

**Verifikation und
Adaption von
Randbedingungen
zur Bestimmung von
Freigabewerten**

Verifikation und Adaption von Randbedingungen zur Bestimmung von Freigabewerten

Andreas Artmann
Katja Brennan
André Filby
Maria-Teresa Hussels
Henrich Meyering

Oktober 2023

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4720E03510 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Adaption, Freigabe, Freigabemodelle, Randbedingungen

Kurzfassung

Es ist im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens zu klären, inwieweit Anpassungen des Regelwerks, insbesondere des konventionellen Abfallrechts, und Veränderungen in der Praxis zu geänderten Randbedingungen, und somit zu ggf. veränderten Parameterwerten innerhalb der Modelle zur Berechnung von Freigabewerten führen. Hierzu zählen u. a. veränderte Rückbautechnologien und Dekontaminationsverfahren, Optimierungen bei der Ausschöpfung von Freigabewerten, veränderte Arbeitsprozesse beim Transport und der weiteren Handhabung freigegebener Stoffe.

Die o. g. Entwicklungen können dazu führen, dass bisherige Randbedingungen in den Berechnungsmodellen der Freigabewerte die Realitäten eines Freigabevorgangs ggf. nicht mehr vollständig abdecken, oder Margen und Konservativitäten aufgezehrt werden.

Dieses Forschungsvorhaben arbeitet daher die Randbedingungen heraus und prüft, inwieweit sie den aktuellen gesetzlichen Regelungen und der Freigabepaxis entsprechen.

Darüber hinaus wird untersucht, ob Bedarf besteht, die Annahmen und Randbedingungen der Berechnungsmodelle untereinander zu harmonisieren und zu systematisieren.

Einzubeziehen sind hierbei sowohl die Modelle, die den Spalten 6 bis 14 der neuen Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) zugrunde liegen, als auch die Modelle aus SR-44, die der Richtlinie 2013/59/EURATOM und somit den Werten der Spalte 3, Tab. 1, Anlage 4 StrlSchV zugrunde liegen.

Im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens 4720E03510 werden die den Berechnungsmodellen zugrunde liegenden Randbedingungen erfasst, verifiziert und ggf. adaptiert. Dabei werden ggf. auch Änderungen in der Gesetzgebung der konventionellen Abfallbehandlung berücksichtigt. Es werden Aussagen getroffen, welche Randbedingungen sich zwischen 2004 und 2018 verändert haben und welche Auswirkung diese auf die Freigabewerte haben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
1 Hintergrund	1
2 Begriffsbestimmungen	3
3 Darstellung der Forschungsarbeiten und -ergebnisse	7
3.1 AP 1: Überprüfung der Randbedingungen der für die Berechnung von Freigabewerten zugrundeliegenden Berechnungsvorschriften.....	7
3.1.1 Stand von Wissenschaft und Technik	7
3.1.2 Rechtlicher Rahmen – Abfallrecht mit Bezug auf die Freigabe.....	13
3.1.3 Auswertung der Freigabepraxis ausgewählter Abfallbeseitigungsanlagen und -verwertungsanlagen	30
3.1.4 Darstellung der veränderten Randbedingungen.....	35
3.2 AP 2: Aufzeigen von Adaptionmöglichkeiten	37
3.3 AP 3: Berechnung von spezifischen Freigabewerten für ausgewählte Schlüsselnuklide	40
3.3.1 AP 3.1: Anpassung der Randbedingungen	40
3.3.2 AP 3.2: Berechnung von spezifischen Freigabewerten	47
3.4 AP 4: Durchführung einer Konsequenzenanalyse.....	72
3.4.1 AP 4.1 und AP 4.2: Konsequenzenanalyse und Bewertung der neu bestimmten Freigabewerte	72
3.4.2 AP 4.3: Prüfung zusätzlicher Szenarien	76
3.5 Ecolego in der Freigabe.....	86
3.5.1 Programmierung eines radioökologischen Modells für Expositionsszenarien bei der Freigabe zur Beseitigung auf einer Deponie	86
3.5.2 Probabilistische Simulationen und die Nutzung der Ecolego „Sensitivitäts-Toolbox“	96
4 Zusammenfassung	103
Literaturverzeichnis	107

Abbildungsverzeichnis.....	115
Tabellenverzeichnis.....	117
Abkürzungsverzeichnis.....	119

1 Hintergrund

Die Entlassung radioaktiver Abfälle aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung wird durch die Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (StrlSchV) /SSV 21/ geregelt. Die Freigabe von festen und flüssigen Stoffen, Gebäuden, Bauschutt, Metallschrott und Bodenflächen sowie etwaiger weiterer Stoffe und Gegenstände ist ein spezieller Verwaltungsakt, durch den auf Antrag des Genehmigungsinhabers durch die zuständige Aufsichtsbehörde beschieden wird, ob der Freigabe zugestimmt werden kann.

Die für die Freigabe einschlägigen Regelungen finden sich in den §§ 31 bis 42 der StrlSchV in der seit 31. Dezember 2018 geltenden Fassung mit den letzten Änderungen vom 8. Oktober 2021 /SSV 21/. Die zuständigen Behörden können in der Regel davon ausgehen, dass für Einzelpersonen der Bevölkerung eine effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert (Dosiskriterium gemäß § 31 StrlSchV /SSV 21/) im Kalenderjahr nicht überschritten wird, wenn die entsprechenden Freigabewerte nach Tab. 1, Anlage 4 der StrlSchV /SSV 21/ eingehalten werden. Voraussetzung zur Einhaltung des Dosiskriteriums ist neben der Einhaltung der genannten Freigabewerte entsprechend Tab. 1, Anlage 4 auch die Einhaltung der Festlegungen zur Freigabe gemäß Anlage 8 der StrlSchV /SSV 21/.

Seit Mitte der 1990er Jahre wurden zu diesem Zweck in mehreren Forschungsvorhaben, auch finanziert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Freigabemodelle für die Bestimmung der Freigabewerte entwickelt und angewandt. Die Berechnungsvorschriften innerhalb der Freigabemodelle für die Freigabewerte basieren auf Szenarien über die Genese der freigegebenen Stoffe in Umwelt und Stoffkreisläufen inklusive der damit verbundenen Expositionen von Einzelpersonen. Hieraus werden weitgehend realitätsnahe Annahmen für szenarien- und expositionsbestimmende Parameter entsprechend der Freigabeoptionen sowie den damit verbundenen Freigabemodellen abgeleitet. Für die in den Freigabemodellen verwendeten Berechnungsvorschriften spielen die Randbedingungen und die damit verbundenen Annahmen der Parameterwerte eine zentrale Rolle. Für jede Spalte¹

¹ In der StrlSchV /SSV 21/ wurden die Werte der Spalte 3 für die uneingeschränkte Freigabe von festen und flüssigen Stoffen den EU-BSS Annex 7 Tabelle A entnommen bzw. entsprechend der Modelle nach SR-44 berechnet /IAEA 05/, Spalte 3 StrlSchV (2018) ersetzt Spalte 5 StrlSchV (2001) /SSV 17/.

der Tab. 1, Anlage 4 StrlSchV /SSV 21/ (vormals Tab. 1, Anlage III StrlSchV 2001 /SSV 17/) wurden auf diese Weise nuklidspezifische Freigabewerte ermittelt.

Ein freigegebener Stoff geht in den konventionellen Stoffkreislauf über und unterliegt dann gegebenenfalls den Gesetzen und Verordnungen für konventionelle Abfälle wie z. B. dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Daher werden in die Berechnung zur Freigabe auch Anforderungen aus den Verordnungen des konventionellen Abfalls berücksichtigt. Ein Beispiel hierfür ist der Verweis der StrlSchV (2001 und 2018) auf die Deponieverordnung (DepV) bezüglich der „Freigabe zur Deponierung“ als Bestandteil eines Expositionsszenarios. Des Weiteren werden in den Berechnungsmodellen zur Bestimmung der Freigabewerte bestimmte Mischungsverhältnisse zwischen freigegebenen Stoffen und konventionellen Stoffen angenommen (Randbedingung „Vermischung des Materials“).

Im Rahmen des Forschungsvorhabens 4720E03510 werden die den Berechnungsmodellen zugrunde liegenden Randbedingungen erfasst, verifiziert und ggf. adaptiert. Dabei wird untersucht, inwieweit Anpassungen der Verordnungen und Gesetze sowie Vorgaben aus der Praxis zu geänderten Randbedingungen geführt haben. Die Randbedingungen werden herausgearbeitet, und es wird geprüft, inwieweit sie den aktuellen gesetzlichen Regelungen und der Freigabepaxis entsprechen. Darüber hinaus wird untersucht, ob Bedarf besteht, die Annahmen und Randbedingungen der Berechnungsmodelle untereinander zu harmonisieren und zu systematisieren.

2 Begriffsbestimmungen

Für das vorliegende Forschungsvorhaben wurden zusammen mit dem Öko-Institut e. V. die folgenden Begriffsdefinitionen erarbeitet.

Freigabeoptionen (Synonym für Freigabepfade)

Als Freigabeoptionen werden die Möglichkeiten zur Freigabe nach Spalte 3 und nach den Spalten 6 bis 14 der Tab. 1 aus Anlage 4 StrlSchV bezeichnet. Es bestehen demnach die Optionen, Abfälle oder Reststoffe aus dem Strahlenschutzrecht uneingeschränkt (Spalte 3) oder spezifisch, d. h. unter Einhaltung spezifischer Randbedingungen (Spalten 6 bis 14), freizugeben. Nach der Freigabe unterliegen Abfälle und Reststoffe den Anforderungen des konventionellen Abfallrechts. Bei Erteilung des Freigabebescheids ist in den Fällen der spezifischen Pfade zu prüfen, ob die daran geknüpften Randbedingungen eingehalten werden.

Als Freigabeoption im Sinne des Forschungsvorhabens werden nicht die „Freigabe im Einzelfall § 37 StrlSchV /SSV 21/“ oder die „Freigabe von Amts wegen § 38 StrlSchV /SSV 21/“ betrachtet.

Randbedingungen (Synonym für Rahmenbedingungen)

Randbedingungen, insbesondere für die spezifische Freigabe, können rechtliche Bestimmungen und praktische Anforderungen sein. So nehmen die einzelnen Spalten der StrlSchV etwa Bezug auf Materialvorgaben (Bauschutt, Bodenflächen, feste Stoffe, Gebäude, Metalle), aber auch auf die Art und Weise der spezifischen Entsorgungswege. Hier kann zwischen Beseitigung und Wiederverwendung unterschieden werden, etwa zwischen der Deponierung bzw. Verbrennung von Stoffen bis zu 100 Mg/a bzw. 1.000 Mg/a einerseits oder der Rezyklierung von Metallschrott oder Gebäuden entweder zum Abriss oder zur Weiterverwendung andererseits.

Rechtliche Vorgaben können darüber hinaus aus den Anforderungen umweltgesetzlicher Vorgaben resultieren, da die Abfälle oder Reststoffe in Beseitigungsanlagen weiteren Regulierungen unterliegen (z. B. KrWG, DepV, Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)).

Freigabemodell und Szenarien

Das übergeordnete Freigabemodell für jede Freigabeoption bzw. jeden Freigabepfad soll sicherstellen, dass das Dosiskriterium laut § 31 Abs. 2 StrlSchV /SSV 21/ eingehalten ist. Für jede Freigabeoption müssen gemäß den geltenden Randbedingungen Szenarien gebildet werden. Diese Szenariendefinition und deren Aggregation zu einer Gesamtbetrachtung über möglichst abdeckende Szenarien für jedes Radionuklid und jede Freigabeoption ist ein konzeptioneller Modellbildungsprozess. In diesem ist sowohl bzgl. des Szenariendesigns als auch hinsichtlich der Auswahl der Parameter, eine gute Abwägung im Sinne eines allgemeingültigen Nachweises erforderlich. Die Szenariendefinition bildet die Schnittstelle zur eigentlichen Berechnungsvorschrift.

Berechnungsvorschriften

Unter einer Berechnungsvorschrift (vormals Berechnungsmodell) für die Freigabe werden die Gleichungen bzw. Gleichungssysteme verstanden, die in ihrer Gesamtheit die Freigabewerte begründen sollen. Es hat sich für die Berechnung etabliert, für einen spezifischen Freigabewert ein Set an Szenarien zu definieren. Für jedes Szenario gibt es mindestens eine oder mehrere mathematische Gleichungen (geschlossene algebraische Systeme), seltener auch ein numerisches Rechenmodell. Gleichungen und numerische Modelle liefern im Ergebnis einen deterministischen Zahlenwert eines Radionuklids als Aktivitätskonzentration. Ob dieser Zahlenwert (ggf. nach Rundung) den Freigabewert bildet, ergibt sich aus dem Vergleich innerhalb des Sets an Szenarien. Durch diesen Vergleich von Szenarien wird sichergestellt, dass jede mögliche Umgangsform mit den Abfällen bzw. Reststoffen durch das restriktivste Szenario – also das mit der potenziell höchsten Strahlenexposition – mit abgedeckt wird, d. h. das restriktivste Szenario entscheidet über den Freigabewert.

Annahmen

Annahmen bilden den Argumentationsrahmen für jedes Szenario. Allgemein werden in der Forschung unter Annahmen Aussagen verstanden, die als gegeben hingenommen werden. Jede wissenschaftliche Aussage beruht auf den zugrunde gelegten Annahmen, und es ist entscheidend, diese Annahmen explizit zu machen. Abhängig von den für das Szenario getroffenen Annahmen, sind die Parameterwerte für die Berechnungsvorschriften festgelegt.

Szenario (Synonym für Expositionsszenario)

Abfolge/Dokumentation von zusammenhängenden, (ursächlich) miteinander verketteten Ereignissen oder Vorgängen. Entscheidend ist hierbei die Frage der Verwendung oder Weiterverarbeitung eines Stoffes und in welchem Umfang dadurch Menschen und Umwelt mit dem betrachteten Stoff in Berührung kommen.

Expositionspfad

Als Expositionspfad wird der Weg radioaktiver Stoffe von der Ableitung aus einer Anlage oder Einrichtung bezeichnet, der über einen Ausbreitungs- oder Transportvorgang zu einer inhalativen (Inhalation), oralen (Ingestion) oder dermalen (externe Strahlung) Exposition des Menschen führt.

Parameter

In die Gleichungen zur Berechnung von Freigabewerten, sprich die Berechnungsvorschrift, fließen eine Vielzahl deterministischer Werte ein. Die Werte beruhen zumeist auf Annahmen, da sie gemeinhin nicht empirisch beobachtbar sind oder als wissenschaftlich gesichert angesehen werden können. Sie werden als Parameter bezeichnet.

3 Darstellung der Forschungsarbeiten und -ergebnisse

3.1 AP 1: Überprüfung der Randbedingungen der für die Berechnung von Freigabewerten zugrundeliegenden Berechnungsvorschriften

Das Arbeitspaket (AP) 1 unterteilt sich in zwei Arbeitspunkte, die unter Einbindung des Öko-Instituts im Unterauftrag erarbeitet wurden. Im Rahmen des AP 1.1 erfolgte zunächst die Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik mit Bezug auf die Randbedingungen für die zur Berechnung von Freigabewerten angewendeten Berechnungsvorschriften. Die Recherche hierzu bezieht sich u. a. auf

- bisherige Arbeiten des Forschungsnehmers,
- Ergebnisse aus der Literaturrecherche sowie
- bewährte Vorgehensweisen („Best Practices“) im Rahmen der Freigabepraxis.

Unter Berücksichtigung der rechtlichen sowie praktischen Rahmenbedingungen des konventionellen Abfallrechts gemäß AP 1.1 werden die sich daraus auf die Randbedingungen ergebenden Änderungen im AP 1.2. kurz zusammenfassend dargestellt.

3.1.1 Stand von Wissenschaft und Technik

Hintergrund und Einordnung

In Bezug auf die Freigabe bestehen grundsätzlich folgende übergeordnete Möglichkeiten:

- Uneingeschränkte Freigabe nach § 35 StrlSchV /SSV 21/ entsprechend der nuklid-spezifischen Freigabewerte aus Anlage 4, Tab. 1, Spalte 3
- Spezifische Freigabe nach § 36 StrlSchV (2018) entsprechend der nuklidspezifischen Freigabewerte aus Anlage 4, Tab. 1, Spalten 6 bis 14
- Freigabe im Einzelfall nach § 37 StrlSchV (2018)
- Freigabe von Amts wegen nach § 38 StrlSchV (2018)

Im Rahmen der Novellierung der StrlSchV 2018 /SSV 18/ wurden u. a. die bestehenden Freigaberegeln der StrlSchV von 2001 /SSV 17/ überarbeitet und die Vorgaben der

Richtlinie 2013/59/Euratom /EUR 14/ Art. 30 in deutsches Recht umgesetzt. Die wesentliche inhaltliche Änderung in Bezug auf die Freigabe besteht in der Übernahme der Werte der „uneingeschränkten Freigabe“ aus der Richtlinie 2013/59/Euratom bzw. entsprechend den in dieser Richtlinie zugrunde gelegten Freigabemodellen aus IAEA SR 44 /IAEA 05/ und der Gleichsetzung dieser Werte mit den Freigrenzen.

Die Freigabewerte der Anlage 3, Tab. 1, Spalte 5 bis 10a StrlSchV (2001) /SSV 17/ und damit auch die entsprechenden Freigabeoptionen wurden in die aktualisierte StrlSchV (2018) übernommen und finden sich in Anlage 4, Tab. 1, Spalten 6 bis 14 StrlSchV (2018) wieder (siehe Abb. 3.1).

In Abb. 3.1 sind die Freigabeoptionen gemäß Anlage 4, Tab. 1 StrlSchV (2018) sowie deren zugrunde liegenden Freigabemodelle im Vergleich zur Anlage 3, Tab. 1 StrlSchV (2001) dargestellt. Diese gelten, mit Ausnahme der Angaben für die uneingeschränkte Freigabe von festen Stoffen und Flüssigkeiten (Spalte 5 StrlSchV (2001)), auch für die aktualisierte StrlSchV (2018). Wie zuvor beschrieben, beruhen die neuen Freigabewerte der uneingeschränkten Freigabe in Spalte 3 der StrlSchV (2018) auf den Untersuchungen und Angaben in IAEA SR 44 /IAEA 05/.

Mithilfe verschiedener Berechnungsvorschriften zur Berücksichtigung externer Gammastrahlung sowie der Exposition durch Inhalation und Ingestion, wurden innerhalb der Szenarien die nuklidspezifischen Freigabewerte entsprechend den dort zu berücksichtigenden Expositionspfaden berechnet. Der im Vergleich zwischen den einzelnen Freigabewerten der verschiedenen Szenarien eines Freigabemodells konservativste Freigabewert wurde jeweils nuklidspezifisch in die Tab. 1 der Anlage 4 StrlSchV übernommen (siehe Abb. 3.1).

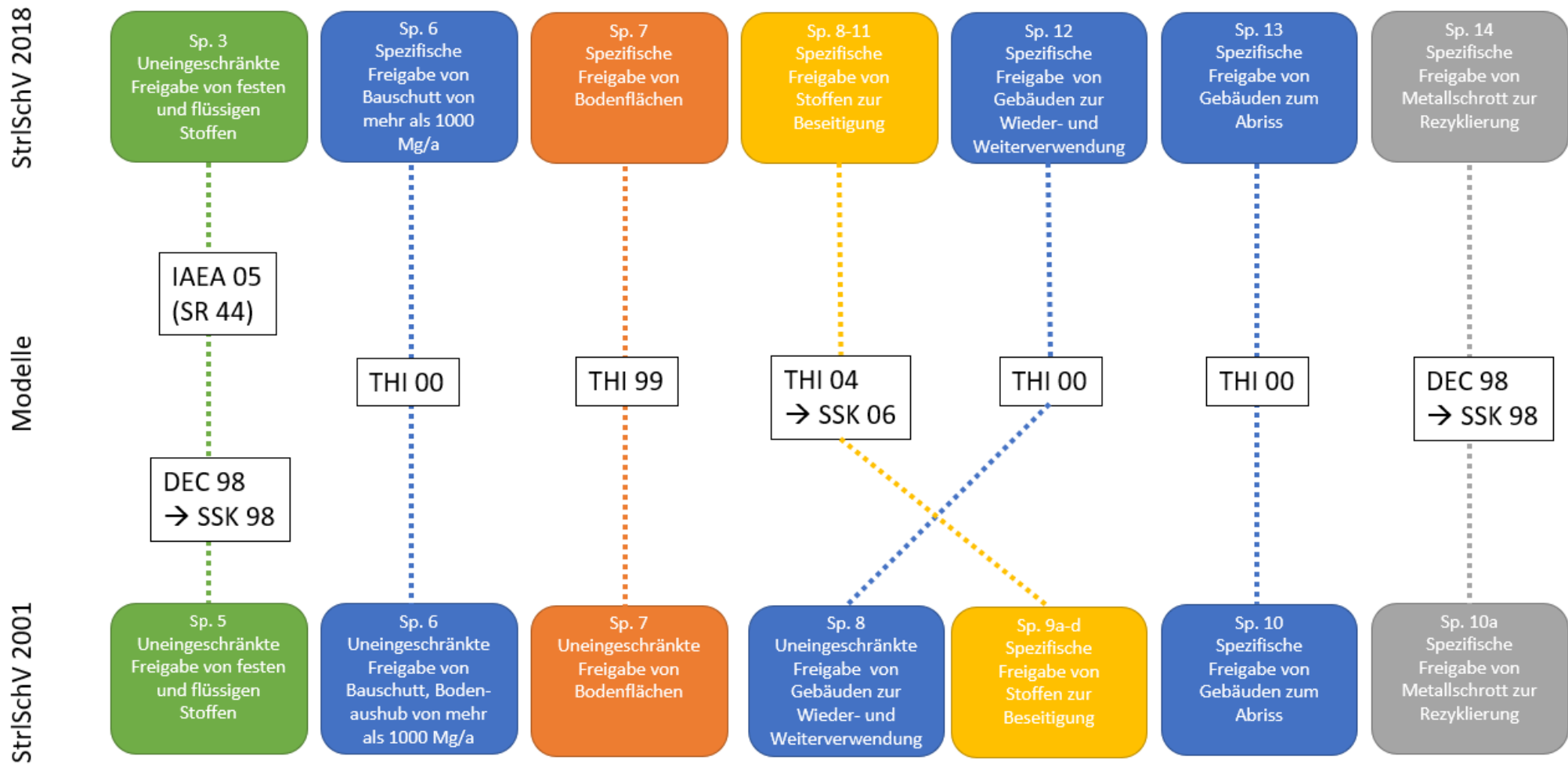


Abb. 3.1 Übersicht über die veränderten Freigabeoptionen und Freigabemodelle der StrlSchV (2018) gegenüber der StrlSchV (2001)

Zusammenstellung der Berechnungsgrundlagen

In die Berechnung der Freigabewerte der StrlSchV sind eine Vielzahl von Berechnungsgrundlagen eingeflossen. Die Vollständigkeit dieser zentralen Unterlagen wurde in einem bereits abgeschlossenen Vorhaben der GRS mit dem Öko-Institut ausführlich geprüft /GRS 20/.

Die Freigaben von Abfällen oder Reststoffen aus dem Strahlenschutzrecht erfolgen entweder uneingeschränkt (Freigabewerte der Anlage 4, Tab. 1, Spalte 3 StrlSchV) oder spezifisch, d. h. unter Einhaltung spezifischer Randbedingungen (Spalten 6 bis 14). Die Berechnungsgrundlagen sind vom Ingenieurbüro Brenk Systemplanung GmbH erstellt worden (u. a. /THI 04/, /DEC 98/). Die daraus abgeleiteten Freigabewerte sind teilweise durch Empfehlungen der SSK überarbeitet und durch das gemeinsame Forschungsvorhaben der GRS und des Öko-Instituts geprüft worden. Im Folgenden werden die Berechnungsgrundlagen kurz dargestellt.

- Werte der Spalte 3 zur uneingeschränkten Freigabe von festen und flüssigen Stoffen in Bq/g entsprechen den Freigrenzen der Euratom-Grundnorm /EUR 14/. Berechnungsgrundlagen sind in /IAEA 05/ enthalten.
- Werte für die spezifische Freigabe fußen jeweils auf den angegebenen Literaturstellen, für die nach
 - Spalte 6 geregelte Freigabe von Bauschutt von mehr als 1.000 Mg/a in Bq/g gelten die Empfehlungen der Expertengruppe der Europäischen Kommission /EC 00/, wie in den Berechnungsgrundlagen /THI 00/ beschrieben, nach arithmetischer Rundung, sofern nicht gedeckelt durch Werte der Spalten 3, 10 oder 11.
 - Spalte 7 geregelte Freigabe von Bodenflächen in Bq/g sind die Berechnungen in /THI 99/ maßgebend.
 - den Spalten 8 bis 11 geregelten Freigaben von Stoffen zur Beseitigung wurden die Werte anhand von Berechnungen in /THI 04/ bestimmt, anschließend durch Szenario- und Parameteradaption /SSK 06/ angepasst und in /GRS 20/ überprüft. Man unterscheidet
 - Spalte 8: Feste Stoffe bis zu 100 Mg/a zur Beseitigung auf Deponien,
 - Spalte 9: Stoffe bis zu 100 Mg/a zur Beseitigung in Verbrennungsanlagen,

- Spalte 10: Feste Stoffe bis zu 1.000 Mg/a zur Beseitigung auf Deponien und
- Spalte 11: Stoffe bis zu 1.000 Mg/a zur Beseitigung in Verbrennungsanlagen.
- Spalte 12 geregelte Freigabe von Gebäuden zur Wieder-, Weiterverwendung in Bq/cm² gelten die Empfehlungen der Europäischen Kommission /EC 00/ nach Rundung auf Basis von Berechnungen /THI 00/, teilweise gedeckelt durch Spalte 13 oder Spalte 5 für Oberflächenkontamination
- Spalte 13 geregelte Freigabe von Gebäuden zum Abriss in Bq/cm² ist überwiegend /THI 00/ maßgeblich
- Spalte 14 geregelte Freigabe von Metallschrott zur Rezyklierung in Bq/g gelten nach wie vor die empfohlenen Werte der Strahlenschutzkommission /SSK 98/

Randbedingungen

In die Berechnung der Freigabewerte der StrlSchV sind eine Vielzahl von Berechnungsgrundlagen eingeflossen. Eine Bestandsaufnahme der Freigabepraxis und ein Abgleich mit den in der StrlSchV /SSV 17/ zugrundeliegenden radiologischen Modellen, Szenarien, ihrer Expositionspfade, Parameter und Randbedingungen wurde in dem bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben „Freigabekonzepte einer neuen Strahlenschutzverordnung nach Euratom-Grundnormen 2013 in der Anwendung“ der GRS zusammen mit dem Öko-Institut ausführlich durchgeführt /GRS 20/. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die folgenden Randbedingungen für die verschiedenen Freigabeoptionen identifiziert und bewertet:

- Materialart
- Freigabeoption
- Massenbereich
- Dosiskriterium
- Altersgruppen
- Radionuklide
- Ausschöpfungsgrad
- Vermischung
- Freigabekriterien

Es gibt in der StrlSchV /SSV 21/ insgesamt zehn Freigabeoptionen (uneingeschränkte Freigabe Spalte 3, spezifische Freigabe Spalten 6 bis 14) und fünf Freigabemodelle. Abhängig z. B. von Vorgaben aus dem Regelwerk oder der Praxis, werden innerhalb der Freigabeoptionen – und den ihnen zugrunde liegenden Freigabemodellen – verschiedene Szenarien entwickelt und mithilfe von szenarienspezifischen Annahmen konkrete Modellparameter für deren Berechnungsvorschriften festgelegt. Innerhalb der einzelnen Freigabemodelle gibt es verschiedene Szenarien mit einer Vielzahl an Modellparametern und -parameterwerten (siehe Abb. 3.2). Je nach Abgrenzung des Begriffes „Szenario“ innerhalb der Freigabemodelle liegen mehr als 70 Szenarien zugrunde, die im Rahmen der Berechnung der Freigabewerte aufgestellt wurden und die einzelnen Expositionspfade möglichst abdeckend berücksichtigen. Die grundsätzliche Überprüfung der Szenarien hinsichtlich ihrer Aktualität bzw. Plausibilität war nicht Teil dieses Forschungsvorhabens. In einigen Fällen wurde jedoch eine Szenarienbetrachtung infolge sich verändernder Randbedingungen vorgenommen z. B. das Klärschlammszenario.

Die Modellparameter sind dabei in der Regel von den Berechnungsvorschriften der zu berücksichtigenden Expositionspfade abhängig. Die Werte der Modellparameter können sich innerhalb und zwischen einzelnen Berechnungsmodellen entsprechend der bestehenden Randbedingungen und gewählten Annahmen deutlich unterscheiden.

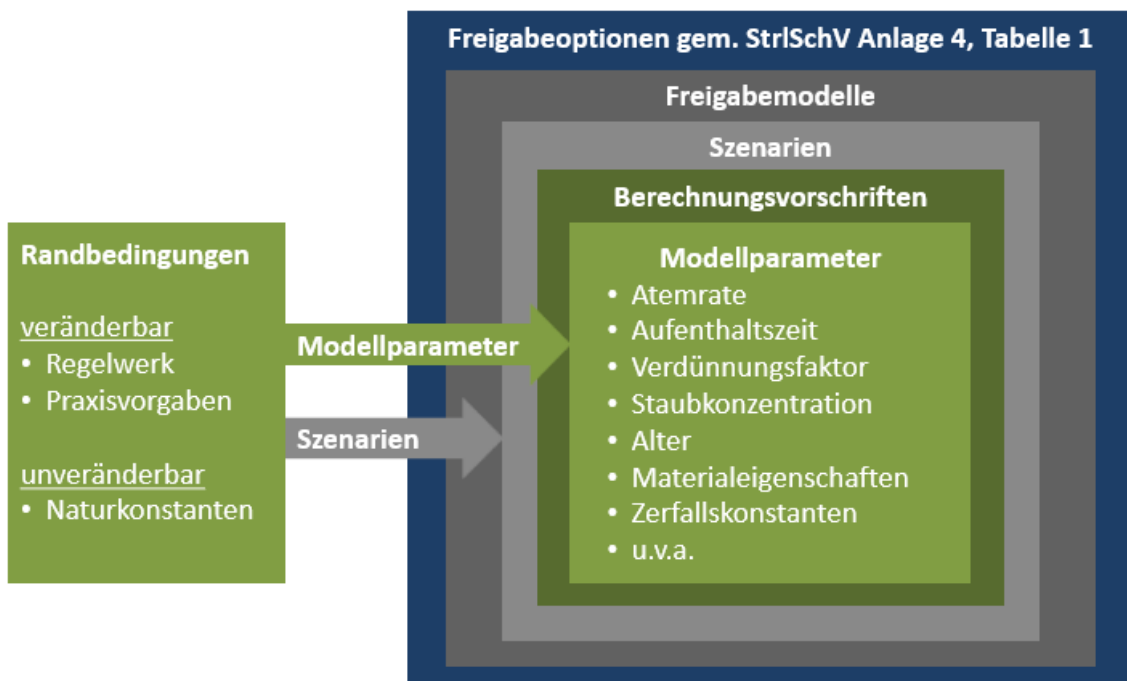


Abb. 3.2 Zusammenhang Randbedingungen, Szenarien, Berechnungsvorschriften und Modellparameter

3.1.2 Rechtlicher Rahmen – Abfallrecht mit Bezug auf die Freigabe

Nach der Freigabe geht der freigegebene Stoff in den konventionellen Stoffkreislauf über und unterliegt dort den Gesetzen und Verordnungen für konventionelle Abfälle wie z. B. dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) /KrWG 17/. Daher werden in den Berechnungsvorschriften, die der Bestimmung der Freigabewerte zugrunde liegen, Annahmen und Randbedingungen aus den Verordnungen des konventionellen Abfallrechts berücksichtigt. Beispielsweise wird in der StriSchV (2001 und 2018) auf die Deponieverordnung /DepV 17/ bezüglich der „Freigabe zur Deponierung“ verwiesen. Hierin wird die Deponieklasse DK 0 (Randbedingungen des Expositionsszenarios) zur Deponierung freigegebener Abfälle ausgeschlossen. Der Ausschluss der Deponieklasse DK 0 führt zu konkreten Annahmen bezüglich der Anforderungen an höhere Deponieklassen z. B. hinsichtlich der Größe und dem Aufbau entsprechender Deponien, und den damit verbundenen Zeiten bis zum Versagen von Abdichtungen.

Auf europäischer Rechtsebene erlassene Richtlinien im Bereich der Abfallwirtschaft sind in der Regel in das nationale Regelwerk zu überführen. Die Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG /EUR 18a/ definiert wesentliche abfallbezogene Begrifflichkeiten und legt u. a. eine fünfstufige Abfallhierarchie fest. Das Europäische Parlament hat zudem im Jahr 2018 umfangreiche Änderungen an den Richtlinien zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen in der EU beschlossen (Richtlinie 2018/851) /EUR 18b/. Ausgehend vom im Dezember 2015 veröffentlichten europäischen Kreislaufwirtschaftspaket erfolgte die Überarbeitung des Legislativvorschlags für Abfälle, mit dem die folgenden vier zentrale Rechtsakte des Europäischen Abfallrechts geändert wurden:

- die Abfallrahmenrichtlinie
- die Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle
- die Richtlinie über Abfalldeponien
- die Richtlinien über Altfahrzeuge, über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und über Elektro- und Elektronik-Altgeräte

Die Änderungen der Abfallrahmenrichtlinie umfassen im Kern erweiterte Anforderungen zur Förderung der Vermeidung von Abfällen, die Festlegung von Zielen für das Recycling und die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Siedlungsabfällen unter Zugrundelegung einer neuen Output-basierten Berechnungsmethode. So müssen die Mitgliedstaaten Papier, Metall, Kunststoffe und Glas getrennt sammeln (ab 2025 auch Alttextilien).

Zudem werden die Anforderungen bzgl. Bauabfällen erweitert. Die Mitgliedstaaten müssen Maßnahmen treffen, um die Wiederverwendung von Produkten zu stärken und Systeme schaffen, die Reparatur und Wiederverwendung fördern.

Für die „spezifische Freigabe von Stoffen zur Beseitigung“ auf Deponien sind beispielsweise die folgenden Verordnungen des konventionellen Abfallrechtes von wesentlicher Bedeutung:

- Deponieverordnung (DepV), zuletzt durch Art. 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert /DepV 17/
- Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV) /AbwV 22/
- Trinkwasserverordnung (TrinkwV) /TkWV 21/
- Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV) /AbfK 20/

In Abb. 3.3 sind am Beispiel der Freigabeoption „spezifische Freigabe zur Beseitigung auf einer Deponie“ die Expositionsszenarien dargestellt sowie die damit verbundenen Verordnungen, die einen Einfluss auf die zugrunde gelegten Parameter haben können.

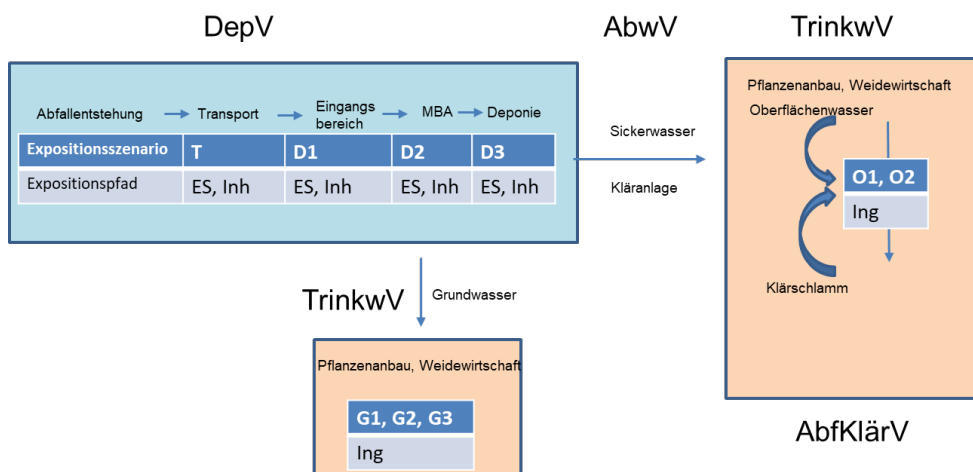


Abb. 3.3 Konventionelles Regelwerk, welches bei der „Freigabe zur Beseitigung auf einer Deponie“ zu berücksichtigen ist

Die für die Freigabe ggf. relevanten Gesetze und Verordnungen des konventionellen Abfallrechts, die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens näher untersucht wurden, werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst und mit Blick auf dadurch möglicherweise veränderte Randbedingungen für die Freigabe untersucht. Die Tab. 3.1 gibt einen Überblick über die betrachteten Gesetze und Verordnungen.

Der Einfluss von Länderrecht auf die Randbedingungen konnte nicht identifiziert werden.

Tab. 3.1 Überblick über das deutsche Regelwerk, welches mit Bezug auf einen möglichen Einfluss auf die Randbedingungen aktueller Freigabemodelle im Rahmen des Forschungsvorhaben untersucht wurde

Kurztitel	Langtitel	in Kraft seit/ Änderung(en)
Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) Kap. 3.1.2.1	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen /KrWG 17/	01.06.2012/ 27.07.2021
Deponieverordnung (DepV) Kap. 3.1.2.2	Verordnung über Deponien und Langzeitlager /DepV 17/	16.07.2009/ 09.07.2021
Trinkwasserverordnung (TrinkwV) Kap. 3.1.2.3	Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch /TkwV 21/	10.03.2016/ 22.09.2021
EMAS-Privilegierungs-Verordnung (EMASPrivilegV) Kap. 3.1.2.4	Verordnung über immissionsschutz- und abfallrechtliche Überwachungserleichterungen für nach der Verordnung (EG) Nr. 761/2001 registrierte Standorte und Organisationen /EMAS 16/	29.06.2002/ 06.07.2021
Entsorgungsfachbetriebeverordnung (EfbV) Kap. 3.1.2.5	Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe, technische Überwachungsorganisationen und Entsorgungsgemeinschaften /EfbV 17/	01.06.2017/ 08.12.2022
Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) Kap. 3.1.2.6	Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen /GeAV 17/	18.04.2017/ 28.04.2022
Gewinnungsabfallverordnung (GewinnungsAbfV) Kap. 3.1.2.7	Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/21/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006 über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG /GAfV 12/	16.07.2009/ 24.02.2012
Abwasserverordnung (AbwV) Kap. 3.1.2.8	Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer /AbwV 22/	01.04.1997/ 20.01.2022

Kurztitel	Langtitel	in Kraft seit/ Änderung(en)
Klärschlammverordnung (AbfKlärV) Kap. 3.1.2.9	Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost /AbfKlärV 20/	03.10.2017/ 19.06.2020
Mantelverordnung für Ersatzbaustoffe und Bodenschutz (MantelV) Kap. 3.1.2.10	Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung /MantelV 21/	09.07.2021
AVV Tätigkeiten Kap. 3.1.2.11	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten /AVV 20/	08.06.2020
Verordnungen zum Thema Metallschrott Kap.3.1.2.12	Verordnung (EU) Nr. 333/2011 des Rates vom 31. März 2011 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Schrott gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind /EU 11/	31.03.2011
Verordnungen zum Thema Öle und ölhaltige Flüssigkeiten, organische Lösungsmittel, Kühlfüssigkeiten (AltöIV) Kap. 3.1.2.13	Altölverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 16. April 2002 (BGBl. I S. 1368), die zuletzt durch Art. 1 der Verordnung vom 5. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2091) geändert worden ist /AltöIV 20/	16.04.2002/ 05.10.2020
Wasserhaushaltsgesetz (WHG) Kap. 3.1.2.14	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts /WHG 23/	31.07.2009/ 04.01.2023

3.1.2.1 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG)

Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen. Die Vorschriften dieses Gesetzes gelten insbesondere für die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung sowie für sonstige Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung.

Die Maßnahmen von der Vermeidung bis zur Beseitigung werden im § 6 des KrWG in folgender Rangfolge angegeben:

- Vermeidung
- Vorbereitung zur Wiederverwendung
- Recycling
- sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung
- Beseitigung

Im § 14 KrWG werden die Vorgaben für das Recycling verstärkt. Bis 2020 soll für Siedlungsabfälle insgesamt eine Recyclingquote von mindestens 65 % sowie für Bau- und Abbruchabfälle eine stoffliche Verwertungsquote von mindestens 70 % erreicht werden. Das Recycling wird durch umfassende Getrennthaltungspflichten gefördert und gesichert.

Das KrWG des Bundes wird ergänzt und konkretisiert durch die Abfallgesetze der Länder. Aufgrund der konkurrierenden Gesetzgebungszuständigkeit des Bundes für die Abfallwirtschaft (Art. 74 Abs. 1 Nr. 24 GG) sind landesrechtliche Vorschriften jedoch nur in den Bereichen möglich, die nicht schon durch Bundesrecht erfasst sind. Die Landesabfallgesetze betreffen daher im Wesentlichen Fragen des Vollzugs, z. B. die Bestimmung der entsorgungspflichtigen Körperschaften und der im Abfallbereich zuständigen Behörden. Dieser Umstand kann dazu führen, dass die in den Freigabemodellen angenommenen Deponiekapazitäten im Einzelfall deutlich von den angenommenen Deponiekapazitäten abweichen. Zudem können die erhöhten Recyclingquoten zu Änderungen in den bisher angenommenen Vermischungsverhältnissen führen. So wird z. B. gefordert, dass das Recycling und die sonstige stoffliche Verwertung von nicht gefährlichen Bau-

und Abbruchabfällen spätestens ab dem 1. Januar 2020 mindestens 70 Gewichtsprozent betragen.

3.1.2.2 Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung)

Vorgänger der Deponieverordnung (DepV) /DepV 17/ war die Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen (Abfallablagerungsverordnung). Die Deponierung von unbehandelten Abfällen aus Haushalten und Gewerbe ist seit dem 1. Juni 2005 verboten.

Am 1. Februar 2007 wurde mit dem Inkrafttreten der Verordnung zur Umsetzung der Ratsentscheidung vom 19. Dezember 2002 die Abfallablagerungsverordnung hinsichtlich der Annahmekriterien für Abfälle geändert. Das Verbot der Ablagerung unbehandelter Abfälle blieb erhalten.

Am 16. Juli 2009 trat die Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts in Kraft. Mit der Verordnung werden die Anforderungen der Deponieverordnung, der Abfallablagerungsverordnung sowie der Deponieverwertungsverordnung in einem Regelwerk zusammengeführt. Die Regelungen der Abfallablagerungsverordnung wurden dabei inhaltsgleich übernommen.

Zum Zeitpunkt des Neuerlasses wurden die Abfallablagerungsverordnung sowie die Deponieverwertungsverordnung aufgehoben. Gleiches gilt für die Technische Anleitung (TA) Siedlungsabfall, die TA Abfall sowie die allgemeine Abfallverwaltungsvorschrift über Anforderungen zum Schutz des Grundwassers bei der Lagerung und Ablagerung von Abfällen. Die Verordnung ist am 16. Juli 2009 außer Kraft getreten.

Die DepV /DepV 17/ trat am 27. April 2009 in Kraft und wurde zuletzt durch Art. 3 der Verordnung vom 9. Juli 2021 geändert. Entsprechend § 1 der DepV werden die folgenden Anwendungsbereiche aufgeführt:

1. Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien
2. Behandlung von Abfällen zum Zwecke der Ablagerung auf Deponien und des Einsatzes als Deponieersatzbaustoff
3. Ablagerung von Abfällen auf Deponien
4. Einsatz von Abfällen als, und zur Herstellung von, Deponieersatzbaustoff

5. Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Langzeitlagern
6. Lagerung von Abfällen in Langzeitlagern

In § 3 der DepV werden die Details zu Errichtung festgelegt. In den Anhängen 1 bis 4 der DepV sind die Anforderungen an die geologischen Barrieren und der Basis- und Oberflächenabdichtungssysteme aufgeführt. Die dort aufgeführten Werte gehen als Parameterwerte in die Modelle zur Grund- und Oberflächenwassermodellierung bei der „spezifischen Freigabe von Stoffen zur Beseitigung“ ein. Änderungen in den Anhängen der DepV hätten unmittelbare Auswirkungen auf die Freigabewerte, die das restriktivste Szenario in der Sekundäringestion über Grund- oder Oberflächenwasser haben. Durch die inhaltsgleiche Übernahme wurden die für die Modellierung wesentlichen Parameter ebenfalls übernommen. Daher haben die Berechnungsvorschriften der Freigabe zur Beseitigung auf Deponien nach wie vor Bestand.

3.1.2.3 Trinkwasserverordnung (TrinkwV)

Die Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung, TrinkwV) vom 10. März 2016 wurde zuletzt durch Art. 1 der Verordnung vom 22. September 2021 geändert /TkWV 21/.

Am 22. Oktober 2013 wurde die Richtlinie 2013/51/Euratom zur Festlegung von Anforderungen an den Schutz der Gesundheit der Bevölkerung hinsichtlich radioaktiver Stoffe in Wasser für den menschlichen Gebrauch erlassen /EUR 14/. Die nationale Umsetzung erfolgte im Rahmen der geänderten Trinkwasserverordnung (TrinkwV). Mit Inkrafttreten dieser Änderungsverordnung am 26. November 2015 sind Inhaber von Wasserversorgungsanlagen (WVA) in Abhängigkeit Ihrer Versorgungsgröße verpflichtet, Erstuntersuchungen des Trinkwassers auf Radionuklide natürlichen Ursprungs durchzuführen (TrinkwV, Anlage 3a).

Ein Einfluss der Verordnung auf die Randbedingungen der Freigabe konnte nicht identifiziert werden.

3.1.2.4 Verordnung über immissionsschutz- und abfallrechtliche Überwachungserleichterungen für nach der Verordnung (EG) Nr. 761/2001 registrierte Standorte und Organisationen (EMASPrivilegV)

Im Sinne dieser Verordnung ist eine EMAS-Anlage eine Anlage, die Bestandteil einer Organisation oder eines Standorts ist, die oder der nach den Art. 13 bis 15 in Verbindung mit Art. 2, Nr. 22 der Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001, sowie der Beschlüsse der Kommission 2001/681/EG und 2006/193/EG (ABl. L 342 vom 22. Dezember 2009, S. 1) registriert ist.

Die Verordnung ist als Art. 1 Bestandteil der „Verordnung zum Erlass und zur Änderung immissionsschutzrechtlicher und abfallrechtlicher Verordnungen“ vom 24. Juni 2002 und am 29. Juni 2002 in Kraft getreten. Es wird geregelt, wie andere Rechtsverordnungen an die neue EG-Öko-Audit-Verordnung (EMAS III) angepasst werden. Die EMAS-Privilegierungs-Verordnung (EMASPrivilegV) /EMAS 16/ betrifft Standorte und Organisationen, die nach der Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 registriert sind, und beinhaltet immissionsschutz-, abfall- und wasserrechtliche Überwachungserleichterungen. Zuständig sind die jeweiligen Genehmigungs- und Überwachungsbehörden der Unternehmen oder Organisationen, d. h. überwiegend die Kreisverwaltungsbehörden (Landratsamt oder kreisfreie Stadt), teilweise auch die Regierungen. Die einzelnen Zuständigkeiten sind im BImSchG, KrWG und WHG enthalten.

Ein Einfluss der Verordnung auf die Randbedingungen der Freigabe konnte nicht identifiziert werden.

3.1.2.5 Entsorgungsfachbetriebeverordnung (EfbV)

Die Entsorgungsfachbetriebeverordnung (EfbV) vom 2. Dezember 2016, die zuletzt durch Art. 2 des Gesetzes vom 8. Dezember 2022 geändert worden ist /EfbV 22/, regelt die Anforderungen an Entsorgungsfachbetriebe nach § 56 Abs. 2 KrWG sowie die Überwachung und Zertifizierung von Entsorgungsfachbetrieben durch technische Überwachungsorganisationen nach § 56 Abs. 5 KrWG und durch Entsorgergemeinschaften nach § 56 Abs. 6 KrWG.

Die Möglichkeit der Zertifizierung zum Entsorgungsfachbetrieb, die mit der Regelung des § 56 KrWG i.V.m. der Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe (EfbV) vom 2. Dezember 2016 fortgeschrieben wurde, verfolgt mehrere Zielsetzungen. Zum einen soll in der Entsorgungswirtschaft ein hohes Qualitätsniveau durch privatwirtschaftliche Verantwortung sichergestellt werden, zum anderen ist mit der Zertifizierung für den einzelnen Entsorgungsbetrieb eine Deregulierung verbunden, z. B. in Form des Verzichts auf eine Erlaubnis gemäß § 54 KrWG oder der Nutzung des privilegierten Nachweisverfahrens.

Darüber hinausgehende spezifische Anforderungen, die an Betriebe, die Abfälle sammeln, befördern, handeln und makeln, gestellt werden, sind der Vollzugshilfe „Anzeige- und Erlaubnisverfahren nach §§ 53 und 54 KrWG und AbfAEV²“ (Stand: 29. Januar 2014) zu entnehmen /BMU 14/.

Ein Einfluss der Verordnung auf die Randbedingungen der Freigabe konnte nicht identifiziert werden.

3.1.2.6 Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)

Die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) /GeAV 17/ regelt die Bewirtschaftung, insbesondere die Erfassung, die Vorbehandlung, die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die sonstige Verwertung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen. Die Verordnung gilt für Erzeuger und Besitzer der genannten Abfälle und für Betreiber von Vorbehandlungs- und Aufbereitungsanlagen.

Die novellierte GewAbfV ist bereits zum 1. August 2017 in Kraft getreten. Mit den Änderungen bezweckt der Gesetzgeber u. a. die getrennte Erfassung von stofflich verwertbaren Abfällen, um das Recycling zu stärken. Dies führt für Abfallerzeuger zu erweiterten Getrenntsammlungs- und Dokumentationspflichten. Im Bereich der gewerblichen Siedlungsabfälle müssen nunmehr neben Papier, Pappen, Kartonagen, Kunststoffen, Glas und Metallen auch Holz, Textilien und sämtliche Bioabfälle getrennt erfasst werden. Dies ist entsprechend zu dokumentieren und auf Verlangen der zuständigen Behörde vorzulegen. Die Dokumentation ist durch Lagepläne, Lichtbilder, Praxisbelege, wie Liefer- oder Wiegescheine oder ähnliche Dokumente vorzunehmen.

² Verordnung über das Anzeige- und Erlaubnisverfahren für Sammler, Beförderer, Händler und Makler von Abfällen (Anzeige und Erlaubnisverordnung - AbfAEV)

Zudem hat der Abfallerzeuger eine Erklärung des Abnehmers der Abfälle vorzuhalten, welche die Zuführung der getrennt gesammelten Abfälle zur stofflichen Verwertung belegt. Für den Fall, dass dem Abfallerzeuger eine getrennte Erfassung technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist, wird in Ausnahmefällen erlaubt, Abfälle gemischt zu sammeln. Dieses Abfallgemisch ist in jedem Fall einer Gewerbeabfall-Vorbehandlungsanlage zuzuführen.

Auch für Bau- und Abbruchabfälle definiert die Verordnung erweiterte Getrenntsammlungs- und Dokumentationspflichten.

Ein direkter Einfluss der Verordnung auf die Randbedingungen der Freigabe konnte nicht identifiziert werden. Eine zunehmende Recyclingquote kann u. U. jedoch Einfluss auf die Vermischung von Abfällen haben.

3.1.2.7 Gewinnungsabfallverordnung (GewinnungsAbfV)

Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/21/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2009 über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG (Gewinnungsabfallverordnung, GewinnungsAbfV) vom 16. Juli 2009, die zuletzt durch Art. 5 Abs. 29 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 geändert worden ist /GAfV 12/.

Die Verordnung gilt für die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung und Nachsorge einer Beseitigungsanlage für Gewinnungsabfälle in Betrieben, die nicht der Bergaufsicht unterstehen, die Lagerung und Ablagerung von Gewinnungsabfällen zu Beseitigungszwecken sowie die Verwertung von Gewinnungsabfällen zu Bau- und Sanierungszwecken im Abgrabungsbetrieb.

In § 1 Abs. 1 und 2 der Verordnung ist deren Anwendungsbereich näher bestimmt; Abs. 3 enthält die Ausnahmen. Der § 10 der GewinnungsAbfV regelt die Übergangsvorschriften für Beseitigungsanlagen für Gewinnungsabfälle, die am 1. Mai 2008 zugelassen oder bis dahin bereits in Betrieb waren. Der Erzeuger von Gewinnungsabfällen hat einen Abfallbewirtschaftungsplan (siehe Anhang der Verordnung) aufzustellen, der alle fünf Jahre überprüft und bei betrieblichen Änderungen angepasst wird. Für aus sicherheitstechnischer oder umweltfachlicher Sicht kritische Abfallentsorgungsanlagen, die der Kategorie A zugeordnet werden, sind ein Sicherheitsmanagementsystem und Notfallpläne etc. erforderlich.

Ein Einfluss der Verordnung auf die Randbedingungen der Freigabe konnte nicht identifiziert werden.

3.1.2.8 Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV)

Die Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004, die zuletzt durch Art. 1 der Verordnung vom 20. Januar 2022 geändert worden ist, verfügt über 57 Anhänge für verschiedene Bereiche, in denen Abwässer erzeugt werden.

Vor diesem Hintergrund besteht die theoretische Möglichkeit, dass trotz der Einhaltung der Freigabewerte radioaktiver Nuklide, konservative Grenzwerte bestimmter Elemente überschritten werden könnten. Eine genauere Betrachtung dieser Möglichkeit ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens infolge der Komplexität der Ermittlung der Eingabeparameter nicht möglich, wird aber Vollständigkeitshalber hier erwähnt.

Ein Einfluss der Verordnung auf die Randbedingungen der Freigabe konnte nicht identifiziert werden.

3.1.2.9 Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – Abf-KlärV)

Die Klärschlammverordnung vom 3. Oktober 2017 wurde zuletzt durch Art. 137 der Verordnung vom 19. Juni 2020 geändert und regelt insbesondere das Auf- oder Einbringen von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost zur Verwertung als Stoff entsprechend des Düngegesetzes /DÜN 22/ vom 9. Januar 2009, welches zuletzt durch Art. 2 des Gesetzes vom 20. Dezember 2022 geändert worden ist /AbfKlärV 20/.

Klärschlamm kann grundsätzlich in der Landwirtschaft, dem Landschaftsbau, in der Forstwirtschaft sowie im Bereich der Haus-, Nutz- und Kleingärten genutzt werden. Die Nutzung wird jedoch u. a. in § 15 umfangreich eingeschränkt und geregelt. Kläranlagen mit über 100.000 bzw. 50.000 Einwohnerwerten dürfen z. B. nur noch bis 2029 bzw. 2032 bodenbezogenen Klärschlamm verwerten /UBA 18/.

Für die Freigabewerte der Spalte 8 und 10 „Freigabe zur Deponierung“ wird u. a. das Szenario O2 „Strahlenexposition der Bevölkerung durch Klärschlammverwendung“ betrachtet. Bei der Berechnung der Dosis wird für die Ingestion der Bevölkerung neben

dem Verzehr von pflanzlichen Lebensmittelgruppen (Kartoffeln und Getreide) auch der Verzehr von Milch und Fleisch berücksichtigt. Für die Berechnung der Dosis durch die Ingestion von Milch und Fleisch wird angenommen, dass diese Tiere mit Futterpflanzen gefüttert werden, die auf Anbauflächen geerntet werden, auf denen Klärschlamm aufgebracht wurde.

Bei Berücksichtigung des § 15 der Klärschlammverordnung sowie den weiteren zukünftigen Anforderungen/Einschränkungen an die Aufbringung von Klärschlamm, kann das Szenario O2 zukünftig ggf. entfallen bzw. eingeschränkt werden. Für die Radionuklide Sr-35, Sr-90, Cd-109, Te-125m, Te-127m, Tl-204 und Pb-210, für die aktuell das Szenario O2 dosisbestimmend ist, könnten dann ggf. höhere Freigabewerte zugelassen werden.

3.1.2.10 Mantelverordnung für Ersatzbaustoffe und Bodenschutz (MantelV) zur Verwertung von Bauschutt

Am 16. Juli 2021 wurde die Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung des Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung im Bundesgesetzblatt veröffentlicht. Sie tritt am 1. August 2023 in Kraft und beinhaltet eine erweiterte Übergangsfrist bis zum 1. August 2031. Im Herbst 2025 ist eine Evaluierung des Verordnungspakets geplant.

Die Mantelverordnung /MantelV 21/ besteht aus mehreren Teilen. Sie enthält als Kernstück die Ersatzbaustoffverordnung und die Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Im Zusammenhang damit werden auch die Deponieverordnung und die Gewerbeabfallverordnung geändert.

Die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) enthält erstmalig bundeseinheitliche und rechtsverbindliche Anforderungen an die Herstellung und den Einbau mineralischer Ersatzbaustoffe. Darunter fallen auch Recycling-Baustoffe aus Bau- und Abbruchabfällen, Bodenaushub, Baggertgut, Gleisschotter sowie Schlacken aus der Metallerzeugung und Aschen aus thermischen Prozessen. Sie gibt zum einen für die jeweiligen Ersatzbaustoffe beziehungsweise für deren Materialklassen Grenzwerte in Bezug auf bestimmte Schadstoffe vor, deren Einhaltung durch den Hersteller im Rahmen einer Güteüberwachung zu gewährleisten ist. Zum anderen sieht sie an diese Materialklassen angepasste

Einbauweisen vor, die vom Verwender beim Einbau in das technische Bauwerk entsprechend den örtlichen Gegebenheiten zu beachten sind.

Mineralische Ersatzbaustoffe (MEB), zu denen z. B. auch MVA-Fertigschlacken zählen können, werden z. B. anhand diverser Parameter in Klassen eingestuft, welche verschiedenen Auflagen unterliegen. So wird statt einer Förderung der stofflichen Wiederverwertung gemäß § 6 KrWG mit deutlichen Einschränkungen für den Einsatz von MEB gerechnet.

Mit der Neufassung der BBodSchV soll die seit dem Jahr 1999 im Wesentlichen unveränderte Verordnung an den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse und die im Vollzug gewonnenen Erfahrungen angepasst werden. Darüber hinaus wird ihr Regelungsbereich auf das Auf- oder Einbringen von Materialien unterhalb oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht ausgedehnt. Damit werden die Anforderungen an die Verwertung von Materialien in Verfüllungen von Abgrabungen und Tagebauen erstmalig bundeseinheitlich und rechtsverbindlich festgelegt. Eine Ausnahme von der bundeseinheitlichen Regelung jedoch sieht § 8 Abs. 8 der BBodSchV durch die sog. Länderöffnungsklausel für die Verfüllung vor. Danach können die Bundesländer zukünftig bzgl. Materialien zur Verfüllung abweichende Regelungen treffen.

Die Deponieverordnung (DepV) wird dahingehend ergänzt, dass bestimmte nach EBV güteüberwachte Ersatzbaustoffe ohne zusätzliche Untersuchungen deponiert werden dürfen. Die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) enthält lediglich eine Folgeänderung aufgrund der neu eingeführten Ersatzbaustoffverordnung. Die Vorgaben und Verpflichtungen der GewAbfV gelten damit ebenso für Ersatzbaustoffe als auch für Gemische aus Ersatzbaustoffen und natürlichen Baustoffen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann der konkrete Einfluss der geplanten Änderungen durch die Mantelverordnung auf die Freigabe nicht abgeschätzt werden. Zukünftig steigende Recyclingquoten können aber mittelfristig die bisher angenommenen Vermischungsverhältnisse verändern.

3.1.2.11 AVV Tätigkeiten

Die überarbeitete Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) wurde am 16. Juni 2020 im Bundesanzeiger veröffentlicht und ist

seit dem 1. September 2020 in Kraft /AVV 20/. Es gelten jedoch Übergangsregelung gemäß § 193 Abs. 1 StrlSchV.

Die AVV Tätigkeiten ist explizit nicht anzuwenden auf Expositionsszenarien, mit denen Freigabewerte berechnet werden. Jedoch ist die Berechnung der Strahlenexposition durch Sekundäringestion nach Modellierung des Wasser- und Luftpfades für verschiedene Freigabepfade, z. B. Beseitigung durch Deponierung oder durch die Freigabe von Bodenflächen, bisher an die Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV (2001) /SSV 17/ angelehnt /THI 04/. Folgende Veränderungen sind durch die neue AVV Tätigkeiten bei künftigen Berechnungen daher ggf. zu berücksichtigen:

- Bei Ableitungen mit Luft, Anwendung des Lagrange-Partikel-Modells in Verbindung mit einer langjährigen Wetterstatistik oder der Zeitreihe eines repräsentativen Jahres (bisher Gauß-Fahnen-Modell)
- Nur diejenigen Expositionspfade, die tatsächlich zur Exposition im betrachteten Zeitraum beitrugen (tatsächliche Nutzung, nicht Nutzungsmöglichkeiten)
- Bevorzugt nur die Lebensmittelgruppen, die in der Umgebung des Standortes im betrachteten Zeitraum tatsächlich erzeugt wurden. Falls diese Informationen nicht mit vertretbarem Aufwand beschafft werden können, ersatzweise generische Daten wie bei der prospektiven Berechnung
- Realitätsnähere Lebensgewohnheiten der repräsentativen Person: Bei der Berücksichtigung des 95. Perzentils der Verzehrmenen ist nunmehr nur die Lebensmittelgruppe, die bei mittleren jährlichen Verzehrmenen zur höchsten Ingestionsdosis (effektive Folgedosis) führt, mit dem entsprechenden Faktor zu multiplizieren. Für alle übrigen, nicht dosisdominierenden Lebensmittelgruppen sind die mittleren jährlichen Verzehrmenen anzusetzen.
- Zusätzlicher generischer Gewässertyp „stehende Gewässer“
- Berechnung der Ingestionsdosis durch Muttermilch mit Hilfe von Dosiskoeffizienten.

Die Änderung in der AVV Tätigkeiten bezüglich der Anwendung des Lagrange-Partikel-Modells in Verbindung mit einer langjährigen Wetterstatistik auf die Luftausbreitung wirkt sich unmittelbar auf den Freigabepfad zur Beseitigung in der Abfallverbrennungsanlage aus. Der Einfluss auf die Freigabewerte der Spalten 9 und 11 wird im Weiteren geprüft.

Die Anforderung aus der AVV Tätigkeiten, nur die Lebensmittelgruppen, die in der Umgebung des Standortes im betrachteten Zeitraum tatsächlich erzeugt wurden, bei den entsprechenden Expositionsszenarien zur Ingestion zu berücksichtigen, muss für die einzelnen Freigabepfade diskutiert werden. Dies würde der „Ortsunabhängigkeit“ der Freigabewerte widersprechen und eher bei Freigabe im Einzelfall zur Anwendung kommen.

Die Einführung von Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion von Radionukliden durch die Mutter für 80 Nuklide bei der Berechnung der Expositionsdosis durch Muttermilch hat Auswirkungen auf alle Ingestionsszenarien der Freigabe. Zuerst sollte allerdings geprüft werden, ob die Änderungen tatsächlich alle Nuklide betreffen und ob die Transferfaktoren zu größeren oder kleineren Werten geändert wurden.

3.1.2.12 Verordnungen zum Thema Metallschrott

Die EU hat in einer Reihe von Verordnungen festgelegt, unter welchen Randbedingungen frühere Abfälle (in der Regel nach Vorbehandlung) nicht mehr als Abfall einzustufen sind und damit nicht mehr dem Abfallrecht unterliegen. Eine der ersten Verordnungen war die EU-Verordnung EU Nr. 333/2011 vom 31. März 2011 bzgl. Eisen-, Stahl- und Aluminiumschrott /EU 11/. Die Kriterien sind allerdings sehr streng, so dass viele Metallschrotte sie nicht einhalten können.

Bei den Anforderungen wird jeweils zwischen den ursprünglichen Abfällen, die einer Verwertung zugeführt werden, und den dann angewandten Behandlungsverfahren sowie den daraus resultierenden Schrotten, die keine Abfälle mehr sein sollen, unterschieden. Die resultierenden Schrotte müssen direkt verwendbar, und alle notwendigen mechanischen Behandlungsschritte abgeschlossen sein. Sie dürfen kein sichtbares Öl oder ähnliche auslaufende Verunreinigungen, keine unter Druck stehenden Behälter und kein radioaktives Material enthalten.

Im zu betrachtenden Szenario S3 des Freigabepfades „Beseitigung durch Verbrennung“ wird angenommen, dass Eisenmetalle, die vor oder beim Verbrennungsprozess in der MVA ausgesondert werden, weitgehend rückgewonnen werden und zum Einschmelzen gelangen. In der Stahlschrottsortenliste wird an die Kategorie „Geschredderter Schrott aus der Müllverbrennung“ die Anforderung eines Eisengehalts $> 92 \%$ gestellt. Aufgrund der niedrigen Qualität ist die Herstellung von Produkten erst nach weiterer Aufarbeitung

möglich. Im Szenario S3 wird daher angenommen, dass der Schrott der MVA mit anderem Metall vermischt wird.

Durch die Verordnung ergeben sich keine Änderungen der Randbedingungen, da nach wie vor eine Reinheit nach Verarbeitung von 98 % erreicht werden muss. Jedoch könnten sich aufgrund der Praxis Änderungen ergeben, wenn höhere Ausgangsreinheiten von > 92 % erzielt werden und somit eine geringere Vermischung auftreten könnte. Die Praxis konnte im Forschungsvorhaben nicht geklärt werden, sollte aber beobachtet werden.

3.1.2.13 Verordnungen zum Thema Öle und ölhaltige Flüssigkeiten, organische Lösungsmittel, Kühlflüssigkeiten

Am 15. Oktober 2020 ist die Novelle der Altölverordnung in Kraft getreten /AltöIV 20/. Die Verordnung gilt für die stoffliche und energetische Verwertung sowie für die Beseitigung von Altöl. Der zentrale Regelungsinhalt der Altölverordnungsnovelle ist in § 2 mit dem Vorrang der Aufbereitung gegeben. Bei der Behandlung von Altöl soll die stoffliche Verwertung im Bereich der Altölbewirtschaftung verbessert werden. Die Aufbereitung von Altöl oder alternative andere Recyclingverfahren, die zum Schutz von Mensch und Umwelt zu einem gleichwertigen oder besseren Ergebnis als die Aufbereitung führen, sollen vorrangig vor sonstigen Verwertungsverfahren verwendet werden.

Gleichzeitig wurden weitere redaktionelle Änderungen vorgenommen, die sich für die Anpassung der Altölverordnung an den aktuellen Stand der Technik (Aktualisierung der anzuwendenden DIN-Normen) und zur Verbesserung der praktischen Anwendung der Altölverordnung für Aufbereiter, Sammelstellen und Verbraucher als notwendig erwiesen haben.

In Bezug auf die Freigabe sind keine Änderungen zu erwarten, da Öle und ölhaltige Flüssigkeiten, organische Lösungsmittel und Kühlflüssigkeiten laut Anlage 8 StriSchV nur uneingeschränkt freigegeben werden.

3.1.2.14 Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts

Der Zweck des Wasserhaushaltsgesetzes /WHG 23/ ist es, durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares

Gut zu schützen. Insbesondere für oberirdische Gewässer gilt das Ziel, so weit wie möglich natürliche Abflussverhältnisse zu gewährleisten.

Bei der Herleitung der Freigabewerte für die Freigabe zur Beseitigung /THI 04/ wurde für den Parameterwert des Abflusses des Kläranlagen-Vorfluters 3 m³/s angenommen. Im Lichte der rechtlichen Rahmenbedingungen für das nachhaltige Bewirtschaftungsziel von Oberflächengewässern ist nicht anzunehmen, dass diese Abflussmenge ausreichend ist, um in einem Gewässer mit einem so geringen Abfluss eine Trinkwassergewinnung wirtschaftlich nach den Anforderungen der Trinkwasserverordnung /TkwV 21/ zu ermöglichen, da nur eine relativ kleine Menge des Abflusses entnommen werden dürfte, um diese einer anschließenden Trinkwasseraufbereitung zuzuführen. Eine Entnahme nicht aufbereiteten Flusswassers zu Trinkwasserzwecken wäre nicht zulässig.

Ein Einfluss des WHG auf die Randbedingungen der Freigabe konnte nicht identifiziert werden.

3.1.3 Auswertung der Freigabepaxis ausgewählter Abfallbeseitigungsanlagen und -verwertungsanlagen

In Ergänzung zu der vorangegangenen rechtlichen Betrachtung wurde insbesondere durch das Öko-Institut geprüft, ob weitere übergeordnete Parameter relevant sind, bei denen es sich etwa um ortsspezifische oder praxisnahe Parameter oder Expositionspfade handelt /ÖKO 21/ und /ÖKO 23/.

Es ist anzumerken, dass Parameter, die bislang der AVV zu § 47 StrlSchV /SSV 17/ entnommen wurden, und nun aus AVV Tätigkeiten 2020 /AVV 20/ zu aktualisieren sind, hier keinen Überprüfungen unterliegen. Dies betrifft u. a. die folgenden Parameter:

- Ingestionsparameter (aus Anlage VII Teile A, B, C StrlSchV /SSV 17/ i. V. m. der AVV zu § 47 StrlSchV (alt) /SSV 17/)
- Inhalationsparameter (Atemraten bislang ebenfalls aus AVV zu § 47 StrlSchV /SSV 17/)

Ebenso keiner Überprüfung unterliegen Werte, die innerhalb eines zu begründenden Szenarios als frei wählbar eingestuft werden können. Dazu gehören

- Aufenthaltszeiten (ganzjährig oder bezogen auf die Dauer eines Arbeitstages, der Art der Freizeitgestaltung o. ä.),

- natürliche radioökologische Parameter für den Luft- und Wasserpfad, wie z. B. Langzeitausbreitung-, Fallout- und Washout-Faktoren, etc. und
- physikalische oder chemische Größen wie der Feststoff-Flüssigkeitsverteilungskoeffizienten (K_d -Werte).

Die Praxiserfahrungen des Öko-Instituts haben insgesamt gezeigt, dass allgemein gültige Anpassungen der bisher getroffenen Randbedingungen nicht sinnvoll erscheinen. Dies liegt insbesondere an den verhältnismäßig wenigen Entsorgungsanlagen und den darüber oftmals stark abweichenden individuellen Randbedingungen jeder einzelnen Anlage vor Ort.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde daher lediglich auf die Jahreskapazität der Referenzdeponien bzw. Referenz-MVA vor dem Hintergrund der aktuellen Deponiekapazitäten und damit verbundenen Parametern eingegangen und deren Einfluss untersucht.

In /THI 04/ wird zur Berechnung der Freigabepfade der Spalten 8 bis 11 „Freigabe zur Beseitigung“ eine Referenz-Deponie mit einer Jahreskapazität von 40.000 Mg/a bzw. eine Referenz-MVA mit einer Jahreskapazität von 100.000 Mg/a angenommen. Grundlage für diese Werte waren die tatsächlich vorliegenden der Kapazitäten in Deutschland zum Zeitpunkt der Modellerstellung. Dabei lagen die angenommenen Werte im unteren Perzentil-Bereich der Verteilungen, stellten also eine konservative Abschätzung dar. Die Jahreskapazität der Referenzdeponie entspricht auch der Untersuchung von /POS 95/.

In der Empfehlung der Strahlenschutzkommission zur „Freigabe von Stoffen zur Beseitigung“ von 2006 /SSK 06/ wurden aufgrund einer Reihe von Veränderungen im Abfallrecht, insbesondere für die Beseitigung auf Deponien, Modellanpassungen vorgenommen. In diesem Zuge wurden auch die Kapazitäten der Referenzdeponie bzw. -MVA angepasst. Die Kapazität der Referenzdeponie wurde auf 60.000 Mg/a gesetzt, wobei sehr kleine Deponie mit Kapazitäten unter 10.000 Mg/a nicht in die Berechnung der Kapazität eingegangen sind. Für die Referenz-MVA wurde ein Wert von 240.000 Mg/a angenommen.

In den Tab. 3.2 und Tab. 3.3 werden Angaben zu Parametern gemacht, die in gezielten Vor-Ort-Terminen durch das Öko-Institut untersucht wurden. Darüber hinaus werden Erfahrungen mit Praxispartnern systematisch aufbereitet /ÖKO 21/.

Tab. 3.2 Durch das Öko-Institut überprüfte Parameter der Spalten 8 und 10 (Freigabewerte fester Stoffe zur Beseitigung auf einer Deponie bis zu 100 Mg/a bzw. 1000 Mg/a) /ÖKO 21/

Bezeichnung des Expositionspfads, der exponierten Gruppe und der dazugehörigen Parameter	Auswertung in der Praxis
Pfad Deponie – Beschäftigte (Transport und Deponie)	
Arbeitszeiten (beim Transport, im Eingangsbereich, der MBV, bei der der Ablagerung)	bei Transport ca. 1 bis 2 h ^{a)} in Eingangsbereichen: 10 min ^{b)} bei der Ablagerung: 2 h ^{e)}
Staubkonzentrationen, falls adaptierbar durch präventive Vorkehrungen (beim Transport, im Eingangsbereich, der MBV, bei der der Ablagerung im Freien und in der Kabine)	in Eingangsbereichen: geringfügig ^{b)} bei der Ablagerung: geringfügig ^{b)} in der Kabine: geringfügig ^{b)}
Abklingzeiten (vor Transport, vor der Annahme, während MBV)	Zeit von Freimessung bis Abtransport: Tage bis Monate ^{c)}
Pfad Deponie – Bevölkerung (Sicker- und Grundwasser)	
Einlagerungsdauer freigemessener Abfälle	< 54 a ^{d)}
abgelagerter freigegebener Abfall pro Jahr	< 1000 Mg/a ^{d)}
Mächtigkeit der Schicht nicht kontaminierter Abfälle	< 1 m ^{e)}
Gesamtjahreskapazität der Deponie	10.000 – 100.000 m ³ pro Jahr ^{f)}
Mittlerer Abfluss (MQ) bei anzunehmender Trinkwasserfassung unterstrom des Kläranlagen-Vorfluters	MQ = 20 m ³ /s MQ = 80 m ³ /s ^{g)}

Tabellenanmerkungen aus /ÖKO 21/:

- a) Entfernungen wurden anhand praktischer Erfahrungen und konkreter Beispiele durch das Öko-Institut ermittelt.
- b) Visuell konnte vor Ort der demonstrative Ablauf einer Anlieferung freigemessener Betonblöcke durch das Öko-Institut nachvollzogen werden. Dieser erfolgt in der Praxis oft staubfrei, wenn die Abfälle wie z. B. in Baden-Württemberg üblich, in Big-Bags verpackt angeliefert und in die Deponie eingebaut werden
- c) Durch Befragung der Abfallerzeuger bzw. aus den Erfahrungen des Öko-Instituts hat sich gezeigt, dass die Zeiten zwischen Freimessung und Abtransport sehr lang sein können (von mehreren Tagen bis zu einigen Monaten). Gründe hierfür können sein: Abwarten behördlich veranlasster Kontrollmessungen, Abwarten einer behördlichen Entscheidung, ohne weitere Kontrolle abzugeben, notwendige Einbeziehung abfallrechtlicher Behörden bei der Freigabe zur Beseitigung sowie Absprachen mit der Beseitigungsanlage.
- d) Große Massenströme sind nur aus dem Abbau kerntechnischer Anlagen zu erwarten. Dieser erstreckt sich normalerweise nicht über 54 Jahre (Wert in der Modellierung). Bei einem einzelnen KKW sind maximal 5.000 bis 10.000 Mg an Abfall zu erwarten, der zur Beseitigung freigegeben werden kann. Auch

wenn aus dem Abbau mehrerer Anlagen an eine Deponie ausgegangen wird, sind kaum $1.000 \text{ Mg/a} \cdot 54 \text{ a} = 54.000 \text{ Mg}$ zu erwarten.

- e) Die vom Öko-Institut betrachtete Deponie hat z. B. für die Abfälle aus dem KKW einen vorher mit nur wenig Abfall bedeckten Deponieabschnitt gewählt. In Abb. 3.4 ist links ein Bagger zu sehen, rechts der mit Planen abgedeckte Abschnitt mit freigemessenen Abfällen. Das Aufdecken des Deponieabschnittes und die Einlagerung einer Charge (hier die Demonstration mit einem exemplarischen Betonblock, der sonst in einem Big Pack verpackt wäre) dauert nach Angaben des Deponiebetreibers etwa zwei Stunden.
- f) Die Wertebandbreite wurde aus Konsultationen verhältnismäßig kleiner Deponien und größerer Deponien sowie unter Berücksichtigung der Datenerhebung der GRS im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelt.
- g) Ergänzende Angaben der Abfallwirtschaftsgesellschaft des betrachteten Kreises: Die Deponie A leitet das Sickerwasser in ein Gruppenklärwerk. Die geklärten Abwässer werden danach in den Vorfluter eingeleitet, der am Pegel einen mittleren Jahresabfluss von etwa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ aufweist. Nach kurzem Fließweg mündet der Vorfluter in einen größeren Fluss.



Abb. 3.4 Einlagerungsabschnitt freigemessener Abfälle aus KKW auf der Deponie /ÖKO 21/

Tab. 3.3 Durch das Öko-Institut überprüfte Parameter der Spalten 9 und 11 (Freigabe von Stoffen zur Beseitigung in Verbrennungsanlagen bis zu 100 Mg/a bzw. 1000 Mg/a) /ÖKO 21/

Bezeichnung des Expositionspfads, der exponierten Gruppe und der dazugehörigen Parameter	Auswertung in der Praxis
Pfad Müllverbrennungsanlage – Beschäftigte (Transport und Anlagenteile der MVA)	
Arbeitszeiten (beim Transport, im Eingangsbereich, der MBV, bei der Ablagerung)	bei Transport ca. 1 h pro Fahrt ^{a)} sonstige Daten aus /ÖKO 19a/ <u>Freigegebener Abfall:</u> 6 h/a bei Transportvorgängen 1 h/a im Jahr während des Abladens 0,67 h/a im Eingangsbereich
Staubkonzentrationen, falls adaptierbar durch präventive Vorkehrungen (beim Transport, im Eingangsbereich, der MBV, bei der Ablagerung im Freien und in der Kabine)	allg. geringe Staubentwicklungen im Freien bei Aufgabe des Mülls in den Bunker und bei Ladevorgängen ^{c)}
Gesamtjahreskapazität der MVA	MHKW Weißenhorn: 100.000 Mg /ÖKO 19a/ MVV Mannheim: 700.000 Mg /ÖKO 19b/
Pfad Verwertung – Beschäftigte (Wegebau, Schrott- und REA-Gips-Verwertung)	
Massenströme innerhalb der MVA (Schlackeanfall, Staubanfall, Rauchgas- bzw. Gipsanfall)	Daten aus /ÖKO 19a/ /ÖKO 19b/: <u>Schlacke</u> 23.000 - 160.000 Mg/a <u>Filter- und Kesselstaub</u> 3.800 - 18.000 Mg/a <u>REA-Gips</u> 0 - 650 Mg/a
Ggf. Abklingzeiten	Zeit von Freimessung bis Abtransport: Tage bis Monate (vgl. Tab. 3.2)
Arbeitszeiten	<u>Schlacken:</u> 76 h/a bei Verladung in der Kanzel 38 h/a bei LKW – Beladung ^{c)} bis zu 460 h/a bei Transportvorgängen ^{b)} <u>Stäube:</u> bis zu 80 h/a bei Transportvorgängen ^{b)}

Tabellenanmerkungen:

- a) Entfernungen wurden anhand praktischer Erfahrungen und konkreter Beispiele durch das Öko-Institut ermittelt.
- b) Ermittelte Fahrzeiten anhand praktischer Erfahrungen und konkreter Beispiele, die durch das Öko-Institut ermittelt wurden sowie anfallenden Schlackemengen unter konservativen Betrachtung /ÖKO 19a/
- c) Visuelle Eindrücke vor Ort

3.1.4 Darstellung der veränderten Randbedingungen

Unter Berücksichtigung der rechtlichen sowie praktischen Rahmenbedingungen des konventionellen Abfallrechts lassen sich in Bezug auf die zuvor identifizierten Randbedingungen folgende mögliche Änderungen darstellen.

Materialart

Die bisher in den spezifischen Freigabeoptionen berücksichtigten Materialarten wurden nicht durch Änderungen im Regelwerk oder der Praxis verändert.

Freigabeoption

Das im AP 1.1 betrachtete Regelwerk sowie Entwicklungen in der Freigabepraxis führen zu keinen Änderungen in Bezug auf die einzelnen Freigabeoptionen gemäß Tab. 4 StriSchV /SSV 21/. Jedoch wurden folgende Aspekte identifiziert, die Einfluss auf einzelne Szenarien der spezifischen Freigabeoptionen haben:

- Recyclingbeton: Entgegen bisherigen Annahmen wird das in der Freigabeoption der Spalte 6 „spezifische Freigabe von Bauschutt“ ausgeschlossene Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Bauschutt gebaut wurde“ angepasst und berücksichtigt. In /THI 00/ wurde dieses Szenario aus der Betrachtung genommen, da bautechnisch nur von ca. 10 % rezyklierten Baumaterial ausgegangen wurde. Diese Werte sind jedoch bautechnisch überholt, so dass der Einfluss dieses Szenarios auf die Freigabewerte im Folgenden näher untersucht wird.
- Klärschlammverwertung: Für die Freigabeoptionen Spalte 8 bis 11 „spezifische Freigabe von Stoffen zur Beseitigung“ kann zukünftig davon ausgegangen werden, dass das bisherige Szenario „Verwertung von Klärschlamm“ nicht weiter betrachtet werden sollte. Der entsprechende Einfluss auf die Freigabewerte wird im Folgenden näher untersucht.
- Staubkonzentration: Für die Freigabeoptionen Spalte 8 bis 11 „spezifische Freigabe von Stoffen zur Beseitigung“ zeigen Erfahrungen aus der Praxis, dass es häufig durch die Verwendung von Big-Bags zu einer nahezu staubfreien Arbeitsplatzumgebung kommt. Der Einfluss der Staubfreiheit in einzelnen Szenarien wird daher im Folgenden näher untersucht.

Massenbereich

Änderungen in Bezug auf die freizugebenden Massen sind unter Berücksichtigung des konventionellen Abfallrechts sowie Entwicklungen in der Entsorgungspraxis nicht identifiziert worden.

Dosiskriterium

Die Herleitung der Freigabewerte basiert in auf dem Dosiskriterium $10 \mu\text{Sv/a}$, und wird nicht durch Änderungen im konventionellen Regelwerk oder der Praxis verändert.

Altersgruppen

Aus dem aktualisierten konventionellen Abfallrecht ergeben sich gegenüber den bisherigen Annahmen keine Änderungen in den zu berücksichtigenden Altersgruppen. Kinder und Erwachsene werden entsprechend der vorliegenden Szenarien betrachtet. Mit den Altersgruppen zusammenhängende Parameter, z. B. altersabhängige Verzehrsmengen, wurden in diesem Vorhaben nicht berücksichtigt, können zukünftig aber Einfluss auf die Freigabewerte nehmen. Hierzu läuft aktuell in der GRS ein Forschungsvorhaben.

Radionuklide

Das konventionelle Abfallrecht nimmt keinen Einfluss auf die bei der Freigabe zu betrachtenden Radionuklide und wird daher im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht weiter betrachtet.

Ausschöpfungsgrad

In /SSK 06/ wird unter Berufung auf die notwendige Rechtssicherheit bei der Anwendung der Freigabe sowie fehlender Absehbarkeit technischer Entwicklungen festgehalten, dass der Ausschöpfungsgrad konservativ mit 100 % angenommen werden sollte. In /GRS 20/ wird gezeigt, dass die Werte der Spalten 6, 12 und 13 aus /THI 00/ unter der Annahme eines Ausschöpfungsgrades von 20 % hergeleitet wurden. Dennoch konnten keine Auswirkungen des konventionellen Abfallrechts sowie der gängigen Praxis auf den Ausschöpfungsgrad identifiziert werden.

Vermischung

Unter Vermischung wird die Vermischung zwischen konventionellem Abfall und freizugebenden, ggf. kontaminierten Abfällen verstanden. Die betrifft u. a. die folgenden Parameter:

- **Deponiekapazitäten:** Praktische Erfahrungen und Analysen haben gezeigt, dass die angenommenen Deponiekapazitäten regional stark schwanken können. Darüber hinaus ist in Folge der sich ändernden Deponielandschaft in Deutschland auch weiterhin mit Abweichungen gegenüber den in den Freigabemodellen angenommenen Kapazitäten zu rechnen. Da die Deponiekapazität neben den zunehmenden Bestrebungen der stofflichen Rezyklierung unmittelbaren Einfluss auf die Vermischung haben kann, wurden im Folgenden für die Freigabeoptionen der Spalten 8 bis 11 weitere Variationen von Deponie- und MVA-Kapazitäten betrachtet.
- Einfluss des Vermischungsfaktor bei Metallschrott im Szenario S3 in Abhängigkeit von den geforderten Mindestreinheiten.
- Änderungen durch die AVV Tätigkeiten
 - Die neue AVV Tätigkeiten etabliert neue Dosiskonversionsfaktoren für den Muttermilchpfad, die für einige Nuklide die Transferfaktoren ersetzen.
 - Das Lagrange-Partikel-Modell wird in der AVV Tätigkeiten verbindlich und löst das Gauß-Fahnenmodell ab.

Freigabekriterien

Im konventionellen Abfallrecht konnte kein Einfluss auf die bisher bei der spezifischen Freigabe zu betrachtenden Freigabekriterien identifiziert werden, so dass diese im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht weiter betrachtet wurden.

3.2 AP 2: Aufzeigen von Adaptionmöglichkeiten

Im Verlauf der Überprüfung der Randbedingungen hinsichtlich möglicher Anpassung infolge des sich veränderten konventionellen Abfallrechts sowie praktischer Vorgehensweisen, hat sich herauskristallisiert, dass der vertiefte Fokus auf den Freigabeoptionen liegen sollte, bei denen eine Veränderung und damit Adaption von Randbedingungen am ehesten zu erwarten ist. Unter Berücksichtigung der Arbeitsergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel können folgende Aspekte festgestellt werden.

Die spezifischen Freigabewerte nach Spalte 6 der StrlSchV /SSV 21/ sind nur dann maßgebend, wenn es sich um Bauschutt eines Abfallerzeugers von mehr als 1.000 Mg/a handelt. In sehr vielen Fällen sind die Freigabewerte der Spalte 6 daher durch die Spalten 3 bzw. 10 oder 11 gedeckelt. In der Regel ist ein derart hohes Abfallaufkommen durch freigegebenen Bauschutt auch durch ein großes KKW im Rückbau kaum zu erwarten, so dass die praktische Bedeutung wie auch die Bedeutung der Szenarien, die Spalte 6 zugrunde liegen, eher vernachlässigbar sind /ÖKO 21/. Dennoch wird für diese Freigabeoption das bisher aufgrund der niedrigen Rezyklierungsquote von 10 % in /THI 00/ ausgeschlossene Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus recyceltem Bauschutt gebaut wurde“ berücksichtigt und entsprechend in diesem Forschungsvorhaben geprüft. Hintergrund ist die zum einen zunehmende regulatorische Pflicht zur Rezyklierung von Abfällen z. B. gemäß /KrWG 17/ und zum anderen die fortschreitenden technologische Entwicklung, die eine Rezyklierung in immer mehr Bereichen ermöglicht.

Adaptionsmöglichkeit:

- Für die Freigabeoption der Spalte 6 wird die Berücksichtigung des Szenarios „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezyklierten Bauschutt gebaut wurde“ geprüft. Hierzu werden exemplarische Freigabewerte entsprechend eines adaptierten SR 44-Ansatzes berechnet, und mit den aktuellen Freigabewerten verglichen.
- Für die Berechnung des Szenarios werden die Parameterwerte (Dosiskonversionsfaktoren, Vermischung) aus SR 44 /IAEA 05/ entnommen. Die Aufenthaltszeit entsprechend sich verändernder Lebensbedingungen auf 16 Stunden pro Tag verlängert.

Auswertbare Erfahrungen für die spezifischen Freigaben von Bodenflächen entsprechend der Spalte 7 zur Weiternutzung von ehemaligen Strahlenschutzbereichen liegen nicht oder nur eingeschränkt vor, da sich viele Rückbauvorhaben noch in einer früheren Phase befinden. Die Frage der Geländefreigabe im Zusammenhang mit kontaminierten Bodenflächen stellt sich nur für vor längerer Zeit stillgelegte kerntechnische Anlagen mit erheblichem Rückbaufortschritt, wie z. B. das Kernkraftwerk in Rheinsberg (KKR). Ein abgeschlossener Rückbau findet sich etwa an Standorten wie dem ehemaligen Versuchssatomkraftwerk Kahl (VAK), am ehemaligen Forschungsreaktor in Rossendorf (RFR) /KNA 20/ oder am ehemaligen KKW Großwelzheim. Auf den hier geprüften Flächen befindet sich zwar eine „grüne Wiese“, die ehemaligen Standorte sind jedoch zumindest umzäunt oder überbaut /ÖKO 21/.

Adaptionsmöglichkeit:

- Änderungen von Randbedingungen infolge des sich ändernden rechtlichen Rahmens oder der Freigabepraxis wurden nicht identifiziert. Die Nutzungsszenarien konnten keiner praktischen Überprüfungen unterzogen werden, so dass die Freigabeoption der Spalte 7 im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens nicht weiter betrachtet wurde.

Entsprechend der Ergebnisse des Arbeitspakets 1 zeigt sich, dass insbesondere eine Fokussierung auf die Spalten 8 bis 11 sinnvoll ist, da es sich hierbei um freigegebene Abfälle zur Beseitigung handelt, und das konventionelle Abfallrecht die Freigabewerte bestimmter Parameter oder Szenarien beeinflussen könnte. Außerdem lässt sich in der Verfahrenspraxis bei der Freigabe mit belastbaren empirischen Erfahrungen hinsichtlich Parametern oder Szenarien zeigen, inwiefern eine Adaption sinnvoll ist. Dies betrifft

- die Anpassung der Parameterwerte Transport- und Arbeitszeiten, Staubkonzentration und Jahreskapazitäten,
- den Einfluss der Reinheit der Schrottverwertung im Szenario S3,
- den Einfluss möglicher Änderungen der Klärschlamm Verordnung auf den Klärschlammfad und
- den Einfluss der Änderungen der AVV Tätigkeiten, insbesondere zu den Punkten Ausbreitungsmodellierung (Lagrange-Partikel-Modell) sowie Auswirkungen der neuen Dosiskoeffizienten für den Muttermilchpfad.

Weitgehend freigegebene Gebäude zur Wieder- und Weiterverwendung (Spalte 12) oder zum Abriss (Spalte 13) sind z. B. auf dem Anlagengelände des Kernkraftwerks Würgassen (KWW) und in Obrigheim (KWO) vorhanden /ÖKO 21/.

Adaptionsmöglichkeit:

- Genaue Informationen über die Weiterverwendungsmöglichkeiten und veränderten Randbedingungen lagen bei Berichtserstellung nicht vor, so dass eine weitere Betrachtung im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht stattgefunden hat.

Im Rahmen der Überprüfung der Randbedingungen wurde festgestellt, dass die Freigabeoption Spalte 14 „Metallschrott zur Rezyklierung“ in der Praxis nur selten angewendet wird. In der Regel wird hier, sofern möglich, für Metalle häufig die uneingeschränkte Freigabe gewählt /ÖKO 21/.

Adaptionsmöglichkeit:

- Änderungen von Randbedingungen infolge des sich ändernden rechtlichen Rahmens oder der Freigabepraxis wurden nicht identifiziert, so dass eine weitere Betrachtung im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht stattgefunden hat

3.3 AP 3: Berechnung von spezifischen Freigabewerten für ausgewählte Schlüsselnuklide

Im AP 3 werden, wo möglich, spezifische Freigabewerte für die Schlüsselnuklide H-3, C-14, Cl-36, Mn-54, Ni-59, Co-60, Sr-90, Tc-99, Ag-108m, I-129, Cs-137, Ba-133, Eu-152, Eu-154, Ac-227, Pa- 231, Pu-238, Pu-239, U-238 und Am-241 berechnet.

3.3.1 AP 3.1: Anpassung der Randbedingungen

Im AP 3.1 erfolgt die Anpassung der Randbedingungen der Berechnungsmodelle, für die im AP 1 identifizierten, veränderten Randbedingungen. Dabei werden jeweils die nötigen Veränderungen von Parametern und Parameterwerten aufgezeigt.

3.3.1.1 Praxisnahe Parameterwerte Kapazität, Expositionszeit und Staubkonzentration aus der Praxis für Spalten 8 bis 11

Beschreibung: In Ergänzung zur rechtlichen Betrachtung wurde geprüft, ob übergeordnete Parameter relevant sind, bei denen es sich etwa um beobachtbare ortsspezifische oder praxisnahe Parameter oder Expositionspfade handelt. Es ist anzumerken, dass Parameter, die bislang der AVV zu § 47 StrlSchV /SSV 17/ entnommen wurden, und nun aus der AVV Tätigkeiten /AVV 20/ zu aktualisieren sind, nicht überprüft wurden. Ebenso keiner Überprüfung unterliegen Werte, die innerhalb eines zu begründenden Szenarios als frei wählbar eingestuft werden können z. B. Aufenthaltszeiten (ganzjährig oder bezogen auf die Dauer eines Arbeitstages, der Art der Freizeitgestaltung o. ä.), natürliche radioökologische Parameter für den Luft- und Wasserpfad, wie z. B. Langzeitausbreitung-, Fallout- und Washout-Faktoren sowie physikalische oder chemische Größen wie den Feststoff-Flüssigkeitsverteilungskoeffizienten (Kd-Werte).

Im Vorfeld der Auswahl der praxisnahen Parameterwerte zur Berechnung von Freigabewerten der Spalten 8 bis 11 wurde durch das Öko-Institut eine kurze Bewertung der Sensitivität einzelner Modellparameter durchgeführt /ÖKO 21/ mit dem Ergebnis, die Parameter **Expositionszeit t**, **Staubkonzentration c** und **Kapazität M** der Deponie bzw. der Müllverbrennungsanlage (MVA) auszuwählen.

Freigabemodelle und Szenarien: Die Anpassungen der praxisnahen Parameter wirken sich dabei auf verschiedene Szenarien des Freigabemodells der Spalten 8 bis 11 „Spezifische Freigabe zur Beseitigung“ aus /THI 04/ aus.

Adaption: Durch die Auswertung der Freigabepraxis wurden in den entsprechenden Modellen für die Spalten 8 bis 11 die folgenden Parameter verändert:

- Kapazität der Deponie bzw. MVA
- Expositionszeiten der Mitarbeiter (beim Transport, im Eingangsbereich, der MBV, bei der Ablagerung)
- Staubkonzentration (beim Transport, im Eingangsbereich, der MBV, bei der Ablagerung im Freien und in der Kabine)

3.3.1.2 Einschränkungen bei der Aufbringung von Klärschlamm

Beschreibung: Die Klärschlammverordnung in ihrer aktuellen Fassung sieht erhebliche Einschränkungen bei der landwirtschaftlichen Nutzung von Klärschlamm vor (siehe Kap. 3.1.2.9). So ist laut § 14 Abs. 1 /AbfKlärV 20/ das Auf- oder Einbringen von maximal 5 Mg Klärschlamm-Trockenmasse je Hektar innerhalb von drei Kalenderjahren zulässig. Weiterhin darf Klärschlamm nach § 15 Abs. 5, S. 1 nicht auf Böden aufgebracht werden, die u. a. als Grünland und Dauergrünland und als Ackerfutteranbaufläche, als Anbauflächen verschiedener Nutzpflanzen zur Verfütterung, jedoch auch für Gemüse, Obst oder Hopfen oder auch als Haus-, Nutz- oder Kleingarten genutzt werden. Aufgrund der Vielzahl von Einschränkungen und dem allgemein sehr hohen Aufwand bei der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlämmen, mit dem allgemeinen Ziel des umfänglichen Verbots einer generellen bodenbezogenen Verwertung, kann die Berücksichtigung der Klärschlammverwertung innerhalb der Szenarien der Freigabeoptionen Spalte 8 bis 11 zukünftig ggf. ausgeschlossen werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde zunächst der Wegfall des Futtermittelpfads geprüft.

Freigabemodelle und Szenarien: Die Restriktionen durch die Klärschlammverordnung wirken sich auf die Szenarien mit Bezug zu der Klärschlammverwertung der Freigabemodelle für die Spalten 8 bis 11 „Spezifische Freigabe zur Beseitigung“ aus /THI 04/. Betroffen ist der Modellteil, welcher die Nuklidausbreitung über das Sickerwasser einer Deponie und die Kläranlage beschreibt. Im Szenario O2 „Verwertung von Klärschlamm“ /THI 04/ wird bisher neben dem Getreide- und Kartoffelanbau auf solchen Flächen auch der Anbau von Futterpflanzen wie Mais und die sich anschließende Exposition durch Milch- und Fleischverzehr berücksichtigt. Die Gültigkeit dieser Annahmen muss überprüft werden. Weiterhin müssen die Parameter, welche die Mengen und zeitlichen Abstände betreffen, angepasst werden.

Adaption: Durch die Vorgaben der Klärschlammverordnung ergeben sich direkte Auswirkungen auf die folgenden Parameterwerte:

- Anbau von Futterpflanzen (Milch- und Fleischverzehr) entfällt.

3.3.1.3 Anforderungen in Bezug auf die Reinheit wiederzuverwertender Schrotte

Beschreibung: In der EU-Verordnung Nr. 333/2011 /EUR 11/ werden hohe Anforderungen in Bezug auf die Reinheit wiederzuverwertender Schrotte gestellt. So wird u. a. gefordert, dass der Fremdstoffanteil bei Eisen- und Stahlschrott 2 % bzw. bei Aluminiumschrott 5 % nicht übersteigt.

Freigabemodelle und Szenarien: In den Freigabepfaden der Spalten 9 und 11 „Freigabe zur Beseitigung in Müllverbrennungsanlagen“ /THI 04/ wird die Verwertung von Eisenmetallen, welche vor oder beim Verbrennungsprozess in der MVA ausgesondert werden, im Szenario S3 „Schrott-Verwertung (Produkt gewerblich)“ betrachtet. In diesem Szenario wird angenommen, dass die Eisenmetalle weitgehend rückgewonnen werden und zum Einschmelzen gelangen. Auf Grundlage der Stahlschrottsortenliste, welche in der Kategorie „Geschredderter Schrott aus der Müllverbrennung“ einen Eisengehalt von mindestens 92 % vorsieht, wird davon ausgegangen, dass eine weitere Aufarbeitung notwendig ist, bei welcher der Schrott der MVA im Produkt mit anderem Material vermischt wird. Diese Annahme sollte vor dem Hintergrund der in der EU-Verordnung geforderten Reinheiten überprüft werden, da infolge technologischer Entwicklungen damit gerechnet werden kann, dass hier höhere Reinheitsgrade erreicht werden können.

Adaption: Bei Berücksichtigung der geforderten Reinheit wiederzuverwertender Schrotte wird der Parameter „Vermischung“ geprüft.

- Reinheit der geschredderten Schrotte beim Verlassen der MVA.

3.3.1.4 Anwendung des Lagrange-Partikel-Modells bei der Betrachtung von Luftausbreitungen

Beschreibung: Auch wenn Expositionsszenarien zur Berechnung von Freigrenzen und Freigabewerten aus den Regelungen der AVV Tätigkeiten /AVV 20/ explizit ausgenommen sind, werden im Folgenden einige Annahmen der AVV-Tätigkeiten im Sinne einer konsistenten Vorgehensweise bei der Berechnung von Expositionen überprüft. So sieht die aktuelle AVV Tätigkeiten /AVV 20/ vor, dass zur Betrachtung von Expositionen durch Luftausbreitung anstelle des bisher verwendeten Gauß-Fahnen-Modells das Lagrange-Partikel-Modell in Verbindung mit einer langjährigen Wetterstatistik angewandt werden soll.

Freigabemodelle und Szenarien: Bei Übertragung dieser Vorgabe auf die Freigabemodelle ist der Modellteil zur Luftausbreitung für die Spalten 9 und 11 „Freigabe zur Beseitigung in Müllverbrennungsanlagen“ /THI 04/ zu überprüfen. Dieser beschreibt die Luftausbreitung von Radionukliden über die Abgasstrecke einer Müllverbrennungsanlage. Es schließen sich die Szenarien „Externe Strahlung (Bodenstrahlung)“ (L1), „Inhalation“ (L2) und „Sekundäringestion“ (L3) an. Insbesondere folgt die in /THI 04/ verwendete Methodik zur Berechnung der Sekundäringestion über Luftpfade dem Entwurf der AVV zu § 47 StrlSchV (Stand: 3. August 2003) /THI 04/ und sollte folglich entsprechend der AVV Tätigkeiten angepasst und die Auswirkung auf die Freigabewerte überprüft werden.

Adaption: Bei Anpassung des zur Berechnung der Luftausbreitung verwendeten Modells sind Auswirkungen auf die folgenden Parameter der Szenarien L1 bis L3 gemäß /THI 04/ zu erwarten:

- Anwendung des Lagrange-Partikel-Modells in Verbindung mit einer langjährigen Wetterstatistik oder der Zeitreihe eines repräsentativen Jahres (bisher Gauß-Fahnen-Modell) bei Ableitungen
- 95. Perzentil der jährlichen Verzehrsmengen nur noch für die dosisdominierende Lebensmittelgruppe

- Gammasubmersion und der Gammabodenstrahlung: Abschirmung bei Aufenthalt in Gebäuden

3.3.1.5 Einführung neuer Transferfaktoren für Muttermilch

Beschreibung: Eine weitere Neuerung der AVV Tätigkeiten, welche im Sinne einer konsistenten Vorgehensweise auch für die Szenarien der Freigabe überprüft werden sollte, ist die Einführung von Dosiskoeffizienten nach /ICRP 05/ für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion von Radionukliden durch die Mutter für 81 Nuklide. Bei der Berechnung der Expositions-dosis durch Muttermilch wurde bisher die Aktivität, welche dem Säugling durch Inhalation oder Ingestion von Radionukliden durch die Mutter zugeführt wird, mithilfe von Transferfaktoren berechnet /AVV 12/. Diese beschreiben jeweils den Anteil eines Radionuklids, welcher nach Inkorporation durch die Mutter in die Muttermilch übergeht. Die Berechnung mithilfe der Transferfaktoren wird nun nur noch in jenen Fällen durchgeführt werden, in denen keine Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion von Radionukliden durch die Mutter zur Verfügung stehen. Andernfalls erfolgt die Berechnung nun über die Dosiskoeffizienten. Entsprechende Berechnungsformeln für die beiden Fälle sind in der AVV Tätigkeiten /AVV 20/ gegeben.

Freigabemodelle und Szenarien: Die Einführung von Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion von Radionukliden durch die Mutter bei der Berechnung der Expositions-dosis durch Muttermilch hat potenziell Auswirkungen auf alle Ingestionsszenarien der Freigabe. Insbesondere im Freigabepfad „Spezifische Freigabe zur Beseitigung“ /THI 04/ ist die bisherige Berechnung der Strahlenexposition durch Sekundäringestion nach Modellierung des Wasser- und Luftpfades angelehnt an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV /AVV 12/. Die Berechnungen in den Modellteilen „Nuklidausbreitung über den Luftpfad“ (Szenario L3: „Sekundäringestion“) und „Nuklidausbreitung über den Oberflächenwasserpfad“ (Szenario O1: „Nutzung von Oberflächenwasser“ und O2, Modellteil „Kontamination der Nahrung und Sekundäringestion“) sollten daher entsprechend angepasst werden.

Adaption: Für die Berechnung der Expositionsdosis durch Muttermilch für die Nuklide, für welche Dosiskoeffizienten in der AVV Tätigkeiten definiert sind, werden diese entsprechend den dort angegebenen Berechnungsformeln verändert und deren Einfluss auf die Freigabewerte geprüft.

- Einführung von Dosiskoeffizienten nach ICRP 05 für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion von Radionukliden durch die Mutter anstelle der bisherigen Transferfaktoren.

3.3.1.6 Erhöhung des Anteils von rezyklierten Beton in Bauwerken

Beschreibung: Vor dem Hintergrund des § 14 Abs. 2 KrWG sollen Recycling und sonstige stoffliche Verwertung von nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen spätestens ab dem 1. Januar 2020 mindestens 70 Gewichtsprozent betragen (siehe Kap. 3.1.2.1). Neben der Verwendung im Straßenbau kann zukünftig auch von einem steigenden Bedarf im Hochbau ausgegangen werden, da mit zunehmenden Schwierigkeiten bei der Rohstoffbeschaffung zur Betonherstellung gerechnet wird. Eine wachsende Anzahl an „Leuchtturm-Projekten“ und „Best-Practice“-Beispielen, die zum Teil komplett aus recycelten Baustoffen bestehen, verdeutlicht die zunehmende Bedeutung von RC-Beton bei öffentlichen Bauvorhaben /DBU 19/. Im Jahr 2020 fielen in Deutschland 60 Mio. Tonnen Bauschutt an. Davon wurden 79 % recycelt. Verwendung findet dieser allerdings nach wie vor hauptsächlich im Straßenbau (50 %) und im Erdbau (23 %). 20 % wurden zur Asphalt- und Betonherstellung verwendet /BBS 23/. Während die Verwendung von Recycling-Beton (RC-Beton) in europäischen Nachbarländern wie der Schweiz, den Niederlanden und Belgien mittlerweile im Hochbau etabliert ist, liegt Deutschland bei dieser Entwicklung noch zurück. Es ist jedoch davon auszugehen, dass deutsche Baustoffmärkte der Entwicklung folgen und RC-Beton perspektivisch an Bedeutung gewinnt.

Diese Prognose wird gestützt durch bereits realisierte Leuchtturmprojekte im Rahmen öffentlicher Vorhaben im (Wohnungs-)bau, etwa in Ludwigshafen, Heilbronn und Stuttgart /IFEU 23a/. Insbesondere in Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg finden sich solche Pilotprojekte /IFEU 23b/. So wurde in Kirchheim unter Teck ein Schulneubau mit RC-Beton realisiert, u. a. mit Sichtbeton-Elementen, wobei der Recycling-Anteil des verwendeten Betons bei 30 % lag /DAB 20/.

Das europaweite EU-Projekt SeRaMCo (Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products) mit einem Investitionsvolumen von 7 Mio. Euro hat u. a. zum Bau einer Lärm-

schutzwand aus 100 % RC-Beton auf einem Parkplatz im französischen Thionville geführt, sowie zu einem Pavillon nahe der Hochschule Pirmasens, der Begegnungsstätte und Veranstaltungsbühne sein soll /VDI 21/. Im Bauvorhaben „Stuttgart Ostheim“ des Bau- und Wohnungsvereins Stuttgart betrug der Anteil von RC-Beton am insgesamt verwendeten Beton etwa zwei Drittel /UMBW 11/.

Freigabemodelle und Szenarien: Im Freigabemodell nach /THI 00/ wird für die Freigabeoptionen, welche die Freigabe von Bauschutt betreffen, also die „Spezifische Freigabe von Bauschutt von mehr als 1.000 Mg/a“ (Spalte 6) und die „Spezifische Freigabe von Gebäuden zum Abriss“ (Spalte 13), angenommen, dass aus bautechnischen Gründen nur ca. 10 % des Baumaterials aus rezykliertem Beton gefertigt werden können. Aus diesem Grund wurde bisher das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton gefertigt wurde“ für die externe Gammabestahlung als mögliches restriktivstes Szenario verworfen, obwohl es die restriktivste Geometrie bezüglich externer Bestahlung, nämlich Bestahlung von allen Seiten, enthält. Stattdessen wurde ein halbunendliches Volumen aus 100 % rezykliertem Beton, wie es in Expositionssituationen von Arbeitern auf Deponien und im Straßenbau auftritt, als restriktivste Geometrie angenommen.

In Anbetracht der heutzutage und ggf. zukünftig stark erhöhten Anteile von rezykliertem Beton im Baumaterial, sollte das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton gefertigt wurde“ für die externe Gammabestahlung als mögliches restriktivstes Szenario betrachtet werden. Der Safety Report Nr. 44 /IAEA 05/ definiert zwei solcher Szenarien für einen 4x5 m großen Raum und eine erwachsene Person, die sich hinsichtlich RC-Beton-Anteil und Aufenthaltsdauer im Gebäude unterscheiden („realistisch“ 10 % RC-Beton, Aufenthalt 4.500 h/a; „unwahrscheinlich“ 50 % RC-Beton, Aufenthalt 8.760 h/a).

Adaption: Bei Berücksichtigung des Szenarios „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton gefertigt wurde“ wird infolge fehlender geometrieabhängiger Dosiskonversionsfaktoren auf die Berechnung nach SR 44 zurückgegriffen. Gegenüber den Annahmen/Berechnungen in SR 44 wird jedoch die jährliche Expositionszeit höher angesetzt, um veränderte Arbeitsbedingungen z. B. bzgl. Heimarbeit und Kinder/Senioren abzudecken:

- Bisher nicht berücksichtigtes Szenario für die Freigabeoption Spalte 6
- Jährliche Expositionszeit (Aufenthaltsdauer 5.840 h/a; 16 h/d)

3.3.2 AP 3.2: Berechnung von spezifischen Freigabewerten

Eine Neuberechnung von spezifischen Freigabewerten (FGW) erfolgt für ausgewählte Szenarien und Freigabemodelle entsprechend der Anlage 4, Tabelle für die Radionuklide H-3, C-14, Cl-36, Mn-54, Ni-59, Co-60, Sr-90, Tc-99, Ag-108m, I-129, Cs-137, Ba-133, Eu-152, Eu-154, Ac-227, Pa- 231, Pu-238, Pu-239, U-238 und Am-241.

3.3.2.1 Praxisnahe Parameterwerte Kapazität, Expositionszeit und Staubkonzentration aus der Praxis für Spalten 8-11

Die Berechnung der Freigabewerte unter Berücksichtigung der veränderten Randbedingungen wurde für die Spalten 8 bis 11 maßgeblich durch das Öko-Institut durchgeführt /ÖKO 23/. Auf Basis der in /ÖKO 23/ festgestellten Änderungen der gesetzlichen Vorgaben und unter Berücksichtigung der Recyclingpraxis sind in den Projektgesprächen mit der GRS Parameteranpassungen für die Neuberechnung der Freigabewerte festgelegt worden, die nachfolgend in die Definition von Rechenfällen eingeflossen sind.

Die einzelnen Rechenfälle werden für die Szenarien der Deponie und der MVA so abgeleitet, dass zunächst ein Basissatz (Referenzrechenfälle) der Parameterwerte definiert ist. Hierbei werden die Annahmen und Parameterwerte der Szenarien der Referenzdeponie mit der zugehörigen mechanisch-biologischen Vorbehandlung (MBV) und der Referenzmüllverbrennungsanlage (Referenz-MVA) nach /ÖKO 20/ bzw. /SSK 06/ übernommen. Im weiteren Schritt wird die Parametervariation für die Neuberechnung in zehn Rechenfällen durchgeführt. So können die Ergebnisse jeweils im Bezug zu dem entsprechenden Referenzfall bewertet werden. Im Folgenden werden die Parameterwerte und deren Variationen für die zehn Rechenfälle der angepassten Szenarien gemäß Spalte 8 und 10 bzw. 9 und 11 der Anlage 4, Tab. 1 StrISchV vorgestellt und erläutert.

3.3.2.1.1 Rechenfälle für das Deponiemodell

In /ÖKO 20/ wurde für die Referenz-Deponie in Anlehnung an die /SSK 06/ ein jährliches Massenaufkommen von 60.000 Mg/a angenommen. Die Rechenfälle für die Szenarien der Deponie werden für drei Varianten der Jahreskapazitäten von 10.000, 60.000 und 100.000 Mg/a und jeweils für die freigegebene Masse gemäß Spalte 8 und 10 der StrISchV definiert. Für diese Jahreskapazitäten sind die Variationen weiterer Parameter für die Szenarien der Deponie für Beschäftigte und Bevölkerung durchgeführt worden. In der folgenden Tab. 3.4 sind die Rechenfälle und die zugehörigen variierten Parameter

in der Übersicht aufgeführt und im Weiteren die Ableitung der Parametervariationen beschrieben.

Tab. 3.4 Parameter der Rechenfälle für Deponieeinlagerung /ÖKO 23/

Parameterwerte	Wert					
	2	5/5a	1	4	3/3a	6
Rechenfall						
Jahreskapazität der Deponie [Mg/a]	10.000		60.000		100.000	
Deponiefläche [m ²]	90.000					
Für die Einlagerung auf der Deponie freigegebene Masse [Mg/a]	100	1.000	100	1.000	100	1.000
Gesamteinlagerungsdauer der freigegebenen Abfälle auf der Deponie [a]	54					
Transport zur Deponie						
Fahrzeit des Fahrers [h/a]	3	27	3	27	3	27
Zeit für Be- und Entladen [h/a]	5,1	51,3	5,1	51,3	5,1	51,3
Staubkonzentration in der Luft (Abfall in Big-Bags) [g/m ³]	0	0	0	0	0	0
Optional (Fall a) Staubkonzentration in der Luft bei Ladevorgängen ohne Einsatz von Big-Bags [g/m ³]		0,001			0,001	
Eingangsbereich der Deponie						
Fahrzeit des Fahrers [h/a]	3	27	3	27	3	27
Zeit für Be- und Entladen [h/a]	5,1	51,3	5,1	51,3	5,1	51,3
Staubkonzentration in der Luft (Abfall in Big-Bags) [g/m ³]	0	0	0	0	0	0
Optional (Fall a) Staubkonzentration in der Luft bei Ladevorgängen ohne Einsatz von Big-Bags [g/m ³]		0,0002			0,0002	
Einlagerung auf der Deponie						
Arbeitszeit in der Kabine [h/a]	2,6	25,6	2,6	25,6	2,6	25,6
Arbeitszeit im Freien [h/a]	1,3	12,8	1,3	12,8	1,3	12,8
Arbeitszeit mit Ingestion von Staub [h/a]	0	0	0	0	0	0
Staubkonzentration in der Luft in der Kabine [g/m ³]	0	0	0	0	0	0
Optional (Fall a) Staubkonzentration in der Luft in der Kabine ohne Einsatz von Big-Bags [g/m ³]		0,0002			0,0002	
Staubkonzentration in der Luft im Freien [g/m ³]	0	0	0	0	0	0
Optional (Fall a) Staubkonzentration in der Luft im Freien ohne Einsatz von Big-Bags [g/m ³]		0,001			0,001	
MBV						
Arbeitszeit [h/a]	1200		800		400	
Staubkonzentration [g/m ³]	0,001					

Begründung der Variation der Transportzeit zur Deponie, der Arbeitszeit im Eingangsbereich der Deponie und bei der Einlagerung auf der Deponie

Bei dem direkt auf der Deponie eingelagerten freigegebenen Abfall handelt es sich um ein inertes Material zumeist in Form von Bauschutt, Beton oder Estrich. Die Fahrt-, Ein- und Ablagerungszeiten ergeben sich aus der genehmigten freigegebenen einzulagernden Menge pro Jahr gemäß Spalte 8 und 10 der StrlSchV. Aus der jeweiligen Spalte leiten sich die Arbeits- und Transportzeiten folgendermaßen ab:

- Der Transport erfolgt mit 20-Fuß-Containern³ mit Innenmaß Länge x Breite x Höhe in cm: 589,5 x 235,0 x 239,2 (High Cube 269); das innere Volumen von 33,2 m³ wird zu 70 % mit Big-Bags befüllt, ein Big-Bag hat im Schnitt ein Volumen von 0,4 m³ (Erfahrungswert). Daraus ergibt sich eine Anzahl von ca. 58 Big-Bags pro Container. Es wird aus Erfahrung eine Schüttdichte für Betonbruch oder Bauschutt von 0,65 t/m³ unterstellt. Ein Big-Bag wird im Schnitt mit 250 kg bis 450 kg Betonbruch, Bauschutt oder Estrich befüllt. Daraus wurde eine durchschnittliche (konservative) Anzahl der zu transportierenden Big-Bags abgeleitet. Insgesamt werden rund 154 Big-Bags im Fall der Spalte 8 der StrlSchV sowie rund 1540 Big-Bags im Fall der Spalte 10 der StrlSchV auf der Deponie eingelagert.
- Im Fall der Freigabe nach Spalte 8 der StrlSchV ergeben sich somit rund drei Fahrten pro Jahr zur Deponie. Im Fall der Freigabe nach Spalte 10 der StrlSchV ergeben sich rund 27 Fahrten pro Jahr zur Deponie. Bei einer Transportzeit von einer Stunde für die Hinfahrt ergeben sich somit drei bzw. 27 Stunden Transportzeit.
- Für die Be- und Entladezeit in und aus dem Container werden zwei Minuten je Big-Bag unterstellt. Daraus ergeben sich bei 154 Big-Bags (Spalte 8 StrlSchV) 5,1 Stunden und bei 1540 Big-Bags (Spalte 10 der StrlSchV) 51,3 Stunden.
- Bei den Abfertigungszeiten im Deponieeingang werden überschlägig 30 Minuten je Container unterstellt, weil hier nur mit einer Eingangskontrolle des Containers zu rechnen ist. Daraus ergeben sich rund 1,5 Stunden im Fall der Spalte 8 sowie rund 15 Stunden im Fall der Spalte 10 der StrlSchV.
- Bei der Deponie-Einlagerung in der Kabine wird überschlägig eine Minute je Big-Bag angenommen, wobei es sich um ein Abladen mehrerer Big-Bags auf einmal in einem Deponiebereich handelt. Daraus ergeben sich 2,6 Arbeitsstunden im Fall der

³ <https://www.containerbasis.de/20-fuss-container/>

Spalte 8 sowie 25,6 Arbeitsstunden im Fall der Spalte 10 der StrISchV. Für die Einlagerung im Freien wird überschlägig 0,5 Minuten für das Hantieren mit einem Big-Bag unterstellt (Zeit z. B. beim Adjustieren des Big-Bags auf der Einlagerungsstelle), daraus ergeben sich 1,3 Stunden im Fall der Spalte 8 sowie 12,8 Stunden im Fall der Spalte 10 der StrISchV.

Begründung der Variation der Arbeitszeiten und Staubbelastung in den Anlagen der Mechanisch-Biologischen Vorbehandlung (MBV) auf der Deponie

In /SSK 06/ und /ÖKO 20/ wurde eine Expositionszeit von 1.000 Stunden im Jahr in einer MBV-Anlage bei einer angenommenen freigegebenen Menge von 1.000 Mg/a nach Spalte 10 der StrISchV angenommen. Die MBV-Anlage hat eine Jahreskapazität von 100.000 Mg, welche kompatibel mit der angesetzten Jahreskapazität der Referenzdeponie in /SSK 06/ von 60.000 Mg/a ist. Die Kapazität der MBV-Anlage wird im Folgenden nicht variiert, lediglich die Arbeitszeiten. Die Variation der Arbeitszeiten erfolgt aufgrund folgender Überlegungen:

- Es ist davon auszugehen, dass mehr Personal auf einer größeren Deponie mit einer MBV-Anlage im Schichtbetrieb arbeitet, daher werden die Arbeitsstunden auf die Hälfte, d. h. 400 h/a je Arbeiter, reduziert. Eine kleinere Deponie mit einer MBV-Anlage (Jahreskapazität von 10.000Mg) verfügt über weniger Personal, welches im Schichtbetrieb arbeitet, so dass die Arbeitszeiten auf rund 1.200 h/a je Arbeiter erhöht werden.
- Im Gegensatz zu anderen Bereichen auf der Deponie, wo mit Big-Bags hantiert wird (Eingangsbereich oder Einlagerung auf der Deponie), kann während der Arbeitsvorgänge in der MBV-Anlage nicht von einer vollständigen Staubvermeidung ausgegangen werden, daher wird der gleiche Wert der Staubkonzentration aus der /SSK 06/ für alle Rechenfälle übernommen.

3.3.2.1.2 Rechenfälle für die Müllverbrennungsanlage (MVA)

In /ÖKO 20/ wurde für die Referenz-Müllverbrennungsanlage in Anlehnung an die /SSK 06/ ein jährliches Massenaufkommen von 240.000 Mg/a angenommen. Für die hier untersuchten Rechenfälle werden jährliche Massenaufkommen von 100.000 und 700.000 Mg/a unterstellt und die Werte der anfallenden Verbrennungsrückstände (Schlacke, Stäube, REA-Gips, Schrott) aus dem Verhältnis der Massenaufkommen zu der Referenz-MVA abgeleitet. Die Rechenfälle für die Szenarien der MVA sind dann für diese zwei Optionen der Jahreskapazitäten jeweils für freigegebene Masse gemäß

Spalte 9 und 11 der StrISchV definiert. Für diese werden die Variationen der ausgewählten Parameter für die Szenarien der MVA für Beschäftigte und Bevölkerung festgelegt. In der folgenden Tab. 3.5 sind die Rechenfälle und die zugehörigen variierten Parameter in der Übersicht aufgeführt und im Weiteren die Ableitung der Parametervariationen beschrieben.

Tab. 3.5 Parameterwerte der MVA für die Rechenfälle 7 bis 10 /ÖKO 23/

* Aus Verhältnis relevanter Mengen zu der Jahreskapazität der MVA von 240.000 Mg/a /SSK 06/

Übergeordnete Parameterwerte	Wert			
	7	9	8	10
Rechenfall				
Jahreskapazität der MVA [Mg/a]	100.000		700.000	
für die Verbrennung freigegebene Masse [Mg/a]	100	1.000	100	1.000
Anfall an Schlacke* [Mg/a]	25.000		175.000	
Anfall an Stäuben* [Mg/a]	1.000		7.000	
Anfall an REA-Gips* [Mg/a]	100		700	
Anfall an Schrott* [Mg/a]	2.500		17.500	
Parameterwerte Transport zur MVA und Eingangsbereich				
Fahrzeit des Fahrers [h/a]	3	30	3	30
Transport zur MVA - Abfertigungszeit Ladevorgänge [h/a]	0,75	7,5	0,75	7,5
Arbeitszeit Eingangsbereich [h/a]	13,3	13,3	5	5
Keine Staubkonzentration - in Big-Bags angeliefert [g/m ³]	0,000			
Schlackenbunker und Schlackentransport				
Staubkonzentration in der Luft [g/m ³]	0,001			
Arbeitszeit äußere Exposition [h/a]	1330	1330	500	500
Arbeitszeit Inhalation [h/a]	133	133	50	50
Staubbunker und Staubtransport				
Staubkonzentration in der Luft [g/m ³]	0,001			
Staubbunker und Transport [h/a]	400	400	150	150
Staubbunker Inhalation [h/a]	67	67	25	25
Parameterwerte Müllbunker und Abfallaufgabe				
Staubkonzentration in der Luft [g/m ³]	0			
Müllbunker und Abfallaufgabe [h/a]	2000	2000	900	900
Arbeitszeit Verwertung				
Schlacke Staubkonzentration in der Luft [g/m ³]	0,001			
Verwertung Schlacke [h/a]	267	267	100	100
Verwertung Schrott [h/a]	2000	2000	1000	1000
Rea-Gips Staubkonzentration in der Luft [g/m ³]	0,0001			
Verwertung REA-Gips [h/a]	267	267	100	100

Begründung der Variation der Transport- und Arbeitszeiten in der MVA

Ähnlich wie im Fall der Beseitigung auf der Deponie lassen sich die Transportzeiten und Ladevorgänge folgendermaßen ableiten:

- Der Transport erfolgt mit einem 20-Fuß-Container mit Innenmaß Länge x Breite x Höhe in cm: 589,5 x 235,0 x 239,2 (High Cube 269); das innere Volumen von 33,2 m³ wird zu 70 % befüllt.
- Im Fall der Freigabe nach Spalte 9 (100 Mg/a) ergeben sich maximal drei Fahrten pro Jahr zur MVA mit einer Dauer von einer Stunde. Die Zeit für den Ladevorgang pro Fahrt wurde auf 0,5 Stunden geschätzt (Erfahrungswert), insgesamt also 1,5 h/a.
- Im Fall der Freigabe nach Spalte 11 (max. 1.000 Mg/a) ergeben sich maximal 30 Fahrten pro Jahr zur MVA. Die Zeit für die Ladevorgänge beträgt demnach 15 h/a.

Die Arbeitszeiten beim Umgang mit Abfällen innerhalb der MVA werden aufgrund folgender Überlegungen variiert:

- Es ist davon auszugehen, dass mehr Personal in einer größeren Anlage (MVA mit der Jahreskapazität von 700.000 Mg) im Schichtbetrieb arbeitet. Daher verbringt bei gleichbleibender Menge freigegebener Abfälle eine Einzelperson weniger Zeit mit dessen Bearbeitung, da sich mehrere Personen die Arbeitsschritte teilen. Folglich werden die Arbeitsstunden auf die Hälfte gegenüber der /SSK 06/ reduziert. Diese Reduktion wird auch für die Arbeitszeit für die Verwertung vorgenommen (Schlacke Schrott, REA-Gips).
- Bei einer kleineren MVA mit der Jahreskapazität von 100.000 Mg werden die Arbeitszeiten um ein Drittel gegenüber der /SSK 06/ erhöht. Diese Erhöhung wird auch für die Arbeitszeit für die Verwertung vorgenommen (Schlacke Schrott, REA-Gips).

3.3.2.1.3 Ergebnisse Beseitigung freigegebener Abfälle auf einer Deponie

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Rechenfälle RF 1, 2, 3, 3A, 4, 5, 5A und 6 angegeben und diskutiert /ÖKO 23/.

Die Freigabewerte ausgewählter Nuklide zu Spalte 8 sind in Tab. 3.6 und die der Spalte 10 der Tab. 3.7 zu entnehmen. In beiden Tabellen finden sich jeweils auch Angaben zu den geltenden Werten der Strahlenschutzverordnung und die – teils aus rechentechnischen, teils aus anderen dokumentierten Gründen – abweichenden Ergebnisse des

Referenzrechenfalls, der mit den Parametern nach /SSK 06/ berechnet wurde (vgl. Kapitel 3.3.2.1.1). Die Spalte „Abweichung vom Wert nach StrlSchV“ gibt das Verhältnis der mit Parametern der /SSK 06/ und den dokumentierten Rechenmodellen nach /ÖKO 20/ berechneten Freigabewerten zu den Freigabewerten der Strahlenschutzverordnung an.

Zur visuellen Lesbarkeit der Zahlen, sind diejenigen Werte, die aufgrund der veränderten Parameter im Rechenfall zu einer Absenkung des Freigabewerts führen, rot markiert. Dagegen sind diejenigen Freigabewerte, die gemäß des Rechenfalls angehoben werden müssten, grün markiert.

Es kann beobachtet werden, dass oftmals für die Festlegung des Freigabewerts neue Szenarien maßgebend sind, wenn die Parameter gemäß der Rechenfälle gewählt sind.

Spalte 8 (siehe Abb. 3.1)

Für die Radionuklide Mn-54, Co-60, Ag-108m+, Cs-137+, Ba-133, Pu-238, Pu-239, U-238+, Eu-152, Eu-154, Ac-227+, Am-241 und Pa-231 ist auffällig, dass im Referenzfall zur Berechnung der Freigabewerte nach Spalte 8 der Einlagerungsbereich den Freigabewert festlegt und sich dies durch die Festlegung der Rechenfälle weitgehend ändert: Durch den Einsatz von Big-Bags wird Staub in den Rechenfällen 1 bis 3 nur noch im Bereich der MBV freigesetzt, dieser Bereich wird dann maßgebend bei gleichzeitiger Anhebung des berechneten Freigabewerts aufgrund einer Herabsetzung der berechneten Dosis. Im Rechenfall 3A ist der Einsatz der Big-Bags nicht vorausgesetzt – hier ergeben sich durch geringe Arbeitszeiten im Bereich der MBV wiederum Verschiebungen in Richtung des Transportszenarios.

Die Absenkungen von Freigabewerten im Rechenfall 2 für die Nuklide H-3, C-14, Mn-54, Co-60, Sr-90+, Ag-108m, Cs-137+ und Ba-133 sind durch erhöhte Arbeitszeiten in der MBV oder durch erhöhten Klärschlammanfall bei größeren Deponiekapazitäten begründet.

Die Freigabewerte für die Radionuklide Cl-36, Ni-59, Tc-99 und I-129, die durch das Grundwasserszenario (Brunnen) festgelegt sind, bleiben in allen Rechenfällen unverändert.

Spalte 10 (siehe Abb. 3.1)

Für die Radionuklide Mn-54, Co-60, Cs-137+, Ba-133, Pu-238, Pu-239, Eu-152, Eu-154, Ac-227+ und Am-241, deren Freigabewerte nach Spalte 10 im Szenario Einlagerungsbereich maßgebend festgelegt sind, ergibt sich durch die Parametervariation nicht wie für die Spalte 8 eine Verschiebung hin zu höheren Freigabewerten durch die unterstellte Anlieferung in Big Packs. Dieser Effekt wird durch die in den Rechenfällen unterstellte Arbeitszeit und der damit verbundenen Direktstrahlung bei Mn-54, Co-60, Cs-137+, Ba-133, Eu-152 und Eu-154 kompensiert, und es ergeben sich im Vergleich zum Referenzfall abgesenkte Freigabewerte durch höhere berechnete Strahlenexpositionen. Einen bedeutenden Einfluss hat der Parameter der freigegebenen Masse von 1.000 Mg/a auf die Szenarien des Grundwassers (Brunnen) bei den Radionukliden U-238+ und Pa-231, für die dieses Szenario zusätzlich maßgebend wird. Im RF 5 wird auch die Oberflächenwassernutzung maßgebend (Ac-227+ und Pa-231).

Die Freigabewerte für die Radionuklide Cl-36, Ni-59, Tc-99 und I-129, die durch das Grundwasserszenario (Brunnen) festgelegt sind, bleiben in allen Rechenfällen auch hier unverändert.

Tab. 3.6 Neuberechnung und Vergleich der Freigabewerte der Spalte 8

Abgesenkte Freigabewerte gegenüber Referenz /SSK 06/ sind rot, angehobene Freigabewerte grün markiert

Nuklid	Spalte 8 StrISchV	FGW nach /SSK 06/	Abw. vom Wert nach StrISchV	bestimmen- des Szenario ALT	RF 1	bestimmen- des Szenario RF 1	RF 2	bestimmen- des Szenario RF 2	RF 3	bestimmen- des Szenario RF 3	RF 3A	bestimmen- des Szenario RF 3A
H-3	6,00E+04	6,41E+04	1,07	MBV	8,01E+04	MBV	5,34E+04	MBV	1,60E+05	MBV	1,60E+05	MBV
C-14	4,00E+03	4,53E+03	1,13	MBV	5,66E+03	MBV	3,78E+03	MBV	1,13E+04	MBV	1,13E+04	MBV
Cl-36	3,00E+00	1,45E+00	0,48	Brunnen	1,45E+00	Brunnen	1,45E+00	Brunnen	1,45E+00	Brunnen	1,45E+00	Brunnen
Mn-54	1,00E+01	5,46E+00	0,55	Einlagerung	8,68E+00	MBV	5,78E+00	MBV	1,74E+01	MBV	1,74E+01	MBV
Ni-59	3,00E+03	2,35E+04	7,84	Brunnen	2,35E+04	Brunnen	1,84E+04	Klärschlamm	2,35E+04	Brunnen	2,35E+04	Brunnen
Co-60	6,00E+00	1,84E+00	0,31	Einlagerung	2,39E+00	MBV	1,60E+00	MBV	4,79E+00	MBV	4,79E+00	MBV
Sr-90+	6,00E+00	1,59E+01	2,66	Klärschlamm	1,59E+01	Klärschlamm	5,47E+00	Klärschlamm	2,40E+01	Klärschlamm	2,40E+01	Klärschlamm
Tc-99	7,00E+00	1,63E+00	0,23	Brunnen	1,63E+00	Brunnen	1,63E+00	Brunnen	1,63E+00	Brunnen	1,63E+00	Brunnen
Ag-108m+	9,00E+00	2,77E+00	0,31	Einlagerung	4,52E+00	MBV	3,01E+00	MBV	9,03E+00	MBV	9,03E+00	MBV
I-129	6,00E-01	9,85E-02	0,16	Brunnen	9,85E-02	Brunnen	9,85E-02	Brunnen	9,85E-02	Brunnen	9,85E-02	Brunnen
Cs-137+	1,00E+01	7,96E+00	0,80	Einlagerung	1,24E+01	MBV	8,28E+00	MBV	2,48E+01	MBV	2,48E+01	MBV
Ba-133	4,00E+01	1,24E+01	0,31	Einlagerung	2,82E+01	MBV	1,88E+01	MBV	4,61E+01	Einlagerung	4,60E+01	Einlagerung
Pu-238	1,00E+00	3,93E+00	3,93	Einlagerung	1,09E+01	MBV	7,26E+00	MBV	2,18E+01	MBV	5,45E+00	Transport
Pu-239	1,00E+00	3,68E+00	3,68	Einlagerung	1,02E+01	MBV	6,79E+00	MBV	2,04E+01	MBV	5,11E+00	Transport
U-238+	6,00E+00	1,90E+01	3,17	Einlagerung	5,04E+01	MBV	3,36E+01	MBV	5,42E+01	Brunnen	2,85E+01	Transport
Eu-152	1,00E+01	4,06E+00	0,41	Einlagerung	5,85E+00	MBV	3,90E+00	MBV	1,17E+01	MBV	1,17E+01	MBV
Eu-154	1,00E+01	3,69E+00	0,37	Einlagerung	5,23E+00	MBV	3,48E+00	MBV	1,05E+01	MBV	1,05E+01	MBV
Ac-227+	1,00E-01	1,90E-01	1,90	Einlagerung	5,35E-01	MBV	3,57E-01	MBV	1,07E+00	MBV	2,59E-01	Transport
Am-241	1,00E+00	4,34E+00	4,34	Einlagerung	1,21E+01	MBV	8,06E+00	MBV	2,42E+01	MBV	6,05E+00	Transport
Pa-231	1,00E-01	1,18E+00	11,85	Einlagerung	3,22E+00	MBV	2,15E+00	MBV	6,44E+00	MBV	1,82E+00	Transport

Tab. 3.7 Neuberechnung und Vergleich der Freigabewerte der Spalte 10

Abgesenkte Freigabewerte gegenüber Referenz /SSK 06/ sind rot, angehobene Freigabewerte grün markiert

Nuklid	Spalte 10 StrlSchV	FGW nach /SSK 06/	Abw. vom Wert nach StrlSchV	bestimmen- des Szenario ALT	RF 4	bestimmen- des Szenario RF 4	RF 5	bestimmen- des Szenario RF 5	RF 5A	bestimmen- des Szenario RF 5A	RF 6	bestimmen- des Szenario RF 6
H-3	6,00E+03	6,41E+03	1,07	MBV	8,01E+03	MBV	5,34E+03	MBV	5,34E+03	MBV	1,60E+04	MBV
C-14	4,00E+02	4,53E+02	1,13	MBV	5,66E+02	MBV	3,78E+02	MBV	3,78E+02	MBV	1,13E+03	MBV
Cl-36	3,00E-01	1,45E-01	0,48	Brunnen	1,45E-01	Brunnen	1,45E-01	Brunnen	1,45E-01	Brunnen	1,45E-01	Brunnen
Mn-54	6,00E+00	5,46E+00	0,91	Einlagerung	2,16E+00	Einlagerung	2,16E+00	Einlagerung	2,16E+00	Einlagerung	2,16E+00	Einlagerung
Ni-59	3,00E+02	2,35E+03	7,84	Brunnen	2,35E+03	Brunnen	1,84E+03	Klärschlamm	1,84E+03	Klärschlamm	2,35E+03	Brunnen
Co-60	2,00E+00	1,84E+00	0,92	Einlagerung	7,38E-01	Einlagerung	7,38E-01	Einlagerung	7,38E-01	Einlagerung	7,38E-01	Einlagerung
Sr-90+	6,00E-01	1,59E+00	2,66	Klärschlamm	1,59E+00	Klärschlamm	5,47E-01	Klärschlamm	5,47E-01	Klärschlamm	2,40E+00	Klärschlamm
Tc-99	7,00E-01	1,63E-01	0,23	Brunnen	1,63E-01	Brunnen	1,63E-01	Brunnen	1,63E-01	Brunnen	1,63E-01	Brunnen
Ag-108m+	1,00E+00	1,70E+00	1,70	Brunnen	1,08E+00	Einlagerung	7,95E-01	Klärschlamm	7,95E-01	Klärschlamm	1,08E+00	Einlagerung
I-129	6,00E-02	9,85E-03	0,16	Brunnen	9,85E-03	Brunnen	9,85E-03	Brunnen	9,85E-03	Brunnen	9,85E-03	Brunnen
Cs-137+	8,00E+00	7,96E+00	0,99	Einlagerung	3,13E+00	Einlagerung	3,13E+00	Einlagerung	3,13E+00	Einlagerung	3,13E+00	Einlagerung
Ba-133	1,00E+01	1,24E+01	1,24	Einlagerung	4,69E+00	Einlagerung	4,69E+00	Einlagerung	4,69E+00	Einlagerung	4,69E+00	Einlagerung
Pu-238	1,00E+00	3,93E+00	3,93	Einlagerung	1,09E+01	MBV	7,26E+00	MBV	5,41E-01	Transport	2,18E+01	MBV
Pu-239	5,00E-01	3,68E+00	7,36	Einlagerung	1,02E+01	MBV	6,79E+00	MBV	5,08E-01	Transport	2,04E+01	MBV
U-238+	6,00E-01	5,42E+00	9,04	Brunnen	5,42E+00	Brunnen	5,42E+00	Brunnen	2,83E+00	Transport	5,42E+00	Brunnen
Eu-152	4,00E+00	4,06E+00	1,01	Einlagerung	1,60E+00	Einlagerung	1,60E+00	Einlagerung	1,60E+00	Einlagerung	1,60E+00	Einlagerung
Eu-154	4,00E+00	3,69E+00	0,92	Einlagerung	1,46E+00	Einlagerung	1,46E+00	Einlagerung	1,46E+00	Einlagerung	1,46E+00	Einlagerung
Ac-227+	1,00E-01	1,90E-01	1,90	Einlagerung	5,35E-01	MBV	2,19E-01	Oberfl.-wasser	2,58E-02	Transport	1,07E+00	MBV
Am-241	1,00E+00	4,34E+00	4,34	Einlagerung	1,21E+01	MBV	8,06E+00	MBV	6,02E-01	Transport	2,42E+01	MBV
Pa-231	1,00E-01	1,16E+00	11,56	Brunnen	1,16E+00	Brunnen	7,27E-01	Oberfl.-wasser	1,81E-01	Transport	1,16E+00	Brunnen

3.3.2.1.4 Ergebnisse Beseitigung freigegebener Abfälle in einer Müllverbrennungsanlage (MVA)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Rechenfälle RF 7, 8, 9 und 10 angegeben und diskutiert /ÖKO 23/.

Die Freigabewerte ausgewählter Nuklide zu Spalte 9 sind der Tab. 3.8 und die der Spalte 11 der Tab. 3.9 zu entnehmen. In beiden Tabellen finden sich jeweils auch Angaben zu den geltenden Werten der Strahlenschutzverordnung und die – teils aus rechen-technischen, teils aus anderen dokumentierten Gründen – abweichenden Ergebnisse des Referenzrechenfalls, der mit den Parametern nach /SSK 06/ berechnet wurde (vgl. Kapitel 3.3.2.1.1). Die Spalte „Abweichung vom Wert nach StrlSchV“ gibt das Verhältnis der mit Parametern der /SSK 06/ und den dokumentierten Rechenmodellen nach /ÖKO 20/ berechneten Freigabewerten zu den Freigabewerten der Strahlenschutzverordnung an.

Zur besseren Lesbarkeit der Zahlen, sind auch hier diejenigen Werte, die aufgrund der veränderten Parameter im Rechenfall zu einer Absenkung des Freigabewerts führen, rot markiert. Dagegen sind diejenigen Freigabewerte, die gemäß des Rechenfalls angeho-ben werden müssten, grün markiert.

Zusätzlich ergibt sich bei der Modellierung der Freigabewerte bei der Beseitigung in einer MVA die Besonderheit, dass der entstehende Abfall nach Verbrennung, die Schlacke, wieder auf einer Deponie entsorgt werden muss. Die so zu berechnenden Freigabewerte sind also im Deponiemodell festgelegt. Für Radionuklide, bei denen diese Festlegung maßgebend ist, sind die Werte in den nachfolgenden Tabellen orange markiert.

Es kann beobachtet werden, dass oftmals für die Festlegung des Freigabewerts neue Szenarien maßgebend sind, wenn die Parameter gemäß der Rechenfälle gewählt sind.

Für H-3 und C-14 bleiben die Freigabewert Spalte 9 und 11 bestimmt durch die Abluft der MVA unverändert. Für Cl-36, Ni-59, Sr-90+ Tc-99 und I-129 ist das Modell der MVA durch das Deponiemodell und der dort festgelegten Szenarien gedeckelt.

Spalte 9 (siehe Abb. 3.1)

Für die Radionuklide Pu-238, Pu-239, U-238+, Ac-227+, Am-241, Pa-231, für die im Referenzfall der Eingangsbereich maßgebend ist, verschiebt sich in einigen Fällen aufgrund der gewählten Arbeitszeiten und der Staubfreiheit im Eingangsbereich (Big-Bags) das bestimmende Szenario zum Szenario Schlackenbunker und -transport. Im Rechenfall 7 (kleinere MVA) ergeben sich höhere Arbeitszeiten von Einzelpersonen beim Transport von Abfällen abgesenkte Freigabewerte.

Spalte 11 (siehe Abb. 3.1)

Für die Radionuklide Mn-54, Co-60, Ag-108m+, Cs-137+, Ba-133, Eu-152, Eu-154 ergeben sich abgesenkte Freigabewerte bedingt durch die in der kleineren MVA gewählten Arbeitszeiten bei Transport und Arbeiten im Schlacke- oder Staubbunker. Für die Radionuklide Pu-238, Pu-239, U-238+, Ac-227+, Am-241 und Pa-231 macht sich die Dosisreduktion im Eingangsbereich durch die Anwendung von Big-Bags in allen Fällen rechnerisch bemerkbar.

Tab. 3.8 Neuberechnung und Vergleich der Freigabewerte der Spalte 9

Abgesenkte Freigabewerte gegenüber Referenz /SSK 06/ sind rot, angehobene Freigabewerte grün markiert.

FGW, die aufgrund der Schlackeeinlagerung auf einer Deponie im Deponiemodell maßgebend festgelegt sind, sind orange markiert.

Nuklid	Spalte 9 StrISchV	FGW nach /SSK 06/	Abw. vom Wert nach StrISchV	bestimmendes Szenario ALT	RF 7	bestimmendes Szenario RF 7	RF 8	bestimmendes Szenario RF 8
H-3	1,00E+06	1,0E+05	0,10	Abluft	1,0E+05	Abluft	1,0E+05	Abluft
C-14	1,00E+04	1,7E+03	0,17	Abluft	1,7E+03	Abluft	1,7E+03	Abluft
Cl-36	3,00E+00	1,6E+04	5446	Brunnen	-	Brunnen	-	Brunnen
Mn-54	1,00E+01	7,6E+00	0,76	Transport	1,1E+01	Eingangsbereich	3,00E+01	Eingangsbereich
Ni-59	1,00E+04	1,0E+05	10,04	Klärschlamm	-	Klärschlamm	-	Klärschlamm
Co-60	7,00E+00	2,4E+00	0,34	Transport	3,5E+00	Eingangsbereich	9,35E+00	Eingangsbereich
Sr-90+	4,00E+01	1,1E+03	27,06	Brunnen	-	Brunnen	-	Brunnen
Tc-99	6,00E+00	2,6E+04	4339	Brunnen	-	Brunnen	-	Brunnen
Ag-108m+	1,00E+00	4,3E+00	4,28	Transport	3,21E+00	Staub	1,69E+01	Eingangsbereich
I-129	6,00E-01	8,5E+02	1415	Brunnen	-	Brunnen	-	Brunnen
Cs-137+	1,00E+01	1,2E+01	1,18	Transport	8,87E+00	Staub	4,68E+01	Eingangsbereich
Ba-133	8,00E+01	2,6E+01	0,33	Transport	4,02E+01	Eingangsbereich	1,07E+02	Eingangsbereich
Pu-238	1,00E+00	2,8E+00	2,78	Eingangsbereich	2,60E+02	Schlacke (Arbeiter)	4,86E+03	Schlacke (Arbeiter)
Pu-239	1,00E+00	2,6E+00	2,60	Eingangsbereich	2,44E+02	Schlacke (Arbeiter)	4,55E+03	Schlacke (Arbeiter)
U-238+	1,00E+01	1,4E+01	1,44	Eingangsbereich	6,27E+02	Eingangsbereich	1,67E+03	Eingangsbereich
Eu-152	1,00E+01	5,7E+00	0,57	Transport	8,55E+00	Eingangsbereich	2,27E+01	Eingangsbereich
Eu-154	1,00E+01	5,1E+00	0,51	Transport	7,60E+00	Eingangsbereich	2,02E+01	Eingangsbereich
Ac-227+	1,00E-01	1,3E-01	1,32	Eingangsbereich	1,06E+01	Schlacke (Arbeiter)	1,09E+02	Eingangsbereich
Am-241	1,00E+00	3,1E+00	3,09	Eingangsbereich	2,58E+02	Schlacke (Arbeiter)	4,82E+03	Schlacke (Arbeiter)
Pa-231	1,00E+00	9,2E-01	0,92	Eingangsbereich	3,86E+01	Schlacke (Arbeiter)	1,04E+02	Eingangsbereich

Tab. 3.9 Neuberechnung und Vergleich der Freigabewerte der Spalte 11

Abgesenkte Freigabewerte gegenüber Referenz /SSK 06/ sind rot, angehobene Freigabewerte grün markiert.

FGW, die aufgrund der Schlackeeinlagerung auf einer Deponie im Deponiemodell maßgebend festgelegt sind, sind orange markiert.

Nuklid	Spalte 11 StrlSchV	FGW nach /SSK 06/	Abw. vom Wert nach StrlSchV	bestimmendes Szenario ALT	RF 9	Bestimmendes Szenario RF 9	RF 10	Bestimmendes Szenario RF 10
H-3	1,00E+06	1,0E+04	0,01	Abluft	1,0E+04	Abluft	1,0E+04	Abluft
C-14	1,00E+04	1,7E+02	0,02	Abluft	1,7E+02	Abluft	1,7E+02	Abluft
Cl-36	3,00E-01	9,6E+03	31942	Brunnen	-	Brunnen	-	Brunnen
Mn-54	6,00E+00	7,6E+00	1,26	Transport	4,08E+00	Schlacke (Bev.)	7,58E+00	Transport
Ni-59	3,00E+03	1,0E+05	33,47	Klärschlamm	-	Klärschlamm	-	Klärschlamm
Co-60	2,00E+00	2,0E+00	1,02	Schlacke	8,54E-01	Schlacke (Bev.)	2,36E+00	Transport
Sr-90+	4,00E+00	1,1E+03	270,58	Brunnen	-	Brunnen	-	Brunnen
Tc-99	6,00E-01	2,6E+04	43397	Brunnen	-	Brunnen	-	Brunnen
Ag-108m+	1,00E+00	1,0E+00	1,03	Staub	3,21E-01	Staub	3,04E+00	REA-Gips
I-129	6,00E-02	1,1E+02	1872	Brunnen	-	Brunnen	-	Brunnen
Cs-137+	3,00E+00	2,8E+00	0,95	Staub	8,87E-01	Staub	8,78E+00	REA-Gips
Ba-133	1,00E+01	2,0E+01	2,02	Schlacke (Arbeiter)	7,84E+00	Schlacke (Arbeiter)	2,60E+01	Transport
Pu-238	1,00E+00	2,8E+00	2,78	Eingangsbereich	2,60E+01	Schlacke (Arbeiter)	4,86E+02	Schlacke (Arbeiter)
Pu-239	1,00E+00	2,6E+00	2,60	Eingangsbereich	2,44E+01	Schlacke (Arbeiter)	4,55E+02	Schlacke (Arbeiter)
U-238+	5,00E+00	1,4E+01	2,87	Eingangsbereich	7,15E+01	Schlacke (Arbeiter)	4,15E+02	Transport
Eu-152	4,00E+00	4,8E+00	1,19	Schlacke (Bev.)	1,98E+00	Schlacke (Bev.)	5,74E+00	Transport
Eu-154	4,00E+00	4,3E+00	1,08	Schlacke (Bev.)	1,80E+00	Schlacke (Bev.)	5,11E+00	Transport
Ac-227+	1,00E-01	1,3E-01	1,32	Eingangsbereich	1,06E+00	Schlacke (Arbeiter)	1,98E+01	Schlacke (Arbeiter)
Am-241	1,00E+00	3,1E+00	3,09	Eingangsbereich	2,58E+01	Schlacke (Arbeiter)	4,82E+02	Schlacke (Arbeiter)
Pa-231	1,00E-01	9,2E-01	9,20	Eingangsbereich	3,86E+00	Schlacke (Arbeiter)	2,53E+01	Transport

3.3.2.2 Neuberechnung des Pfades Klärschlammverordnung

Das Aufbringen von Klärschlamm auf ackerbaulich genutzte Flächen zur Lebensmittel- und Futtermittelerzeugung ist im Wesentlichen durch die Klärschlammverordnung geregelt /AbfklärV 20/. Die Anpassung gegenüber /ÖKO 20/ wurde folgendermaßen vorgenommen. Der Transfer durch Futterpflanzen in Milch und Fleisch wurde in dem Modell nicht mehr berücksichtigt, da das Ausbringen auf Flächen zur Futtermittelerzeugung (Zuckerrüben und Mais) nach §15 Abs. 5 AbfklärV nicht zulässig ist.

Es ergeben sich entsprechend der Berechnungen des Öko-Institutes folgende Rechen- ergebnisse (siehe Tab. 3.10), wobei die Abweichung als Quotient des neu berechneten Freigabewerts (FGW) zum Referenzrechenfall in Prozent angegeben ist /ÖKO 23/.

Tab. 3.10 Abweichungen bei der Neuberechnungen der Spalte 10 über den Pfad der Klärschlammverwertung ohne Fleisch und Milchverzehr

Nuklid	FGW nach /SSK 06/ in Bq/g ⁴	FGW NEU in Bq/g	Abweichung in %
H-3		-	
C-14		-	
Co-60	2,38E+03	2,65E+03	111
Cl-36	1,25E+01	5,86E+01	470
Mn-54	1,69E+03	1,75E+03	104
Ni-59	9,12E+03	2,01E+04	220
Sr-90+	1,59E+00	1,84E+00	115
Tc-99	3,01E+01	5,56E+01	185
Ag-108m+	1,96E+00	1,10E+01	561
I-129	2,25E+01	3,37E+01	150
Cs-137+	1,50E+02	3,49E+02	232
Ba-133	4,14E+02	4,27E+02	103
Pu-238	1,46E+03	1,46E+03	100
Pu-239	9,09E+02	9,11E+02	100
U-238+	2,37E+02	2,46E+02	104
Eu-152	3,28E+04	3,43E+04	105
Eu-154	2,70E+04	2,82E+04	105
Ac-227+	7,73E+00	1,13E+01	146
Am-241	1,49E+03	1,50E+03	101
Pa-231	6,40E+00	6,65E+00	104

⁴ Die hier berechneten FGW sind nicht die maßgeblichen FGW für die Spalte 10, bilden aber den entsprechenden Vergleichswert für die Betrachtung des Einflusses durch Weglassen des Transfers in Milch und Fleisch.

Im Ergebnis zeigt sich für einige Radionuklide, bei denen die Abweichungen über dem Faktor 2 liegen, dass der dominierende Dosisanteil durch den Milch- und Fleischverzehr über den Pfad der Ingestion infolge von durch Klärschlamm gedüngten Ackerbau erfolgt. Vergleicht man für die Radionuklide ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{137}Cs die Tab. 3.10 mit der Tab. 3.7, so erkennt man jedoch, dass der Pfad „Deponie - Bevölkerung – Klärschlammverwertung“ für die Festlegung der Freigabewerte nicht maßgebend ist. Da sich der berechnete Freigabewert, wie er sich aus dem Pfad „Deponie - Bevölkerung – Klärschlammverwertung“ ergeben würde, durch die angesprochene Veränderung nur erhöhen kann, bleibt er durch die jeweils anderen Pfade bestimmt und verändert sich nicht.

Maßgebend ist der Pfad „Deponie - Bevölkerung - Klärschlammverwertung“ lediglich für das Radionuklid ^{90}Sr . Hier beträgt der Neuberechnete Freigabewert von 1,84 Bq/g relativ betrachtet 115 % des vorherig berechneten Werts von 1,59 Bq/g. Eine Abweichung in dieser Größenordnung ist geringer als die bestehende Abweichung zum Wert von 0,6 Bq/g der /SSV 21/ und hat daher keine entscheidenden Auswirkungen auf die bestehenden Freigabewerte.

3.3.2.3 Kritische Reinheit geschredderter Schrotte aus der MVA

Eisenmetalle, die vor oder während des Verbrennungsprozesses in einer MVA aussortiert werden, werden weitgehend zurückgewonnen und vor der erneuten Verwendung eingeschmolzen und aufbereitet. Entsprechend der europäischen Stahlschrottsortenliste /BDSV 95/ ist für „Geschredderten Schrott aus der Müllverbrennung“ ein Eisen- (Fe-)gehalt von mindestens 92 % gefordert. Die bisherigen Modelle gemäß /THI 04/, /SSK 06/ nehmen daher jeweils diesen „Mindest-Wert“ im Szenario S3 „Schrott Verwertung“ an und rechnen mit einem Vermischungsfaktor $f = 0,25$ bei der Aufarbeitung des Metallschrotts um den gemäß EU-Verordnung Nr. 333/2011 geforderten Fe-Gehalt von mindestens 98 % zu erreichen. Durch eine höhere Reinheit des geschredderten MVA-Stahlschrotts, z. B. infolge technologischer Entwicklungen, ist als Folge eine geringere Vermischung denkbar, um den geforderten Fe-Gehalt zu erlangen, und somit ein höherer Nuklidanteil im Endprodukt.

Da hierzu keine expliziten Praxiserfahrungen vorliegen, sind die folgenden Berechnungen theoretischer Natur. Gesucht wurde dabei der Grad an Reinheit des „Geschredderten Schrott aus der Müllverbrennung“, bei dem der bisherige Freigabewert der Tab. 1, Anlage 4 für die für dieses Szenario maßgeblichen Nuklide ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{99}Tc und ^{108}Ag erreicht würde. Bei einer Überschreitung des berechneten Reinheitsgrads

würde es zu Änderungen des tabellierten Freigabewertes kommen. Dabei ist es unerheblich, welches Szenario dem aktuellen Freigabewert zugrunde liegt.

Tab. 3.11 Abweichung Schrott Szenario S3

Nuklid	FGW S3 Spalte 11	FGW Spalte 11		FGW S3 Spalte 9	FGW Spalte 9	
	neu	StrlSchV	Abweichung	neu	StrlSchV	Abweichung
Mn-54	9,98	6	1,66	99,8	10	9,98
Co-60	2,31	2	1,15	23,1	7	3,3
Tc-99	6,17E+09	0,6	1,03E+10	6,17E+10	6	1,03E+10
Ag-108m	353,86	1	354	3538,6	10	354

Die Tab. 3.11 zeigt zunächst als Ergebnis die Abweichung der Gegenüberstellung des jeweiligen Freigabewertes der Tab. 1, Anlage 4 mit dem für das Szenario S3 berechneten Freigabewert. Sowohl für die Spalte 11 als auch für die Spalte 9, ist das Szenario S3 bislang nicht maßgeblich, jedoch liegt Co-60 am nächsten an dem bisherigen (maßgeblichen) Freigabewerten (Abweichung 1,15 für Spalte 11 und 3,3 für Spalte 9). Da der Vermischungsfaktor linear in die Berechnung der FGW eingeht, würde das Szenario S 3 infolge einer Erhöhung der Reinheit und der damit verbundenen Reduzierung der Vermischung als erstes für Co-60 kritisch werden.

Der kritische Vermischungsfaktor f_{krit} berechnet sich aus dem Produkt der Abweichung (hier 1,15 für Co-60) multipliziert mit 0,25 und ergibt für Co-60 $f_{krit} = 0,288$. D. h. ab einem Mischungsverhältnis größer 0,288 würde das Szenario S3 für die Freigabewerte der Spalte 11 maßgeblich und der neue Freigabewert durch Co-60 bestimmend. Um den nach EU-Verordnung Nr. 333/2011 geforderten Fe-Gehalt von min. 98 % zu erreichen ist in diesem Fall eine Fe-Reinheit im geschredderten Metallschrott von 93,1 % ausreichend.

Gleiches tritt für Spalte 9 ein, wenn der „Geschredderte Schrott aus der Müllverbrennung“ einen Fe-Gehalt von mehr als 97,6 % aufweist.

3.3.2.4 Auswirkungen des Lagrange-Partikel-Modells

Die Änderungen in der neuen AVV Tätigkeiten sind sehr umfangreich und betreffen u. a. die folgenden für die Vergleichsrechnungen berücksichtigten Punkte:

- Das Lagrange-Partikel-Modell löst das bisherige Gauß-Fahnenmodell ab.
- Es gibt nun zwei Betriebsmodi
 - Prospektiv: im Rahmen von Genehmigungs- oder Anzeigeverfahren und
 - Retrospektiv: zur Ermittlung der durch bereits genehmigte oder angezeigte Tätigkeiten erhaltenen Exposition.
- Es werden keine Organdosen mehr berechnet.
- Es werden nuklid- und pfadspezifische Faktoren bei prospektiver Vorgehensweise verwendet.
- Dosiswerte werden nun für die repräsentative Person (früher Referenzperson) berechnet. Das 95. Perzentil der jährlichen Verzehrsmengen gilt nur noch für die dosisdominierende Lebensmittelgruppe.
- Die Berücksichtigung mehrerer Quellen ist möglich.
- Reale Nutzungen bzw. Nutzungsmöglichkeiten können berücksichtigt werden (Landnutzungskataster LBM-DE, besondere Gebiete und Aufteilung der Expositionszeiten).
- Abschirmung von Gebäuden bei Gammastrahlung wird angegeben.
- Es existieren nun verbindliche Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch (siehe Kapitel 3.3.2.5),
- Teilweise gibt es Änderungen/Anpassungen in den Gleichungen zur Expositionsermittlung.
- Die Berechnungen werden nun mit geänderten Parametern für verschiedene Partikelgrößen durchgeführt.
- Einzelne Parameter wurden geändert.

In der GRS wurde aufgrund der vielfachen Änderungen ein neues Dosismodell zu der AVV Tätigkeiten entwickelt und in diesem Vorhaben angewendet. Zu prüfen war, inwieweit es infolge der neuen Anforderungen in der AVV zu Änderungen bei den vorliegenden Nukliden gegenüber der alten Version kommt.

Die Ausbreitungsrechnungen wurden mit der neuesten Version des Lagrange-Partikel-Modells ARTM (3.0) durchgeführt. Für alle Nuklide wurde eine Einheitsfreisetzung von 1 Bq/s in der Quellhöhe von 50 m über Grund angenommen. Die Partikelklasse bei Aerosolen wurde mit 2 angenommen ($< 10 \mu\text{m}$). Als meteorologischer Antrieb wurde der als repräsentativ bewertete Datensatz von Konrad aus dem Jahr 2006 verwendet.

Es ergaben sich daraus horizontale Verteilungen der Konzentrationen, der nassen und trockenen Depositionsraten sowie des Gamma-Ausbreitungsfaktors.

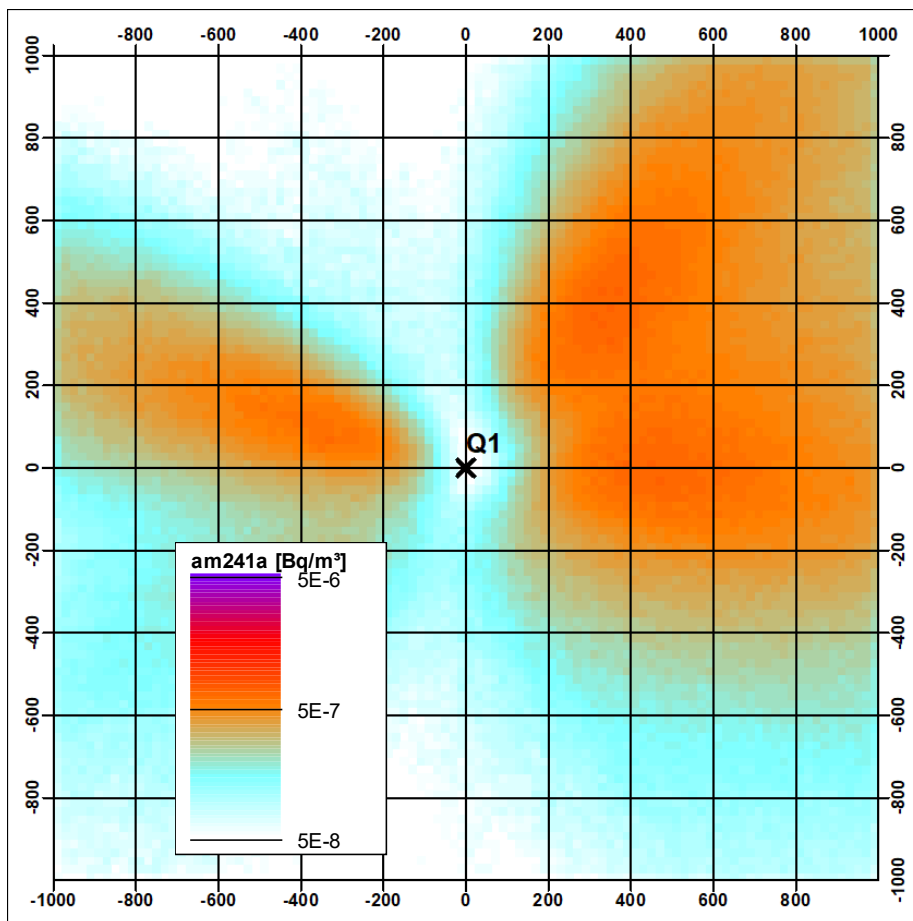


Abb. 3.5 Bodennahe Konzentration vom Am-241 in Bq/m^3 gerechnet mit der neuesten Version des Lagrange-Partikel-Modells ARTM (3.0)

Mit diesen Verteilungen wurden zum einen mit dem alten Modell der AVV zu § 47 der StrlSchV von 2012 und zum anderen mit dem neuen Dosismodell der GRS zu der AVV

Tätigkeiten die zu erwartenden Expositionen der Bevölkerung berechnet und miteinander verglichen.

Tab. 3.12 Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem neuen und alten Dosismodell der GRS in Bezug auf die Änderungen der neuen AVV Tätigkeiten

Nuklid	FGW [Bq/g]	Dosis alt [Sv]	Dosis neu [Sv]	Abweichung
AC-227	1,0E-01	1,29E-05	1,41E-05	109,1%
AM-241	1,0E+00	1,37E-05	1,28E-05	93,6%
BA-133	8,0E+01	4,95E-05	2,19E-05	44,4%
CL-36	3,0E+00	1,27E-04	4,33E-06	3,4%
CO-60	7,0E+00	1,21E-05	5,35E-06	44,2%
CS-137	1,0E+01	1,78E-05	5,97E-06	33,5%
C-14	1,0E+04	1,74E-05	1,09E-05	62,4%
EU-152	1,0E+01	1,64E-05	6,52E-06	39,8%
EU-154	1,0E+01	1,31E-05	5,47E-06	41,8%
H-3	1,0E+06	1,24E-04	9,85E-05	79,6%
I-129	6,0E-01	3,53E-06	2,01E-06	56,9%
MN-54	1,0E+01	1,05E-06	3,93E-07	37,4%
NI-59	1,0E+04	1,22E-04	8,39E-05	68,7%
PA-231	1,0E+00	5,40E-05	4,62E-05	85,6%
PU-238	1,0E+00	1,47E-05	1,37E-05	93,0%
PU-239	1,0E+00	1,55E-05	1,44E-05	92,8%
SR-90	4,0E+01	2,68E-04	8,08E-05	30,2%
TC-99	6,0E+00	4,42E-06	6,08E-06	137,5%
U-238	1,0E+01	1,60E-05	1,30E-05	81,6%

Die in Tab. 3.12 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich für die meisten Nuklide eine deutliche Reduzierung der Dosiswerte durch die Anwendung der neuen AVV ergibt. Ursachen hierfür sind vor allem,

- dass das 95. Perzentil der jährlichen Verzehrsmengen nur noch für die dosisdominierende Lebensmittelgruppe berechnet wird und
- bei der Gamma-Submersion und der Gamma-Bodenstrahlung eine Abschirmung bei Aufenthalt in Gebäuden erfolgt.

Im Fall des Ac-227 und Tc-99 ergibt sich durch die Erhöhung der Transferfaktoren ein größerer Beitrag durch die Ingestionsdosis. Die auffällige Reduktion der Dosis beim Cl-36 ergibt sich infolge eines deutlich schnelleren Abbaus im Boden durch die Änderung der Verweilkonstante aufgrund des Transports in tiefere Bodenschichten.

Die Summe über alle Nuklide bei Freisetzung des jeweiligen Freigabewertes zur spezifischen Freigabe durch Verbrennung ergibt etwa eine Halbierung des Dosiswertes. Da hier zur Vereinfachung und zur Transparenz des Rechenverfahrens keine Rückhaltung oder Partitionierung unterstellt wurde, dienen diese absoluten Dosiswerte nicht zur Bestimmung von realen Dosen der Bevölkerung. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass durch die Anwendung der Änderungen der AVV insbesondere mit Blick auf die Verwendung des Lagrange-Partikel-Modells nicht mit Änderungen der Freigabewerte zu rechnen ist.

3.3.2.5 Berechnung der Freigabewerten unter Berücksichtigung aktualisierter Dosiskoeffizienten des Muttermilchpfades gemäß AVV Tätigkeiten

Im Rahmen der Verifikation der bisherigen Berechnungsgrundlagen der Freigabewerte wird im Folgenden auf den aktualisierten Stand von Wissenschaft und Technik eingegangen, indem die AVV Tätigkeiten /AVV 20/ herangezogen wird. Im Ergebnis der Fachgespräche zwischen der GRS und dem Öko-Institut wurden die folgenden Änderungen gegenüber den bislang in Anlehnung an frühere Berechnungsgrundlagen gewählten Ansätze durch das Öko-Institut untersucht /ÖKO 23/.

Stehen für ein Radionuklid aktualisierte Dosiskoeffizienten für die Ingestion $g_{g,r,eff}^{MM}$ und Inhalation $g_{h,r,eff}^{MM}$ von Radionukliden über den Muttermilchpfad zur Verfügung, so sind diese nach Tab. 2 auf S. 69 /AVV 20/ zu verwenden.

Bei Radionukliden, für die diese Faktoren gegeben sind, ersetzen sie die bislang verwendeten Transferfaktoren der Inhalation $T_r^{MM,h}$ und Ingestion $T_r^{MM,g}$ entsprechend der Tab. 5 auf S. 78 /AVV 20/.

Die folgenden Werte der Tab. 3.13 werden in das Berechnungsprogramm des Öko-Instituts neu übernommen (liegen mehrere Werte für verschiedene Aggregationszustände vor, so wird konservativ der höchste Wert genommen).

Tab. 3.13 Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion oder Inhalation durch die Mutter in Sv/Bq

Nuklid	Ingestion $g_{g,r,eff}^{MM}$	Inhalation $g_{h,r,eff}^{MM}$
H-3	1,80E-11	1,80E-11
C-14	1,80E-10	1,90E-10
Co-60	1,10E-09	2,50E-09
Ni-59	1,30E-12	2,50E-11
Sr-90	8,90E-09	7,20E-09
Ag-108m	1,70E-10	8,30E-10
I-129	3,50E-08	3,20E-08
Cs-137	1,90E-09	6,80E-10
Ba-133	7,00E-11	8,80E-11
Pu-238	5,10E-11	2,50E-08
Pu-239	5,30E-11	2,60E-08
Am-241	5,30E-11	2,60E-08

Für die hier durchgeführten Berechnungen werden nur Dosiskoeffizienten für die Ingestion durch die Mutter herangezogen, da davon ausgegangen wird, dass die stillende Mutter nicht für die Arbeitsschritte auf der Deponie, bei denen Inhalation möglich ist, beschäftigt wird.

Die Dosis des Säuglings durch Ingestion von Muttermilch sowie durch Beikost berechnet sich durch Gl. 51 /AVV 20/, die aufgenommene Aktivität A der Mutter ist gegeben durch Gl. 53⁵ /AVV 20/. Für die Berechnung werden die Lebensmittelgruppen Trinkwasser, Fisch, pflanzliche Nahrungsmittel, Blattgemüse, Milch und Fleisch bei der Ernährung der Mutter berücksichtigt.

Für andere als in Tab. 3.13 angegebene und hier zu berechnende Radionuklide wird, wie bislang im Berechnungsmodell, die Gleichung Gl. 52 /AVV 20/ genutzt. Abweichungen bei den Rechenergebnissen der FGW können sich durch diese Änderungen nur bei auf Pfaden ergeben, bei denen die Altersgruppe < 1 a und der Muttermilchpfad der maßgebende ist. Die Abweichungen bei der Berechnung von FGW gibt folgende Tab. 3.14

⁵ Das Öko-Institut geht von einem Fehler der Indizes „1a“ bei den Verzehrsmengen für Trinkwasser und Fisch aus. Sinnvollerweise wird daher für die Berechnung die Verzehrsmenge durch eine erwachsene Person für die Aktivitätsaufnahme der Mutter angesetzt.

an. Die Abweichung wird hier als Quotient des neu berechneten FGW zum Referenzrechenfall in Prozent angegeben.

Tab. 3.14 Abweichungen bei der Neuberechnungen ausgewählter Radionuklide von Spalte 10 mit aktualisierten Dosiskoeffizienten für den Muttermilchpfad

	Nuklid	FGW in Bq/g	Abweichung in %
Oberflächenwassernutzung	Ni-59	4,17E+04	103
Klärschlammverwertung	Co-60	2,38E+03	109
	Ni-59	9,12E+03	110
	Pu-238	1,46E+03	100
	Pu-239	9,09E+02	100
	Am-241	1,49E+03	100

Bei näherer Betrachtung durch Vergleich der Tab. 3.14 mit Tab. 3.7 zeigt sich, dass für keines der genannten Radionuklide die Pfade Oberflächenwassernutzung bzw. Klärschlammverwertung die jeweils insgesamt maßgebenden sind. Somit ergibt sich aus der Berücksichtigung der aktualisierten Dosiskoeffizienten für die Ingestion von Radionukliden des Säuglings über den Muttermilchpfad keine Veränderung bei der Berechnung der Freigabewerte insgesamt.

3.3.2.6 Berechnung von Freigabewerten für das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton gefertigt wurde“

Um das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton (RC-Beton) gefertigt wurde“ an aktuelle Bedingungen anzupassen und einen möglichen Einfluss dieses Szenarios auf die Freigabewerte zu beurteilen, wurden in Anlehnung an den IAEA Safety Report 44 (SR 44) neue Freigabewerte berechnet /IAEA 05/ und mit den bisherigen Freigabewerten der Spalte 6 verglichen.

In den Berechnungen wurde ein Anteil von RC-Beton von 50 % angenommen (Verdünnungsfaktor 0,5; entspricht „unwahrscheinlichem“ Szenario in SR 44). Zusätzlich wurde die Aufenthaltsdauer neu festgelegt, um etwa die Situation von Kindern, Senior*innen und sich ändernden Arbeitsgewohnheiten (Home-Office, Teilzeit) abzubilden. Mit 16 h/d (5.840 h/a) liegt dieser Wert zwischen den beiden Szenarien „realistisch“ und „unwahrscheinlich“ (4.500 bzw. 8.760 h/a) des SR 44. Zusätzlich wurde die angepasste Aufenthaltszeit mit zwei Verdünnungsfaktoren berechnet (10 % RC-Beton und 50 % RC-Beton). Die geänderten Annahmen sind in Tab. 3.15 zusammengeführt.

Tab. 3.15 Annahmen für das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton (RC-Beton) gefertigt wurde“

		Szenarien			
		A	B	C	D
Expositionszeit	h/a	4500	5840	5840	5840
Zerfall vor Szenario	d	100	100	365	100
Zerfallszeit während Szenario	d	365	365	365	365
Verdünnungsfaktor	[1]	0,1	0,5	0,5	0,1

Berechnet wurde zunächst für ausgewählte Nuklide die Dosis für die externe Strahlenbelastung (Gleichung 3.1) /IAEA 05/ sowie in einem weiteren Schritt die neuen Freigabewerte mit der Gleichung (3.2).

$$E_{ext,C} = \dot{e}_{ext} \cdot t_e \cdot f_d \cdot e^{-\lambda t_1} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2} \quad (3.1)$$

- $E_{ext,C}$ effektive Dosis durch äußere γ -Bestrahlung [(μ Sv/a)/(Bq/g)]
 \dot{e}_{ext} Dosiskoeffizient für bestimmte Geometrie und Material, berechnet [(μ Sv/h)/(Bq/g)]
 ρ Dichte des Materials [g/cm³]
 t_e Expositionszeit [h/a]
 f_d Verdünnungsfaktor [-]
 λ radioaktive Zerfallskonstante [a⁻¹]
 t_1 Zeitraum vor Beginn des Szenarios [a]
 t_2 Zeitraum während des Szenarios [a]

Die Gleichung (3.2) zeigt den Zusammenhang von Dosis(kriterium) und Konversionsfaktor zur Ermittlung der Freigabewerte. Der (Dosis)konversionsfaktor stellt dabei eine Beziehung zwischen der Dosis pro Jahr (μ Sv/a) und der Aktivität (Bq/g) her.

$$\text{Freigabewert} \left[\frac{\text{Bq}}{\text{g}} \right] = \frac{\text{Dosis(kriterium)} 10 \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\text{a}} \right]}{\text{Konversionsfaktor} \left[\frac{\mu\text{Sv}}{\frac{\text{a}}{\frac{\text{Bq}}{\text{g}}} \right]} \quad (3.2)$$

Die nuklidspezifischen Dosiskoeffizienten \dot{e}_{ext} [(μ Sv/h)/(Bq/g)] wurden dem Anhang aus SR 44, Tab. I bis III entnommen /IAEA 05/ und gelten für einen Raum mit einer Fläche von 4x5 m sowie einer Wanddicke von 0,2 m. Für Nuklide, zu denen keine Dosiskoeffizienten vorlagen, konnten keine Berechnungen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tab. 3.16 dargestellt. Das Szenario A dient der Überprüfung der Formel aus SR 44 und spielt für die weitere Betrachtung keine Rolle. Die Szenarien B und C unterscheiden sich lediglich in der Zeit bis zum Beginn des Szenarios. Die Ergebnisse zeigen hier für die betrachteten Nuklide keinen substantziellen Unterschied. In der Praxis ist jedoch davon auszugehen, dass prozessbedingt (Abbruch der freizugebenden Struktur, Aufbereitung des Abbruch, Konstruktion der Wohnung, Beginn Bewohnen) die Zeit bis zum Beginn des betrachteten Szenario eher bei 365 Tagen, als bei 100 Tagen liegt. Insgesamt ist der Effekt jedoch gering und wird nicht weiter betrachtet.

Im Vergleich zu den bestehenden FGW der Spalte 6 werden daher lediglich die neu berechneten FGW für die Szenarien B (Verdünnungsfaktor 0,5) und D (Verdünnungsfaktor 0,1) betrachtet. In beiden Fällen werden für die Nuklide Mn-54, Co-60, Ag-108, Cs-137, Eu-152 und Eu-154 die bestehenden FGW deutlich unterschritten und das betrachtete Szenario theoretisch maßgeblich. Für Szenario B liegen die Werte um den Faktor 10 bis 20 unterhalb der bisherigen Freigabewerte, für das Szenario D (geringere Verdünnung) immerhin noch um den Faktor 2 bis 5 unterhalb der aktuellen FGW.

Tab. 3.16 Berechnung neuer FGW für das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton gefertigt wurde“ für die Spalte 6

Nuklide	Freigabewerte neu Spalte 6				FGW	Abweichung	
	A	B	C	D	Spalte 6	Spalte 6 zu	
	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	Bq/g	B	D
Mn-54	1,50E-01	2,30E-02	4,14E-02	1,15E-01	3,00E-01	13,0	2,60
Co-60	3,10E-02	4,77E-03	5,25E-03	2,39E-02	9,00E-02	18,9	3,77
Tc-99	2,59E+05	3,99E+04	3,99E+04	1,99E+05	6,00E-01	k. A.	k. A.
Ag-108m	4,37E-02	6,73E-03	6,76E-03	3,37E-02	1,00E-01	14,9	2,97
I-129	4,40E+01	6,78E+00	6,78E+00	3,39E+01	6,00E-02	k. A.	k. A.
Ba-133	2,31E-01	3,56E-02	3,74E-02	1,78E-01		k. A.	k. A.
Cs-137	1,18E-01	1,83E-02	1,86E-02	9,13E-02	4,00E-01	22,0	4,38
Eu-152	6,58E-02	1,01E-02	1,05E-02	5,07E-02	2,00E-01	19,7	3,95
Eu-154	6,02E-02	9,28E-03	9,83E-03	4,64E-02	2,00E-01	21,5	4,31
Pu-238	9,89E+03	1,52E+03	1,53E+03	7,62E+03	8,00E-02	k. A.	k. A.
Pu-239	2,10E+03	3,23E+02	3,23E+02	1,62E+03	8,00E-02	k. A.	k. A.
Am-241	9,98E+00	1,54E+00	1,54E+00	7,69E+00	5,00E-02	k. A.	k. A.

3.4 AP 4: Durchführung einer Konsequenzenanalyse

Das Arbeitspaket unterteilt sich gemäß Angebot in verschiedene Unterpunkte, deren übergeordnetes Ziel es ist, darzulegen, welche Auswirkungen die ggf. anzupassenden Randbedingungen auf die Freigabewerte und somit auf die Stoffströme in der Praxis hätten. Aus Gründen der besseren Darstellung werden die AP 4.1 „Konsequenzenanalyse“ und AP 4.2 „Bewertung der neu bestimmten Freigabewerte“ gemeinsam im Kapitel 3.4.1 bearbeitet.

3.4.1 AP 4.1 und AP 4.2: Konsequenzenanalyse und Bewertung der neu bestimmten Freigabewerte

Unter Berücksichtigung der Arbeitsergebnisse aus dem Kapitel 3.2 wurden in dem vorliegenden Forschungsvorhaben veränderte Freigabewerte für verschiedene Szenarien der Spalte 6 sowie der Spalten 8 bis 11 berechnet, da für die übrigen spezifischen Freigabeoptionen keine relevanten Regelwerksänderungen oder Änderungen aus der Verfahrenspraxis identifiziert werden konnten. Folgende Punkte wurden berücksichtigt:

- Für die Freigabeoption der Spalte 6 „spezifische Freigabe von Bauschutt“ wurde das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezyklierten Bauschutt gebaut wurde“ entsprechend eines adaptierten SR 44-Ansatzes berücksichtigt, neu berechnet und mit den aktuellen Freigabewerten der Spalte 6 verglichen.
- Für die Spalten 8 bis 11 „spezifische Freigabe zur Beseitigung“ wurden die folgenden fünf möglichen Anpassungen identifiziert und deren Auswirkungen auf die aktuellen Freigabewerte der Spalten 8 bis 11 bewertet:
 - Anpassung der Parameterwerte Transport- und Arbeitszeiten, Staubkonzentration und Jahreskapazitäten (Anpassung Praxis)
 - Einfluss der Reinheit der Schrottverwertung im Szenario S3 (Anpassung Praxis)
 - Einfluss der Änderungen der Klärschlamm Verordnung auf den Klärschlamm Pfad (Regelwerk)
 - Einfluss der AVV-Änderungen (Regelwerk), in Bezug auf die Ausbreitungsmodellierung (Lagrange-Partikel-Modell) sowie
 - Einfluss der AVV-Änderungen (Regelwerk), Auswirkungen der neuen Dosiskoeffizienten für den Muttermilchpfad

Aktuelle Untersuchungen der GRS zeigen, welchen Anteil verschiedene Massenströme am Gesamtaufkommen im Rahmen der Stilllegung und insbesondere dem Abbau kern-technischer Anlagen haben /GRS 22/. Die Abb. 3.6 zeigt die in Deutschland zu erwartenden Massenströme bei der Stilllegung von Kernkraftwerken. Demnach können ca. 91 % der Massen spezifisch freigegeben werden, wobei sich der überwiegende Anteil von ca. 86 % auf Bauschutt (Spalte 6) und Gebäude zur Wieder- und Weiterverwendung (Spalte 12) beziehen. Die restlichen ca. 5 % verteilen sich auf die übrigen spezifischen Freigabeoptionen, u. a. auch auf die Spalten 8 bis 11 (spezifische Freigabe von Stoffen zur Beseitigung).

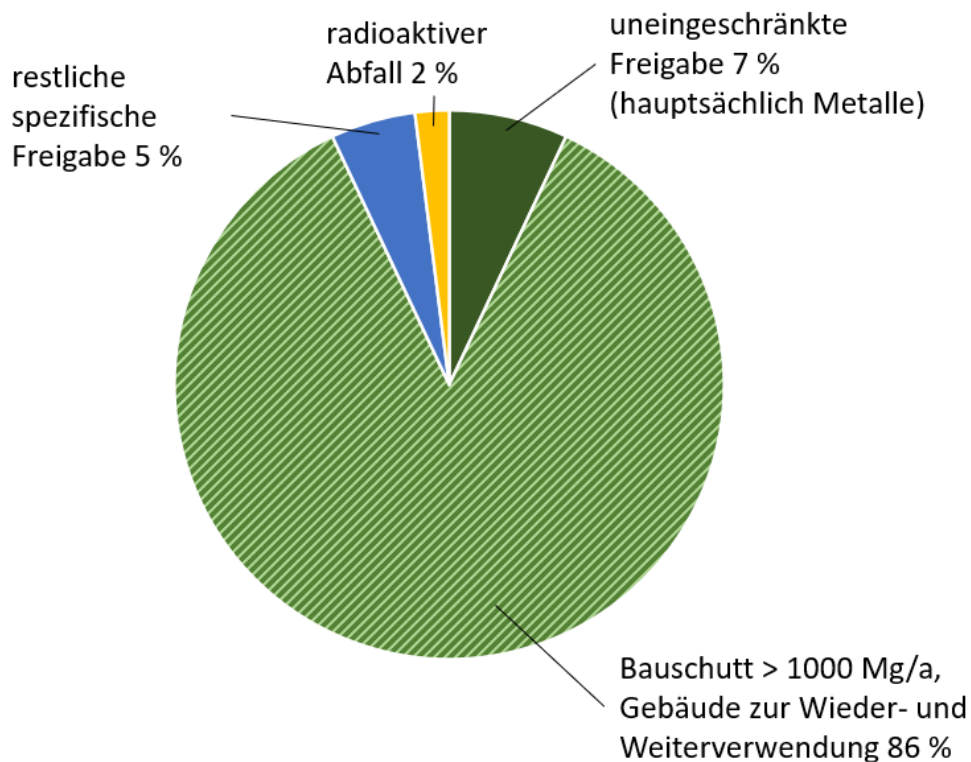


Abb. 3.6 Massenströme bei der Stilllegung von Kernkraftwerken in Deutschland /HUS 22/

Zu Beginn des Rückbaus fallen dabei zunächst kontaminierte und aktivierte Komponenten sowie metallische Reststoffe an. Der in Bezug auf die zu erwartenden Massen größte Teil (Gebäude und Bauschutt) folgt zum Ende des Rückbauprozesses. In Deutschland hat dies zur Folge, dass ein erster Peak zwischen 2024 und 2029 und ein zweiter Peak zwischen 2032 und 2039 erwartet wird (siehe Abb. 3.7).

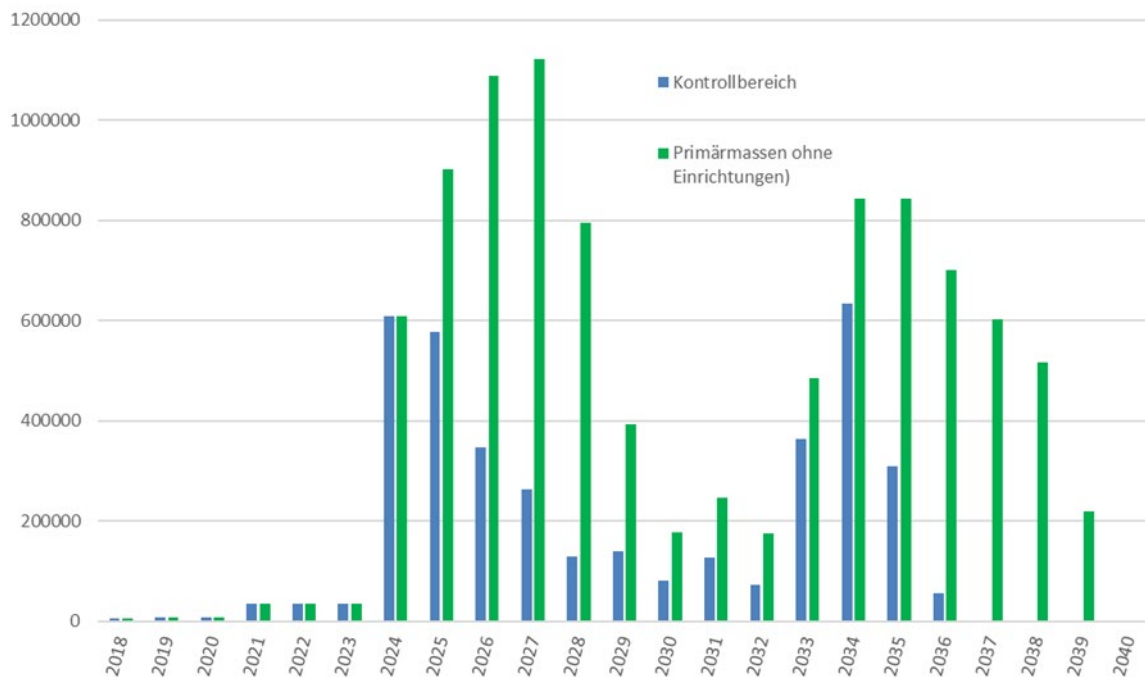


Abb. 3.7 Zeitliche Abschätzung des Bauschuttaufkommens (in Mg) aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen in Deutschland /GRS 22/

Vor dem Hintergrund der zu erwartenden Massen ist daher festzustellen, dass insbesondere Änderungen im Bereich der Freigabewerte der Spalte 6 erheblichen Einfluss auf das freizugebene Volumen haben können. Die berücksichtigten Änderungen der Spalten 8 bis 11 hingegen spielen in Bezug auf die zu erwartenden absoluten Massen eine untergeordnete Rolle.

Im Folgenden wird für die im Forschungsvorhaben überprüften, veränderten Randbedingungen eine Abschätzung hinsichtlich möglicher Konsequenzen gegeben.

3.4.1.1 Spezifische Freigabe von Stoffen zur Beseitigung (Spalte 8 bis 11)

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen zu erwartenden Massen, die aus der Stilllegung sowie dem Rückbau in Zukunft zu erwarten sind, spielt die spezifische Freigabe von Stoffen zur Beseitigung im Verhältnis eine geringere Rolle. Dennoch ist und bleibt dieser Entsorgungspfad von Bedeutung, zumal hier insbesondere das Abfallrecht bestimmte Szenarien und Parameter beeinflusst und aus der Verfahrenspraxis belastbare empirische Erfahrungen hinsichtlich Parameter und Szenarien vorliegen.

Für die folgenden Fälle wurden Anpassungen der Szenarien und/oder Parameter durchgeführt:

- Praxisnahe Parameterwerte, Expositionszeit, Staubkonzentration und Kapazität der Deponie bzw. der MVA
- Einschränkung in der Aufbringung von Klärschlamm
- Anforderungen an die Reinheit von Metallschrott
- AVV Tätigkeiten, Anwendung des Lagrange-Partikel-Modells
- AVV Tätigkeiten, Muttermilch

Im Ergebnis zeigt sich, dass keine substantziellen Veränderungen von Massenströmen entsprechend der im Forschungsvorhaben durchgeführten Berechnungen zu erwarten sind.

3.4.1.2 Spezifische Freigabe von Bauschutt (< 1.000 Mg/a)

Die FGW für die spezifische Freigabe von Bauschutt wurden für die Nuklide Mn-54, Co-60, Tc-99, Ag-108m, I-129, Ba-133, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Pu-238 und Pu-239 entsprechend des bisher ausgeschlossenen Szenarios „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezyklierten Bauschutt gebaut wurde“ neu berechnet. Die Berechnung erfolgte für dieses Szenario für zwei Annahmen bzgl. der Vermischung, also dem Anteil an recyceltem Beton im Bauwerk. Im Rechenfall B wurde eine Vermischung von 50 % und im Rechenfall D von 10 % angenommen.

In beiden Rechenfällen werden für die Nuklide Mn-54, Co-60, Ag-108, Cs-137, Eu-152 und Eu-154 die bestehenden Freigabewerte deutlich unterschritten und das betrachtete Szenario somit gegenüber den bisher zu betrachteten Szenarien theoretisch maßgeblich. Für Szenario B liegen die Werte um den Faktor 10-20 unterhalb der bisherigen Freigabewerte, für das Szenario D (geringere Verdünnung) immerhin noch um den Faktor 2 bis 5 unterhalb der aktuellen Freigabewerte.

Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Konsequenzenanalyse und den zu erwartenden Bauschuttmassen, sollte der Einfluss dieser möglichen Änderungen auf die freigegebenen Massen unter den aktuellen sich ggf. zukünftig weiter ändernden Randbedingungen weiter beobachtet werden.

3.4.2 AP 4.3: Prüfung zusätzlicher Szenarien

Bei der Stilllegung und dem Rückbau der kerntechnischen Anlagen fallen größtenteils Abbruchmassen an, die nicht bzw. nur geringfügig kontaminiert sind. Diese Massen durchlaufen ein in der Strahlenschutzverordnung /SSV 21/ geregeltes behördlich genehmigtes Freigabeverfahren nach verschiedenen Freigabearten als nicht radioaktive Stoffe und werden dem konventionellen Stoffkreislauf zugeführt oder fachgerecht auf Deponien beseitigt.

Neuere Entwicklungen aus dem Bereich der Entsorgung konventioneller Abfälle weisen aktuell auf eine zusätzliche Freigabeart zur Verbringung in Versatzbergwerken als eine weitere Möglichkeit der Entsorgung der o. g. Stoffe hin. Hierdurch könnten spezifisch freigegebene Stoffe noch dauerhafter, einfacher und zuverlässiger den Stoffkreisläufen entzogen werden. Diese Art der Freigabe war nach § 29 Abs. 2, S. 3 der bisherigen StrlSchV (2001) /SSV 17/ über einen Einzelfallnachweis möglich. In der neuen StrlSchV /SSV 21/ wurde in § 37 Abs. 1, S. 3 ein Hinweis auf diese Art der Freigabe aufgenommen. Die Freigabe zur Verbringung in Versatzbergwerke ist jedoch nicht als eigenständige spezifische Freigabeart in der StrlSchV vorgesehen. Nach bisherigem Stand von Wissenschaft und Technik fehlen Erkenntnisse zu entscheidenden allgemeinen Randbedingungen und den in der Regel auftretenden maßgeblichen betrieblichen Prozessen bei Versatzbergwerken, so dass ein übertragbares radiologisches Modell zur Bestimmung von Freigabewerten etwa für eine neue Spalte der Tab. 1, Anlage 4 StrlSchV bislang nicht generiert wurde.

Im Folgenden wird geprüft, ob die Werte der Spalten 8 bzw. 10 „Feste Stoffe zur Beseitigung auf Deponien“ in Bezug auf die „Verbringung in ein Versatzbergwerk“ das 10 µSv-Konzept einhalten.

Die folgende Abb. 3.8 stellt das radiologische Modell für einen möglichen Freigabepfad „Verbringung in ein Versatzbergwerk“ schematisch dar.

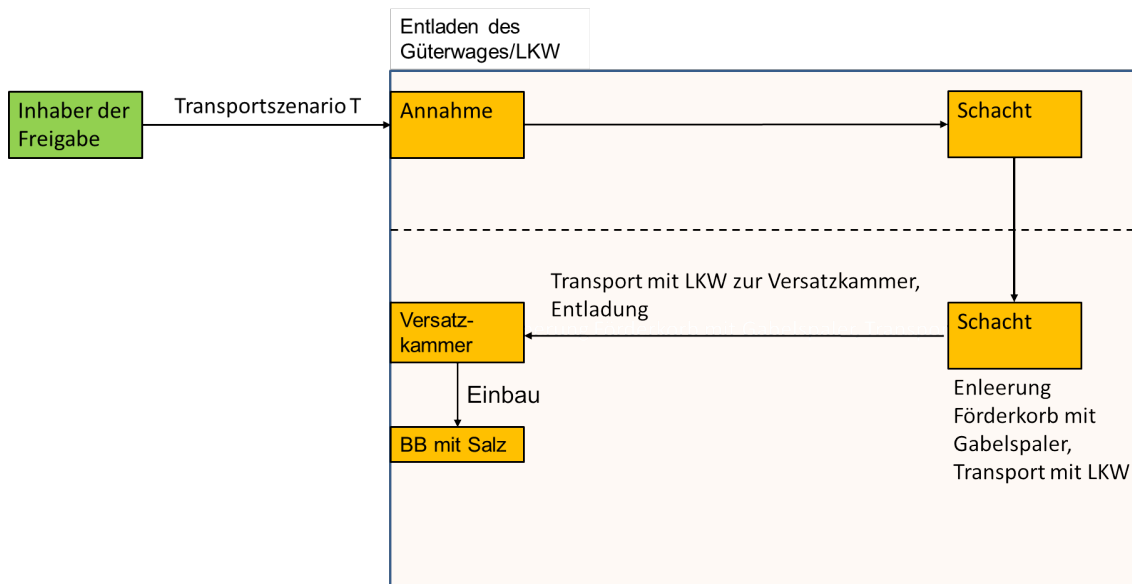


Abb. 3.8 Das radiologische Modell für einen möglichen Freigabepfad „Verbringung in ein Versatz-bergwerk“

In Bezug auf die Expositionspfade wird angenommen, dass durch die Verwendung von Big-Bags die Inhalation oder Ingestion von Staub des Versatzmaterials als Expositionspfad vernachlässigbar ist. Wenn die staubdichte Version der Big-Bags zum Einsatz kommen ist der Pfad im Normalfall sogar ausgeschlossen.

3.4.2.1 Transportszenario

Die Transportzeit ist abhängig von der Strecke zwischen dem Ort der Freigabe z. B. einem Kernkraftwerksgelände in Deutschland und dem Versatzbergwerk. Eine Auswertung mittels eines geographischen Informationssystems ergab eine maximale Transportdistanz von ca. 500 km vom Gelände eines Stilllegungsprojektes bis zu einem Versatzbergwerk. Für das Transportszenario können die gleichen Parameter verwendet werden wie für das Transportszenario zur Deponie. Aus /THI 04/ und /SSK 06/ ergeben sich für die Fahrtzeit von einer Wegstrecke von 100 km zwei Stunden Fahrtzeit. Für 50 Fahrten à 20 Mg Ladung ergeben sich somit 100 aus /THI 04/ und /SSK 06/ Stunden. Gesetzlich vorgeschrieben ist aber nach neun Stunden Tageslenkzeit elf Stunden Tagesruhezeit einzuhalten. Anschließend würde dann die Weiterfahrt zum Zielort erfolgen, je nachdem ob neun Stunden oder zehn Stunden Fahrtzeit angenommen werden. Für die Expositionsrechnung des Fahrers ist auch wichtig, ob die Ruhezeit in der Fahrerkabine verbraucht wird. Insgesamt käme man auf neun Stunden Tageslenkzeit und elf Stunden Tagesruhezeit plus eine Stunde Weiterfahrt im konservativsten Fall auf eine Expositionszeit des Fahrers von 21 Stunden. Die Expositionszeit zum Versatzbergwerk wäre demnach

unter den konservativen Annahmen um den Faktor 10,5 höher als zur Deponie. Unter den Bedingungen und mit den Parametern aus /SSK 06/ ergeben sich für das Transport-szenario für das Radionuklid Co-60 eine Dosis von 1,05 $\mu\text{Sv/a}$ und für Cs-137 0,9 $\mu\text{Sv/a}$.

3.4.2.2 Szenarien auf dem Gelände des Versatzbergwerkes

Insgesamt wurden bei einem GRS-Besuch der Grube Teutschenthal am 23. Juli 2019 die folgenden Arbeitsplätze identifiziert, bei denen sich Beschäftigte längere Zeit in der Nähe von Big-Bags mit freigegebenem Material aufhalten. Die nachfolgenden Angaben wurden daher von der GRS als plausibel eingeschätzt:

- Beschäftigte im Eingangsbereich (über Tage)
- Gabelstaplerfahrer (über Tage)
- Anschläger (über Tage)
- Rollgangfahrer (unter Tage)
- Steiger (unter Tage)
- Fahrer des Transportfahrzeugs und des Stapelfahrzeugs (unter Tage)

Aus den vorhandenen Angaben lassen sich die in Abb. 3.18 angegebenen Expositionszeiten, Expositionsgeometrien und Expositionszeit pro Versatz von 100 Big-Bags ableiten.

Die Annahmetauglichkeit der zu versetzenden Materialien wird durch die Versatzverordnung geregelt. Hierbei gelten die folgenden Kriterien:

- max. 6 % TOC, Glühverlust GV max. 12 %
- Grenzwerte für PCB, MHKW, Dioxine, Furane, Schwermetalle etc.

Aufbauend auf der Darstellung der übertägigen und untertägigen Arbeitsschritte zwischen der Anlieferung des Versatzmaterials und dessen Versatz unter Tage werden im Rahmen der vorliegenden Vorabbewertung der Freigabe zum Versatz diejenigen Arbeitsplätze identifiziert, die im Rahmen der radiologischen Bewertung zu betrachten sind, und es werden die Expositionszeiten für diese Arbeitsplätze sowie Expositionsgeometrien zusammengestellt.

3.4.2.2.1 Übertage: Personal Versatzbergwerk

Das folgende Szenario ist vergleichbar mit dem Szenario D1, das bei der Beseitigung durch Deponierung betrachtet wird.

3.4.2.2.2 Eingangsbereich Versatzbergwerk (Szenario Ü1)

Der LKW fährt durch das Eingangstor des Betriebsgeländes des Versatzbergwerkes ein. Er kann direkt auf eine Waage gefahren werden, oder der LKW-Fahrer begibt sich zum Eingangsbüro zur Prüfung der Transportpapiere und anschließend zur Waage.

Exponierte Personen: Bergwerkspersonal, LKW-Fahrer; Expositionsdauer ca. 10 bis 15 Min., Abstand zur Waage > 10 m

Anschließend fährt der LKW zum Entladeort. Es wird angenommen, dass das Entladen mit einem Gabelstapler erfolgt. Je nachdem werden die Big-Bags auf Holzpaletten oder einzeln ohne Holzpaletten angeliefert. Der Stapler stellt die Paletten bzw. Big-Bags auf einer Bereitstellungsfläche ab.

Es wird unterstellt, dass sich der LKW-Fahrer während des Entladens in der Nähe des LKWs aufhält.

Exponierte Person: LKW-Fahrer Dauer: in Summe 5 Min., Abstand: max. 0,5 m

Die Big-Bags werden mittels des Gabelstaplers von der Bereitstellungsfläche in die Schachthalle gefahren und auf den Rollenförderer gestellt.

Exponierte Person: Fahrer des Gabelstaplers; Dauer: 30 Min.

Die Big-Bags werden automatisiert vom Rollgang zum Schacht befördert.

Exponierte Personen: Keine.

Es wird angenommen das drei Big-Bags in den Förderkorb verladen werden. Aufgrund des automatisierten Transportes wird kein Personal unterstellt, das durch diese Tätigkeit exponiert werden könnte. Bei der Beförderung nach unter Tage befinden sich keine Personen im Korb. Die max. Seilzugnutzlast liegt bei 10 t (inkl. Plattform) pro Schachtfahrt, Geschwindigkeit der Schachtfahrt: 8 m/s.

Exponierte Personen: Keine.

3.4.2.3 Szenarien Unter Tage

3.4.2.3.1 Entladen des Korbes (Szenario U1)

Das Entladen des Korbes nach der Schachtfahrt erfolgt mit ebenfalls mit einem Rollgang. Der Rollgangfahrer sitzt in einer Kabine und steuert den Entladevorgang. Dabei ist der Rollgangfahrer so positioniert, dass sich die Schiene für die Leertransporte immer zwischen ihm und der beladenen Plattform befindet. Je nach Anlage können zwei Schienen jeweils für Voll- und Leertransporte existieren.

Exponierte Person: Rollgangfahrer; Dauer: 15 Min. für zwei Plattformen; Abstand ca. 3 m

3.4.2.3.2 Umladen von der Plattform auf das Transportfahrzeug (Szenario U2)

Die Big-Bags werden vom Rollgangfahrer mit dem Kran (Bedienung ohne Abschirmung) von der Plattform auf das wartende Transportfahrzeug gehoben. Es wird angenommen, dass insgesamt sechs Big-Bags auf ein Transportfahrzeug passen, so dass zwei Förderkörbe pro Transportfahrzeug entladen werden. Im Szenario wird unterstellt, dass das Umladen auf das Transportfahrzeug erst stattfindet, wenn sich sechs Big-Bags unter Tage befinden. Dieser Vorgang nimmt pro drei Big-Bags sieben Minuten in Anspruch, also ca. 15 Minuten für sechs Big-Bags.

Exponierte Person: Steiger (Aufsichtsfahrten während einer Schicht); Dauer: 2 x 5 Min. pro Schicht; Abstand: 3 m; keine Abschirmung

Exponierte Person: Rollgangfahrer; Dauer: 7 Min. pro Plattform; somit 49 Min. pro Schicht; Abstand: 3 m; keine Abschirmung

3.4.2.3.3 Transport unter Tage (Szenario U3)

Der Fahrer des Transportfahrzeugs fährt das Transportfahrzeug nach der Beladung zur Einlagerungskammer. Je nach Länge der Kammer fährt der Fahrer des Transportfahrzeugs in die Kammer hinein oder parkt an deren Eingang.

Exponierte Person: Fahrer des Transportfahrzeugs; Dauer: max. 15 Min. pro Fahrt, somit bei vier Fahrten 60 Min. pro Schicht; Abstand: 1,5 m

3.4.2.3.4 Versatz der Big-Bags (Szenario U4)

Der Versatz der Big-Bags erfolgt mittels eines Stapelfahrzeugs, das für den untertägigen Betrieb konstruiert ist.

Der Fahrer des Transportfahrzeugs verlässt das Fahrzeug und steigt auf das Stapelfahrzeug um. Das Stapelfahrzeug ist mit einem Dorn ausgerüstet, an dem die Big-Bags an ihren Laschen hängend transportiert werden.

In die sog. Einlagerungskammern des Versatzbergwerkes wird zunächst Sturzversatz in die Kammer eingebracht und anschließend mittels der Raupenfahrzeuge auf eine Dichte von ca. $1,7 \text{ g/cm}^3$ verdichtet. Anschließend werden die Big-Bags einlagig auf das Schüttgut aufgebracht und anschließend mit Schüttgut überdeckt. Dieses Verfahren wird so oft wiederholt, bis die Kammer nahezu vollständig erfüllt ist.

Der Versatz erfolgt als reihenweiser Einbau an der Ortsbrust. Es werden zehn Big-Bags nebeneinander aufgereiht. Für den Fahrer des Staplerfahrzeugs ergibt sich einerseits eine Strahlenexposition von der Bodenfläche, auf der er sich bewegt, wie auch von der Stirnfläche, wo die Big-Bags aufgereiht werden.

Hinzu kommt noch die Exposition, die der Fahrer beim Einbau eines Big-Bags in die Ortsbrust bekommt, wenn sich ein Big-Bag in 1 m Entfernung auf der Gabel des Transportfahrzeuges befindet.

Exponierte Person: Fahrer des Staplerfahrzeugs; Dauer: 2,5 Min. je Big-Bag = max. 52,5 Min. bzw. 0,875 Std. pro Schicht; Abstand: 3 m; weitere Personen sind geringeren Expositionszeiten ausgesetzt.

Exponierte Person: Steiger; Dauer: 2 x 5 Min. pro Schicht; Abstand: 5 m

3.4.2.4 Abschätzung der Expositionsabschätzung des Personals

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Expositionszeiten der einzelnen Arbeitsplätze.

Tab. 3.17 Übersicht der Expositionszeiten einzelner Arbeitsplätze

Szenario	Arbeitsplatz	Zeitabschätzung	Expositionsgeometrie	Expositionszeit pro 100 Big-Bags
U1	Personal	15 min. pro LKW	10 m zum LKW in Gebäude	1,5 h
	Gabelstaplerfahrer	30 min. pro LKW	1 m zu Big-Bag, 1 - 10 m zum LKW in Fahrerkabine	2,5 h
	Anschläger	1 min. pro 3 Big-Bag	1,5 m zu Plattform keine Abschirmung	0,5 h
U2	Rollgangfahrer	7,5 min. pro 3 Big-Bag	2,5 m zu Plattform in Kabine	4,1 h
	Steiger	10 min. pro Schicht	5 m zu Plattform keine Abschirmung	~ 0,5 h
U3	Fahrer Transportfahrzeug	Transport: 15 min für 6 Big-Bags	Abstand 1,5 m zum Ladegut	4,2 h
U4	Fahrer Stapelfahrzeug	2,5 min. für 1 Big-Bag	in Stapelfahrzeug, 2 - 3 m vor Ortsbrust	4,2 h

Aus dieser Aufstellung wird deutlich, dass der Fahrer des Transport- und des Stapelfahrzeugs beim untertätigen Versatz (Szenarien U3/U4) die Person ist, die am höchsten exponiert wird. Für diese wird daher im nächsten Abschnitt abdeckend eine Abschätzung der Exposition durchgeführt.

Bei dem Fahrzeug, das für den Transport unter Tage verwendet wird, handelt es sich um einen leichten LKW. Da dieser anders aufgebaut ist, als der LKW für den Transport werden die Dosisumrechnungsfaktoren für die Expositionsgeometrie des Fahrers mittels MicroShield neu berechnet.

Die berechneten Dosisumrechnungsfaktoren, Freigabewerte nach Anlage 4, Tab. 1, Spalte 10 StrlSchV und abgeleiteten Dosisleistungen für relevante Radionuklide für das Szenario des Fahrers des Transportfahrzeugs sind in der nachfolgende Tab. 3.18 angegeben.

Tab. 3.18 Dosisumrechnungsfaktoren, FGW nach Anlage 4, Tab. 1, Spalte 10 StrlSchV und abgeleitete Dosisleistungen für relevante Radionuklide für das Szenario des Fahrers des Transportfahrzeugs

Radionuklid	Dosisumrechnungsfaktoren (Sv/h)/(Bq/g)	Freigabewert Anl. 4 Tab. 1 Sp. 10 StrlSchV [Bq/g]	Dosisleistung [(μ Sv/h)]
Co-60	$5 \cdot 10^{-8}$	2	$1 \cdot 10^{-1}$
Cs-137	$1 \cdot 10^{-8}$	8	$8 \cdot 10^{-2}$

Das Stapelfahrzeug, welches unter Tage eingesetzt wird, verfügt über eine robuste Kabine. Vor dem Fahrer befinden sich verschiedene Teile des Fahrzeugs, so dass eine mittlere Abschirmdicke von 5 cm Stahl angenommen wird.

Der Fahrer des Stapelfahrzeuges kann in drei Fällen exponiert werden:

1. Exposition durch Bodenfläche aus abgedeckten Big-Bags
2. Exposition durch einen Big-Bag der an der Gabel des Stapelfahrzeugs hängt
3. Exposition durch die aufgestapelten Big-Bags

Die folgenden Abbildungen zeigen die entsprechenden MicroShield-Einträge für die vor- genannten Expositionsszenarien. In den Abbildungen entspricht die grüne Fläche den Big-Bags, die blaue Fläche möglichen/rechnerischen Abschirmungen und der orange Punkt entspricht der exponierten Person.

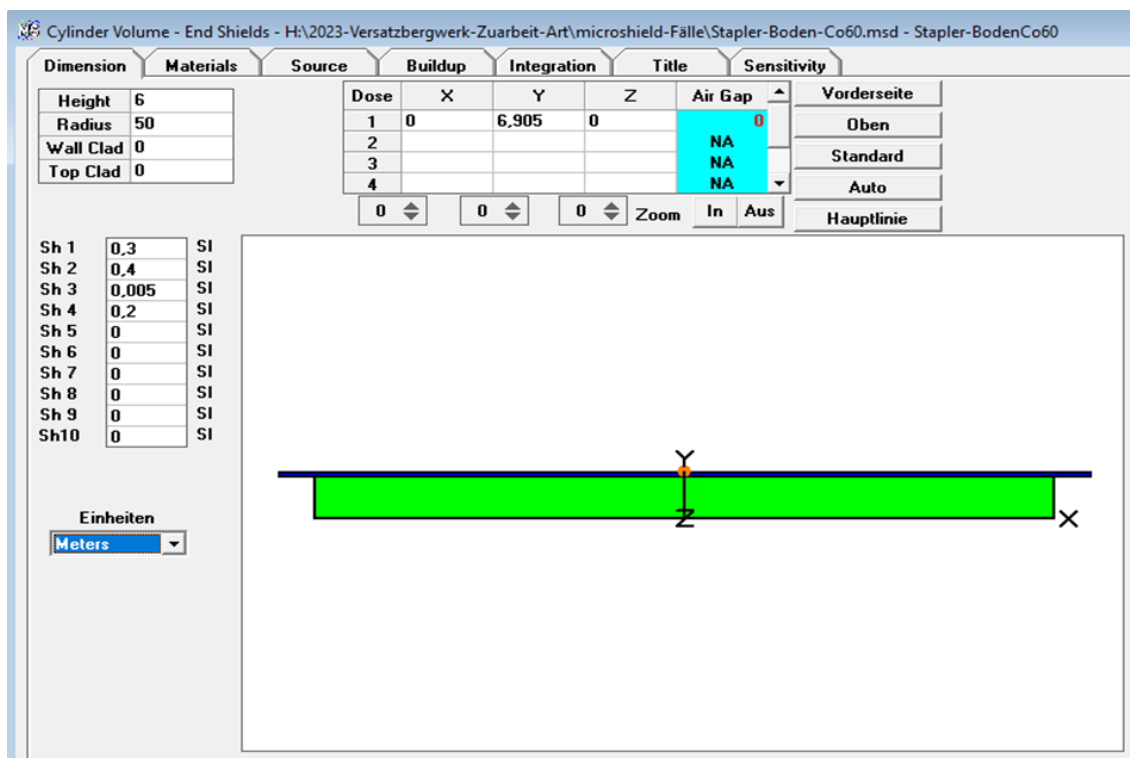


Abb. 3.9 MicroShield-Eingabe für das Szenario Bodenstrahlung Staplerfahrer

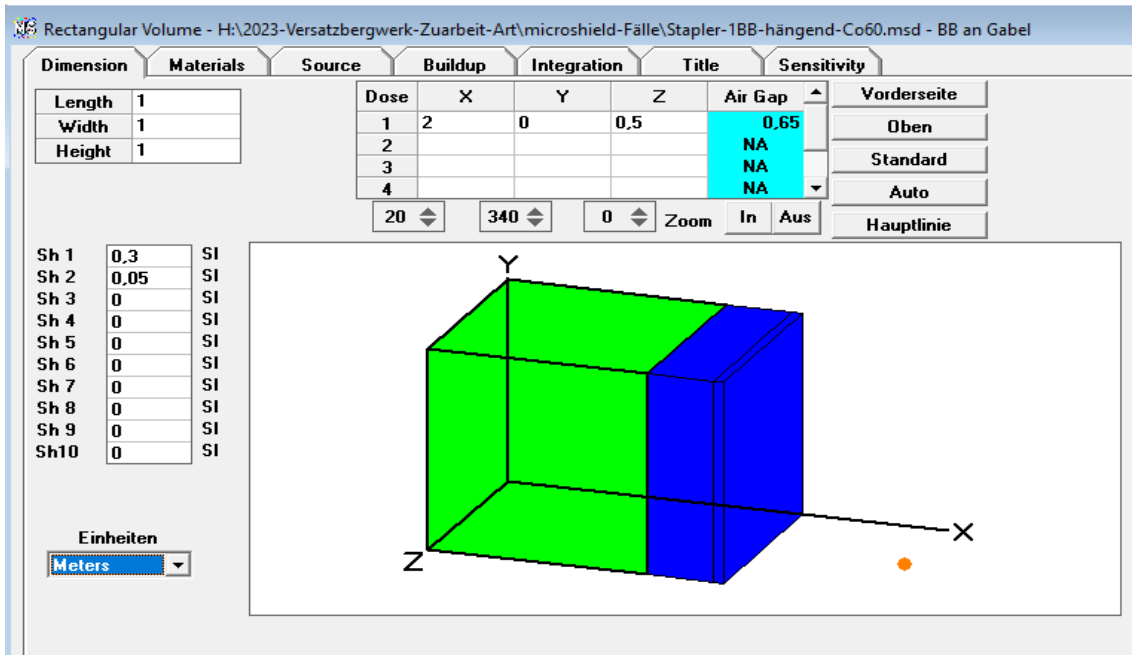


Abb. 3.10 MicroShield-Eingabe für das Szenario Big-Bag an der Gabel

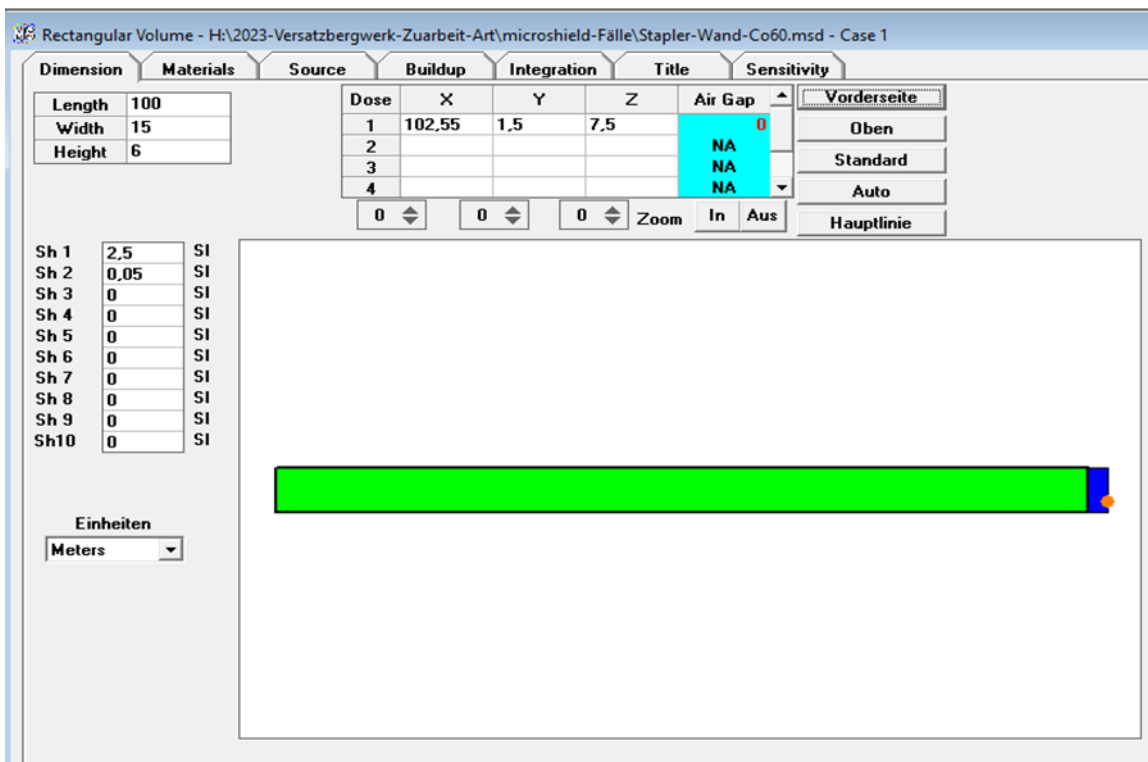


Abb. 3.11 MicroShield-Eingabe für das Szenario Big-Bag Einbau

Mit diesen Annahmen und der Geometrie der aufgestapelten Big-Bags erfolgt eine Modellierung mittels MicroShield mit den in der folgenden Tab. 3.19 dargestellten Ergebnissen.

Tab. 3.19 Dosisumrechnungsfaktoren, FGW nach Anlage 4, Tab. 1, Spalte 10 StrlSchV und abgeleitete Dosisleistungen für relevante Radionuklide für das Szenario des Fahrers des Stapelfahrzeugs

Nuklid	Szenario	Dosisumrechnungsfaktoren [(μ Sv/h)/(Bq/g)]	Freigabewert Anl. 4, Tab. 1, Sp. 10 StrlSchV [Bq/g]	Dosisleistung [(μ Sv/h)]
Co-60	Bodenstrahlung	4,41E-08	2	8,83E-02
	Big-Bag an Gabel	5,67E-08	2	2,83E-02
	Big-Bag Einbau	1,39E-06	2	6,95E-01
Cs-137	Bodenstrahlung	3,14E-08	8	3,92E-03
	Big-Bag an Gabel	1,37E-09	8	1,09E-02
	Big-Bag Einbau	4,38E-09	8	3,51E-02

Für den Fahrer des Transport- und Stapelfahrzeugs unter Tage ergibt sich, gemäß der vorangegangenen Tabellen für die aktuelle Freigabe zur Deponierung von 1000 Mg für die beiden Radionuklide Co-60 und Cs-137 folgende externe Strahlenexposition für die beiden Untertageszenarien U3 und U4 (siehe Tab. 3.20):

Tab. 3.20 Externe Strahlenexposition für die beiden Untertageszenarien U3 und U4

Szenario	Arbeitsplatz	Expositionszeit pro 100 Big-Bags	Nuklid	Dosis [(μ Sv/a)]
U3	Fahrer Transportfahrzeug	4,2 h	Co-60	1,9
			Cs-137	0,2
U4	Fahrer Stapelfahrzeug	4,2 h	Co-60	34,1
			Cs-137	2,1

3.4.2.5 Fazit

Die Prüfung der untertägigen Deponierung (z. B. in einem Versatzbergwerk) wurde anhand des radiologischen Modelles zur Freigabe zur Deponierung durchgeführt. Durch die getroffene Annahme der Verbringung in Big-Bags (staubfrei) konnten die Expositionspfade Inhalation und Ingestion in den durchgeführten Berechnungen ausgeschlossen werden. Für die Dosisberechnung wurden die Freigabewerte zur Deponierung angewendet.

Unter den angenommenen Randbedingungen wurde das Szenario U4 „Einbau der Big-Bags in der Versatzkammer“ als restriktivstes Szenario identifiziert. Die so berechnete Strahlendosis liegt mit 34,1 $\mu\text{Sv/a}$ über dem Dosiskriterium. Dies zeigt, dass die Freigabewerte zur Deponierung nicht ohne Einschränkungen für den untertägigen Versatz geeignet sind. Eine Möglichkeit zur Einhaltung des Dosiskriteriums wäre z. B. die Reduzierung der jährlich einzulagernden Freigabemassen.

3.5 Ecolego in der Freigabe

Im Laufe des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde zusätzlich die Eignung der kommerziellen Software Ecolego von Facilia AB hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bei der Berechnung von Freigabewerten untersucht. Ecolego ist ein von Facilia AB entwickeltes Softwarepaket zur Implementierung deterministischer und stochastischer dynamischer Modelle, die durch gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung (d. h. Kompartimentmodelle) beschrieben werden. Darüber hinaus kann es auch zur Durchführung von Risikobewertungen komplexer dynamischer Systeme verwendet werden, die sich im Laufe der Zeit verändern.

3.5.1 Programmierung eines radioökologischen Modells für Expositionsszenarien bei der Freigabe zur Beseitigung auf einer Deponie

Für einige ausgewählte Radionuklide wurden von der GRS im vorliegenden Forschungsvorhaben Modellrechnungen von potenziellen Dosen durch die Freigabe zur Beseitigung vorgenommen. Für die Berechnungen wurde Ecolego verwendet. Ziel war die Prüfung der Anwendbarkeit von Ecolego für diese Aufgabenstellung.

Expositionsszenarien, Annahmen und Parameterwerte wurden so gewählt, dass sie den entsprechenden Grundlagen der Herleitung der Freigabewerte der Strahlenschutzverordnung so weit wie möglich entsprachen. Die vorliegenden Berechnungen erfolgen für die spezifische Freigabeoption „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“.

Die Berechnungen wurden für eine Reihe von Radionukliden durchgeführt. Es sollte sich dabei um Radionuklide handeln, die beim Abbau kerntechnischer Anlagen von Bedeutung sind, und die repräsentativ sind für die Modellierung verschiedener Expositionspfade. Dies trifft auf folgende Radionuklide zu: H-3, C-14, Cl-36, Mn-54, Ni-59, Co-60,

Sr-90, Tc-99, Ag-108m, I-129, Cs-137, Ba-133, U-238, Pu-238 und Pu-239. Die Rechnungen umfassen die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung (Nutzung eines Brunnens und Ingestion von Trinkwasser).

3.5.1.1 Methodenbeschreibung

Mit dem Kompartimentmodell einer Deponie soll hier der in /THI 04/ als Grundwasserszenario mit Brunnennutzung eingeführte Rechenfall exemplarisch nachgerechnet werden. Das Kompartimentmodell einer Deponie muss dazu, wie auch in /THI 04/, den Transport von Radionukliden durch poröse Medien mit unterschiedlichen Eigenschaften, also

- dem Abfallkörper bzw. der Deponie selbst,
- der geologischen Barriere bei unbeabsichtigten hydraulischen Fließwegen, und
- dem Grundwasserleiter

durch ein diskretes numerisches Modell beschreiben. Das Ergebnis des Kompartimentmodells ist die Aktivitätskonzentrationen in einem Brunnen (benötigt für das Grundwasserszenario).

Die Anwendbarkeit von Kompartimentmodellen stößt generell dort an ihre Grenzen, wo sie ohne genaueres Prozessverständnis und Datenkalibrierungen der angenommenen Gleichverteilungen aller Zustandsgrößen in einem Kompartiment angesetzt werden. Das angenommene instantane Durchmischen ist als Black-Box Modell anzusehen, vgl. /KIR 98/. Gerade bei realen Prozessen ist die Gefahr der Überschätzung des advektiven Transportanteils bei zu geringer Anzahl von Kompartimenten gegeben.

Da jedoch die hier angestellte Fragestellung auf generischen Annahmen beruht und weder reale Transportbedingungen (wie etwa präferenziellem Fließen) bekannt oder auch vorausgesetzt werden, ist diese Art der Modellierung zulässig, da sie nur die Bandbreite möglicher Ergebnisse in Abhängigkeit von Inputvariablen demonstriert. Darüber hinaus werden

- die molekulare Diffusion sowie
- die makroskopisch zu beobachtende hydrodynamische Dispersion aufgrund von Porengrößenverteilungen und variierender lokaler Strömungsgeschwindigkeiten

vernachlässigt. Dies führt zur Überschätzung der Aktivitätskonzentration.

3.5.1.2 Darstellung des Gesamtmodells

Für die Modellrechnungen wird sich bezüglich der Größe der Referenzdeponie an die Angaben in /SSK 06/ gehalten. Die Deponiekapazität beträgt demnach 60.000 Mg. Die räumliche Ausdehnung wird mit 300 m Seitenlänge quadratischer Grundfläche und 20 m Höhe angesetzt. Alle Parameter können Tab. 3.21 entnommen werden.

Die Deponie und der zu betrachtende Grundwasserleiter, aus dem der angenommene Privatbrunnen Trinkwasser bezieht, werden bis zu einem Zeitpunkt von mindestens 500 Jahren berechnet. Konservativ wird angenommen, dass die Barriere bereits ab $t = 0$ a versagt (z. B. durch Baufehler) und eine Radionuklidmigration stattfindet.

Für die drei Radionuklide (Ag-108m, Ni-59, U-238) wird zusätzlich ein zweiter Rechenlauf bis 10.000 Jahre durchgeführt.

Das Stoffinventar der Deponie für die einzelnen Radionuklide wird aus den FGW zur Beseitigung fester Stoffe auf Deponien bis zu 1.000 Mg/a der StrlSchV /SSV 17/ auf das Deponievolumen errechnet. Die Halbwertszeiten wurden ebenfalls der /SSV 17/ entnommen.

Die in die Deponie eingebrachte Aktivität richtet sich nach den spezifischen FGW der Anlage VII, Tab. 1, Spalte 9c der /SSV 17/. Die angegebenen FGW eignen sich für die Beseitigung fester Stoffe bis zu 1.000 Mg/a auf Deponien und sind in Bq/g angegeben.

Das in Ecolego implementierte Modell besteht aus den Modulen „Deponie“, „ungesättigte Zone“, „Aquifer Mixing“, „Aquifer 1“, Aquifer 2“ und „Well“. Ein Screenshot des Modells wird in Abb. 3.12 gezeigt.

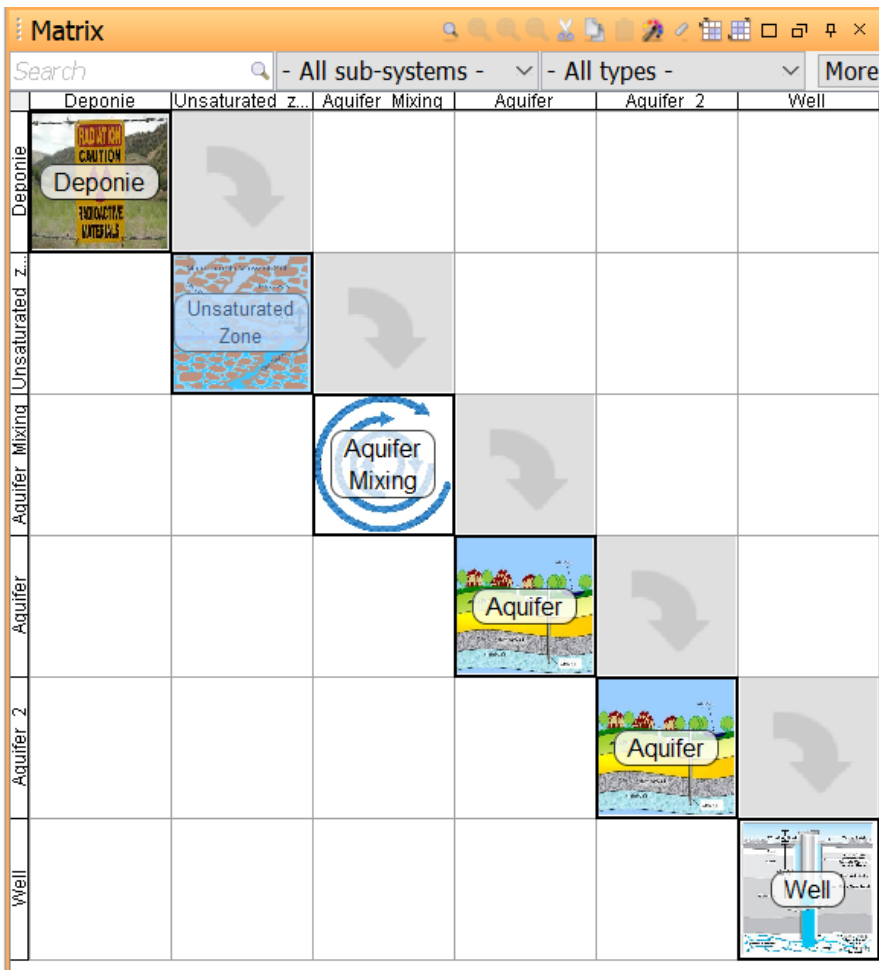


Abb. 3.12 Screenshot der Darstellung eines Ecolego-Modells

Im Folgenden werden die Eigenschaften der Module kurz erläutert.

Modul „Deponie“: Hier wird der Quellterm für das Modell beschrieben. Das Modell ist Baes und Sharp entnommen /BAE 83/. Es wird die Freisetzung aus dem Abfall mit einem Transfer (leaching)-koeffizienten beschrieben.

Modul „ungesättigte Zone“: Dieses Modul simuliert den Radionuklidtransport in der ungesättigten Zone unter Berücksichtigung von Advektion, Dispersion, radioaktivem Zerfall und Sorption.

Modul „aquifer mixing zone“: Dieses Kompartiment soll ein „Übergangskompartiment“ zwischen dem Kompartiment „ungesättigte Zone“ und dem Kompartiment „Aquifer“ darstellen. Es dient der „Übersetzung“ des vertikalen Transports in der ungesättigten Zone auf den horizontalen Transport im Aquifer. Das Kompartiment simuliert die Aquiferzone unmittelbar unter der Deponie, wo sich der kontaminierte Infiltrationsstrom aus der un-

gesättigten Zone mit dem Grundwasser im Aquifer vermischt. Dieses „Übergangs“-Kompartiment wird insbesondere dann benötigt, wenn die Deponie eine große Flächenausdehnung hat, während der Grundwasserleiter eine geringe Mächtigkeit aufweist.

Modul „Aquifer“: Ziel des Moduls „Aquifer“ ist die dynamische Simulation des Transports von Radionukliden innerhalb des Grundwasserleiters in Richtung des Brunnens. Dieses Modul enthält den Schadstoff-Eintrag aus dem vorgeschalteten Modul „Aquifer Mixing“. Alternativ kann dieses Modul auch Eingaben vom vorgelagerten Modul „Aquifer“ erhalten. Es können mehrere aufeinander folgende „Aquifer“-Module mit räumlich variierenden physikalischen oder geochemischen Eigenschaften oder variierenden anfänglichen Kontaminationsbedingungen verwendet werden. Die Ausgabe des Moduls „Aquifer“ dient in der Regel als Eingabe für das/die Empfängermodul(e), z. B. „Brunnen“ oder „Süßwasserkörper“. In diesem Modell wurden zwei identische „Aquifermodule“ hintereinander implementiert.

Modul „Brunnen“: Dieses Modul berechnet die Radionuklidkonzentration im Grundwasser, das durch einen Brunnen gepumpt wird.

3.5.1.3 Im Modell angesetzte Parameter

Die Parameter für und Sickerwassergeschwindigkeiten durch den Deponiekörper und den Grundwasserleiter sind /THI 04/ entnommen. Die Tab. 3.21 zeigt diese und weitere im Modell angesetzte Parameter.

Tab. 3.21 Im Modell angesetzte Parameter

Parameter	Wert	Quelle
Länge und Breite Deponiekörper	300 m	/THI 04/
Höhe Deponiekörper	20 m	/THI 04/
Dichte Deponie	1.200 kg/m ³	/THI 04/
Porenraum Deponie	25 %	/THI 04/
Abstand Brunnen	500 m	/THI 04/
Mächtigkeit ungesättigte Zone	5 m	Abgeleitet aus Spring-Rechnungen
Dichte ungesättigte Zone	1.600 kg/m ³	Jene des Aquifers gewählt
Initiale spezifische Aktivität im Boden/ungesättigte Zone und im GWL (at time t=0)	0	-

Parameter	Wert	Quelle
Porenraum ungesättigte Zone	20 %	-
Infiltrationsrate	0,2 m/a	-
Kd-Werte für U, Cs, Sr, Cl, H, I, Tc, C, Mn, Ni, Co, Ag, Ba, Pu der ungesättigten Zone		/THI 04/ (siehe Tab. 3.23)
Mächtigkeit Grundwasserleiter	5 m	/THI 04/
Dichte Grundwasserleiter	1.600 kg/m ³	/THI 04/ (Dichte Boden)
Porenraum Grundwasserleiter	20 %	/THI 04/
Darcy-Geschwindigkeit Grundwasserleiter	100 m/a	-

Die Tab. 3.22 zeigt die Initialkonzentrationen der betrachteten Radionuklide in der Deponie (in Bq/g). Diese Werte sind /SSV 17/ entnommen.

Tab. 3.22 Initialkonzentrationen der jeweiligen Radionuklide /SSV 17/

Nuklid	Spezifische Freigabe von festen Stoffen bis 1.000 Mg/a zur Beseitigung auf Deponien [Bq/kg]
H-3	6E+6
C-14	4E+5
Cl-36	3E+2
Mn-54	6E+3
Ni-59	3E+5
Co-60	2E+3
Sr-90+	6E+2
Tc-99	7E+2
Ag-108m	1E+3
I-129	6E+1
Ba-133	1E+04
Cs-137+	8E+03
Pu-238	1E+03
Pu-239+	5E+02
U-238+	6E+02

Die Parameter der Retardation (K_d -Werte) für die Deponie und den Aquifer sind /THI 04/ entnommen und in den Tab. 3.23 und Tab. 3.24 dargestellt. Für die ungesättigte Zone wurden dieselben Werte wie für den Aquifer angesetzt.

Tab. 3.23 Angesezte K_d -Werte für den Aquifer und die ungesättigte Zone

Nuklid	Wert/Einheit [$m^3/kgDW$]
Default	0,7
U	0,0001
Cs	0,001
Sr	0,0001
Cl	0
H	0
I	0
TC	0
C	0
Mn	0,0001
Ni	0,0001
Co	0,001
Ag	0,0001
Ba	0,0001
Pu	0,001

Tab. 3.24 Angesezte K_d -Werte für den Abfall

Nuklid	Wert/Einheit [$m^3/kgDW$]
Default	0,0
U	0,01
Cs	0,01
Sr	0,001
Cl	0,00001
H	0,00001
I	0,00001
TC	0,00001
C	0,1
Mn	0,001
Ni	0,01
Co	0,01
Ag	0,001
Ba	0,001
Pu	0,1

3.5.1.4 Ermittelte Aktivitätskonzentrationen im Grundwasser

Dargestellt ist die Aktivität des jeweiligen Radionuklids, welche sich im oberflächennahen Grundwasser innerhalb eines Jahres durch eine gedachte Kontrollfläche in 500 m Abstand vom Eintragsort in das Grundwasser bewegt.

Bei den in der Modellierung in der im Grundwasserleiter nicht sorbierenden Radionukliden H-3, C-14, Cl-36, Tc-99 und I-129 tritt die maximale Aktivität nach zehn Jahren auf, bei den sorbierenden Radionukliden Ni-59 und U-238+ nach 25 Jahren. Weitere Ergebnisse finden sich in Tab. 3.25.

Tab. 3.25 Maximale Konzentration im Brunnen [Bq/m³] mit jeweiligem Zeitpunkt

Nuklid	Zeit [a]	Konzentration [Bq/m ³]
H-3	10	1,48E9
C-14	20	4,77E5
Cl-36	10	1,3E5
Mn-54	5	7,7E1
Ni-59	25	3,44E6
Co-60	50	1,25E1
Sr-90+	20	3,29E4
Tc-99	10	3,03E5
Ag-108m	20	8,59E4
I-129	10	2,59E4
Ba-133	15	2,86E5
Cs-137+	50	1,13E4
Pu-238	100	5,14E2
Pu-239+	150	5,9E2
U-238+	25	6,9E3

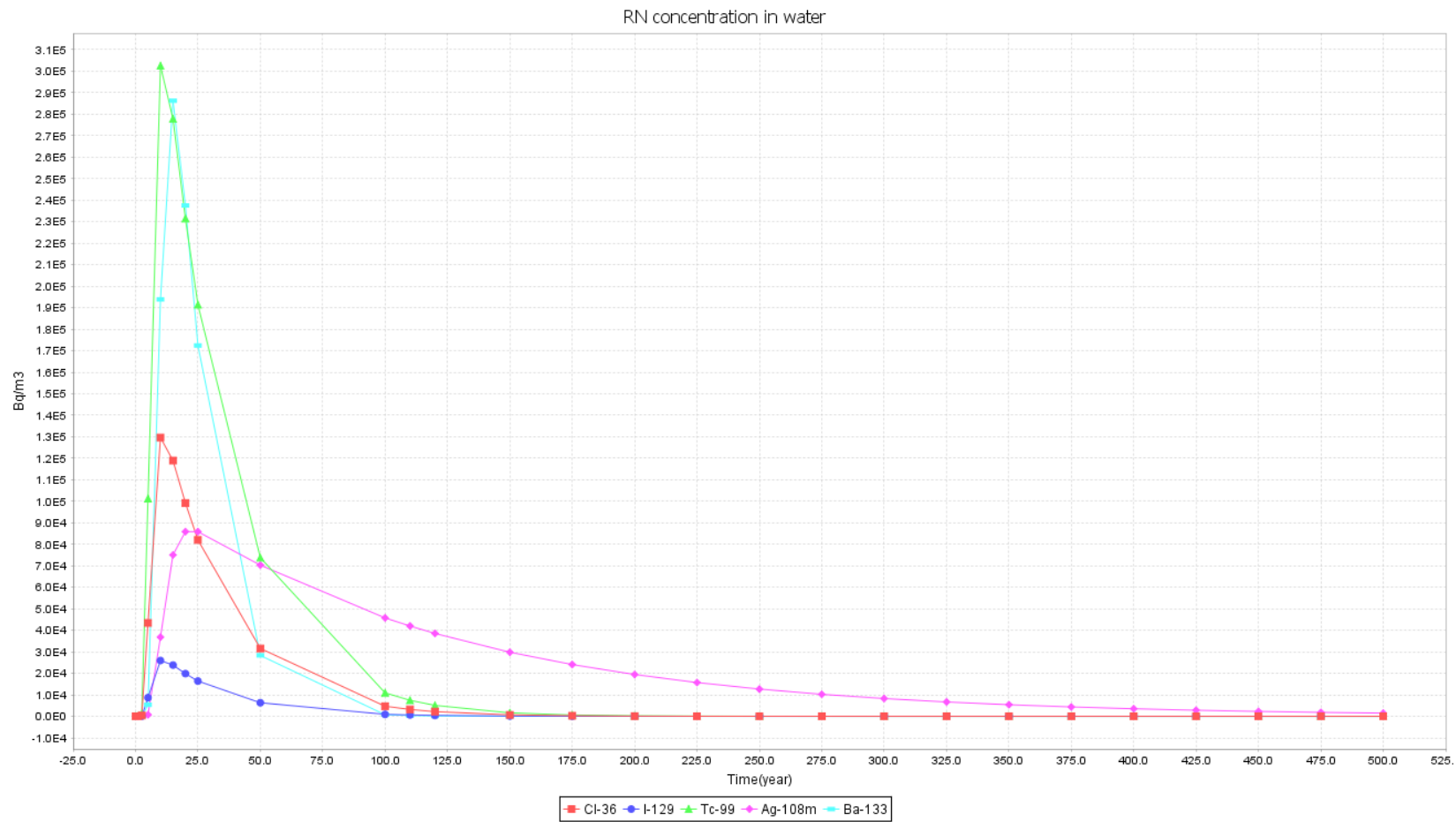


Abb. 3.13 Aktivitätskonzentration im Grundwasser für ausgewählte Radionuklide bis 500 a

3.5.1.5 Dosisberechnung

Durch die Multiplikation der oben berechneten spezifischen Aktivitäten in den Nahrungsmitteln (hier Trinkwasser) mit den altersabhängigen Verzehrsmengen gemäß /AVV 12/ sowie den altersabhängigen Ingestionsdosiskoeffizienten werden die Dosen für erwachsene Personen berechnet.

$$H_{T,g,r} = (U^W * C_r^W) * g_{g,R,T}$$

U^W : jährliche Verzehrmenge an Trinkwasser in kg (siehe Anhang 5, Tab. 1 in /AVV 12/)

C_r^W : Aktivitätskonzentration des Radionuklids r im Trinkwasser in Bq/kg

$g_{g,R,T}$: Ingestionsdosiskoeffizient des Radionuklids r für das Organ oder Gewebe T in Sv/Bq (siehe Tab. A-4.1 in /THI 04/)

Exemplarische Dosisberechnung für H-3:

$$(1,48E6 \text{ Bq/kg} * 350 \text{ kg/a}) * 4,2E-11 \text{ Sv/Bq} = 0,021 \text{ Sv} = 21 \text{ mSv (im betreffenden Jahr)}$$

Exemplarische Dosisberechnung für I-129:

$$(2,59E1 \text{ Bq/kg} * 350 \text{ kg/a}) * 1,1E-7 \text{ Sv/Bq} = 0,00099 \text{ Sv (im betreffenden Jahr)} = 0,99 \text{ mSv}$$

Die mit Hilfe des hier aufgesetzten Modells berechneten Dosen liegen weit über jenen für Personen der allgemeinen Bevölkerung von 10 $\mu\text{Sv/a}$. Grund hierfür sind die sehr konservativen Annahmen der Berechnung, wie bspw. die Abwesenheit einer Barriere und die hohe Darcy-Geschwindigkeit.

3.5.1.6 Zusammenfassung Programmierung eines radioökologischen Modells mit Ecolego

Für einige ausgewählte Radionuklide wurden Modellrechnungen von potenziellen Dosen durch die Freigabe zur Beseitigung vorgenommen. Für die Berechnungen wurde Ecolego verwendet. Seitens der GRS sollte die grundsätzliche Eignung der Software zur Berechnung spezifischer Freigabewerte geprüft werden.

In diesem Zusammenhang wurden hier Berechnungen für den Freigabepfad „Freigabe von festen Stoffen zur Beseitigung auf einer Deponie“ vorgenommen.

Parameter und Herangehensweisen wurden aus der bestehenden Literatur entnommen. Aus Gründen der Vereinfachung wurde jedoch auf das Vorhandensein einer Barriere verzichtet und stattdessen eine ungesättigte Zone implementiert sowie ein Stofftransport ab $t = 0$ angenommen. Aufgrund der somit sehr konservativen Annahmen wurden hohe Aktivitätskonzentrationen im Grundwasser und Personendosen berechnet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Ecolego grundsätzlich für die Berechnung spezifischer Freigabewerte geeignet ist. In diesem AP wurde ein konservatives und vereinfachtes Deponiemodell aufgebaut und getestet. Weiterhin wurde an diesem Modell exemplarisch die Probabilistic-Toolbox getestet werden.

3.5.2 Probabilistische Simulationen und die Nutzung der Ecolego „Sensitivitäts-Toolbox“

Ecolego bietet die Möglichkeit für aufgebaute oder importierte Modelle, probabilistische Berechnungen sowie Sensitivitätsanalysen einzelner Parameter durchzuführen. Vor dem Hintergrund der Eignungsprüfung von Ecolego zum Zweck der Berechnung von FGW, wurden anhand des zuvor aufgebauten Modells einfache Überprüfungen mit den entsprechenden Toolboxen durchgeführt.

3.5.2.1 Probabilistische Simulationen

Probabilistische Simulationen werden in Ecolego durch die Ausführung von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, bei denen einer ausgewählten Anzahl von Parametern statistische Verteilungen (PDFs) zugewiesen werden, um ihre Unsicherheit zu berücksichtigen. Anschließend wird das Modell wiederholt simuliert, wobei Eingabeparameterwerte unter Verwendung dieser Verteilungen zufällig gezeichnet werden.

Um probabilistische Simulationen in Ecolego auszuführen, müssen die Einstellungen für die Simulation zunächst definiert werden, dies betrifft z. B. die Anzahl der Iterationen, Auswahl von Parametern und Definition der Parameterkorrelation. Das Minimum besteht darin, auszuwählen, welche Parameter in die probabilistische Analyse einbezogen werden sollen.

3.5.2.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wird verwendet, um den Einfluss von Modellparametern auf Modellvorhersagen zu bewerten. Die Sensitivitäts-Toolbox ist ein optionales, voll integriertes Modul für Ecolego und eignet sich daher insbesondere für die Verwendung mit Ecolego-Modellen. Allerdings werden auch externe Modelle durch den Export/Import von Beispielen von Modelleingaben und/oder Modellvorhersagen unterstützt.

Korrelationen zwischen Parametern können durch Rangordnungskorrelation induziert werden (Methode von Iman und Conover). Die dabei durch Ecolego unterstützten Sampling-Techniken sind: Monte-Carlo, Latin Hypercube und Quasi-Random LpTau. Die enthaltenen Sensitivitätsanalyse Methoden sind

- Morris-Screening-Methode,
- Fourier-Amplitudenempfindlichkeitstest (FAST),
- Erweiterter Fourier-Amplitudenempfindlichkeitstest (EFAST),
- Sobol (erste, benutzerdefinierte und Gesamtbestellung),
- Lokale Sensibilität (Lokal) und
- Gartensche Methode (Garten).

Mit der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) können in Ecolego folgende Punkte durchgeführt werden:

- Angabe unsicherer Modellparameter und Modellausgaben
- Generieren und überprüfen von Eingabebeispielen
- Export von Eingaben und Ausgaben
- Simulation und Untersuchung von Modellausgabebeispielen
- Sensitivitätsanalyse von Modellvorhersagen

Es ist ferner möglich, Sensitivitätsanalysen für Gruppen von Parametern durchzuführen (mit Erweiterungen der Sobol- oder EFAST-Methoden). Auf diese Weise wird der Einfluss jedes der ausgewählten Parameter sowie einer beliebigen Kombination von ihnen bei der Berechnung der Sensitivitätsindizes auf einen gegebenen Output berücksichtigt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden mit Hilfe des zuvor aufgebauten Modells eine einfache Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Parameter untersucht:

- Infiltrationsrate in den Deponiekörper „Deponie.rate_infiltration“
- Mächtigkeit der ungesättigten Zone „Unsaturated_zone.length_unsat_zone“
- Porosität des Aquifers „Aquifer_Mixing.aquifer porosity“

In den Abb. 3.14 bis Abb. 3.19 wird am Beispiel der zuvor ausgewählten Parameter das Vorgehen in Ecolego sowie die Ergebnisdarstellung gezeigt.

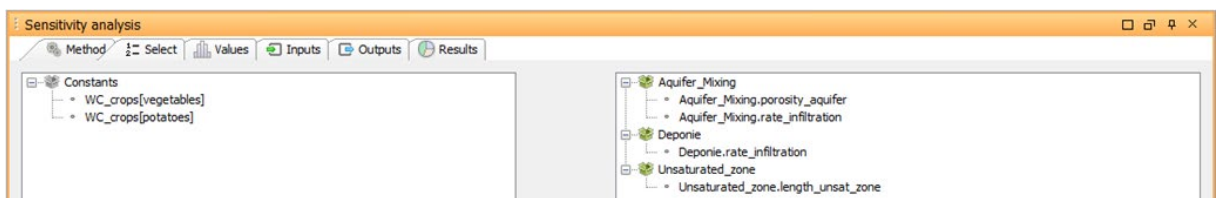


Abb. 3.14 Eingabemaske zur Auswahl der zu untersuchenden Parameter in Ecolego (Sensitivitätsanalyse)

Name	Value	PDF	Unit	Min value	Max value	Arithmetic Mean	Arithmetic Std. Dev.	Geometric Mean	Geometric Std. Dev.	Median	Mode	N
Aquifer_Mixing.rate_infiltration	0.2	norm(mean=0.2,sd=0.05,trmin=0.01)	m/year									
Aquifer_Mixing.porosity_aquifer	0.2	norm(mean=0.2,sd=0.1,trmin=0.01,trmax=1.0)	unitless									
Deponie.rate_infiltration	0.15	norm(mean=0.2,sd=0.1,trmin=0.01,trmax=1.0)	m/year									
Unsaturated_zone.length_unsat_zone	5	norm(mean=5.0,sd=1.0,trmin=1.0,trmax=10.0)	m									

Abb. 3.15 Eingabemaske der PDF für die ausgewählten Parameter in Ecolego

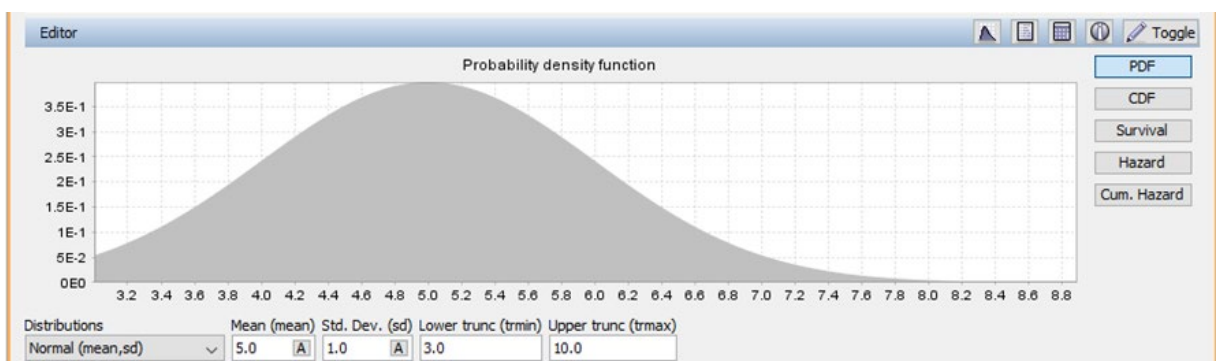


Abb. 3.16 Erweiterte Eingabemaske der PDF für die einzelnen Parameter

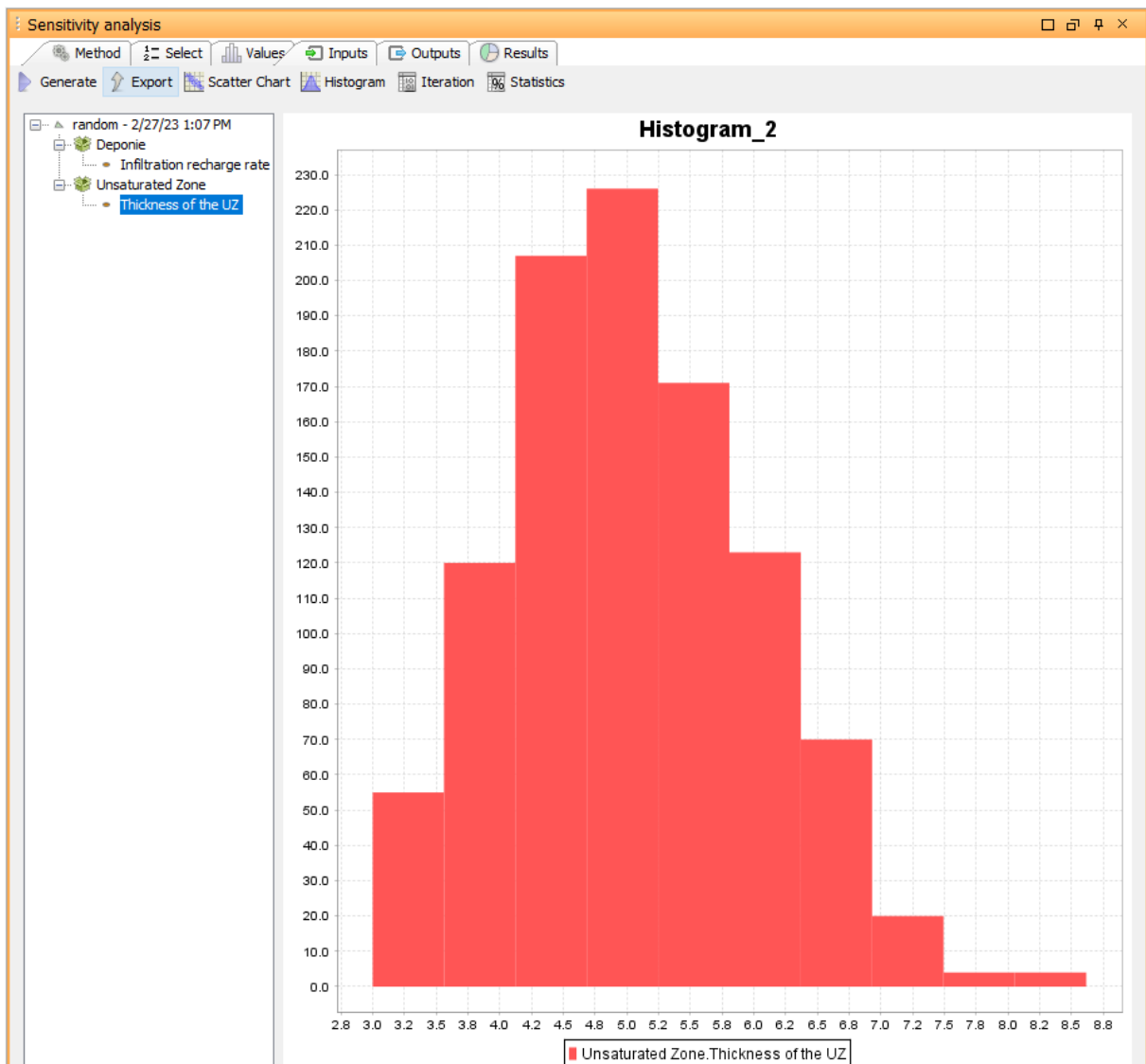


Abb. 3.17 Erzeugung der Parameterwerte (Verteilung) auf Grundlage der zuvor gewählten Verteilungsfunktion in Ecolego am Beispiel für die Mächtigkeit der ungesättigten Zone

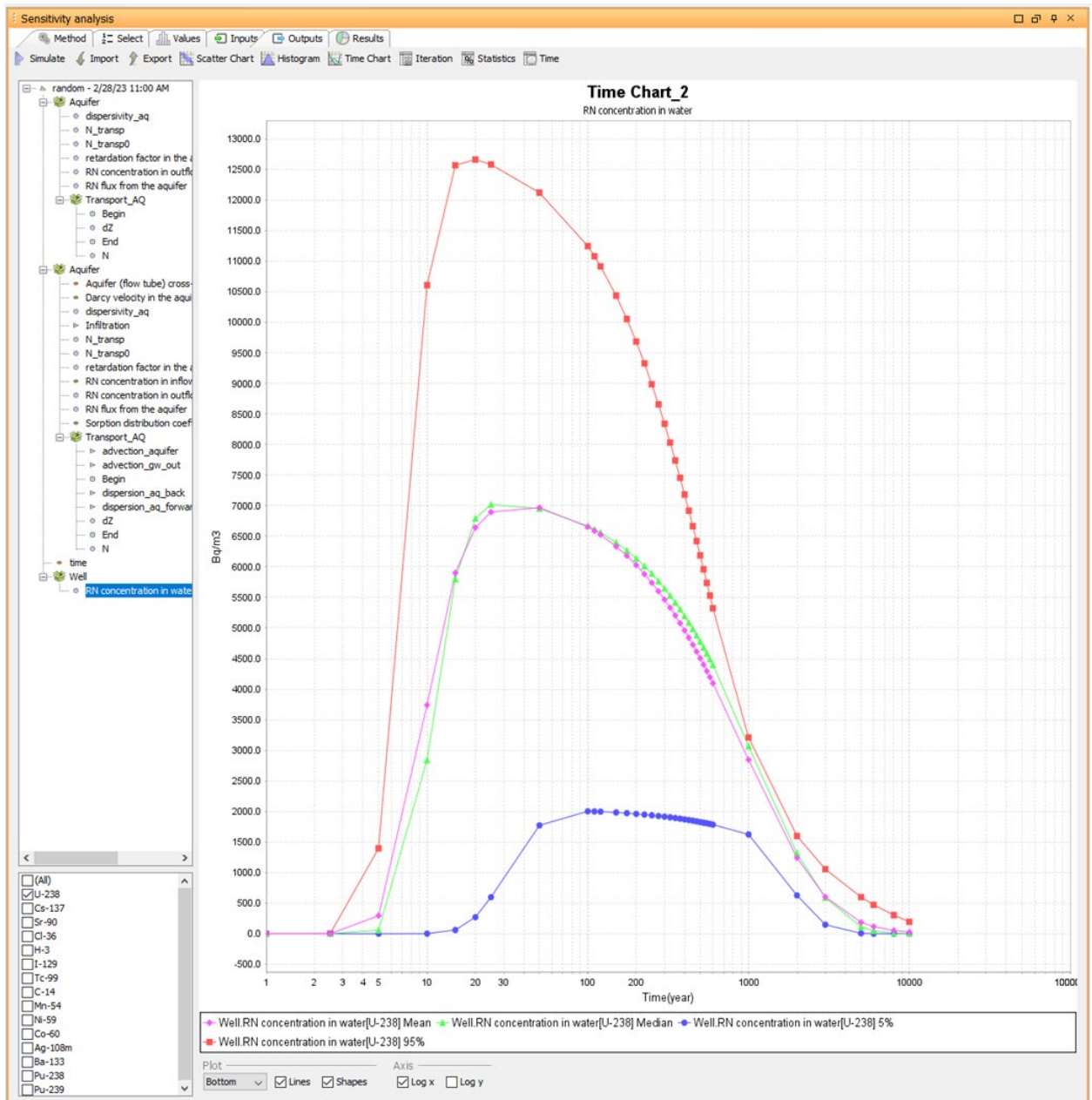


Abb. 3.18 Ergebnisdarstellung der zeitlichen Entwicklung der Radionuklidkonzentration im Beobachtungsbrunnen in Abhängigkeit der Ergebnisse der Verteilungsfunktion

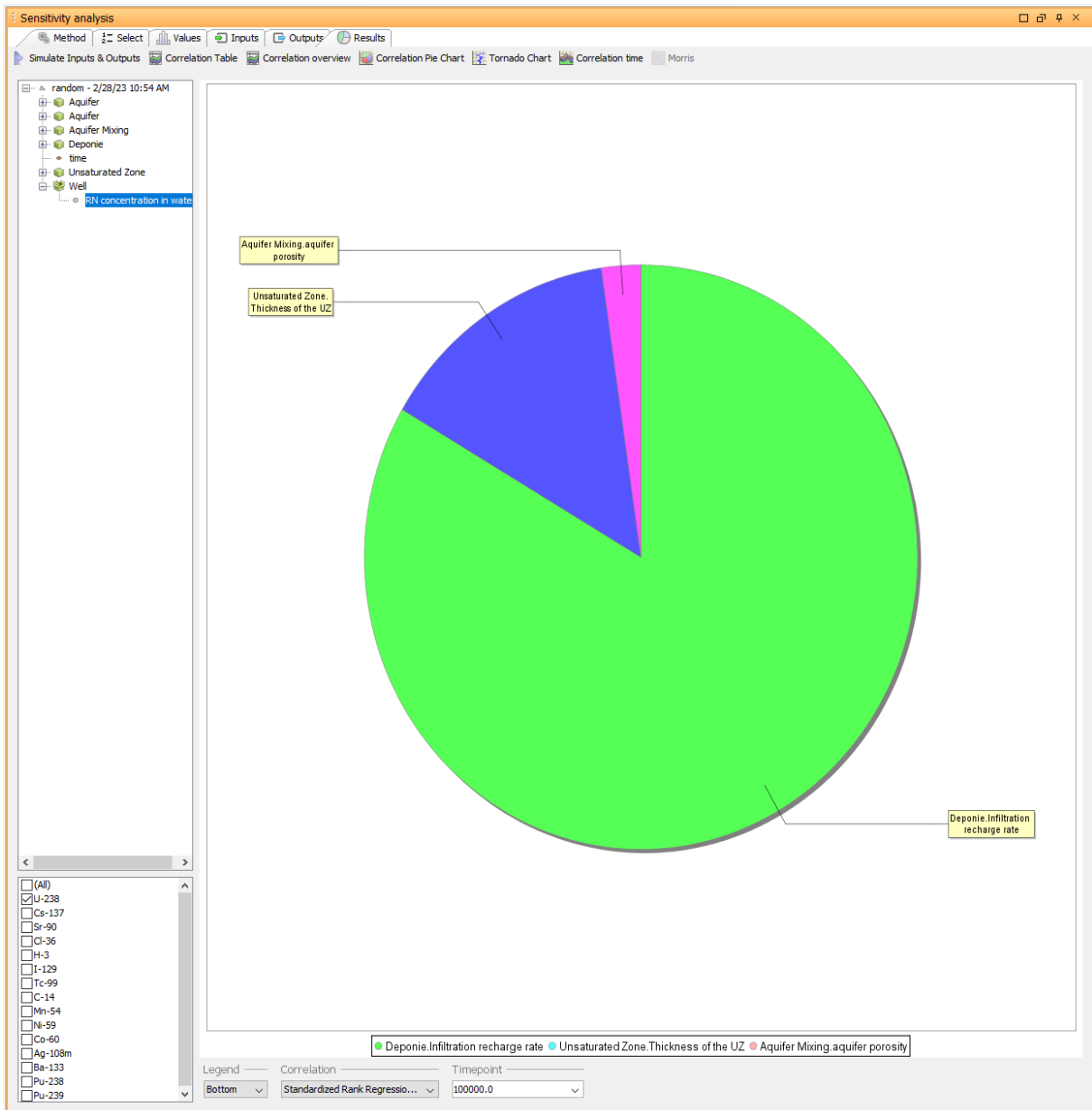


Abb. 3.19 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die drei zuvor beispielhaft ausgewählten Parameter am Beispiel des Nuklids U-238

3.5.2.3 Zusammenfassung Probabilistische Simulation und Sensitivitätsanalyse mit Ecolego

Ecolego bietet die Möglichkeit, probabilistische Modellrechnungen und auch Sensitivitätsanalysen durchzuführen und auf vielfältige Art und Weise die Ergebnisse darzustellen. Hierbei greift die Software auf eine Reihe von Berechnungsmethoden zurück, die vom Nutzer entsprechend ausgewählt und angepasst werden können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mithilfe der zusätzlich zu erwerbenden Sensitivitäts-Toolbox umfangreiche Parameteranalysen durchgeführt werden können. Die im Forschungsvorhaben durchgeführten Analysen konnten dies grundsätzlich zeigen. Die effiziente Anwendung des Softwarepaketes ist bei entsprechender Routine möglich, darüber hinaus ist die Anwendung aufgrund der vielfältigen und komplexen Zusammenhänge nicht ohne weiteres zu empfehlen.

4 Zusammenfassung

Die Freigabemodelle zur Berechnung der spezifischen Freigabewerte in Deutschland wurden in den 90er und 00er Jahren entwickelt. Für die in den Freigabemodellen verwendeten Berechnungsvorschriften spielen die Randbedingungen und die damit verbundenen Annahmen der Parameterwerte eine zentrale Rolle. Für jede Spalte⁶ der Tab. 1, Anlage 4 StrlSchV /SSV 21/ (vormals Tab. 1, Anlage III StrlSchV 2001 /SSV 17/) wurden auf diese Weise nuklidspezifische Freigabewerte ermittelt.

Randbedingungen können im Laufe der Zeit jedoch Änderungen unterliegen, wodurch sich die damit verbundenen und angenommenen Parameterwerte in den Berechnungsvorschriften der Freigabemodelle ändern können. Ferner kann es durch veränderte Randbedingungen auch zu Anpassungen bei den in den Freigabemodellen zu berücksichtigenden Szenarien kommen.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war es, solche veränderten Randbedingungen sowohl auf Seiten des praktischen Vollzugs als auch in Folge regulativer Änderungen des konservativen Abfallrechtes zu identifizieren und deren mögliche Auswirkungen auf die bestehenden Freigabewerte zu untersuchen. Zusammen mit dem Öko-Institut konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens insgesamt die folgenden Änderungen/Aspekte identifiziert und näher untersucht werden:

- Praxisnahe Parameterwerte für die Spalten 8 bis 11
- Einschränkungen bei der Aufbringung von Klärschlamm
- Anforderungen in Bezug auf die Reinheit von Metallschrott
- Anwendung des Lagrange-Partikel-Modell bei der Ausbreitungsmodellierung (AVV Tätigkeiten)
- Einführung neuer Transferfaktoren für den Muttermilchpfad (AVV Tätigkeiten)
- Erhöhung des Anteils von rezyklierten Beton in Bauwerken

⁶ In der StrlSchV /SSV 21/ wurden die Werte der Spalte 3 für die uneingeschränkte Freigabe von festen und flüssigen Stoffen den EU-BSS Annex 7 Tabelle A entnommen bzw. entsprechend der Modelle nach SR-44 berechnet /IAEA 05/, Spalte 3 StrlSchV (2018) ersetzt Spalte 5 StrlSchV (2001) /SSV 17/.

Die meisten der hier identifizierten Aspekte betreffen dabei die Spalten 8 bis 11, also die „spezifische Freigabe von Stoffen zur Beseitigung“. Hierzu lagen im Rahmen des Forschungsvorhabens zudem die einzigen qualifizierten Erfahrungen in Bezug auf die Entsorgungspraxis vor. Die Ergebnisse zeigen, dass es in diesem Bereich durchaus zu Änderungen der Parameterwerte infolge der Anpassung veränderter Randbedingungen kommen kann und zum Teil auch zum Wegfall ganzer Szenarien. Diese Änderungen lassen jedoch für die im Forschungsvorhaben untersuchten Radionuklide auf keine nennenswerten Änderungen der aktuellen Freigabewerte deuten. D. h. durch die Anpassung der Parameterwerte kommt es zwar in einigen Rechenfällen für vereinzelte Radionuklide zu veränderten und ggf. restriktiveren Freigabewerten, die jedoch im Vergleich zu anderen Szenarien nach wie vor nicht maßgeblich werden.

Im Forschungsvorhaben wurde zudem eine regulative Randbedingung für das sogenannte „Schrott-Szenario S3“ identifiziert, die hinsichtlich der Berechnung hieraus resultierender Freigabewerte nicht hinreichend genau definiert wird. Der Grund hierfür liegt an dem regulatorisch festgeschriebenen Fe-Gehalt von mindestens 92 %. Die bisherigen Modelle gemäß /THI 04/, /SSK 06/ nehmen daher jeweils diesen „Mindestwert“ im Szenario S3 „Schrott Verwertung“ an und rechnen mit einem Vermischungsfaktor $f = 0,25$ bei der Aufarbeitung des Metallschrotts, um den gemäß EU-Verordnung Nr. 333/2011 geforderten Fe-Gehalt von min. 98 % zu erreichen. Durch eine höhere Reinheit des geschredderten MVA-Stahlschrotts, ist als Folge eine geringere Vermischung denkbar. Am Beispiel des Radionuklids Co-60 würde ein Fe-Gehalt von 93,1 % im geschredderten Metallschrott ausreichen, um unter Annahme der weiteren Anforderungen an die Aufarbeitung und damit verbundene Reduzierung der Vermischung als Szenario für die Freigabe maßgeblich zu werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens war es jedoch nicht möglich, konkrete Zahlen zu den Fe-Gehalten von „Geschredderten Schrott aus der Müllverbrennung“ zu erhalten.

Am Beispiel der sowohl regulatorisch geforderten Erhöhung der Recyclingquote über den gesamten Stoffkreislauf in Kombination mit technologischen Fortschritten z. B. im Bereich der Baufertigung, zeigt sich, dass durch die Verwendung sog. RC-Betone bisher ausgeschlossene (aber restriktive) Szenarien wieder in die Betrachtung möglicher Freigabeszenarien eingeschlossen werden sollten. Die Berücksichtigung des Szenarios „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton gefertigt wurde“ verdeutlicht, dass es hier zu restriktiveren Freigabewerten gegenüber den bisherigen Freigabewerten kommen kann. Historisch wurde dieses Szenario zwar in der Vergangenheit schon als

maßgeblich identifiziert, jedoch damals nicht weiter betrachtet, da technologisch der Einsatz recycelter Baustoffe begrenzt war. Anhand zunehmender Beispiele wird jedoch deutlich, dass die damals angenommenen Vermischungen heutzutage keine technologische Grenze mehr darstellen. Weitere Bedeutung bekommt ein solches Szenario zusätzlich durch veränderte Lebensgewohnheiten und die damit ggf. verbundenen längeren Aufenthaltszeiten in solchen Gebäuden gegenüber bisherigen Annahmen. Insbesondere unter dem Aspekt der zu erwartenden großen Massen sollte dieses bisher explizit ausgeschlossene Szenario weiter beobachtet werden.

Insgesamt zeigt sich der Komplex der Freigabe mit seinen Freigabemodellen und Annahmen jedoch auch nach fast zwei Jahrzehnten als weitgehend robust gegenüber Änderungen der Randbedingungen und der damals getroffenen Annahmen für die Berechnung der Freigabewerten. Dennoch wird durch das Forschungsvorhaben deutlich, dass das System der Freigabe auch zukünftig hinsichtlich sich verändernder Randbedingungen geprüft werden sollte.

Literaturverzeichnis

- /AbfK 20/ Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (AbfKlärV) in der Fassung von 27.09.2017 (BGBl. I S. 3465), zuletzt geändert 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328).
- /AbfKlärV 20/ Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung - AbfKlärV) (AbfKlärV) in der Fassung von 2020.
- /AbwV 22/ Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (AbwV) in der Fassung von 17.07.2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), zuletzt geändert 20. Januar 2022 (BGBl. I S. 87).
- /AltöIV 20/ Altölverordnung (AltöIV) (AltöIV) zuletzt geändert 2020.
- /AVV 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung, Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen. BAnz AT 05.09.2012 B1, 28. August 2012.
- /AVV 20/ Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten, (AVV Tätigkeiten). BAnz AT 16.06.2020 B3, 8. Juni 2020.
- /BAE 83/ Baes III, C. F., Sharp, R. D.: A Proposal for Estimation of Soil Leaching and Leaching Constants for Use in Assessment Models. Journal of Environmental Quality, Bd. 12, Nr. 1, S. 17–28, 1983.
- /BBS 23/ Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V.: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020. 13. Aufl.: Berlin, Januar 2023.
- /BDSV 95/ Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V. (BDSV): Europäische Stahlschrottsortenliste. 1. Juni 1995.
- /BMU 14/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Vollzugshilfe Vollzugshilfe Anzeige- und Erlaubnisverfahren nach §§ 53 und 54 KrWG und AbfAEV. Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 29. Januar 2014.

- /DAB 20/ Fromm, L.: Recycling-Beton als Sichtbeton für Schule. Deutsches Architektenblatt (DAB), Stand vom 17. März 2020, erreichbar unter <https://www.dab-online.de/2020/03/17/recycling-beton-als-sichtbeton-fuer-schule-bauschutt-rbeton/>, abgerufen am 5. September 2023.
- /DBU 19/ Elpers, F.-G.: Von flexiblen „Beton-Köpfen“ und Umwelt-Initialzündungen: Würzburg weist wieder Weg. Deutsche Bundestiftung Umwelt, 4 S.: Osnabrück, März 2019.
- /DEC 98/ Deckert, A., Thierfeldt, S.: Berechnung massenspezifischer Freigabewerte für schwach radioaktive Reststoffe. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1998-520, August 1998.
- /DepV 17/ Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) (DepV) in der Fassung vom 27. April 2009, zuletzt geändert 27. September 2017.
- /DÜN 22/ Düngegesetz (DüngG) in der Fassung vom 9. Januar 2009, zuletzt geändert 20. Dezember 2022.
- /EC 00/ European Commission: Radiation protection 113, Recommended radiological protection criteria for the clearance of buildings and building rubble from the dismantling of nuclear installations, Recommendations of the group of experts set up under the terms of Article 31 of the Euratom Treaty. 2000.
- /EfbV 17/ Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe, technische Überwachungsorganisationen und Entsorgungsgemeinschaften (Entsorgungsfachbetriebeverordnung - EfbV) in der Fassung von 02.12.2016 (BGBl. I S. 2770), zuletzt geändert 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234).
- /EfbV 22/ Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe, technische Überwachungsorganisationen und Entsorgungsgemeinschaften (Entsorgungsfachbetriebeverordnung - EfbV) in der Fassung von 02.12.2016 (BGBl. I S. 2770), zuletzt geändert 8. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2240).
- /EMAS 16/ Verordnung über immissionsschutz- und abfallrechtliche Überwachungsvereinfachungen für nach der Verordnung (EG) Nr. 761/2001 registrierte Standorte und Organisationen (EMAS-Privilegierungs-Verordnung - EMASPrivilegV) in der Fassung vom 24. Juni 2002, zuletzt geändert 2. Dezember 2016.

- /EU 11/ VERORDNUNG (EU) Nr. 333/2011 DES RATES vom 31. März 2011 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Schrott gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind ((EU) Nr. 333/2011) zuletzt geändert 2011.
- /EUR 11/ Amtsblatt der Europäischen Union , zuletzt geändert 31. März 2011.
- /EUR 14/ 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, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom (Richtlinie 2013/59/Euratom) in der Fassung vom 5. Dezember 2013 (Amtsblatt der Europäischen Union), zuletzt geändert 6. Februar 2014 (Amtsblatt der Europäischen Union 2014, Nr. L 13, S. 1–73).
- /EUR 18a/ Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 (2008/98/EG) in der Fassung von 2008, zuletzt geändert 14. Juni 2018.
- /EUR 18b/ Richtlinie 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfall in der Fassung von 2018, zuletzt geändert 14. Juni 2018.
- /GAfV 12/ Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/21/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006 über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG (Gewinnungsabfallverordnung - GewinnungsAbfV) in der Fassung von 27.04.2009 (BGBl. I S. 900, 947), zuletzt geändert 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- /GeAV 17/ Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV) in der Fassung von 18.04.2017 (BGBl. I S. 896), zuletzt geändert 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234).
- /GRS 20/ Artmann, A., Eberhard, H., Filby, A., Hussels, M.-T., Johnen, M., Seher, H., Thielen, H., Weyand, T.: Freigabekonzepte einer neuen Strahlenschutzverordnung nach Euratom-Grundnormen 2013 in der Anwendung. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS, Nr. 506, 349 S., ISBN 978-3-946607-91-5: Köln, Oktober 2020.

- /GRS 22/ Artmann, A., Hussels, M.-T.: Reststoffe und freigegebene Stoffe sowie ihre Massenströme aus Stilllegung und Abbau kerntechnischer Anlagen in Deutschland, Abschlussbericht zum Vorhaben 4718E03520. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Nr. 803521, Juni 2022.
- /HUS 22/ Hussels, M.-T.: Massenströme aus Stilllegung und Abbau. Präsentation, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Sitzung des FAVE-FAS-AK Freigabe: Berlin, 8. September 2022.
- /IAEA 05/ Internationale Atom Energie Organisation (IAEO): Derivation of activity concentration values for exclusion, exemption and clearance (SR 44). Safety Reports Series, Bd. 44, 61 S., ISBN 9201131046: Vienna.
- /ICRP 05/ International Commission on Radiological Protection (ICRP) (Hrsg.): Doses to infants from ingestion of radionuclides in mothers' milk. ICRP publication, Bd. 95, 281 S., ISBN 9780080446271, Elsevier: Oxford, 2005.
- /IFEU 23a/ Istitut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) (Hrsg.): Bauen mit RC-Beton, Häufige Fragen zum Thema RC-Beton. Erreichbar unter <http://www.rc-beton.de/faq.html>, abgerufen am 9. Mai 2023.
- /IFEU 23b/ Istitut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) (Hrsg.): Bauen mit RC-Beton, Pilotprojekte im Überblick. Erreichbar unter <http://www.rc-beton.de/index-pilotprojekte.html>, abgerufen am 9. Mai 2023.
- /KIR 98/ Kirchner, G.: Applicability of Compartmental Models for Simulating the Transport of Ra-dionuclides in Soil. Journal of Environmental Radioactivity, Bd. 38, Nr. 3, S. 339–352, 1998.
- /KNA 20/ Knappik, R., Geyer, K., Jansen, S., Graetz, C.: Stilllegung und Rückbau des Rossendorfer Forschungsreaktors RFR, Teil 2: Ausgewählte Aspekte der Durchführung von Stilllegung und Rückbau. atw – International Journal for Nuclear Power, Bd. 65, Nr. 1, S. 17–24, 2020.
- /KrWG 17/ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) in der Fassung vom 24. Februar 2012, zuletzt geändert 27. Juni 2017.
- /MantelV 21/ Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung (MantelV) zuletzt geändert 2021.

- /ÖKO 19a/ Küppers, C., Ustohalova, V.: Stellungnahme zur Geeignetheit des MHKW Weißenhorn für die Verbrennung freigegebener Abfälle aus dem Kernkraftwerk Gundremmingen, Im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebes des Landkreises Neu-Ulm. Öko-Institut e.V.: Darmstadt, 6. November 2019.
- /ÖKO 19b/ Küppers, C., Claus, M., Ustohalova, V.: Stellungnahme zu konzeptionellen Fragen der Freigabe zur Beseitigung in einer Verbrennungsanlage sowie zu spezifischen Fragen bei der Freigabe von Abfällen aus dem Kernkraftwerk KKP zur Verbrennung bei der MVV, Im Auftrag der MVV Umwelt Asset GmbH. Öko-Institut e.V., 7. März 2019.
- /ÖKO 20/ Küppers, C., Claus, M.: Anwendung von rechnerbasierten Methoden zur Überprüfung der Freigabewerte der Strahlenschutzverordnung, Unterstützung der GRS im Rahmen des Forschungsvorhabens 3617E03510, Bericht zu AP 4: Anwendung rechnerbasierter Methoden. Öko-Institut e.V.: Darmstadt, 27. Februar 2020.
- /ÖKO 21/ Claus, M., Küppers, C.: Verifikation und Adaption von Rahmenbedingungen zur Bestimmung von Freigabewerten, Zwischenbericht für den Zeitraum vom 01.07.2020 bis 30.06.2021 bei der Unterstützung der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Rahmen des Forschungsvorhabens 4720E03510. Öko-Institut e.V.: Darmstadt, 6. August 2021.
- /ÖKO 23/ Claus, M., Ustohalova, V.: Verifikation und Adaption von Rahmenbedingungen zur Bestimmung von Freigabewerten, Bericht für den Zeitraum vom 01.07.2020 bis 31.03.2023 bei der Unterstützung der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Rahmen des Forschungsvorhabens 4720E03510. Öko-Institut e.V.: Darmstadt, 27. März 2023.
- /POS 95/ Poschner, J., Schaller, G.: Richtwerte für die spezifische Aktivität von schwach radioaktiv kontaminierten Abfällen, die konventionell entsorgt werden, BfS-ISH-169/95. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), ISBN 0937-4558: Neuherberg, 1995.
- /SSK 98/ Strahlenschutzkommission (SSK): Freigabe von Materialien, Gebäuden und Bodenflächen mit geringfügiger Radioaktivität aus anzeige- und genehmigungspflichtigem Umgang. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK), Nr. 11, 12. Februar 1998.

- /SSK 06/ Strahlenschutzkommission (SSK): Freigabe von Stoffen zur Beseitigung, Verabschiedet in der 213. Sitzung der SSK am 05./06.12.2006, Veröffentlicht im BAnz Nr. 113a vom 22.06.2007, auch erschienen als Heft 54: Freigabe von Stoffen zur Beseitigung (ISBN: 978-3-87344-135-4). Empfehlung der Strahlenschutzkommission, 1. Dezember 2006.
- /SSV 17/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I 2001, Nr. 38, S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert 27. Januar 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 5, S. 114, 1222).
- /SSV 18/ Anlageband zum Bundesgesetzblatt Teil II Nr. 34 vom 2. Dezember 2010 (Anlage zur Bekanntmachung der Neufassung der Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)) , zuletzt geändert www.juris.de 29. November 2018.
- /SSV 21/ Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) in der Fassung vom 29. November 2018 (BGBl. I 2018, Nr. 41, S. 2034, 2036), zuletzt geändert 8. Oktober 2021 (BGBl. I 2021, S. 4645).
- /THI 99/ Thierfeldt, S., Nüsser, A., Deckert, A., Schramke, M., Neuhaus, I.: Stilllegung von Kernanlagen - Freigabe von Bodenflächen kerntechnischer Standorte, Endbericht zu Vorhaben SR 2271 des BMU. Brenk Systemplanung (BS): Aachen, 1999.
- /THI 00/ Thierfeldt, S., Kugeler, E.: "Freigabe von Gebäuden und Bauschutt aus kerntechnischem Umgang" und "Abschätzung der Strahlenexposition durch Rezyklierung schwach radioaktiver Schlacke aus der konventionellen Müllverbrennung". Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-2000-558, Juni 2000.
- /THI 04/ Thierfeldt, S., Wörlen, S.: Spezifische Fragestellungen für die Fortentwicklung von Datensätzen für die Freigrenzen, Freigabe von Oberflächenkontaminationen. Fortentwicklung des radiologischen Modells für die Berechnung von Freigabewerten für die Freigabe zur Beseitigung, Ergänzungen und Durchsicht: 17. Dezember 2004, Endbericht zu AP2/AP3 des BMU Vorhabens StSch 4279 - BS-Nr. 0107-01. Brenk Systemplanung (BS), 233 S.: Aachen, 31. Juli 2004.

- /TkwV 21/ Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV) in der Fassung von 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), zuletzt geändert 22. September 2021 (BGBl. I S. 4343).
- /UBA 18/ Roskosch, A., Heidecke, P.: Klärschlamm-entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Hrsg.: Umweltbundesamt (UBA), 104 S., 2018.
- /UMBW 11/Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg: RC-Beton im Baubereich, Informationen für Bauherren, Planer und Unternehmen. März 2011.
- /VDI 21/ Kranzler, T., Ooyen, H. van: Recycelter Beton ist einsatzbereit. VDI Fachmedien GmbH & Co. KG Unternehmen für Fachinformationen, Stand vom 5. März 2021, erreichbar unter <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/forschung-und-entwicklung/recycelter-beton-ist-einsatzbereit/>, abgerufen am 9. Mai 2023.
- /WHG 23/ Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) in der Fassung vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert 4. Januar 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 5).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Übersicht über die veränderten Freigabeoptionen und Freigabemodelle der StrlSchV (2018) gegenüber der StrlSchV (2001)	9
Abb. 3.2	Zusammenhang Randbedingungen, Szenarien, Berechnungsvorschriften und Modellparameter	12
Abb. 3.3	Konventionelles Regelwerk, welches bei der „Freigabe zur Beseitigung auf einer Deponie“ zu berücksichtigen ist	14
Abb. 3.4	Einlagerungsabschnitt freigemessener Abfälle aus KKW auf der Deponie /ÖKO 21/	33
Abb. 3.5	Bodennahe Konzentration vom Am-241 in Bq/m ² gerechnet mit der neuesten Version des Lagrange-Partikel-Modells ARTM (3.0).....	65
Abb. 3.6	Massenströme bei der Stilllegung von Kernkraftwerken in Deutschland /HUS 22/	73
Abb. 3.7	Zeitliche Abschätzung des Bauschutttaufkommens (in Mg) aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen in Deutschland /GRS 22/	74
Abb. 3.8	Das radiologische Modell für einen möglichen Freigabepfad „Verbringung in ein Versatz-bergwerk“	77
Abb. 3.9	MicroShield-Eingabe für das Szenario Bodenstrahlung Staplerfahrer	83
Abb. 3.10	MicroShield-Eingabe für das Szenario Big-Bag an der Gabel	84
Abb. 3.11	MicroShield-Eingabe für das Szenario Big-Bag Einbau	84
Abb. 3.12	Screenshot der Darstellung eines Ecolego-Modells	89
Abb. 3.13	Aktivitätskonzentration im Grundwasser für ausgewählte Radionuklide bis 500 a	94
Abb. 3.14	Eingabemaske zur Auswahl der zu untersuchenden Parameter in Ecolego (Sensitivitätsanalyse)	98
Abb. 3.15	Eingabemaske der PDF für die ausgewählten Parameter in Ecolego	98
Abb. 3.16	Erweiterte Eingabemaske der PDF für die einzelnen Parameter.....	98
Abb. 3.17	Erzeugung der Parameterwerte (Verteilung) auf Grundlage der zuvor gewählten Verteilungsfunktion in Ecolego am Beispiel für die Mächtigkeit der ungesättigten Zone	99

Abb. 3.18	Ergebnisdarstellung der zeitlichen Entwicklung der Radionuklidkonzentration im Beobachtungsbrunnen in Abhängigkeit der Ergebnisse der Verteilungsfunktion	100
Abb. 3.19	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die drei zuvor beispielhaft ausgewählten Parameter am Beispiel des Nuklids U-238	101

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Überblick über das deutsche Regelwerk, welches mit Bezug auf einen möglichen Einfluss auf die Randbedingungen aktueller Freigabemodelle im Rahmen des Forschungsvorhaben untersucht wurde.....	16
Tab. 3.2	Durch das Öko-Institut überprüfte Parameter der Spalten 8 und 10 (Freigabewerte fester Stoffe zur Beseitigung auf einer Deponie bis zu 100 Mg/a bzw. 1000 Mg/a) /ÖKO 21/.....	32
Tab. 3.3	Durch das Öko-Institut überprüfte Parameter der Spalten 9 und 11 (Freigabe von Stoffen zur Beseitigung in Verbrennungsanlagen bis zu 100 Mg/a bzw. 1000 Mg/a) /ÖKO 21/.....	34
Tab. 3.4	Parameter der Rechenfälle für Deponieeinlagerung /ÖKO 23/.....	48
Tab. 3.5	Parameterwerte der MVA für die Rechenfälle 7 bis 10 /ÖKO 23/.....	51
Tab. 3.6	Neuberechnung und Vergleich der Freigabewerte der Spalte 8.....	55
Tab. 3.7	Neuberechnung und Vergleich der Freigabewerte der Spalte 10.....	56
Tab. 3.8	Neuberechnung und Vergleich der Freigabewerte der Spalte 9.....	59
Tab. 3.9	Neuberechnung und Vergleich der Freigabewerte der Spalte 11.....	60
Tab. 3.10	Abweichungen bei der Neuberechnungen der Spalte 10 über den Pfad der Klärschlammverwertung ohne Fleisch und Milchverzehr.....	61
Tab. 3.11	Abweichung Schrott Szenario S3.....	63
Tab. 3.12	Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem neuen und alten Dosismodell der GRS in Bezug auf die Änderungen der neuen AVV Tätigkeiten.....	66
Tab. 3.13	Dosiskoeffizienten für den Verzehr von Muttermilch bei Ingestion oder Inhalation durch die Mutter in Sv/Bq.....	68
Tab. 3.14	Abweichungen bei der Neuberechnungen ausgewählter Radionuklide von Spalte 10 mit aktualisierten Dosiskoeffizienten für den Muttermilchpfad.....	69
Tab. 3.15	Annahmen für das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton (RC-Beton) gefertigt wurde“.....	70
Tab. 3.16	Berechnung neuer FGW für das Szenario „Bewohnen eines Hauses, welches aus rezykliertem Beton gefertigt wurde“ für die Spalte 6.....	71
Tab. 3.17	Übersicht der Expositionszeiten einzelner Arbeitsplätze.....	82

Tab. 3.18	Dosisumrechnungsfaktoren, FGW nach Anlage 4, Tab. 1, Spalte 10 StrISchV und abgeleitete Dosisleistungen für relevante Radionuklide für das Szenario des Fahrers des Transportfahrzeugs	82
Tab. 3.19	Dosisumrechnungsfaktoren, FGW nach Anlage 4, Tab. 1, Spalte 10 StrISchV und abgeleitete Dosisleistungen für relevante Radionuklide für das Szenario des Fahrers des Stapelfahrzeugs.....	85
Tab. 3.20	Externe Strahlenexposition für die beiden Untertageszenarien U3 und U4.....	85
Tab. 3.21	Im Modell angesetzte Parameter	90
Tab. 3.22	Initialkonzentrationen der jeweiligen Radionuklide /SSV 17/	91
Tab. 3.23	Angesetzte K_d -Werte für den Aquifer und die ungesättigte Zone	92
Tab. 3.24	Angesetzte K_d -Werte für den Abfall.....	92
Tab. 3.25	Maximale Konzentration im Brunnen [Bq/m^3] mit jeweiligem Zeitpunkt	93

Abkürzungsverzeichnis

AbfklärV	Klärschlammverordnung
AbwV	Abwasserverordnung
AP	Arbeitspaket
ARTM	Atmosphärische Radionuklid Transportmodell
AVV Tätigkeiten	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
DepV	Deponieverordnung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Deponieklasse
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
EFAST	Erweiterter Fourier-Amplitudenempfindlichkeitstest
EfbV	Entsorgungsfachbetriebsverordnung
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
FAST	Fourier-Amplitudenempfindlichkeitstest
FGW	Freigabewert
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
GewinnungsAbfV	Gewinnungsabfallverordnung
GG	Grundgesetz
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
IAEA	Internationale Atomenergie-Organisation
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission
KKR	Kernkraftwerk Rheinsberg
KKW	Kernkraftwerk
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KWW	Kernkraftwerk Würgassen
LBM-DE	Landbedeckungsmodell Deutschland
MantelV	Mantelverordnung für Ersatzbaustoffe und Bodenschutz
MBV	mechanisch-biologische Vorbehandlung

MEB	Mineralische Ersatzbaustoffe
MQ	mittlerer Abfluss
MVA	Müllverbrennungsanlage
PDF	probability density function
RC-Beton	Recycling-Beton
REA	Rauchgasentschwefelungsanlagen
RF	Rechenfall
RFR	Forschungsreaktor Rossendorf
SR 44	IAEA Safety Report 44
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TA	Technische Anleitung
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
VAK	Versuchsatomkraftwerk Kahl
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de