigung des Beitrags der Tochternuklide in radiologischen Rechnungen	8
2.3.2	Identifizierung solcher Tochternuklide, die bei der Modellierung gemäß Safety Report 44 vollständig durch das Mutternuklid abgedeckt sind.....	21
2.4	Unterschiede in den Tochternukliden im Vergleich zu Anl. III Tab. 2 StrlSchV	25
2.4.1	Fehlerhafte Angaben in Anl. III Tab. 2 StrlSchV	25
2.4.2	Nuklide in Anl. III Tab. 2 StrlSchV, die jetzt fehlen	26
2.4.3	Nuklide mit zusätzlichen Tochternukliden gegenüber Anl. III Tab. 2 StrlSchV	27
2.4.4	Zusätzliche Mutternuklide gegenüber Anl. III Tab. 2 StrlSchV	28
3.	Vorschlag für eine Neufassung von Anl. III Tab. 2 StrlSchV	30
4.	Literaturverzeichnis	30

<u>Tabellenverzeichnis:</u>	Seite:
Tabelle 2.1: Tochternuklide, die in Safety Report 44 [IAE 05] zusammen mit dem Mutternuklid betrachtet werden	4
Tabelle 2.2: Tochternuklide, die für die Freigabewerte für Metalle zum Einschmelzen [DEC 98] zusammen mit dem Mutternuklid betrachtet werden	6
Tabelle 2.3: Tochternuklide, die für die Freigabewerte für Bauschutt und Gebäude [THI 00] zusammen mit dem Mutternuklid betrachtet werden	7
Tabelle 2.4: Liste der Mutternuklide und der einbezogenen Tochternuklide zur Herleitung der Freigrenzen und Freigabewerte für alle in Anl. III Tab. 1 StrlSchV aufgeführten Radionuklide [BS 15B]	9
Tabelle 2.5: Liste der Nuklide, für die in der Datenbank JEFF-3.1.1 ([KEL 09], [SAN 09]) die Bezeichnungen der angeregten Zustände gegenüber der StrlSchV geändert sind	20
Tabelle 2.6: Liste von Tochternukliden, die bei der Modellierung gemäß Safety Report 44 vollständig durch das Mutternuklid abgedeckt sind [BS 15B]	21
Tabelle 2.7: Liste der Nuklide, bei denen in Anl. III Tab. 2 StrlSchV Übertragungs- oder Formatierungsfehler vorhanden sind	25
Tabelle 2.8: Liste der Tochternuklide, die in Anl. III Tab. 2 StrlSchV vorhanden sind, aber nicht die Bedingungen nach RS-G-1.7 bzw. SR-44 erfüllen. Die entsprechenden Tochternuklide sind in Klammern gesetzt. Unter dem Nuklid ist der jeweilige, gerundete Anteil an der Dosis angegeben.	26
Tabelle 2.9: Liste der Nuklide, für die im Vergleich zu Anl. III Tab. 2 StrlSchV weitere Tochternuklide die Bedingungen nach RS-G-1.7 bzw. SR-44 erfüllen. Die entsprechenden Tochternuklide sind in Klammern gesetzt. Unter dem Nuklid ist der jeweilige, gerundete Anteil an der Dosis angegeben.	28
Tabelle 2.10: Liste der Mutternuklide, die zusätzlich zu den in Anl. III Tab. 2 StrlSchV angegebenen Mutternukliden Tochternuklide besitzen, die die Bedingungen nach RS-G-1.7 bzw. SR-44 erfüllen. Unter dem Nuklid ist der jeweilige, gerundete Anteil an der Dosis angegeben. Es sind nur die Mutternuklide mit einer Halbwertszeit größer als 20 Tage angegeben	29

1. EINLEITUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Brenk Systemplanung GmbH (BS) im August 2014 mit der Durchführung des Forschungsvorhabens „Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bzgl. der Freigrenzen von radioaktiven Stoffen zur Umsetzung der neuen EURATOM-Grundnormen in deutsches Recht“ (Förderkennzeichen 3614S70051) beauftragt. Das Vorhaben bezieht sich insbesondere auf die in den EURATOM-Grundnormen [EUR 14] enthaltenen Freigrenzen, die identisch zu den Werten im Safety Guide RS-G-1.7 [IAE 04] der IAEA sind.

In einem weiteren Forschungsvorhaben mit dem Titel „Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bzgl. der Regelungen zur Freigabe künstlicher radioaktiver Stoffe zur Umsetzung der neuen Euratom-Grundnormen in deutsches Recht - Konzept zur Umsetzung“ (Förderkennzeichen 3614R03520) wurde BS mit der Untersuchung von Fragen bzgl. des Zusammenwirkens der deutschen Freigaberegungen, insbesondere der zweckgerichteten Freigabe (§ 29 Abs. 2 Nr. 2 StrlSchV), mit den in den Euratom-Grundnormen [EUR 14] enthaltenen Freigrenzen beauftragt.

Die Behandlung von Tochternukliden spielt sowohl bei der Herleitung von Freigrenzen im Rahmen von RS-G-1.7 [IAE 04] bzw. Safety Report 44 [IAE 05] bzw. bei der Herleitung von Freigabewerten für die Freigabe von Metallen zum Einschmelzen im Rahmen von RP 89 [EUR 98], von Bauschutt und Gebäuden im Rahmen von RP 113 [EUR 00] sowie bei den jeweiligen Umsetzungen in die StrlSchV von 2001 eine wichtige Rolle. Die vollständig mit den Mutternukliden abgedeckten Tochternuklide sind in Anl. III Tab. 2 StrlSchV dargestellt.

Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Behandlung von Tochternukliden in diesen verschiedenen Untersuchungen und Empfehlungen weitgehend, aber nicht vollständig einheitlich erfolgt, wird in der vorliegenden Unterlage eine Zusammenfassung der Behandlung von Tochternukliden bei der Herleitung von Freigrenzen und Freigabewerten gegeben. Die jeweiligen Vorgehensweisen zur Behandlung von Tochternukliden sind in den verschiedenen Berichten, die für die genannten Forschungsvorhaben vorgelegt wurden, bereits dargestellt worden, werden hier aber noch einmal gegenübergestellt. In Abschnitt 2 wird die Vorgehensweise zur Einbeziehung von Tochternukliden erläutert, wobei Abschnitt 2.2 die Vorgehensweisen in den verschiedenen internationalen Untersuchungen und Empfehlungen darstellt und in Abschnitt 2.3 ein Vergleich dieser Vorgehensweisen gegeben wird. In Abschnitt 3 werden die aus diesem Vergleich zu ziehenden Konsequenzen für eine Neufassung von Anl. III Tab. 2 StrlSchV dargestellt. Abschnitt 4 stellt die verwendete Literatur zusammen.

2. VORGEHENSWEISEN ZUR EINBEZIEHUNG VON TOCHTERNUKLIDEN

2.1 Grundlagen

2.1.1 Möglichkeiten der Einbeziehung von Tochternukliden

Die Einbeziehung von Tochternukliden bei der Herleitung von Freigrenzen und Freigabewerten erfolgt allgemein aus folgenden Gründen:

- (1) Bei Tochternukliden, die während Zeitspannen, die kurz im Vergleich zu Freigabeprozessen sind, ins radioaktive Gleichgewicht mit dem Mutternuklid gelangen, ist es sinnvoll, die Beiträge dieser Tochternuklide zur Exposition vollständig dem Mutternuklid zuzuschlagen. Beispiele sind Sr-90 mit Y-90 oder Cs-137 mit Ba-137m (radioaktives Gleichgewicht wird für Sr-90 innerhalb von 20 Tagen und für Cs-137 innerhalb von weniger als ½ Stunde erreicht).

Durch eine solche Vorgehensweise wird Eindeutigkeit erzielt und es wird vermieden, dass Beiträge von Tochternukliden zweimal gezählt werden.

- (2) Bei Tochternukliden, die während der Dauer von Szenarien, die bei der Herleitung von Freigrenzen oder Freigabewerten betrachtet werden, nachgebildet werden, ist die Einbeziehung von Tochternukliden notwendig, um die Dosisbeiträge der nachgebildeten Tochternuklide nicht zu vernachlässigen. Ein typisches Beispiel ist die Nachbildung des radiologisch relevanten Am-241 aus dem radiologisch weit weniger relevanten Pu-241. Die nachgebildete Aktivität von Am-241 erreicht nach ca. 70 Jahren ein Maximum, das allerdings nur bei ca. 3 % der anfänglichen Aktivität von Pu-241 liegt.

2.1.2 Konsequenzen aus dem Erreichen des radioaktiven Gleichgewichts (1. Fall)

Im ersten Fall, bei dem vom Vorliegen des radioaktiven Gleichgewichts zwischen Mutter- und Tochternuklid(en) zum Zeitpunkt der Freigabe ausgegangen werden kann, ist es nicht notwendig, das/die Tochternuklid/e separat vom Mutternuklid zu betrachten. Um dies zu kennzeichnen, hat sich die Schreibweise mit einem nachgestellten „+“ zum Mutternuklid (also z. B. Sr-90+) eingebürgert und wurde in der StrlSchV übernommen. Weitere Zusätze wie „++“ und „sec“ kennzeichnen längere Ketten von Tochternukliden bzw. bei den natürlichen Zerfallsreihen die gesamte Reihe.

In diesem Fall wurde/n also das/die Tochternuklid/e vollständig mit dem Mutternuklid in allen Rechnungen berücksichtigt und müssen außerdem bei der Freigabe nicht separat berücksichtigt werden. Sollten die Tochternuklide beim genehmigten Umgang zusätzlich zum Mutternuklid aus irgendeiner Ursache separat vorgelegen haben, ist durch ihre kurze Halbwertszeit sichergestellt, dass dieser zusätzliche Anteil abgeklungen ist, bevor für Freigabewerte relevante Szenarien einsetzen.

2.1.3 Konsequenzen aus der Einbeziehung von Tochternukliden außerhalb des radioaktiven Gleichgewichts (2. Fall)

Tochternuklide, die nicht das radioaktive Gleichgewicht mit dem Mutternuklid erreichen, sind bei den Rechnungen zur Herleitung von Freigrenzen und Freigabewerten ebenfalls berücksichtigt worden. So wurde beispielsweise der Beitrag durch das aus Pu-241 nachgebildete Am-241 in allen Szenarien bei der Herleitung von Freigabewerten berücksichtigt, indem der maximale Anteil von Am-241, der innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne (z. B. 100 Jahre) erreicht wird, als zum Zeitpunkt der Freigabe gegeben unterstellt wurde. Auf diese Weise wird vermieden, dass Dosisbeiträge vernachlässigt werden, auch wenn diese Szenarien zu einem späteren Zeitpunkt auftreten sollten (z. B. Szenarien, die die Rezyklierung von Metall beschreiben, das einige Jahre oder Jahrzehnte irgendwo gelagert wurde und erst dann eingeschmolzen wird).

Solche Tochternuklide sind allerdings dennoch separat bei der Freigabe zu berücksichtigen, da (entsprechend dem Beispiel) neben Pu-241 auch das Am-241 aus separater Ursache vorliegen kann. Daher werden diese Tochternuklide auch nicht durch einen Zusatz wie „+“ zum Mutternuklid gekennzeichnet, da ihre Aktivität gerade nicht vollständig durch das Vorliegen des Mutternuklids beschrieben wird.

2.2 Vorgehensweise in RS-G-1.7, RP 89 und RP 113

In diesem Unterabschnitt wird zusammengestellt, wie die Einbeziehung von Tochternukliden in den verschiedenen internationalen Untersuchungen zur Herleitung von Freigabewerten und Freigrenzen erfolgte. Ein Vergleich erfolgt in Abschnitt 2.3.

2.2.1 Vorgehensweise in RS-G-1.7

Die Behandlung von Tochternukliden wird in SR 44 [IAE 05] im Detail dargestellt. Generell wird für Radionuklide, deren Tochternuklide einen nicht zu vernachlässigenden Dosiskoeffizienten im Verhältnis zum Mutternuklid aufweisen, der insgesamt anzuwendende Dosiskoeffizient als die gewichtete Summe der Beiträge von Mutternuklid und Tochternukliden berechnet. Die Wichtung erfolgt über Aktivitätsverhältnisse, die in Anhang II von SR 44 angegeben sind. Hierdurch wird erreicht, dass die Beiträge von Tochternukliden in geeigneter Weise in den Dosisberechnungen berücksichtigt werden.

Allgemeine Berücksichtigung von Tochternukliden: Der Dosisbeitrag von Tochternukliden wird in den Berechnungen berücksichtigt, um die Dosen nicht zu unterschätzen. Dies geschieht dadurch, dass der Dosiskoeffizient des Tochternuklids zum Dosiskoeffizienten des Mutternuklids addiert wird, wobei ein geeigneter Wichtungsfaktor verwendet wird. Als Wichtungsfaktor für das Tochternuklid wird das maximale Aktivitätsverhältnis verwendet, das dieses während eines Zeitraums von 100 a bezogen auf das Mutternuklid zum Zeitpunkt $t = 0$ erreicht. Ein Zeitraum von 100 a ist notwendig, um sicherzustellen, dass die Einhaltung der Dosisrichtwerte als Folge der Freigabe von Material auch in Zukunft sichergestellt ist.

Der Zeitpunkt, für den die Aktivität des ersten Zerfallsprodukts maximal wird, berechnet sich wie folgt:

$$A_2(t) = A_1(0)\lambda_2 \frac{(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})B_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2-1)$$

wobei

$A_2(t)$	[Bq] Aktivität des Tochternuklids zur Zeit t ;
$A_1(0)$	[Bq] ursprüngliche Aktivität des Mutternuklids;
λ_1	[a ⁻¹] radioaktive Zerfallskonstante des Mutternuklids;
λ_2	[a ⁻¹] radioaktive Zerfallskonstante des Tochternuklids;
B_2	[-] Zerfallsausbeute des Tochternuklids.

Setzt man die Ableitung nach der Zeit zu Null:

$$\frac{dA_2(t)}{dt} = \frac{A_1(0)\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_1 t}) B_2 = 0 \quad (2-2)$$

und löst nach t auf, so erhält man:

$$t_{\max} = \frac{\log(\lambda_2/\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2-3)$$

wobei t_{\max} die Zeit ist, zu der das Maximum auftritt. Die vollständige Liste derjenigen Radionuklide, für die Tochternuklide bereits in den Dosisfaktoren berücksichtigt sind, und deren zugehörige Werte sind im Safety Report 44 angegeben.

Vollständige Einbeziehung mit dem Mutternuklid: Die folgenden Kriterien werden verwendet, um festzulegen, wann ein bestimmtes Tochternuklid vollständig mit dem Mutternuklid zusammen berücksichtigt wird:

(1) Die Halbwertszeit des Tochternuklids muss kürzer sein als die des Mutternuklids;

UND

(2) Die Halbwertszeit des Tochternuklids ist kürzer als 1 Tag;

ODER

(3) Die Halbwertszeit des Tochternuklids ist kürzer als 10 % der Halbwertszeit des Mutternuklids **UND** die Halbwertszeit des Tochternuklids ist kürzer als 10 a.

Dies bedeutet, dass ein Tochternuklid nicht separat behandelt werden muss, falls Kriterium 1 zusammen mit mindestens einem der Kriterien 2 oder 3 erfüllt ist.

Beispiel: Sr-90 mit Tochternuklid Y-90:

- Die Halbwertszeit von Y-90 (64 h) ist kürzer als die von Sr-90 (29 a) → Kriterium 1 erfüllt.
- Die Halbwertszeit von Y-90 ist nicht kürzer als 1 Tag → Kriterium 2 nicht erfüllt.
- Die Halbwertszeit von Y-90 ist kürzer als 10 % der Halbwertszeit von Sr-90 und kürzer als 10 a → Kriterium 3 erfüllt.
- Da Kriterien 1 und 3 erfüllt sind, wird Y-90 vollständig mit Sr-90 zusammen betrachtet (Sr-90+).

Beispiel: Mo-101 mit Tochternuklid Tc-101:

- Die Halbwertszeit von Tc-101 (14,2 min) ist kürzer als die von Mo-101 (14,6 min) → Kriterium 1 erfüllt.
- Die Halbwertszeit von Tc-101 ist kürzer als 1 Tag → Kriterium 2 erfüllt.
- Die Halbwertszeit von Tc-101 ist nicht kürzer als 10 % der Halbwertszeit von Mo-101 → Kriterium 3 nicht erfüllt.
- Da Kriterien 1 und 2 erfüllt sind, wird Tc-101 vollständig mit Mo-101 zusammen betrachtet (Mo-101+).

Die vollständige Liste der Tochternuklide, die in Safety Report 44 [IAE 05] zusammen mit dem Mutternuklid betrachtet werden, zeigt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Tochternuklide, die in Safety Report 44 [IAE 05] zusammen mit dem Mutternuklid betrachtet werden

Radionuklid	Tochternuklid(e)
Fe-52+	Mn-52m
Zn-69m+	Zn-69
Sr-90+	Y-90
Sr-91+	Y-91m
Zr-95+	Nb-95m
Zr-97+	Nb-97m, Nb-97
Nb-97+	Nb-97m
Mo-99+	Tc-99m
Mo-101+	Tc-101
Ru-103+	Rh-103m
Ru-105+	Rh-105m
Ru-106+	Rh-106
Pd-103+	Rh-103m
Pd-109+	Ag-109m
Ag-108m+	Ag-108
Ag-110m+	Ag-110
Cd-109+	Ag-109m
Cd-113m	In-113m, Cd-113
Cd-115+	In-115m
Cd-115m+	In-115m
In-114m+	In-114
Sn-113+	In-113m

Radionuklid	Tochternuklid(e)
Sn-121m	Sn-121
Sb-125+	Te-125m
Te-127m+	Te-127
Te-129m+	Te-129
Te-131m+	Te-131
Te-132+	I-132
Cs-137+	Ba-137m
Ce-144+	Pr-144, Pr-144m
Pm-146	Sm-146
U-232sec	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208
U-240+	Np-240m, Np-240
Np-237+	Pa-233
Pu-244+	U-240, Np-240m, Np-240
Am-242m+	Np-238
Am-243+	Np-239
Cm-247+	Pu-243
Es-254+	Bk-250
Es-254m+	Fm-254

2.2.2 Vorgehensweise in RP 89

Für die Herleitung der Freigabewerte für Metalle zum Einschmelzen wurde ein ähnlicher Ansatz gewählt wie der in Abschnitt 2.2.1 für RS-G-1.7 beschriebene. Die Empfehlung RP 89 [EUR 98] der Europäischen Kommission wurde mittels des Berichts [DEC 98] auf alle für die Freigabe einzubeziehenden Radionuklide in der Neufassung der StrlSchV 2001 erweitert.

In [DEC 98] wird hierzu das Folgende ausgeführt:

Vollständige Einbeziehung mit dem Mutternuklid:

„Die Zerfallsprodukte vieler Radionuklide sind ebenfalls radioaktiv. Diese Tochternuklide werden laufend nachgebildet und begleiten deshalb die Mutternuklide in den freizugebenden Materialien. Sollte die Halbwertszeit des Mutternuklids im Verhältnis zur Halbwertszeit des Tochternuklids lang sein, dann bildet sich ein Quasi-Gleichgewicht zwischen Mutter- und Tochternukliden, und man spricht von säkularem Gleichgewicht. Als praktisches Beispiel ist Cs-137 und dessen Zerfallsprodukt Ba-137m zu nennen. Das Tochternuklid Ba-137m ist dosisbestimmend, da es beim Zerfall eine energiereiche γ -Strahlung emittiert, und darf deshalb nicht vernachlässigt werden. Solche Fälle werden bei den Dosisberechnungen berücksichtigt, indem angenommen wird, daß die Tochternuklide mit Halbwertszeiten von weniger als 60 Tagen und kürzer als die Halbwertszeit des Mutternuklids in säkularem Gleichgewicht mit dem Mutternuklid stehen.“

„Die Berücksichtigung der kurzlebigen Zerfallsprodukte zusammen mit dem Mutternuklid stellt eine ausreichende Berücksichtigung der Tochternuklide bei Szenarien dar, die sich auf den Zeitraum kurz nach der Freigabe (erstes Jahr) erstrecken.“

In diesem Zusammenhang wird in [DEC 98] eine Liste der Nuklide in säkularem Gleichgewicht aufgeführt (Tabelle 2.2). Bei den Dosisberechnungen werden die von den Tochternukliden verursachten Dosen denen der Mutternuklide zugeschlagen. Daher sind die Tochternuklide, sofern deren Aktivität die säkulare Gleichgewichtsaktivität nicht übersteigt, bereits berücksichtigt.

Allgemeine Berücksichtigung von Tochternukliden:

„Es gibt aber auch Szenarien, die sich sowieso erst sehr lange Zeit nach der Freigabe ereignen können. Bei solchen Szenarien ist es möglich, daß sich die langlebigen Tochternuklide, die bei der Freigabe nicht vorhanden waren, durch den Zerfall des Mutternuklids nachbilden und dosisbestimmend werden. Für Szenarien, die erst in der Zukunft auftreten können, wird deshalb die eventuelle Dosis durch nachgebildete Zerfallsprodukte bei der Berechnung berücksichtigt. Für viele dieser Radionuklide, insbesondere die natürlich vorkommenden Radionuklide, wird das Maximum der Summe der Dosiskoeffizienten des Mutternuklids und der Tochternuklide erst nach vielen Tausenden bis einigen Millionen Jahren erreicht, da die nachgebildeten Tochternuklide erst nach dieser Zeit im säkularen Gleichgewicht mit dem Mutternuklid stehen würden. Nach solch langen Zeiträumen ist die Gültigkeit der postulierten Szenarien nicht mehr gegeben, so daß derartige Betrachtungen nicht als Basis für die Ableitung der Freigabewerte dienen können.“

Tabelle 2.2: Tochternuklide, die für die Freigabewerte für Metalle zum Einschmelzen [DEC 98] zusammen mit dem Mutternuklid betrachtet werden

Radionuklid	Tochternuklid(e)
Sr-90	Y-90
Zr-95	Nb-95, Nb-95m
Ru-103	Rh-103m
Ru-106	Rh-106
Pd-103	Rh-103m
Ag-108m	Ag-108
Ag-110m	Ag-110
Cd-109	Ag-109m
In-114m	In-114
Sn-113	In-113m
Sb-125	Te-125m
Te-127m	Te-127
Te-129m	Te-129
Cs-137	Ba-137m
Ba-131	Cs-131
Ba-140	La-140
Ce-144	Pr-144, Pr-144m
Ir-190	Os-190m
Pb-210	Bi-210
Ra-223	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211
Ra-225	Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Tl-209, Po-213, Pb-209
Ra-226	Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214
Ra-228	Ac-228
Th-227	Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211
Th-228	Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212
Th-229	Ra-225, Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Tl-209, Po-213, Pb-209
Th-234	Pa-234m, Pa-234
U-230	Th-226, Ra-222, Rn-218, Po-214
U-235	Th-231

Radionuklid	Tochternuclid(e)
U-238	Th-234, Pa-234m, Pa-234
Np-237	Pa-233
Pu-244	U-240, Np-240m, Np-240
Am-242m	Np-238, Am-242
Am-243	Np-239
Cm-247	Pu-243
Cf-253	Cm-249
Es-254	Bk-250

2.2.3 Vorgehensweise in RP 113

Für die Herleitung der Freigabewerte für Bauschutt und Gebäude wurde ein ähnlicher Ansatz gewählt wie der in Abschnitt 2.2.1 für RS-G-1.7 beschriebene. Die Empfehlung RP 113 [EUR 00] der Europäischen Kommission wurde mittels des Berichts [THI 00] auf alle für die Freigabe einzubeziehenden Radionuklide in der Neufassung der StrlSchV 2001 erweitert. Die Begründung zur Vorgehensweise sowie die Anwendung eines Kriteriums von 60 Tagen für die Halbwertszeit ist (ganz) analog zu derjenigen von RP 89 in Abschnitt 2.2.2.

Die Liste der Tochternuclide, die in [THI 00] als vollständig mit dem Mutternuclid berücksichtigt gelten, ist in Tabelle 2.3 wiedergegeben.

Tabelle 2.3 Tochternuclide, die für die Freigabewerte für Bauschutt und Gebäude [THI 00] zusammen mit dem Mutternuclid betrachtet werden

Nuklid	Mit dem Mutternuclid berücksichtigte Tochternuclide
Fe-52+	Mn-52m
Sr-90+	Y-90
Zr-95+	Nb-95, Nb-95m
Mo-101+	Tc-101
Ru-103+	Rh-103m
Ru-106+	Rh-106
Pd-103+	Rh-103m
Ag-108m+	Ag-108
Ag-110m+	Ag-110
Cd-109+	Ag-109m
Cd-115+	In-115m
In-114m+	In-114
Sn-113+	In-113m
Sb-125+	Te-125m
Te-127m+	Te-127
Te-129m+	Te-129
Te-132+	I-132
Te-133m+	Te-133
Cs-137+	Ba-137m
Ba-131+	Cs-131
Ba-140+	La-140
Ce-144+	Pr-144, Pr-144m
Dy-166+	Ho-166
Ir-190+	Os-190m

Nuklid	Mit dem Mutternuklid berücksichtigte Tochternuklide
Pb-210+	Bi-210, Po-210
Pb-212+	Bi-212, Tl-208
Ra-223+	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211
Ra-224+	Pb-212, Bi-212, Tl-208
Ra-225+	Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Tl-209, Po-213, Pb-209
Ra-226+	Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214
Ra-226++	Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210
Ra-228+	Ac-228
Th-227+	Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211
Th-228+	Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212
Th-229+	Ra-225, Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Tl-209, Po-213, Pb-209
Th-232sec	Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212
Th-234+	Pa-234m, Pa-234
U-230+	Th-226, Ra-222, Rn-218, Po-214
U-235+	Th-231
U-238+	Th-234, Pa-234m, Pa-234
U-238sec	Th-234, Pa-234m, Pa-234, U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210
Np-237+	Pa-233
Pu-244+	U-240, Np-240m, Np-240
Am-242m+	Np-238, Am-242
Am-243+	Np-239
Cm-247+	Pu-243
Cf-253+	Cm-249
Es-254+	Bk-250
Es-254m+	Bk-250, Fm-254
Ac-227+	Fr-223, Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211, Th-227

2.3 Vergleich der Vorgehensweisen zur Behandlung von Tochternukliden

2.3.1 Berücksichtigung des Beitrags der Tochternuklide in radiologischen Rechnungen

In allen drei Untersuchungen zur Herleitung von Freigrenzen und Freigabewerten, die in Abschnitt 2.2 betrachtet wurden, sind Tochternuklide in allen Szenarien in angemessener Weise zusammen mit dem Mutternuklid bei der Dosisberechnung und somit bei der Herleitung von Freigabewerten berücksichtigt worden. Geringe Unterschiede bestehen für einige wenige Mutternuklide, für welche unterschiedlich lange Reihen von Tochternukliden berücksichtigt wurden. Dies hat in der Praxis jedoch keine Auswirkungen auf den abgeleiteten Freigabewert, da die Beiträge der verschiedenen langen Teilketten bei der Berechnung nur eine sehr geringe Auswirkung auf das Ergebnis haben. Bei der Herleitung der auf Zehnerpotenzen gerundeten Werte in RS-G-1.7 bzw. Safety Report 44 ist die Einbeziehung von Tochternukliden, die nur einen sehr geringen Dosisbeitrag liefern, von noch geringerer Relevanz, da hier eine Rundung um bis zu einen Faktor 3,2 aufwärts oder abwärts erfolgt.

Der Grund für die unterschiedliche Einbeziehung von Tochternukliden liegt im Abschneidekriterium, das angewendet wurde, um zu entscheiden, welche Tochternuklide noch als zum Mutternuklid zugehörig betrachtet werden. Tabelle 2.4 zeigt eine vollständige Auflistung aller Tochternuklide gemäß der Vorgehensweise in Safety Report 44 [IAE 05], ausgeweitet auf alle in Anl. III Tab. 1 StrlSchV aufgeführten Radionuklide, die bei der Dosisberechnung berücksichtigt wurden. Die Benennungen der angeregten Zustände der Nuklide wurde entsprechend der in der Datenbank JEFF-3.1.1

Muttern.	Tochter nuklide												
Sm-156	Eu-156												
Eu-145	Sm-145	Pm-145											
Eu-146	Sm-146												
Eu-147	Sm-147	Pm-143											
Eu-148	Sm-148	Nd-144											
Eu-149	Sm-149												
Eu-152	Gd-152	Sm-148	Nd-144										
Eu-152m	Gd-152	Sm-148	Nd-144										
Gd-145	Eu-145	Sm-145	Pm-145										
Gd-146	Eu-146	Sm-146											
Gd-147	Eu-147	Sm-147	Pm-143										
Gd-149	Eu-149	Sm-149											
Gd-152	Sm-148	Nd-144											
Tb-147	Gd-147	Eu-147	Sm-147	Pm-143									
Tb-149	Gd-149	Eu-145	Eu-149	Sm-145	Sm-149	Pm-145							
Tb-150	Gd-150	Eu-146	Sm-146										
Tb-151	Gd-151												
Tb-153	Gd-153												
Tb-154	Dy-154	Gd-150	Sm-146										
Tb-156m	Tb-156												
Dy-155	Tb-155												
Dy-157	Tb-157												
Dy-166	Ho-166												
Ho-155	Dy-155	Tb-155											
Ho-157	Dy-157	Dy-157m	Tb-157										
Ho-159	Dy-159												
Ho-162m	Ho-162												
Ho-164m	Ho-164												
Ho-167	Er-167m												
Er-161	Ho-161	Ho-161m											
Er-171	Tm-171												
Er-172	Tm-172												
Tm-162	Er-162												
Tm-167	Er-167m												
Tm-175	Yb-175m	Yb-175											
Yb-162	Tm-162	Er-162											
Yb-166	Tm-166m	Tm-166											
Yb-167	Tm-167	Er-167m											
Yb-177	Lu-177												
Yb-178	Lu-178												
Lu-169	Yb-169	Yb-169m											
Lu-174m	Lu-174												
Lu-177m	Hf-177m	Lu-177											
Lu-178m	Hf-178m												
Hf-170	Lu-170	Lu-170m											
Hf-172	Lu-172m	Lu-172											
Hf-173	Lu-173												
Hf-180m	Ta-180m												
Hf-182	Ta-182												
Hf-182m	Ta-182n	Hf-182	Ta-182m	Ta-182									
Hf-183	Ta-183	W-183	W-183m	Hf-179m	Hf-179n	Hf179							

Muttern.	Tochternuklide												
U-239	Np-239												
U-240	Np-240m	Np-240											
Np-232	U-232	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Po-212	Tl-208	Bi-209			
Np-233	U-233	Th-229	Ra-225	Ac-225	Fr-221	At-217	Bi-213	Rn-217	Po-213	Tl-209	Pb-209	Bi-209	
Np-234	U-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	Pb-214	At-218	Bi-214	Rn-218	Po-214	Tl-210	Pb-210	Pb-209
Np-235	U-235	Pa-231	Th-231	Ac-227	Th-227	Fr-223	Ra-223	At-219	Rn-219	Bi-215	Po-215		
Np-236	U-236	Pu-236	Pa-232	Th-232	U-232	Ra-228	Th-228	Ac-228	Ra-224	Rn-220			
Np-236m	Pu-236	U-236	U-232	Th-232	Th-228	Ra-228	Ra-224	Ac-228	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	
Np-237	Pa-233	U-233											
Np-238	Pu-238	U-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	Pb-214	At-218	Bi-214	Rn-218	Po-214	Tl-210	Pb-210
Np-239	Pu-239	U-235m	U-235	Th-231	Pa-231	Ac-227	Th-227	Fr-223	Ra-223	At-219	Pb-209		
Np-240	Pu-240	U-236	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Po-212	Tl-208
Np-240m	Pu-240	Np-240	U-236	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220				
Pu-234	Np-234	U-230	U-234	Th-226	Th-230	Ra-222	Ra-226	Rn-218	Rn-222	Po-214	Po-218	Pb-210	Pb-214
Pu-235	Np-235	U-231	U-235	Pa-231	Th-227	Th-231	Ac-227	Ra-223	Fr-223	At-218	Bi-210	Rn-219	At-219
Pu-236	U-232	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Po-212	Tl-208				
Pu-237	Np-237	U-233	Pa-233	Th-229	Ra-225	Ac-225	Fr-221	At-217	Bi-213	Rn-217	Po-213	Tl-209	
Pu-238	U-234												
Pu-239	U-235m	U-235	Th-231	Pa-231	Ac-227	Th-227	Fr-223	Ra-223	At-219	Rn-219			
Pu-240	U-236	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Po-212	Tl-208	
Pu-241	Am-241												
Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	Pb-214	At-218	Bi-214	
Pu-243	Am-243	Np-239	Pu-239	U-235m	U-235	Th-231	Pa-231	Ac-227	Th-227	Fr-223	Ra-223	At-219	
Pu-244	U-240	Np-240m	Np-240	Pu-240									
Pu-245	Am-245	Cm-245	Pu-241	Am-241	U-237	Np-237	Pa-233	U-233	Th-229	Ra-225	Ac-225		
Pu-246	Am-246m	Cm-246	Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	
Am-237	Pu-237	Pu-237m	Np-233	Np-237	U-233	Pa-233	Th-229	Ra-225	Ac-225				
Am-238	Pu-238	U-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	Pb-214	At-218	Bi-214	Rn-218	Po-214	Tl-210	Pb-210
Am-239	Pu-239	Np-235	U-235m	U-235	Pa-231	Th-231	Ac-227	Th-227	Fr-223	Ra-223			
Am-240	Pu-240	U-236	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Po-212	Tl-208
Am-241	Np-237	Pa-233	U-233	Th-229	Ra-225	Ac-225	Fr-221	At-217	Bi-213	Rn-217	Po-213	Tl-209	Pb-209
Am-242	Cu-242												
Am-242m	Am-242	Cm-242	Np-238	Pu-238	U-234								
Am-243	Np-239	Pu-239											
Am-244	Cm-244	Pu-240	U-236	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Po-212
Am-244m	Cm-244	Pu-244	Pu-240	U-240	U-236	Np-240	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Tl-208	Ra-224	Bi-209
Am-245	Cm-245	Pu-241	Am-241	U-237	Np-237	Pa-233	U-233	Th-229	Ra-225	Ac-225			
Am-246	Cm-246	Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	Pb-214	At-218
Am-246m	Cm-246	Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	Pb-214	At-218
Cm-238	Am-238	Pu-234	Pu-238	Np-234	U-230	U-234	Th-226	Th-230	Ra-222	Ra-226	Rn-218	Rn-222	Po-214
Cm-240	Pu-236	U-232	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Po-212	Tl-208			
Cm-241	Am-241	Pu-237	Np-237	U-233	Pa-233	Th-229	Ra-225	Ac-225	Fr-221				
Cm-242	Pu-238												
Cm-243	Pu-239												
Cm-244	Pu-240												
Cm-245	Pu-241	Am-241											
Cm-246	Pu-242												
Cm-247	Pu-243	Am-243	Np-239										
Cm-248	Pu-244	U-240	Np-240	Pu-240	U-236	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212
Cm-249	Bk-249	Cf-249	Am-245	Cm-245	Pu-241	Am-241	U-237	Np-237	Bi-212	Po-212	Pa-233		
Cm-250	Pu-246	Am-246m	Cm-246	Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218

Muttern.	Tochtermuklide												
Bk-245	Cm-245	Am-241	Pu-241	Np-237	U-237	Pa-233	U-233	Th-229	Ra-225				
Bk-246	Cm-246	Am-242	Am-242n	Pu-242	Cm-242	U-238	Pu-238	Th-234	U-234	Pa-234m	Th-230	Pa-234	Ra-226
Bk-247	Am-243	Np-239	Pu-239	U-235m	U-235	Th-231	Pa-231	Ac-227	Th-227	Fr-223	Ra-223	At-219	
Bk-249	Cf-249												
Bk-250	Cf-250	Cm-246	Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	
Cf-244	Cm-240	Pu-236	U-232	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Po-212	Tl-208		
Cf-246	Cm-242	Pu-238	U-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	Pb-214	At-218	Bi-214	Rn-218	Po-214	Tl-210
Cf-248	Cm-244	Pu-240											
Cf-249	Cm-245	Pu-241	Am-241										
Cf-250	Cm-246												
Cf-251	Cm-247	Pu-243	Am-243	Np-239	Pu-239	U-235m	U-235	Th-231	Pa-231	Ac-227	Th-227	Fr-223	Pb-210
Cf-252	Cm-248	Pu-244	U-240	Np-240	Pu-240	U-236	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216
Cf-253	Cm-249	Es-253	Bk-249	Cf-249									
Cf-254	Cm-250	Pu-246	Am-246m	Cm-246	Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230	Ra-226	Pb-212
Es-250	Cf-250	Bk-246	Cm-246	Am-242	Am-242n	Pu-242	Cm-242	U-238	Pu-238	Th-234	U-234	Pb-209	
Es-251	Cf-251	Bk-247	Cm-247	Am-243	Pu-243	Np-239	Pu-239	U-235m	U-235	Th-231	Pa-231		
Es-253	Bk-249	Cf-249											
Es-254	Bk-250	Cf-250	Cm-246										
Es-254m	Fm-254	Bk-250	Cf-250										
Fm-252	Cf-248	Cm-244	Pu-240	U-236	Th-232	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212
Fm-253	Es-253	Cf-249	Bk-249	Cm-245	Am-245	Pu-241	Am-241	U-237	Np-237	Tl-208	Pa-233		
Fm-254	Cf-250	Cm-246	Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	
Fm-255	Cf-251	Cm-247	Pu-243	Am-243	Np-239	Pu-239	U-235m	U-235	Th-231	Pa-231	Ac-227	Th-227	Fr-223
Fm-257	Cf-253	Es-253	Cm-249	Bk-249	Cf-249	Am-245	Cm-245	Pu-241	Am-241	U-237			
Md-257	Fm-257	Es-253	Cf-253	Bk-249	Cm-249	Cf-249	Am-245	Cm-245	Pu-241				
Md-258	Es-254	Fm-258	No-258	Bk-250	Cf-250	Cm-246	Pu-242	U-238	Th-234	Pa-234m	U-234	Pa-234	Th-230

Tabelle 2.5: Liste der Nuklide, für die in der Datenbank JEFF-3.1.1 ([KEL 09], [SAN 09]) die Bezeichnungen der angeregten Zustände gegenüber der StrlSchV geändert sind

Nuklid	Anregungsenergie E_x [keV]	Spin und Parität J^π	Halbwertszeit $T_{1/2}$	Bezeichnung in StrlSchV
Sc-44	0	2 ⁺	3,97 h	Sc-44m
Sc-44m	271	6 ⁺	2,44 d	Sc-44
Nb-90	0	8 ⁺	14,6 h	Nb-90
Nb-90m	24	4 ⁻	18,81 s	-
Nb-90n	382	1 ⁺	6,19 ms	-
Nb-98	0	1 ⁺	2,86 s	-
Nb-98m	84	5 ⁺	51,3 min	Nb-98
Rh-99	0	1/2 ⁻	16,1 d	Rh-99m
Rh-99m	64,6	9/2 ⁺	4,7 h	Rh-99
In-110	0	7 ⁺	4,9 h	-
In-110m	62,1	2 ⁺	69,1 min	In-110
Sb-128	0	8 ⁻	9 h	Sb-128m
Sb-128m	10	5 ⁺	10,4 min	-
Tb-156	0	3 ⁻	5,17 d	Tb-156
Tb-156m	49,6	7 ⁻	1,01667 d	-
Tb-156n	88,4	0 ⁺	5,1 h	Tb-156m
Hf-177	0	7/2 ⁻	stabil	-
Hf-177m	1315,5	23/2 ⁺	1,08 s	-
Hf-177n	2740	37/2 ⁻	51,4 min	Hf-177m
Hf-178	0	0 ⁺	stabil	-
Hf-178m	1147	8 ⁻	4 s	-
Hf-178n	2446	16 ⁺	31 a	Hf-178m
Hf-179	0	9/2 ⁺	stabil	-
Hf-179m	375	1/2 ⁺	18,67 s	-
Hf-179n	1106	25/2 ⁻	25,1 d	Hf-179m
Ta-178	0	1 ⁺	9,29 min	-
Ta-178m	?	7 ⁻	2,36 h	Ta-178
Ta-180	0	1 ⁺	8,08 h	Ta-180m
Ta-180m	75,3	0 ⁻	1,8 · 10 ¹⁵ a	Ta-180
Ta-182	0	3 ⁻	114,7 d	Ta-182
Ta-182m	16	5 ⁺	283 ms	-
Ta-182n	520	10 ⁻	15,84 min	Ta-182m
Ir-194	0	1 ⁻	19,3 h	Ir-193m
Ir-194m	147	4 ⁺	31,85 ms	-
Ir-194n	370	?	171 d	Ir-194
Np-236	0	6 ⁻	1,52 · 10 ⁵ a	Np-236m
Np-236m	60	1 ⁻	22,5 h	Np-236

Muttern.	Tochternuclide												
Pu-245+	Am-245												
Pu-246+	Am-246m												
Am-237+	Np-233	Pu-237m											
Am-242m+	Np-238	Am-242	Cm-242										
Am-243+	Np-239												
Cm-238+	Am-238												
Cm-247+	Pu-243												
Cm-250+	Pu-246	Am-246m											
Bk-246+	Am-242	Am-242n											
Bk-249+	Am-245												
Cf-253+	Cm-249												
Es-254+	Bk-250												
Es-254m+	Bk-250	Fm-254											
Md-258+	Fm-254	Fm-258	No-258										
Ra-226++	Rn-222	Po-218	Pb-214	Bi-214	Pb-210	Bi-210	Po-210	Po-214					
Th-232sec	Ra-228	Ac-228	Th-228	Ra-224	Rn-220	Po-216	Pb-212	Bi-212	Tl-208	Po-212			
U-238sec	Th-234	Pa-234m	U-234	Th-230	Ra-226	Rn-222	Po-218	Pb-214	Bi-214	Pb-210	Bi-210	Po-210	Po-214

2.4 Unterschiede in den Tochternucliden im Vergleich zu Anl. III Tab. 2 StrlSchV

2.4.1 Fehlerhafte Angaben in Anl. III Tab. 2 StrlSchV

In Tabelle 2.7 sind die Nuclide aufgeföhrt, bei denen in der Liste der Tochternuclide in Anl. III Tab. 2 StrlSchV Übertragungs- oder Formatierungsfehler (z. T. auch nur in bestimmten Ausgaben der StrlSchV) aufgetreten sind. Dabei ist in der StrlSchV für einige Nuclide ein falsches Tochternuclid angegeben und in einigen Ausgaben fehlen Zeilenumbrüche vor Mutternucliden, so dass diese in der Liste der Tochternuclide des vorher aufgeföhrteten Nuclids aufgeföhrt sind.

Tabelle 2.7: Liste der Nuclide, bei denen in Anl. III Tab. 2 StrlSchV Übertragungs- oder Formatierungsfehler vorhanden sind

gemäß Anl. III Tab. 2 StrlSchV		korrigiert		Kommentar
Mutternuclid	Tochternuclide	Mutternuclid	Tochternuclide	
Mo-101+	Tc-100	Mo-101+	Tc-101	falsches Tochternuclid
Ru-103+	Rh-102m	Ru-103+	Rh-103m	falsches Tochternuclid
Pd-103+	Rh-106	Pd-103+	Rh-103m	falsches Tochternuclid
Hg-195m+	Hg-195, Pb-210+, Bi-210, Pb-210++, Bi-210, Po-210	Hg-195m+	Hg-195	fehlende Zeilenumbrüche ^{a)}
		Pb-210+	Bi-210	fehlende Zeilenumbrüche bei Mutternuclid Hg-195m+ ^{a)}
		Pb-210++	Bi-210, Po-210	fehlende Zeilenumbrüche bei Mutternuclid Hg-195m+ ^{a)}
Th-229+	Ra-225, Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Tl-209, Po-213, Pb-209, Th-232sec, Ra-228, Ac-228,	Th-229+	Ra-225, Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Tl-209, Po-213, Pb-209	fehlender Zeilenumbruch ^{a)}

	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212			
		Th-232sec	Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212	fehlender Zeilenumbruch bei Mutternuklid Th-229+ ^{a)}
Am-243+	Np-239, Cm-247+, Pu-243	Am-243+	Np-239	fehlender Zeilenumbruch ^{a)}
		Cm-247+	Pu-243	fehlender Zeilenumbruch bei Mutternuklid Am-243+ ^{a)}

^{a)} Zeilenumbrüche fehlen nur in manchen Ausgabe (z. B. Ziegler, Atomgesetz mit Verordnungen – Textsammlung, Nomos Verlagsgesellschaft, 31. Auflage, Stand: 15. Dezember 2011)

2.4.2 Nuklide in Anl. III Tab. 2 StrlSchV, die jetzt fehlen

Wenn die Liste der Tochternuklide mit den Bedingungen nach Safety Report 44 [IAE 05] aufgestellt wird, gibt es einige in Anl. III Tab. 2 StrlSchV aufgeführte Tochternuklide, die die Bedingungen nach Safety Report 44 jedoch nicht erfüllen. Diese sind in Tabelle 2.8 in Klammern aufgeführt. Zusätzlich sind die Anteile dieser Nuklide an der resultierenden Dosis für das in den aktuellen Rechnungen begrenzende Szenario angegeben. Bei einigen Mutternukliden entfallen unter Anwendung der Bedingungen nach Safety Report 44 sämtliche Tochternuklide. Die Zeilen in Tabelle 2.8, in denen kein Mutternuklid in der ersten Spalte steht, enthalten weitere Tochternuklide des in der vorhergehenden Zeile aufgeführten Mutternuklids.

Tabelle 2.8: Liste der Tochternuklide, die in Anl. III Tab. 2 StrlSchV vorhanden sind, aber nicht die Bedingungen nach RS-G-1.7 bzw. SR-44 erfüllen. Die entsprechenden Tochternuklide sind in Klammern gesetzt. Unter dem Nuklid ist der jeweilige, gerundete Anteil an der Dosis angegeben.

Muttern.	Tochternuklid(e)						
Ca-47+ 97 %	(Sc-47) 3 %						
Zr-93+ 46 %	(Nb-93m) 54 %						
I-133+ 100 %	(Xe-133) < 1 %	(Xe-133m) < 1 %					
I-135+ 93 %	(Xe-135) 3 %	Xe-135m 4 %					
Ba-131+ 100 %	Cs-131 < 1 %						
Ba-140+ 8 %	(La-140) 92 %						
Pm-148+ 100 %	(Pm-148) < 1 %						
Dy-166+ 65 %	(Ho-166) 35 %						

Muttern.	Tochternuklid(e)						
Ir-189 100 %	(Os-189m) < 1 %						
Ir-190+ 48 %	(Os-190m) 52 %						
Pt-188+ 100 %	(Ir-188) < 1 %						
Pb-210++ 30 %	(Bi-210) < 1 %	(Po-210) 69 %					
Ra-226++ 8 %	(Rn-222) < 1 %	(Po-218) < 1 %	(Pb-214) < 1 %	(Bi-214) < 1 %	(Pb-210) 27 %	(Bi-210) < 1 %	(Po-210) 65 %
Ac-227++ 94 %	(Fr-223) < 1 %	(Th-227) 2 %	(Ra-223) 2 %	(Rn-219) < 1 %	(Po-215) < 1 %	(Pb-211) < 1 %	(Bi-211) < 1 %
	(Tl-207) < 1 %	(Po-211) < 1 %					
Th-232sec < 1 %	(Ra-228) < 1 %	(Ac-228) 41 %	(Th-228) < 1 %	(Ra-224) < 1 %	(Rn-220) < 1 %	(Po-216) < 1 %	(Pb-212) 5 %
	(Bi-212) 4 %	(Tl-208) 50 %	(Po-212) < 1 %				
U-238sec < 1 %	(Th-234) < 1 %	(Pa-234m) < 1 %	(U-234) < 1 %	(Th-230) < 1 %	(Ra-226) < 1 %	(Rn-222) < 1 %	(Po-218) < 1 %
	(Pb-214) 12 %	(Bi-214) 86 %	(Pb-210) < 1 %	(Bi-210) < 1 %	(Po-210) < 1 %	(Po-214) < 1 %	
U-240+ < 1 %	Np-240 < 1 %	(Np-240m) 100 %					
Pu-244+ 59 %	U-240 < 1 %	(Np-240m) 40 %	Np-240 < 1 %				

2.4.3 Nuklide mit zusätzlichen Tochternukliden gegenüber Anl. III Tab. 2 StrlSchV

Die Mutternuklide, bei denen gegenüber Anl. III Tab. 2 StrlSchV zusätzliche Tochternuklide das Kriterium nach Safety Report 44 [IAE 05] erfüllen, sind in Tabelle 2.9 aufgeführt. Die in Anl. III Tab. 2 StrlSchV fehlenden Tochternuklide sind in Tabelle 2.9 in Klammern gesetzt. Für das in den aktuellen Rechnungen führende Szenario sind zusätzlich die Anteile an der Dosis angegeben. Die Zeilen in Tabelle 2.9, in denen kein Mutternuklid in der ersten Spalte steht, enthalten weitere Tochternuklide des in der vorhergehenden Zeile aufgeführten Mutternuklids.

Tabelle 2.9: Liste der Nuklide, für die im Vergleich zu Anl. III Tab. 2 StrlSchV weitere Tochternuklide die Bedingungen nach RS-G-1.7 bzw. SR-44 erfüllen. Die entsprechenden Tochternuklide sind in Klammern gesetzt. Unter dem Nuklid ist der jeweilige, gerundete Anteil an der Dosis angegeben.

Muttern.	Tochternuklide						
Fe-60+ 88 %	(Co-60) < 1 %	Co-60m 12 %					
Sn-126+ 100 %	(Sb-126) < 1 %	Sb-126m < 1 %	(Sb-126n) < 1 %				
Hg-195m+ < 1 %	(Au-195m) 31 %	Hg-195 69 %					
Pb-210+ 30 %	(Hg-206) < 1 %	(Tl-206) < 1 %	Bi-210 < 1 %	(Po-210) 69 %			
Rn-222+ < 1 %	(Tl-210) < 1 %	(Pb-209) < 1 %	Pb-214 23 %	Bi-214 77 %	Po-214 < 1 %	Po-218 < 1 %	(At-218) < 1 %
	(Rn-218) < 1 %						
Ra-223+ 64 %	Tl-207 < 1 %	Pb-211 15 %	Bi-211 9 %	Po-211 < 1 %	Po-215 < 1 %	(At-215) < 1 %	Rn-219 11 %
Ra-226+ ^(a) 8 %	(Tl-210) < 1 %	(Pb-209) < 1 %	Pb-214 < 1 %	Bi-214 < 1 %	Po-214 < 1 %	Po-218 < 1 %	(At-218) < 1 %
	(Rn-218) < 1 %	Rn-222 < 1 %					
Ac-225+ 64 %	Tl-209 8 %	Pb-209 < 1 %	Bi-213 21 %	Po-213 < 1 %	At-217 < 1 %	(Rn-217) < 1 %	Fr-221 7 %
Ac-227+ 94 %	(Tl-207) < 1 %	(Pb-211) < 1 %	(Bi-211) < 1 %	(Bi-215) < 1 %	(Po-211) %	(Po-215) < 1 %	(At-215) < 1 %
	(At-219) < 1 %	(Rn-219) < 1 %	Fr-223 < 1 %	(Ra-223) 2 %	(Th-227) 2 %		
Th-229+ 68 %	Tl-209 4 %	Pb-209 < 1 %	Bi-213 10 %	Po-213 < 1 %	At-217 < 1 %	(Rn-217) < 1 %	Fr-221 2 %
	Ra-225 8 %	Ac-225 9 %					
Am-242m+ ^(b) 63 %	Np-238 < 1 %	Am-242 1 %	(Cm-242) 7 %				

^(a) Für Ra-226+ ergibt sich der Hauptbeitrag zur Dosis durch die Tochternuklide Po-210 und Pb-210, welche die Bedingung nach SR-44 nicht erfüllen

^(b) Für Am-242m+ ergibt sich ein weiterer wesentlicher Beitrag zur Dosis durch das Tochternuklid Pu-238, welches die Bedingung nach SR-44 nicht erfüllt

2.4.4 Zusätzliche Mutternuklide gegenüber Anl. III Tab. 2 StrlSchV

Tabelle 2.10 zeigt eine Zusammenstellung der Mutternuklide, die Tochternuklide nach Anwendung des Kriteriums nach Safety Report 44 [IAE 05] besitzen, aber in Anl. III Tab. 2 StrlSchV nicht als Mutternuklid aufgeführt sind. Dabei sind nur Mutternuklide berücksichtigt, deren Halbwertszeit größer als 20 Tage ist. Zusätzlich ist für das in den aktuellen Rechnungen führende Szenario der Anteil

des jeweiligen Nuklids an der Dosis angegeben. Die Zeilen in Tabelle 2.10, in denen kein Mutternuklid in der ersten Spalte steht, enthalten weitere Tochternuklide des in der vorhergehenden Zeile aufgeführten Mutternuklids.

Tabelle 2.10: Liste der Mutternuklide, die zusätzlich zu den in Anl. III Tab. 2 StrlSchV angegebenen Mutternukliden Tochternuklide besitzen, die die Bedingungen nach RS-G-1.7 bzw. SR-44 erfüllen. Unter dem Nuklid ist der jeweilige, gerundete Anteil an der Dosis angegeben. Es sind nur die Mutternuklide mit einer Halbwertszeit größer als 20 Tage angegeben.

Muttern.	Tochternuklide						
Si-32 18 %	P-32 82 %						
Ca-45 100 %	Sc-45m < 1 %						
As-73 < 1 %	Ge-73m 100 %						
Sr-89 100 %	Y-89m < 1 %						
Zr-95 66 %	Nb-95m < 1 %						
Lu-177m 18 %	Lu-177 < 1 %	Hf-177m 82 %					
Hf-178n 57 %	Hf-178m 43 %						
Hf-182 14 %	Ta-182 86 %						
Re-186m 59 %	Re-186 41 %						
Pb-202 6 %	Tl-202 94 %						
Bi-210m 100 %	Tl-206 < 1 %						

Muttern.	Tochternuclide							
	Th-232 < 1 %	Tl-208 50 %	Pb-212 5 %	Bi-212 4 %	Po-212 < 1 %	Po-216 < 1 %	Rn-220 < 1 %	Ra-224 < 1 %
	Ra-228 < 1 %	Ac-228 41 %	Th-228 < 1 %					
Np-236 100 %	Pa-232 < 1 %	Pu-236 < 1 %						
Pu-239 100 %	U-235m < 1 %							
Pu-241 ^(a) 42 %	(U-237) < 1 %							
Cm-250 96 %	Pu-246 < 1 %	Am-246m 4 %						
Bk-249 ^(b) 39 %	(Am-245) < 1 %							
Md-258 ^(c) 33 %	(Fm-254) < 1 %	Fm-258 < 1 %	No-258 < 1 %					

- (a) Für Pu-241 ergibt sich der Hauptbeitrag zur Dosis durch das Tochternuclid Am-241, welches die Bedingung nach SR-44 nicht erfüllt
- (b) Für Bk-249 ergibt sich der Hauptbeitrag zur Dosis durch das Tochternuclid Cf-249, welches die Bedingung nach SR-44 nicht erfüllt
- (c) Für Md-258 ergibt sich der Hauptbeitrag zur Dosis durch die Tochternuclide Es-254 und Bk-250, welche die Bedingungen nach SR-44 nicht erfüllen

3. VORSCHLAG FÜR EINE NEUFASSUNG VON ANL. III TAB. 2 STRLSCHV

Die Darstellung der bereits vollständig mit dem Mutternuclid berücksichtigten Tochternuclide, die bisher in Anl. III Tab. 2 StrlSchV erfolgt, muss auch in einer zukünftigen Fassung dieser oder einer vergleichbaren Verordnung in ähnlicher Weise beibehalten werden, um Eindeutigkeit bei der Anwendung der Freigrenzen und Freigabewerte zu erzielen. Es sollte ausschließlich das Schema eingesetzt werden, das für die Herleitung von Freigrenzen und Freigabewerten in RS-G-1.7 [IAE 04] bzw. Safety Report 44 [IAE 05] verwendet wurde, um Inkonsistenzen zu vermeiden.

Diese Anforderungen werden durch die Liste in Tabelle 2.6 erfüllt, wobei die Ketten Ra-226++, U-238sec und Th-232sec aus Gründen der Kompatibilität zusätzlich aufgenommen wurden. Es wird daher vorgeschlagen, für eine zukünftige Fassung einer Regelung analog zu Anl. III Tab. 2 StrlSchV diese Tabelle zu verwenden.

4. LITERATURVERZEICHNIS

- [BS 15A] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH
Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bzgl. der Regelungen zur Freigabe künstlicher radioaktiver Stoffe zur Umsetzung der neuen Euratom-Grundnormen in deutsches Recht - Konzept zur Umsetzung
Bericht zu AP1 (Endfassung), Aachen, 12.05.2015

- [BS 15B] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH
Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bzgl. der Freigrenzen von radioaktiven Stoffen zur Umsetzung der neuen EURATOM-Grundnormen in deutsches Recht
Bericht zu AP1 und AP2, Aachen, 03.08.2015
- [BS 15C] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH
Überarbeitung der Strahlenschutzverordnung bzgl. der Regelungen zur Freigabe künstlicher radioaktiver Stoffe zur Umsetzung der neuen Euratom-Grundnormen in deutsches Recht - Konzept zur Umsetzung
Bericht zu AP2 (Entwurf), Aachen, 31.08.2015
- [DEC 98] DECKERT, A.; THIERFELDT, S. (BRENK SYSTEMPLANUNG)
Berechnung massenspezifischer Freigabewerte für schwach radioaktive Reststoffe
BMU-1998-520, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz des BMU, ISSN 0724-3316, Brenk Systemplanung, Aachen, 1998
- [EUR 98] EUROPÄISCHE KOMMISSION
Recommended Radiological Protection Criteria for the Recycling of Metals from the Dismantling of Nuclear Installations. Radiation Protection No. 89, Recommendation from the Group of Experts set up under the terms of Article 31 of the Euratom Treaty, Luxemburg, März 1998
- [EUR 00] EUROPÄISCHE KOMMISSION
Recommended radiological protection criteria for the clearance of buildings and building rubble from the dismantling of nuclear installations
Radiation Protection No. 113, Luxemburg, 2000, ISBN 92-828-9172-0
- [EUR 14] EUROPÄISCHE KOMMISSION
Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom
Amtsblatt der Europäischen Union, L13, ISSN 1977-0642, 17. Januar 2014
- [IAE 04] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Standards Series No. RS-G-1.7, Safety Guide, Vienna 2004
- [IAE 05] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance
Safety Report Series No. 44, Vienna, 2005
- [KEL 09] KELLETT, M. A.; BERSILLON, O.; MILLS, R. W.
The JEFF-3.1/-3.1.1 radioactive decay data and fission yields sub-libraries
JEFF Report 20, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD 2009, NEA No. 6287, ISBN 978-92-64-99087-6

- [SAN 09] SANTAMARINA, A.; BERNARD, D.; BLAISE, P.; COSTE, M.; COURCELLE, A.; HUYNH, T. D.; JOUANNE, C.; LECONTE, P.; LITAIZE, O.; MENGELLE, S.; NOGUERE, G.; RUGGIERI, J.-M.; SEROT, O.; TOMMASI, J.; VAGLIO, C.; VIDAL, J.-F.
- The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library
JEFF Report 22, Validation Results from JEF-2.2 to JEFF-3.1.1, ed. by A. Santamarina, D. Bernard, Y. Rugama; Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD 2009, NEA No. 6807, ISBN 978-92-64-99074-6
- [THI 00] THIERFELDT, S.; KUGELER, E.
- Freigabe von Gebäuden und Bauschutt aus kerntechnischem Umgang
Brenk Systemplanung, 2000; BMU-2000-558; Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz