

Mögliche radiologische Folgen der Freigabe zur Beseitigung nach § 29 StrlSchV bei der Nachnutzung einer Deponie in der Nachsorgephase und in der Zeit nach der Entlassung aus der Nachsorge

Darmstadt,
15.11.2016

Im Auftrag
des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des
Landes Baden-Württemberg

Autorinnen und Autoren

Dipl.-Phys. Christian Küppers
Dipl.-Ing. Manuel Claus
Dr. Ing. Veronika Ustohalova

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
79017 Freiburg
Hausadresse
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Zusammenfassung	7
1. Hintergrund und Einleitung	9
2. Rechtliche Regelungen für den Zeitraum der Nachsorgephase einer Deponie sowie deren Basis- und Oberflächenabdichtung und für die Zeit nach der Entlassung aus der Nachsorge	11
2.1. Rechtliche Anforderungen für die Nachsorgephase	11
2.2. Voraussetzungen für die Entlassung aus der Nachsorge	13
2.3. Rechtliche Anforderungen in der Zeit nach der Entlassung aus der Nachsorge	14
2.4. Anforderungen an die geologische Barriere und die Ausführung der Basisabdichtung der Deponie	14
2.5. Anforderungen an die Ausführung der Oberflächenabdichtung der Deponie	17
3. Mögliche Strahlenexpositionen durch zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebene Abfälle während und nach Entlassung aus der Nachsorgephase	21
3.1. Mögliche Strahlenexpositionen bei intaktem Oberflächenabdichtungssystem	21
3.1.1. Randbedingungen während und nach Entlassung aus der Nachsorgephase sowie Szenarien der Nachnutzung	21
3.1.2. Mögliche Strahlenexposition in den Nachnutzungsszenarien	25
3.1.3. Konservativität der Annahmen und bei der Dosisermittlung bei intaktem Oberflächenabdichtungssystem	31
3.2. Mögliche Strahlenexpositionen bei langfristig nicht intaktem Oberflächenabdichtungssystem	32
3.2.1. Modellberechnungen zu Deponielangzeitverhalten und Radionuklidmigration in (Artemann 2014)	32
3.2.2. Prüfung der Einhaltung des 10 µSv-Konzepts bei langfristig nicht intaktem Oberflächenabdichtungssystem	33
Literaturverzeichnis	37
Anhang	A-1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Oberflächen- und Basisabdichtungssystem einer Deponie der Deponiekasse I

20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Aufbau der geologischen Barriere und des Basisabdichtungssystems	16
Tabelle 2-2:	Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems	19
Tabelle 3-1:	Randbedingungen und Annahmen der Nachnutzungsszenarien bei intakter Basisabdichtung	25
Tabelle 3-2:	Dosisleistungskoeffizienten für Aufenthalt auf dem Deponiekörper, Abschirmfaktoren für Boden, Freigabewerte und massenbezogene Aktivität des Deponiekörpers für ausgewählte Radionuklide	27
Tabelle 3-3:	Dosis durch Direktstrahlung aus dem Deponiekörper (Freigabe von bis zu 100 Mg/a), Radionuklide mit einer Dosis von mehr als 10^{-3} $\mu\text{Sv/a}$	29
Tabelle 3-4:	Dosis durch Direktstrahlung aus dem Deponiekörper (Freigabe von bis zu 1000 Mg/a), Radionuklide mit einer Dosis von mehr als 10^{-3} $\mu\text{Sv/a}$	30

Zusammenfassung

Hinsichtlich der Deponierung von zur Beseitigung auf einer Deponie nach § 29 Strahlenschutzverordnung freigegebenen Abfällen hat sich in Baden-Württemberg die Frage ergeben, ob die spätere Nachnutzung einer Deponie eingeschränkt werden muss, um die radiologischen Anforderungen (Einhaltung der De Minimis-Dosis von 10 µSv im Jahr) zu erfüllen. Nachnutzungsbetrachtungen sind bislang für die in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Freigabewerte nicht in ausreichendem Maße erfolgt.

Es wurden daher die rechtlichen Anforderungen, insbesondere der Deponieverordnung, herangezogen um Randbedingungen für Szenarien einer Nachnutzung festzulegen.

Dabei werden zwei Situationen unterschieden:

- Das Oberflächenabdichtungssystem wurde anforderungsgerecht ausgeführt, wird in Stand gehalten und ist unversehrt.
- Die DepV fordert für die Abdichtungssysteme, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen sein muss. Es wurde daher für den Zeitraum ab 100 Jahren nach Stilllegung der Deponie ein beginnendes Versagen des Oberflächenabdichtungssystems betrachtet.

Die Modellierung deckt alle oberirdischen Deponien in Baden-Württemberg, auf denen nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebene Abfälle bereits eingelagert worden sind oder zukünftig eingelagert werden sollen, ab. Die Berechnungen der szenarienbezogenen Dosen erfolgten für alle Radionuklide, für die in der Strahlenschutzverordnung Freigabewerte zur Beseitigung auf einer Deponie festgelegt sind.

Bei insgesamt sehr konservativ gewählten Randbedingungen für fünf verschiedene Nachnutzungsszenarien ergab sich bei unversehrtem Oberflächenabdichtungssystem im ungünstigsten Fall bei der Freigabe nach § 29 StrlSchV von Abfällen zur Beseitigung bis zu 1000 Mg im Jahr nur eine Dosis von 0,46 µSv im Jahr, bei einer Freigabe nach § 29 StrlSchV von Abfällen zur Beseitigung bis zu 100 Mg im Jahr 1,4 µSv im Jahr (Co-60, Szenario „Bebauung“, Kleinkind des Alters ≤ 1 Jahr). Die De Minimis-Dosis von 10 µSv im Jahr ist daher in allen Szenarien und für alle betrachteten Radionuklide deutlich unterschritten.

Für den Fall des Versagens des Oberflächenabdichtungssystems ab 100 Jahren nach Stilllegung der Deponie konnte gezeigt werden, dass keine Dosen von mehr als 10 µSv im Jahr möglich sind.

1. Hintergrund und Einleitung

Der Ausstieg aus der Kernenergie im Rahmen der Energiewende bedingt die Stilllegung und den Rückbau von Kernkraftwerken (KKW). Außerdem werden in Baden-Württemberg weitere kerntechnische Anlagen, insbesondere der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe Rückbau- und Entsorgungs-GmbH (WAK GmbH) rückgebaut. Beim Rückbau weist ein großer Teil des anfallenden Materials eine so geringe Kontamination mit radioaktiven Stoffen auf, dass er nach § 29 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2001) freigegeben werden kann. Pro rückgebautem KKW werden mehrere 1.000 Mg an Abfällen, überwiegend Bauschutt, erwartet, die aufgrund der Höhe ihres Gehalts an künstlichen Radionukliden keiner uneingeschränkten Freigabe, d. h. keiner freien Verwertung zugeführt werden können, wohl aber die Freigabewerte für die Beseitigung auf einer Deponie unterschreiten. Die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger, in deren Entsorgungsgebiet sich der Standort der rückzubauenden kerntechnischen Anlage befindet, sind nach § 20 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG 2012) gesetzlich verpflichtet, nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebene Abfälle als Abfall zur Beseitigung aus anderen Herkunftsbereichen zu beseitigen und demgemäß auf ihren Deponien anzunehmen und entsprechend den Regelungen der Deponieverordnung (DepV 2009) abzulagern. Stehen eigene Deponien nicht zur Verfügung, sind im Rahmen der interkommunalen Zusammenarbeit Deponiekapazitäten anderer öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger zu nutzen, mit denen hierzu eine Vereinbarung über die Zusammenarbeit bei der Abfallbeseitigung geschlossen wurde.

Der Landkreistag Baden-Württemberg hat gemeinsam mit den betroffenen Stadt- und Landkreisen eine Handlungsanleitung zur Entsorgung von nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebenen Abfällen auf Deponien entwickelt (Landkreistag BaWü 2015). Darin sind Festlegungen getroffen, die eine weitere Reduzierung möglicher Risiken bewirken sollen.

Für die Deponie „Am Froschgraben“ im Landkreis Ludwigsburg sowie für viele weitere Deponien sind zumindest Teilbereiche auch für eine landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche oder sonstige Nachnutzung vorgesehen. Diese ist in der Regel bereits in allgemeiner Form Gegenstand des Planfeststellungsbeschlusses der Deponie. Einzelheiten hierzu werden im Regelfall im Rahmen einer Änderung des Planfeststellungsbeschlusses rechtzeitig mit dem Eintritt in die Stilllegungsphase festgelegt. Im Fall der Deponie Am Froschgraben im Landkreis Ludwigsburg soll nach der Stilllegung in der Nachsorgephase eine Fläche von etwa 20 ha zur Wiederaufnahme der landwirtschaftlichen Nutzung zurückgegeben werden.

Bei der Herleitung der Freigabewerte für die Beseitigung wurden eine Reihe von möglichen Expositionsszenarien betrachtet und die Freigabewerte so gewählt, dass bei diesen eine Dosis von 10 µSv im Jahr nicht überschritten werden kann. Eine Dosis im Bereich von 10 µSv im Jahr ist nach StrlSchV die Voraussetzung für die Freigabe. Die Freigabewerte zur Beseitigung basieren auf einer Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK) (SSK 2006). In ihrer Empfehlung hat die SSK auch Betrachtungen zu langfristigen radiologischen Folgen einer Ablagerung von nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebenen Abfällen auf einer Deponie vorgenommen, eine Wohnbebauung oder direkte landwirtschaftliche Nutzung aber ausgeschlossen.

Da keine Modellierung möglicher radiologischer Folgen einer Nachnutzung bei der Herleitung der Freigabewerte erfolgt ist, hat das Umweltministerium Baden-Württemberg in einer Pressemitteilung vom 28.06.2016 bekanntgegeben, dass die Lieferung nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebener Abfälle auf Deponien in Baden-Württemberg ausgesetzt wird, bis offene Fragen zur Nachnutzung von Deponien geklärt sind.

Das Öko-Institut e.V. wurde am 18.07.2016 vom Umweltministerium Baden-Württemberg im Rahmen der staatlichen Aufsicht nach § 19 Abs. 1 des Atomgesetzes (AtG) als Sachverständiger nach § 20 AtG beauftragt, folgende Frage Gutachterlich zu klären:

„Ist bei einer Deponie, in der gemäß § 29 Abs. 2 Satz 1 i. V. m. Satz 2 Nr. 2 Buchstabe a) StrlSchV feste Stoffe zur Beseitigung auf einer Deponie eingelagert wurden, auch bei der landwirtschaftlichen Nutzung, der forstwirtschaftlichen Nutzung, einer Nutzung mit Freizeitanlagen (etwa durch einen Golfplatz) oder bei einer Wohnbebauung auf der dann stillgelegten Deponie in der Nachsorgephase und nach der Entlassung aus der Nachsorgephase unter Zugrundelegung der nachgewiesenen Unterschreitung der Freigabewerte gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 9a bzw. 9c StrlSchV das 10-Mikro-Sievert-Konzept eingehalten?“

Die vorliegende Stellungnahme gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden die für die Fragestellung relevanten rechtlichen Anforderungen an eine Deponie für den Zeitraum der Nachsorgephase¹ und die Zeit nach der Entlassung aus der Nachsorge dargelegt.

In Kapitel 3 werden die möglichen Strahlenexpositionen durch nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebene Abfälle auf der Basis der in Kapitel 2 festgestellten Randbedingungen ermittelt. Dabei werden zwei Situationen unterschieden:

- Das Oberflächenabdichtungssystem wurde anforderungsgerecht ausgeführt, wird in Stand gehaltenen und ist unversehrt.
- Die DepV fordert für die Abdichtungssysteme, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen sein muss. Es wird daher für den Zeitraum ab 100 Jahren nach Stilllegung der Deponie ein beginnendes Versagen des Oberflächenabdichtungssystems betrachtet.

Die Untersuchungen erfolgen für alle Radionuklide, für die in der StrlSchV Freigabewerte zur Beseitigung auf einer Deponie festgelegt sind.

¹ Nachsorgephase: Der Zeitraum nach der endgültigen Stilllegung einer Deponie oder eines Deponieabschnittes bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die zuständige Behörde nach § 40 Abs. 5 KrWG den Abschluss der Nachsorge der Deponie festgestellt hat (entsprechend der Begriffsbestimmung in § 2 Nr. 27 DepV)

2. Rechtliche Regelungen für den Zeitraum der Nachsorgephase einer Deponie sowie deren Basis- und Oberflächenabdichtung und für die Zeit nach der Entlassung aus der Nachsorge

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf Deponien der Klassen I, II und III. Die Einlagerung von nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebenen Abfällen auf einer Deponie der Klasse 0 ist nicht zulässig. Sofern keine Deponieklassierung genannt wird, gilt die entsprechende Anforderung für diese drei Klassen gleichermaßen.

In Kapitel 2.1 werden die rechtlichen Anforderungen für die Nachsorgephase beschrieben, in Kapitel 2.2 die Voraussetzungen für eine Entlassung aus der Nachsorge und in Kapitel 2.3 die Anforderungen in der Zeit nach der Entlassung aus der Nachsorge. Anschließend werden die Anforderungen an die Basisabdichtung (Kapitel 2.4) und die Oberflächenabdichtung (Kapitel 2.5) dargestellt.

2.1. Rechtliche Anforderungen für die Nachsorgephase

Zur Stilllegung einer Deponie fordert § 10 Abs. 2 DepV, dass der Deponiebetreiber die endgültige Stilllegung der Deponie oder eines Deponieabschnittes nach § 40 Absatz 3 KrWG bei der zuständigen Behörde beantragt und unverzüglich alle erforderlichen Maßnahmen zur Errichtung des Oberflächenabdichtungssystems nach Anhang 1 Nummer 2 DepV durchführt (§ 10 Abs. 1 DepV).

Gemäß § 11 DepV hat der Deponiebetreiber in der Nachsorgephase alle Maßnahmen, insbesondere die Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen, nach § 12 DepV durchzuführen, die zur Verhinderung von Beeinträchtigungen des Wohles der Allgemeinheit erforderlich sind.

In § 12 DepV werden die Maßnahmen zur Kontrolle, Verminderung und Vermeidung von Emissionen, Immissionen, Belästigungen und Gefährdungen festgeschrieben. Zur Feststellung, ob von einer Deponie die Besorgnis einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder einer sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften ausgeht, legt die zuständige Behörde vor Beginn der Ablagerungsphase unter Berücksichtigung der jeweiligen hydrologischen Gegebenheiten am Standort der Deponie und der Grundwasserqualität entsprechende Auslöseschwellen und geeignete Grundwasser-Messstellen zur Kontrolle dieser Schwellen fest. Diese Grundwasser-Messstellen sowie sonstige Messeinrichtungen hat der Deponiebetreiber vor Beginn der Ablagerungsphase zu schaffen und bis zum Ende der Nachsorgephase zu erhalten.

Der Deponiebetreiber hat bis zum Ende der Nachsorgephase Messungen und Kontrollen nach Anhang 5 Nr. 3.2 DepV durchzuführen. Für die Nachsorgephase bedeutet dies insbesondere

- vierteljährliche Prüfungen des Dichtungskontrollsysteams (soweit vorhanden),
- halbjährliche Kontrollen der Sickerwassermenge und Sickerwasserzusammensetzung,
- halbjährliche Kontrollen der Grundwasserstände und Grundwasserbeschaffenheit im Hinblick auf die Unterschreitung der Auslöseschwellen,
- jährliche Setzungsmessungen und Stabilitätsuntersuchungen,
- jährliche Untersuchungen der Verformung des Basisabdichtungssystems,
- jährliche Prüfungen der Entwässerungsleitungen,
- jährliche Prüfung der Funktionsfähigkeit und Verformung des Oberflächenabdichtungssystems.

Ergänzend hat der Deponiebetreiber bis zum Ende der Nachsorgephase folgende Pflichten:

- Der Anfall von Sickerwasser ist so gering zu halten, wie dies nach dem Stand der Technik möglich ist. Wird eine Entwässerungsschicht errichtet, hat der Deponiebetreiber das anfallende Sickerwasser zu fassen und zu kontrollieren. Gefasstes Sickerwasser und eventuelle Rückstände aus einer Sickerwasserreinigung sind ordnungsgemäß zu entsorgen, soweit es nicht in den Deponiekörper infiltriert wird (Anhang 5 Nr. 6 DepV).
- Entsteht auf einer Deponie auf Grund biologischer Abbauprozesse Deponiegas in relevanten Mengen, so hat der Deponiebetreiber dieses Deponiegas schon in der Ablagerungsphase zu fassen und zu behandeln sowie nach Möglichkeit energetisch zu verwerten. Deponiegaserfassung, -behandlung und -verwertung sind nach dem Stand der Technik durchzuführen. Quantität und Qualität des Deponiegases sind zu untersuchen. Mit Zustimmung der zuständigen Behörde kann der Deponiebetreiber auf die Fassung geringer Restemissionen an Deponiegas verzichten. In diesem Fall hat er gegenüber der zuständigen Behörde nachzuweisen, dass das im Deponiegas enthaltene Methan vor Austritt in die Atmosphäre weitestgehend oxidiert wird (Anhang 5 Nr. 7 DepV).
- Sonstige von der Deponie ausgehende Belästigungen und Gefährdungen sind zu minimieren. Diese Belästigungen und Gefährdungen sind (Anhang 5 Nr. 8 DepV)
 - Geruchs- und Staubemissionen,
 - Brände,
 - Aerosolbildung,
 - Vögel, Ungeziefer, Insekten,
 - Lärm und Verkehr.

Der Deponiebetreiber hat die Maßnahmen, die bei Überschreiten der Auslöseschwellen durchgeführt werden, in Maßnahmenplänen zu beschreiben und der zuständigen Behörde zur Zustimmung vorzulegen. Werden die Auslöseschwellen überschritten, hat der Deponiebetreiber die zuständige Behörde unverzüglich zu informieren und nach den Maßnahmenplänen zu verfahren.

Nach § 12 Abs. 5 DepV kann die zuständige Behörde weitere Überwachungsmaßnahmen anordnen, wenn zu besorgen ist, dass durch die Deponie das Wohl der Allgemeinheit beeinträchtigt wird. Nach § 12 Abs. 6 DepV hat der Deponiebetreiber bei allen Ereignissen mit erheblichen Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit unverzüglich die erforderlichen Maßnahmen zur Begrenzung der Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit sowie zur Vermeidung weiterer möglicher Ereignisse dieser Art zu ergreifen. Die zuständige Behörde verpflichtet den Deponiebetreiber, alle weiteren geeigneten Maßnahmen zu ergreifen, die zur Begrenzung der Umweltauswirkungen und zur Vermeidung weiterer möglicher Ereignisse erforderlich sind.

In § 22 DepV ist geregelt, dass die zuständige Behörde die behördlichen Entscheidungen nach § 21 DepV (dazu zählen das zulässige Deponievolumen, die zulässige Größe der Ablagerungsfläche, die Oberflächengestaltung, die Endhöhen, die Mess- und Überwachungsverfahren, die Anforderungen an die Nachsorgephase, die Auslöseschwellen etc.) alle vier Jahre darauf zu überprüfen hat, ob zur Einhaltung des Standes der Technik weitere Bedingungen, Auflagen oder Befristungen angeordnet oder bestehende geändert werden müssen. Soweit die von der Deponie verursachten Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit, die Betriebssicherheit oder neue umweltrechtliche Vorschriften dies erfordern, nimmt die zuständige Behörde entsprechende Anordnungen oder Änderungen der behördlichen Entscheidungen vor.

Gemäß § 22a DepV sind Überwachungspläne zu erstellen, die von den zuständigen Behörden regelmäßig zu überprüfen und soweit erforderlich zu aktualisieren sind. Auf der Grundlage der Überwachungspläne erstellen oder aktualisieren die zuständigen Behörden regelmäßig Überwachungsprogramme, in denen auch die Zeiträume angegeben sind, in denen Vor-Ort-Besichtigungen stattfinden müssen. In welchem zeitlichen Abstand Deponien vor Ort besichtigt werden müssen, richtet sich nach einer Beurteilung der mit der Deponie verbundenen Umweltrisiken. Der Abstand zwischen zwei Vor-Ort-Besichtigungen darf dabei bei Deponien der Klasse III ein Jahr, bei Deponien der Klasse II zwei Jahre und bei Deponien der Klasse I drei Jahre nicht überschreiten. Wurde bei einer Überwachung festgestellt, dass der Deponiebetreiber in schwerwiegender Weise gegen die Zulassung verstößt, hat die zuständige Behörde innerhalb von sechs Monaten nach der Feststellung des Verstoßes eine zusätzliche Vor-Ort-Besichtigung durchzuführen. Unbeschadet der genannten Überwachung führen die zuständigen Behörden bei Beschwerden wegen ernsthafter Umweltbeeinträchtigungen, bei Ereignissen mit erheblichen Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit und bei Verstößen gegen Vorschriften des KrWG, der DepV oder einer auf Grund des KrWG erlassenen Rechtsverordnung eine Überwachung durch.

2.2. Voraussetzungen für die Entlassung aus der Nachsorge

Für die Entlassung aus der Nachsorge hat die zuständige Behörde gemäß § 40 Abs. 5 KrWG auf Antrag den Abschluss der Nachsorgephase festzustellen. Die Vorgehensweise und Vorgaben hierfür sind in § 11 Abs. 2 DepV geregelt.

Kommt demnach die zuständige Behörde unter Berücksichtigung der Prüfkriterien nach Anhang 5 Nr. 10 DepV zu dem Schluss, dass aus dem Verhalten einer Deponie der Klasse 0, I, II oder III zukünftig keine Beeinträchtigungen des Wohles der Allgemeinheit zu erwarten sind, kann sie auf Antrag des Deponiebetreibers die Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen nach § 12 DepV aufheben und nach § 40 Abs. 5 KrWG den Abschluss der Nachsorgephase feststellen. Die Prüfkriterien nach Anhang 5 Nr. 10 DepV umfassen insbesondere:

1. Umsetzungs- oder Reaktionsvorgänge sowie biologische Abbauprozesse sind weitgehend abgeklungen.
2. Eine Gasbildung findet nicht statt oder ist so weit zum Erliegen gekommen, dass keine aktive Entgasung erforderlich ist, austretende Restgase ausreichend oxidiert werden und schädliche Einwirkungen auf die Umgebung durch Gasmigration ausgeschlossen werden können.
3. Setzungen sind so weit abgeklungen, dass setzungsbedingte Beschädigungen des Oberflächenabdichtungssystems für die Zukunft ausgeschlossen werden können. Hierzu ist die Setzungsentwicklung der letzten zehn Jahre zu bewerten.
4. Das Oberflächenabdichtungssystem ist in einem funktionstüchtigen und stabilen Zustand, der durch die derzeitige und geplante Nutzung nicht beeinträchtigt werden kann. Es ist sicherzustellen, dass dies auch bei Nutzungsänderungen gewährleistet ist.
5. Die Deponie ist insgesamt dauerhaft standsicher.
6. Die Unterhaltung baulicher und technischer Einrichtungen ist nicht mehr erforderlich; ein Rückbau ist gegebenenfalls erfolgt.

7. Das in ein oberirdisches Gewässer eingeleitete Sickerwasser hält ohne Behandlung die Konzentrationswerte des Anhangs 51 Abschnitt C Abs. 1 und Abschnitt D Abs. 1 der Abwasserverordnung ein.
8. Das Sickerwasser, das in den Untergrund versickert, verursacht keine Überschreitung der Auslöseschwellen² in den Grundwasser-Messstellen, und eine Überschreitung ist auch für die Zukunft nicht zu besorgen.
9. Wurden auf der Deponie asbesthaltige Abfälle oder Abfälle, die andere gefährliche Mineralfasern enthalten, abgelagert, müssen geeignete Maßnahmen getroffen worden sein, um zu vermeiden, dass Menschen in Kontakt mit diesem Abfall geraten können.

Mit dem Bescheid über den Abschluss der Nachsorgephase regelt die zuständige Behörde auch die Umsetzung und Festschreibung der zukünftig einzuhaltenden Bedingungen. Es erfolgt außerdem ein Eintrag in das Bodenschutz- und Altlastenkataster, der nicht gelöscht wird.

2.3. Rechtliche Anforderungen in der Zeit nach der Entlassung aus der Nachsorge

Die oben genannten Kriterien für die Feststellung des Abschlusses der Nachsorgephase nach Anhang 5 Nr. 10 DepV enthalten Bedingungen, die auch für die Zukunft nach Abschluss der Nachsorgephase eingehalten werden müssen. Hierzu gehört insbesondere, dass das Oberflächenabdichtungssystem bei derzeitiger Nutzung, geplanter Nutzung und bei künftigen Nutzungsänderungen in einem funktionstüchtigen und stabilen Zustand bleibt.

Die auch für die Zeit nach Abschluss der Nachsorgephase einzuhaltenden Bedingungen werden in einem behördlichen Bescheid festgelegt. Dies dient dazu, dass der Deponiekörper dauerhaft unberührt bleibt.

Geplante Eingriffe in den Deponiekörper, wie z. B. eine Deponiesanierung, bedürfen einer behördlichen Zustimmung, in deren Rahmen die notwendigen Schutz- und Vorsorgemaßnahmen sichergestellt werden, und werden hier nicht näher betrachtet.

2.4. Anforderungen an die geologische Barriere und die Ausführung der Basisabdichtung der Deponie

Anforderungen an die geologische Barriere und das Basisabdichtungssystem sind in Anhang 1 Nr. 2.1 und 2.2 DepV festgelegt.

Allgemeine Anforderung ist, dass für die Verbesserung der geologischen Barriere und technischen Maßnahmen als Ersatz für die geologische Barriere sowie das Abdichtungssystem nur Materialien, Komponenten oder Systeme eingesetzt werden dürfen, die dem Stand der Technik entsprechen und wenn dies der zuständigen Behörde auf der Basis prüffähiger Unterlagen nachgewiesen worden ist. Dies kann entweder durch eine Zulassung durch die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (für Geokunststoffe, Polymere und serienmäßig hergestellte Dichtungskontrollsysteme) oder für sonstige Materialien durch bundesweit einheitliche Eignungsbeurteilungen der Länder geschehen.

Sämtliche Bauteile sind standsicher zu errichten. Hierüber ist der zuständigen Behörde ein Nachweis vorzulegen, der insbesondere die Gleitsicherheit der Schichten berücksichtigt. Die Verbesserung der geologischen Barriere und die technischen Maßnahmen als Ersatz für die geologische

² Auslöseschwellen sind gemäß der Begriffsbestimmung in § 2 Nr. 4 DepV Grundwasserüberwachungswerte, bei deren Überschreitung Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers eingeleitet werden müssen.

Barriere sowie die Herstellung der Komponenten der Abdichtungssysteme sind in der Vorfertigung und während der Bauausführung einem Qualitätsmanagement zu unterwerfen, für das weitere detaillierte Festlegungen getroffen werden.

Die Verbesserung der geologischen Barriere und die technischen Maßnahmen als Ersatz für die geologische Barriere, das Abdichtungssystem, die Materialien und die Herstellung der Systemkomponenten und deren Einbau sowie die Eigenschaften dieser Komponenten im Einbauzustand müssen so gewählt werden, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußerer und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen ist. Abweichend hiervon gilt bei serienmäßig hergestellten Dichtungskontrollsystmen ein Zeitraum von mindestens 30 Jahren.

Es sind mindestens folgende Kriterien und Einwirkmechanismen zu berücksichtigen:

1. Dichtigkeit,
2. Verformungsvermögen, um unvermeidbare Setzungen aufzunehmen,
3. Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanisch einwirkenden Kräften,
4. Widerstandsfähigkeit gegen hydraulische Einwirkungen (Suffusion und Erosion),
5. Beständigkeit gegenüber chemischen und biologischen Einwirkungen,
6. Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen,
7. Beständigkeit gegenüber alterungsbedingten nachteiligen Materialveränderungen,
8. gesicherte, reproduzierbare und qualitätsüberwachte Vorfertigung von Abdichtungskomponenten,
9. gesicherte, die Funktionalität wahrende und qualitätsüberwachte Herstellung sowie Einbau der Systemkomponenten und des Abdichtungssystems, insbesondere unter Einbeziehung geeigneter Maßnahmen zum Schutz vor auflastbedingten Beschädigungen,
10. bei Vorgabe einer einzuhaltenden Durchflussrate: geeignete Nachweise,
11. bei mineralischen Abdichtungskomponenten: Materialzusammensetzung, Einbautechnik und Einbindung im Abdichtungssystem, um eine sehr niedrige Durchlässigkeit zu erreichen und die Gefahr einer Trockenrissbildung zu minimieren,
12. bei Deponieersatzbaustoffen: Einhaltung der zusätzlichen Anforderungen der §§ 14 und 15 DepV,
13. bei einer Entwässerung an der Deponiebasis: DIN 19667, Ausgabe August 2015, Dränung von Deponien – Planung, Bauausführung und Betrieb.

Als besondere Anforderungen an die geologische Barriere und das Basisabdichtungssystem ist festgelegt, dass der dauerhafte Schutz des Bodens und des Grundwassers durch die Kombination aus geologischer Barriere und einem Basisabdichtungssystem im Ablagerungsbereich erreicht werden muss. Bei Erfordernis von zwei Abdichtungskomponenten sollen diese aus einer Konvektionssperre (Kunststoffdichtungsbahn oder Asphaltierung) über einer mehrlagigen mineralischen Komponente bestehen.

Weitere Details der Anforderungen an den Aufbau der geologischen Barriere und des Basisabdichtungssystems sind in Tabelle 2-1 wiedergegeben.

Tabelle 2-1: Aufbau der geologischen Barriere und des Basisabdichtungssystems

Systemkomponente	Deponie Klasse I	Deponie Klasse II	Deponie Klasse III
Geologische Barriere			
Durchlässigkeitsbeiwert k Dicke d	$k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 1,00 \text{ m}$	$k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 1,00 \text{ m}$	$k \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 5,00 \text{ m}$
Erste Abdichtungskomponente			
- falls mineralisch			
Durchlässigkeitsbeiwert k Dicke d	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$
- falls Kunststoffdichtungsbahn			
Dicke d	$d \geq 2,5 \text{ mm}$	$d \geq 2,5 \text{ mm}$	$d \geq 2,5 \text{ mm}$
Zweite Abdichtungskomponente		nicht erforderlich	
- falls mineralisch			
Durchlässigkeitsbeiwert k Dicke d		$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$	$k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$
- falls Kunststoffdichtungsbahn			
Dicke d		$d \geq 2,5 \text{ mm}$	$d \geq 2,5 \text{ mm}$
Mineralische Entwässerungsschicht¹			
Dicke d Körnung	$d \geq 0,50 \text{ m}$ gemäß DIN 19667	$d \geq 0,50 \text{ m}$ gemäß DIN 19667	$d \geq 0,50 \text{ m}$ gemäß DIN 19667

¹ Wenn nachgewiesen wird, dass es langfristig zu keinem Wasseranstau im Deponiekörper kommt, kann mit Zustimmung der zuständigen Behörde die Entwässerungsschicht mit einer geringeren Schichtstärke oder anderer Körnung hergestellt werden.

2.5. Anforderungen an die Ausführung der Oberflächenabdichtung der Deponie

Spezifische Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem sind in Anhang 1 Nr. 2.3 DepV festgelegt.

Müssen Unebenheiten der Oberfläche des abgelagerten Abfalls ausgeglichen oder bestimmte Tragfähigkeiten hergestellt werden, um die Abdichtungskomponenten ordnungsgemäß einzubauen zu können, ist auf der Oberfläche eine ausreichend dimensionierte Ausgleichsschicht einzubauen. Bei Erfordernis von zwei Systemkomponenten sollen diese Komponenten aus verschiedenen Materialien bestehen, die auf eine Einwirkung (z. B. Austrocknung, mechanische Perforation) so unterschiedlich reagieren, dass sie hinsichtlich der Dichtigkeit fehlerausgleichend wirken. Wird das Oberflächenabdichtungssystem ohne eine Konvektionssperre hergestellt, ist ein Kontrollfeld von wenigstens 300 m^2 Größe an repräsentativer Stelle im Oberflächenabdichtungssystem einzurichten, mit dem der Durchfluss durch das Oberflächenabdichtungssystem bestimmt werden kann. Das Kontrollfeld ist bis zum Ende der Nachsorgephase zu betreiben.

Für den Fall, dass es die angestrebte und zulässige Folgenutzung erfordert, kann die Rekultivierungsschicht durch eine auf die entsprechende Nutzung abgestimmte technische Funktionsschicht ersetzt werden. Gemäß Anhang 1 Nr. 2.3.2 DepV kann eine technische Funktionsschicht erforderlich werden, wenn die Deponieoberfläche nach endgültiger Stilllegung als Verkehrsfläche, Parkplatz, zur Bebauung oder in ähnlicher Weise genutzt werden soll. Die Dicke ist nach den Schutzerfordernissen der darunter liegenden Systemkomponenten (keine Beeinträchtigung der langfristigen Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht, Schutz der Abdichtungskomponenten vor Wurzel- und Frosteinwirkung sowie vor Austrocknung) zu bemessen.

Für eine Rekultivierungsschicht, die nicht als technische Funktionsschicht genutzt wird, gilt insbesondere Folgendes:

- Die Dicke, die Materialauswahl und der Bewuchs der Rekultivierungsschicht sind nach den Schutzerfordernissen der darunter liegenden Systemkomponenten (weitestgehende Vermeidung einer Durchwurzelung der Entwässerungsschicht, keine sonstige Beeinträchtigung der langfristigen Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht, Schutz der Systemkomponenten vor Wurzel- und Frosteinwirkung sowie vor Austrocknung, Folgenutzungen) zu bemessen. Eine Mindestdicke von 1 m darf nicht unterschritten werden.
- Durch die Auswahl eines geeigneten Bewuchses soll die Oberfläche vor Wind- und Wasserosion geschützt und eine möglichst hohe Evapotranspiration erreicht werden.

Soll die Rekultivierungsschicht zugleich Aufgaben einer Methanoxidation von Restgasen übernehmen, sind zusätzliche Anforderungen an die Schicht mit der zuständigen Behörde abzustimmen.

Wird die Deponieoberfläche nach endgültiger Stilllegung als Verkehrsfläche, Parkplatz, zur Bebauung oder in ähnlicher Weise genutzt, kann die Rekultivierungsschicht durch eine technische Funktionsschicht ersetzt werden, wenn die Folgenutzung dies erfordert. Dabei muss das in diese technische Funktionsschicht einzubauende Material mindestens die Anforderungen an Schadstoffgehalt und Auslaugbarkeit einhalten, unter denen eine Verwendung außerhalb des Deponiestandortes unter vergleichbaren Randbedingungen zulässig wäre. Für die technische Funktionsschicht gilt insbesondere:

- Die Dicke ist nach den Schutzerfordernissen der darunter liegenden Systemkomponenten (keine Beeinträchtigung der langfristigen Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht, Schutz

der Abdichtungskomponenten vor Wurzel- und Frosteinwirkung sowie vor Austrocknung) zu bemessen.

- Nach Aufgabe der die technische Funktionsschicht begründenden Nutzung ist die Rekultivierungsschicht so herzustellen, dass die oben genannten Anforderungen an die Rekultivierungsschicht erfüllt werden.

Weitere Details der Anforderungen an den Aufbau der geologischen Barriere und des Basisabdichtungssystems sind in Tabelle 2-2 wiedergegeben.

Bei den Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem gemäß Tabelle 2-2 sind bei Deponien der Klassen I und II (nicht der Klasse III) folgende Alternativen zugelassen:

- Deponien Klasse I: Anstelle der Abdichtungskomponente, der Entwässerungsschicht und der Rekultivierungsschicht kann eine als Wasserhaushaltsschicht ausgeführte Rekultivierungsschicht zugelassen werden, wenn der Durchfluss durch die Wasserhaushaltsschicht im fünfjährigen Mittel nicht mehr als 20 mm/Jahr beträgt.
- Deponien Klasse II: Anstelle der zweiten Abdichtungskomponente und der Rekultivierungsschicht kann eine als Wasserhaushaltsschicht bemessene Rekultivierungsschicht eingebaut werden. Wird die erste Abdichtungskomponente als Konvektionssperre ausgeführt, kann anstelle der zweiten Abdichtungskomponente auch ein Kontrollsysteem für die Konvektionssperre eingebaut werden. In diesem Fall ist im Bereich von Stellen, an denen das Dränwasser gesammelt und abgeleitet wird, unmittelbar unter der Konvektionssperre eine zweite Abdichtungskomponente einzubauen oder gleichwertige Systeme vorzusehen. (Bei Deponien oder Deponieabschnitten, auf denen Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Klärschlämme und andere Abfälle mit hohen organischen Anteilen abgelagert worden sind, gelten Einschränkungen dieser Alternativen.)

Wird die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht³ ausgeführt, so muss die Mindestdicke 1,50 m betragen. Im fünfjährigen Mittel darf die Durchsickerung höchstens 10 % vom langjährigen Mittel (in der Regel Mittel über 30 Jahre) des Niederschlags betragen, maximal jedoch 20 mm/Jahr bei Deponien der Klasse I und 60 mm/Jahr bei Deponien der Klasse II.

³ Eine Wasserhaushaltsschicht ist eine besondere Form der Rekultivierungsschicht. Sie soll aufgrund des Zusammenwirkens des Wasserspeichervermögens des Bodens und der Verdunstungsleistung des Bewuchses die Durchsickerung in hohem Maße mindern.

Tabelle 2-2: Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems

Systemkomponente	Deponie Klasse I	Deponie Klasse II	Deponie Klasse III
Ausgleichsschicht¹	erforderlich, falls Unebenheiten der Oberfläche ausgeglichen oder bestimmte Tragfähigkeiten hergestellt werden müssen	erforderlich, falls Unebenheiten der Oberfläche ausgeglichen oder bestimmte Tragfähigkeiten hergestellt werden müssen	erforderlich, falls Unebenheiten der Oberfläche ausgeglichen oder bestimmte Tragfähigkeiten hergestellt werden müssen
Gasdränschicht	nicht erforderlich	erforderlich, falls Deponegas in relevanten Mengen entsteht	erforderlich, falls Deponegas in relevanten Mengen entsteht
Erste Abdichtungskomponente			
- falls mineralisch	äquivalent zu	äquivalent zu	äquivalent zu
Durchlässigkeitsbeiwert k Dicke d	$k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$	$k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$	$k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$
- falls Kunststoffdichtungsbahn			
Dicke d	$d \geq 2,5 \text{ mm}$	$d \geq 2,5 \text{ mm}$	$d \geq 2,5 \text{ mm}$
Zweite Abdichtungskomponente			
- falls mineralisch²	äquivalent zu	äquivalent zu	äquivalent zu
Durchlässigkeitsbeiwert k Dicke d	$k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$	$k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$	$k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ $d \geq 0,50 \text{ m}$
- falls Kunststoffdichtungsbahn			
Dicke d		$d \geq 2,5 \text{ mm}$	$d \geq 2,5 \text{ mm}$
Dichtungkontrollsysteem	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich
Entwässerungsschicht³			
Durchlässigkeitsbeiwert k Dicke d Gefälle	$k \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ $d \geq 0,30 \text{ m}$ $\geq 5 \%$	$k \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ $d \geq 0,30 \text{ m}$ $\geq 5 \%$	$k \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ $d \geq 0,30 \text{ m}$ $\geq 5 \%$
Rekultivierungsschicht / technische Funktionsschicht	erforderlich	erforderlich	erforderlich

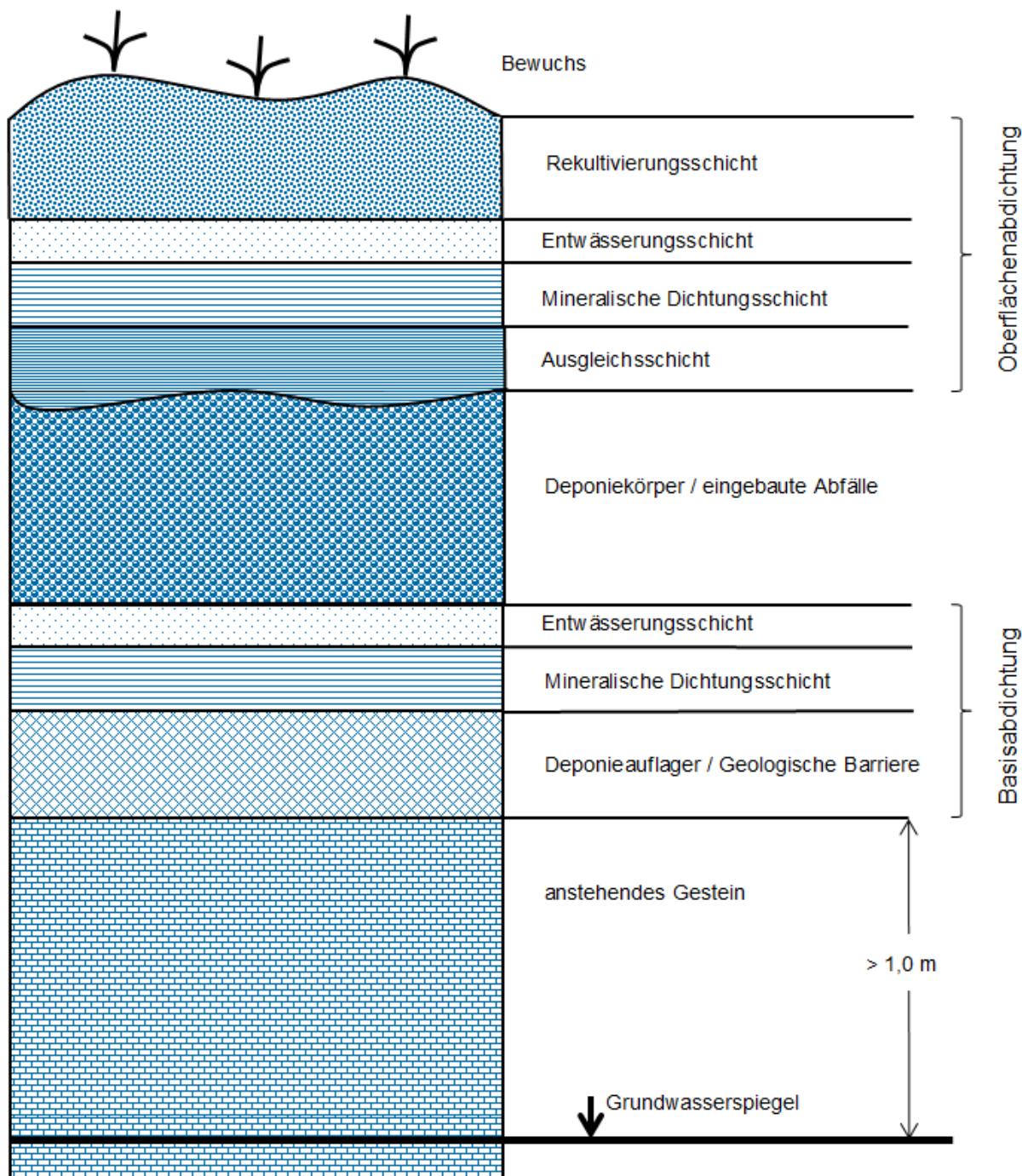
¹ Die Ausgleichsschicht kann bei ausreichender Gasdurchlässigkeit und Dicke die Funktion der Gasdränschicht mit erfüllen.

² Es können mineralische Abdichtungskomponenten, deren Wirksamkeit nicht mit Durchlässigkeitsbeiwerten beschrieben werden kann, eingesetzt werden, wenn sie im fünfjährigen Mittel $\leq 20 \text{ mm/a}$ Durchsickerung aufweisen.

³ Die zuständige Behörde kann Abweichungen von Mindestdicke, Durchlässigkeitsbeiwert und Gefälle zulassen, wenn nachgewiesen wird, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungsschicht und die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht dauerhaft gewährleistet sind.

In Abbildung 2-1 sind das Oberflächen- und Basisabdichtungssystem einer Deponie der Deponiekategorie I zur Veranschaulichung dargestellt.

Abbildung 2-1: Oberflächen- und Basisabdichtungssystem einer Deponie der Deponiekategorie I



3. Mögliche Strahlenexpositionen durch zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebene Abfälle während und nach Entlassung aus der Nachsorgephase

In Kapitel 3 werden die möglichen Strahlenexpositionen durch nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebene Abfälle auf der Basis der in Kapitel 2 festgestellten Randbedingungen ermittelt. Dabei werden zwei Situationen unterschieden:

- Das Oberflächenabdichtungssystem wurde anforderungsgerecht ausgeführt, wird in Stand gehalten und ist unversehrt (Kapitel 3.1).
- Die DepV fordert für die Abdichtungssysteme, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen sein muss. Es wird daher für den Zeitraum ab 100 Jahren nach Stilllegung der Deponie ein beginnendes Versagen des Oberflächenabdichtungssystems betrachtet (Kapitel 3.2).

3.1. Mögliche Strahlenexpositionen bei intaktem Oberflächenabdichtungssystem

Auf der Basis der in Kapitel 2 dargestellten rechtlichen Anforderungen werden in Kapitel 3.1.1 die für die weiteren Untersuchungen hier relevanten Randbedingungen dargestellt, die für die Nachsorgephase und in der Zeit nach der Entlassung aus der Nachsorge gelten. Davon ausgehend werden Szenarien definiert, für die in Kapitel 3.1.2 die möglichen Strahlenexpositionen ermittelt werden.

3.1.1. Randbedingungen während und nach Entlassung aus der Nachsorgephase sowie Szenarien der Nachnutzung

Aus den in Kapitel 2 dargelegten rechtlichen Anforderungen ergeben sich Randbedingungen, die bei einer Deponie in der Nachsorgephase gegeben sein müssen. Diese haben zum großen Teil auch Einfluss auf mögliche Expositionsszenarien einer Nachnutzung der Fläche oberhalb des Deponiekörpers. Ebenso bedingen die rechtlichen Anforderungen für die Zeit nach Entlassung aus der Nachsorge Einschränkungen bei der Bildung der Expositionsszenarien (z. B. keine Durchwurzelung von Abdichtungskomponenten). Dies wird weiter unten näher ausgeführt.

In den Szenarien, die bei der Herleitung der Freigabewerte der StrlSchV zugrunde gelegt wurden, wurden unter anderem der Sickerwasserpfad (während des Betriebs der Deponie) sowie der Brunnenpfad (nach Ende der Einlagerung) modelliert. Es wurde unterstellt, dass die Systeme zur Oberflächen- und Basisabdichtung nach 100 Jahren zu versagen beginnen und nach 200 Jahren keinerlei rückhaltende Wirkung mehr aufweisen. Die DepV fordert für die Abdichtungssysteme, wie in Kapitel 2.1 dargelegt, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen sein muss. Es ist daher mit Blick auf die Zulassungsvoraussetzungen für Materialien, Komponenten oder Systeme für die Verbesserung der geologischen Barriere sowie auf die technischen Maßnahmen als Ersatz für die geologische Barriere und die Abdichtungssysteme sicher davon auszugehen, dass sich in dieser Hinsicht keine ungünstigeren Verhältnisse ergeben können als in der Herleitung der Freigabewerte angenommen.

Nach Ende der Einlagerungsphase müssen entsprechend den Anforderungen der Nummer 2.3 Anhang 1 DepV – soweit erforderlich - Unebenheiten der Oberfläche des abgelagerten Abfalls ausgeglichen und bestimmte Tragfähigkeiten hergestellt werden, um die Abdichtungskomponenten ordnungsgemäß einzubauen zu können. Dazu muss auf der Oberfläche eine ausreichend dimensiонierte Ausgleichsschicht aufgetragen werden. Nach dem Bundeseinheitlichen Qualitätsstan-

dard 4-1 „Trag- und Ausgleichsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“ ist aus bau-technischen Gründen eine Mindestdicke der Trag- und Ausgleichsschicht von 0,15 m erforderlich. Eine Dicke der Trag- und Ausgleichsschicht von ca. 0,5 m hat sich bewährt. Da dies aber nicht in allen Fällen gleich gehandhabt wird, wird konservativerweise eine solche Schicht für die weiteren Betrachtungen nicht angenommen. Ebenso wird hier kein Kredit davon genommen, dass die Handlungsanleitung (Landkreistag BaWü 2015) bei der Einlagerung von nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebenen Abfällen in Baden-Württemberg eine sofortige Abdckung der Abfälle fordert.

Eine Gasdränschicht wird konservativerweise für die weiteren Betrachtungen ebenfalls nicht angenommen, da sie bei einer Deponie Klasse I von der DepV nicht gefordert wird und bei einer Deponie Klasse II nur dann erforderlich ist, wenn Deponiegas in relevanten Mengen entsteht.

Für die erste Abdichtungskomponente (eine zweite Abdichtungskomponente ist bei Deponien der Klasse I nicht gefordert und wird deshalb nicht in die Betrachtungen einbezogen) wird hier davon ausgegangen, dass es sich um eine Kunststoffbahn der erforderlichen Mindestdicke (also 2,5 mm bei einer Deponie Klasse I) handelt. Eine mineralische Abdichtung hätte eine größere Dicke (insgesamt mindestens 0,50 m bei einer Deponie Klasse I oder beim Einsatz einer geosynthetischen Tondichtungsbahn 6 mm Bentonit zwischen zwei Lagen Kunststoffflies). Für die radiologischen Betrachtungen (Abschirmung von Direktstrahlung aus den deponierten Abfällen) ist der Massenschwächungskoeffizient für Gamma-Strahlung des abschirmenden Materials entscheidend. Dieser hängt insbesondere von der Ordnungszahl der in der Abschirmung enthaltenen Elemente sowie der Gamma-Energie ab. Im Verhältnis zur abschirmenden Wirkung einer Bodenschicht von 1,0 m Mächtigkeit ist die Abschirmung durch eine 2,5 mm dicke Kunststoffbahn gering, so dass diese in den nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt wird.

Oberhalb der Abdichtungskomponenten ist eine Entwässerungsschicht aufzubringen. Diese wird bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt, da hierfür auch Kunststoffdrainelemente von geringer Dicke eingesetzt werden können.

Die Ausgestaltung von Rekultivierungsschicht oder technischer Funktionsschicht hängt von der angestrebten und zulässigen Folgenutzung ab. Hinsichtlich der Nachnutzung werden hier die folgenden Szenarien unterschieden:

- Szenario „Landwirtschaftliche Nutzung“: Es findet eine landwirtschaftliche Nachnutzung statt. Es können dabei pflanzliche Lebensmittel, Futterpflanzen oder Pflanzen für eine energetische Verwertung angebaut werden. Außerdem kann die Fläche als Weide genutzt werden.
- Szenario „Forstwirtschaftliche Nutzung“: Es findet eine forstwirtschaftliche Nachnutzung statt, bei der der Holzertrag weiterverarbeitet werden kann oder als Brennholz dient.
- Szenario „Freizeitnutzung“: Es findet eine Nutzung mit Freizeit- und Erholungsfunktion statt. Dabei kann es sich beispielsweise um einen Kinderspielplatz, ein Sportgelände oder einen Park handeln. Bei einem Sportplatz wäre unter Umständen auch eine technische Funktionsschicht statt der Rekultivierungsschicht erforderlich. Einschließlich der dann notwendigen Schicht zur Gewährleistung des Frostschutzes würden sich hinsichtlich der abschirmenden Wirkung aber keine ungünstigeren Bedingungen gegenüber einer Bodenschicht von 1,0 m Mächtigkeit ergeben.
- Szenario „Bebauung“: Es findet eine Bebauung statt. Diese Bebauung könnte eine Wohnbebauung oder auch eine andere Bebauung sein. Dabei werden auch Tiefbauarbeiten, beispielsweise zur Unterkellerung von Wohnbebauung, einbezogen. Durch die Bebauung darf die Wirksamkeit der Oberflächenabdichtung nicht beeinträchtigt werden.

- Szenario „Verkehrsflächen“: Es werden Verkehrswege und –flächen angelegt. Hierbei wird von einer technischen Funktionsschicht ausgegangen.

Bei intaktem Oberflächenabdichtungssystem erfolgt kein Radionuklidtransport in die Rekultivierungsschicht. Damit kann es insbesondere zu keiner Kontamination des Bewuchses kommen. In äußerst geringem Umfang wäre ein gasförmiges Austreten des sehr mobilen H-3 denkbar, das aber, wie Abschätzungen radiologischer Folgen gezeigt haben, in den hier betrachteten Szenarien radiologisch nicht relevant ist.

Für die Nachnutzungsszenarien werden im Einzelnen die folgenden Randbedingungen für die Modellierung der Strahlenexposition zugrunde gelegt, die als plausible ungünstige Annahmen zu sehen sind und mit den Forderungen der DepV in Einklang stehen:

- Szenario „Landwirtschaftliche Nutzung“:

- Es kommt zu keiner Durchwurzelung der Abdichtungskomponenten und diese sind auch unabhängig davon unversehrt.
- Die Oberfläche ist vor Erosion geschützt.
- Die Rekultivierungsschicht beträgt mindestens 1,0 m.
- Es wird zur landwirtschaftlichen Nutzung von einem Aufenthalt einer einzelnen Person über 1000 Stunden im Jahr im Freien ausgegangen. Dabei soll es sich um einen Erwachsenen handeln, der auf der Fläche tätig wird. Eine Abschirmung durch eine Kabine beim Aufenthalt in einem landwirtschaftlichen Nutzfahrzeug wird nicht unterstellt. Es wird konservativ davon ausgegangen, dass sich die exponierte Person während ihrer gesamten Aufenthaltszeit im Freien oberhalb der deponierten freigegebenen Abfälle aufhält.
- Ein Aufenthalt von Personen anderer Altersgruppen auf der nachgenutzten Fläche ist durch diese Annahmen abgedeckt, da für Kinder und Jugendliche von einer geringeren (nicht beruflich bedingten) Aufenthaltszeit auf landwirtschaftlichen Flächen ausgegangen werden kann. Ein Kleinkind müsste sich beispielsweise mehr als etwa 600 Stunden im Jahr auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche oberhalb der deponierten freigegebenen Abfälle aufhalten, um eine höhere Dosis erhalten zu können als die betrachtete erwachsene Person.

- Szenario „Forstwirtschaftliche Nutzung“:

- Es kommt zu keiner Durchwurzelung der Abdichtungskomponenten und diese sind auch unabhängig davon unversehrt.
- Die Oberfläche ist vor Erosion geschützt.
- Die Rekultivierungsschicht beträgt mindestens 1,0 m.
- Es wird zur forstwirtschaftlichen Nutzung von einem Aufenthalt einer einzelnen Person über 500 Stunden im Jahr im Freien ausgegangen. Dabei soll es sich um einen Erwachsenen handeln, der sich aus beruflichen Gründen auf der Fläche aufhält. Wie bei der landwirtschaftlichen Nutzung wird davon ausgegangen, dass sich die exponierte Person während ihrer gesamten Aufenthaltszeit im Freien oberhalb der deponierten freigegebenen Abfälle aufhält.
- Ein Aufenthalt von Personen anderer Altersgruppen auf der nachgenutzten Fläche ist durch diese Annahmen abgedeckt, da für Kinder und Jugendliche von einer geringeren (nicht beruflich bedingten) Aufenthaltszeit auf forstwirtschaftlichen Flächen ausgegangen werden kann. Ein Kleinkind müsste sich beispielsweise mehr als etwa 300 Stunden im Jahr auf einer forstwirtschaftlich genutzten Fläche oberhalb der deponierten freigegebenen Abfälle aufhalten, um eine höhere Dosis erhalten zu können als die betrachtete erwachsene Person.

- Szenario „Freizeitnutzung“:
 - Es kommt zu keiner Durchwurzelung der Abdichtungskomponenten und diese sind auch unabhängig davon unversehrt.
 - Die Oberfläche ist vor Erosion geschützt.
 - Die Rekultivierungsschicht beträgt mindestens 1,0 m.
 - Es wird bei der Freizeitnutzung von einem Aufenthalt einer einzelnen Person über 1200 Stunden im Jahr ausgegangen (30 Stunden an 40 Wochenenden eines Jahres). Dabei werden alle sechs Altersgruppen der StrlSchV berücksichtigt.
- Szenario „Bebauung“:
 - Es kommt zu keiner Durchwurzelung der Abdichtungskomponenten und diese sind auch unabhängig davon unversehrt.
 - Die Oberfläche ist vor Erosion geschützt.
 - Die Rekultivierungsschicht beträgt mindestens 1,0 m. Diese Dicke ist auch dann gewährleistet, wenn es zu Tiefbauarbeiten kommt.
 - Betrachtet wird der Aufenthalt einer Person im Freien, da beim Aufenthalt im Gebäude durch die Fundamente und Wände eine erhebliche Abschirmung stattfindet. Dabei werden alle sechs Altersgruppen der StrlSchV berücksichtigt. Es wird bei der Freizeitnutzung von einem Aufenthalt einer einzelnen Person über 2400 Stunden im Jahr ausgegangen (8 Stunden im Freien an 300 Tagen eines Jahres). Ein solch langer jährlicher Aufenthalt im Freien ist nur dann anzunehmen, wenn es sich bei der Bebauung um Wohnbebauung handelt, bei der auch insbesondere Gärten und Spielplätze einzubeziehen sind.
- Szenario „Verkehrsflächen“:
 - Die Abdichtungskomponenten sind unversehrt.
 - Die Oberfläche ist vor Erosion geschützt.
 - Es ist eine technische Funktionsschicht vorhanden, die den Lasten der Verkehrswege gerecht wird. Zur Berücksichtigung einer technischen Funktionsschicht wird hier eine Platte aus Normalbeton von 20 cm Dicke angenommen und eine weitere Abschirmung durch Boden vernachlässigt. Aus dem Vergleich von gammaenergiespezifischen Halbwertsdicken⁴ für Boden und Normalbeton in (Singh 2014) kann abgeschätzt werden, dass sich durch die Abschirmung mit 20 cm Normalbeton eine deutlich höhere Abschirmung als durch die Rekultivierungsschicht (mindestens 1,0 m Boden) ergibt⁵.
 - Es wird von einem Aufenthalt einer einzelnen erwachsenen Person über 1000 Stunden im Jahr ausgegangen (z. B. Parkwächter, der die Arbeitszeit eines Jahres auf der Fläche verbringt, beim Aufenthalt in seinem Parkwächterhäuschen aber zusätzlich abgeschirmt ist).
 - Ein Aufenthalt von Personen anderer Altersgruppen auf der nachgenutzten Fläche ist durch diese Annahmen abgedeckt, da für Kinder und Jugendliche von einer geringeren Aufenthaltszeit auf Verkehrsflächen ausgegangen werden kann. Ein Kleinkind müsste sich beispielsweise

⁴ Dicke einer Schicht, die die Dosisleistung auf die Hälfte reduziert.

⁵ Für die einzelnen Radionuklide wurde, konservativ bezogen auf die jeweils höchste Gamma-Energie (ohne Berücksichtigung ihrer Emissionswahrscheinlichkeit), ein Reduktionsfaktor von 1600 (Gamma-Energie < 100 keV), 270 (Gamma-Energie < 200 keV), 60 (Gamma-Energie < 400 keV), 37 (Gamma-Energie < 600 keV), 25 (Gamma-Energie < 800 keV), 16 (Gamma-Energie < 1 MeV), 8,2 (Gamma-Energie < 1,5 MeV) und 7,4 (Gamma-Energie < 2 keV) festgelegt.

mehr als etwa 600 Stunden im Jahr auf einer Verkehrsfläche oberhalb der deponierten freigegebenen Abfälle aufhalten, um eine höhere Dosis erhalten zu können als die betrachtete erwachsene Person.

In Tabelle 3-1 sind die Randbedingungen und Annahmen im Überblick zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Randbedingungen und Annahmen der Nachnutzungsszenarien bei intakter Basisabdichtung

Nachnutzungsszenario	abschirmende Schicht	Personengruppe	Aufenthaltsdauer
Landwirtschaftliche Nutzung	1 m Boden	Erwachsene	1000 h/a
Forstwirtschaftliche Nutzung	1 m Boden	Erwachsene	500 h/a
Freizeitnutzung	1 m Boden	alle*	1200 h/a
Bebauung	1 m Boden	alle*	2400 h/a
Verkehrsflächen	20 cm Normalbeton	Erwachsene	1000 h/a

* alle sechs Altersgruppen nach StrlSchV

3.1.2. Mögliche Strahlenexposition in den Nachnutzungsszenarien

Die Abschätzung der möglichen Strahlenexposition in den Nachnutzungsszenarien erfolgt für die Freigabe nach Anlage III Tabelle 1 Spalte 9c StrlSchV, also der Freigabe zur Beseitigung auf Deponien von bis zu 1000 Mg im Kalenderjahr, sowie für die Freigabe nach Anlage III Tabelle 1 Spalte 9a StrlSchV, also der Freigabe zur Beseitigung auf Deponien von bis zu 100 Mg im Kalenderjahr. Da hier zunächst von einem intakten Oberflächenabdichtungssystem ausgegangen wird, kommt es zu keinem stofflichen Transfer von Radionukliden aus dem Abfallkörper in die Rekultivierungsschicht. Dies wird unter anderem durch die Konstellation der nach DepV geforderten Durchlässigkeitswerte von Abdichtungskomponenten und Entwässerungsschicht gewährleistet. Zu beachten bleibt die mögliche Exposition durch von den Abfällen ausgehende Direktstrahlung, sofern diese die bestehenden Barrieren durchdringen kann.

Bei der Ermittlung der möglichen Dosis durch Direktstrahlung wird zunächst konservativ unterstellt, dass als letzter Abfall vor Beendigung der Einlagerung nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebener Abfall eingelagert wurde. Eine Begrenzung der Höhe dieser Abfallschicht oder ihrer horizontalen Ausbreitung wird konservativ nicht vorgenommen. Es wird auch nicht angenommen, dass sich Radionuklide mit dem Sickerwasser in tiefere Schichten des Deponeikörpers fortbewegt haben. Hinsichtlich des Abklingens von Radionukliden von der letzten Einlagerung bis zu einer Nachnutzung wird konservativ von nur einem Jahr ausgegangen.

Nuklidspezifische Dosisleistungskoeffizienten zur Berechnung der Dosisleistung beim Aufenthalt auf einem Deponeikörper sind in (Thierfeld 2000) aus gammaenergiespezifischen Monte Carlo-Simulationen von (Chen 1991) zusammengestellt worden. Diese enthalten die Beiträge durch Tochternuklide und sind hier in Tabelle 3-2 aufgelistet. Dabei wurden hier nur die Dosisleistungskoeffizienten der Radionuklide übernommen, für die in der StrlSchV Freigabewerte zur Beseitigung festgelegt sind. In wenigen Fällen musste unter Rückgriff auf Ergebnisse in (Chen 1991) ein Dosisleistungskoeffizient ergänzt werden. Ebenfalls in der Tabelle aufgeführt sind die Freigabewerte der StrlSchV für die Beseitigung auf einer Deponie sowie die Aktivitätskonzentration, die sich ausgehend von diesen Werten durch Abklingen nach einem Jahr ergibt. Die Zeit von einem Jahr wird hier als Mindestzeit bis zum Beginn einer Nachnutzung angesetzt.

Für die Berechnung der abschirmenden Wirkung einer Bodenschicht von 1,0 m Höhe werden Ergebnisse von Monte Carlo-Simulationen aus (Bellamy 2014) herangezogen. Verwendet werden die Abschirmfaktoren für eine unendlich ausgedehnte kontaminierte Schicht unterhalb der Abschirmung. Der Aufbau von Tochternukliden über einen Zeitraum von 1000 Jahren ist in diesen Abschirmfaktoren enthalten. Die verwendeten Abschirmfaktoren sind in Tabelle 3-2 aufgelistet. Sie sind dimensionslos und sind bei der Berechnung der Strahlenexposition mit der Dosis ohne Abschirmung zu multiplizieren. Den Abschirmfaktor von 1 gibt es bei Radionukliden, die keine Gamma-Strahlung aussenden. Die Abschirmung ist umso höher (und der Abschirmfaktor umso kleiner), je niedriger die Energien der Gammalinien betreffender Radionuklide sind. Der Abschirmfaktor erreicht den Wert Null für eine hundertprozentige Abschirmung. Dies bedeutet einen Abschirmfaktor, der kleiner ist als 10^{-12} .

In Tabelle 3-2 sind der Übersichtlichkeit halber nur die Radionuklide aufgenommen, für die die weiteren Berechnungen Dosen von mehr als $10^3 \mu\text{Sv}$ im Jahr ergeben haben. Eine vollständige Zusammenstellung mit allen Radionukliden, für die in der StrlSchV Freigabewerte zur Beseitigung auf einer Deponie festgelegt sind, findet sich im Anhang (Tabelle A-1).

Da die Abschirmfaktoren wie auch die Massenschwächungskoeffizienten für Gamma-Strahlung von der Ordnungszahl der in der Abschirmung enthaltenen Elemente abhängen, sind sie auch abhängig von der Art des Bodens. Den Berechnungen in (Chen 1991) liegt eine als typisch bezeichnete Zusammensetzung des Bodens zugrunde, der als trocken angenommen wird. In (Bellamy 2014) werden keine Aussagen zur angenommenen Zusammensetzung des Bodens gemacht. In (Singh 2014) ist die Abschirmung von Gamma-Strahlung für fünf Böden unterschiedlicher Zusammensetzung (Lehm, sandiger Lehm, sandiger Ton/Lehm, Ton und toniger Lehm) untersucht worden. Es haben sich nur sehr geringe Unterschiede in der abschirmenden Wirkung gezeigt, insbesondere bei (den hier relevanten) Gamma-Energien oberhalb etwa 100 keV. Eine Differenzierung verschiedener Bodenarten bei der Anwendung der Dosisleistungskoeffizienten nach (Chen 1991) und der Abschirmfaktoren nach (Bellamy 2014) ist daher nicht erforderlich.

In Tabelle 3-2 (sowie in weiter unten folgenden Tabellen) wird bei U-238 zwischen U-238+ und U-238sec unterschieden, da in Anlage III Tabelle 1 Spalte 9c StrlSchV jeweils unterschiedliche Freigabewerte festgelegt sind. Der Zusatz „+“ und „++“ bedeutet die Berücksichtigung eines radioaktiven Gleichgewichts mit Tochternukliden, die in Anlage III Tabelle 2 StrlSchV genannt sind. Der Zusatz „sec“ bedeutet, dass sich das Radionuklid im säkularen Gleichgewicht mit seinen Tochternukliden befindet.

Tabelle 3-2: Dosisleistungskoeffizienten für Aufenthalt auf dem Deponiekörper, Abschirmfaktoren für Boden, Freigabewerte und massenbezogene Aktivität des Deponiekörpers für ausgewählte Radionuklide

Nuklid	Dosisleistungskoeffizient ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)/(Bq/g)	Abschirmfaktor	Freigabewert Anlage III Tab. 1 StrlSchV		massenbezogene Aktivität nach 1 Jahr Abklingdauer	
			Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g	Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g
Na-22	5,47E-01	1,1E-04	7	2	5,36E+00	1,53E+00
Sc-46	5,06E-01	5,0E-05	8	2	3,91E-01	9,78E-02
Mn-54	2,10E-01	1,5E-05	10	6	4,45E+00	2,67E+00
Co-56	9,03E-01	5,0E-04	4	1	1,61E-01	4,03E-02
Co-60	6,28E-01	1,1E-04	6	2	5,26E+00	1,75E+00
Zn-65	1,46E-01	7,1E-05	10	8	3,54E+00	2,84E+00
Y-91	9,07E-04	9,5E-05	1000	1000	1,32E+01	1,32E+01
Nb-94	3,95E-01	1,4E-05	10	3	1,00E+01	3,00E+00
Ru-106+	5,17E-02	2,5E-05	70	20	3,51E+01	1,00E+01
Ag-108m+	3,99E-01	4,5E-06	9	1	8,95E+00	9,95E-01
Ag-110m+	6,85E-01	4,5E-05	6	2	2,20E+00	7,33E-01
Sb-124	4,67E-01	1,5E-04	9	3	1,35E-01	4,49E-02
Sb-125+	1,03E-01	2,4E-06	40	10	3,09E+01	7,74E+00
Cs-134	3,89E-01	1,1E-05	10	3	7,15E+00	2,14E+00
Cs-137+	1,41E-01	5,5E-06	10	8	9,77E+00	7,82E+00
Ba-133	8,47E-02	3,2E-07	40	10	3,75E+01	9,37E+00
Eu-152	2,77E-01	6,6E-05	10	4	9,48E+00	3,79E+00
Eu-154	3,07E-01	6,0E-05	10	4	9,22E+00	3,69E+00
Tb-160	2,66E-01	4,7E-05	10	4	2,99E-01	1,20E-01
Ta-182	3,11E-01	8,2E-05	10	4	1,11E+00	4,43E-01
Os-185	1,68E-01	7,2E-06	10	7	6,70E-01	4,69E-01
Bi-207	3,76E-01	5,5E-05	10	3	9,82E+00	2,95E+00
U-238+	4,65E-03	1,3E-05	6	0,6	6,00E+00	6,00E-01
Pu-244+	8,20E-02	6,2E-04	1	0,3	1,00E+00	3,00E-01

Die Dosis für das erste Jahr der Nachnutzungsphase durch Aufenthalt im Freien wurde wie folgt berechnet:

$$H_{R,r} = A_r(t_0) \cdot g_{Erw,r} \cdot c_{geo,R} \cdot F \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_r \cdot t}}{\lambda_r} \cdot c \cdot t_A \quad (1)$$

Dabei bedeuten

$H_{R,r}$	Effektive Dosis der Referenzperson R durch externe Gamma-Strahlung durch das Nuklid r über die Zeit von 1 Jahr [μSv]
t	1 Jahr
$A_r(t_0)$	Aktivitätskonzentration des Nuklids r im freigegebenen Abfall zu Beginn der Nachnutzung [Bq/g], (siehe Tabelle 3.2 bzw. Tabelle A-1, Spalten 6 und 7)
t_0	Zeit zwischen letzter Deponierung und Beginn der Nutzung [a], verwendeter Wert: 1 Jahr
$g_{Erw,r}$	Dosisleistungskoeffizient für die äußere Gamma-Strahlung der erwachsenen Referenzperson für das Nuklid r [$(\mu\text{Sv}/\text{h})/(Bq/\text{g})$] (siehe Tabelle 3.2 bzw. Tabelle A-1, Spalte 2)
$c_{geo,R}$	Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Alters der Referenzperson R bei einer Bestrahlung von einer Bodenfläche [-], verwendete Werte nach (BArz 2001):
	<ul style="list-style-type: none"> – 1,7 für die Altersgruppe ≤ 1 Jahr, – 1,6 für die Altersgruppe $> 1 - \leq 2$ Jahre, – 1,4 für die Altersgruppe $> 2 - \leq 7$ Jahre, – 1,3 für die Altersgruppe $> 7 - \leq 12$ Jahre, – 1,1 für die Altersgruppe $> 12 - \leq 17$ Jahre
F	Abschirmfaktor [-] (siehe Tabelle 3.2 bzw. Tabelle A-1, Spalte 3)
λ_r	Zerfallskonstante des Nuklids r [1/a]
c	Faktor zur Umrechnung von 1 Jahr in Stunden in (= 8760)
t_A	Aufenthaltszeit im Freien [h/a]

Die Dosis wird in den einzelnen Szenarien im Verhältnis der unterstellten Aufenthaltsdauer des Szenarios zum Gesamtjahr umgerechnet. Auf diese Weise wird auch für bereits im ersten Jahr deutlich abklingende Radionuklide erreicht, dass sich die Stunden des Aufenthalts über das Jahr mit seiner zurückgehenden Dosisleistung gleichmäßig verteilen.

Die auf der Basis der dargelegten Annahmen und Randbedingungen berechneten Dosen sind für die einzelnen Szenarien in Tabelle 3-3 (Freigabe von bis zu 100 Mg/a) und Tabelle 3-4 (Freigabe von bis zu 1000 Mg/a) aufgelistet. Die Dosen sind die Werte für das erste Jahr der Nutzung, sofern es zu keinem Aufbau von dosisrelevanten Tochternukliden kommt. Für Radionuklide mit dosisrelevanten Tochternukliden beziehen sich die Dosen auf das Jahr des maximalen Aufbaus dieser Tochternuklide. Der Übersichtlichkeit halber werden die Ergebnisse nur für Radionuklide dargestellt, für die eine mögliche Dosis von mehr als $10^{-3} \mu\text{Sv}$ im Jahr errechnet wurde. Eine vollständige Zusammenstellung mit allen Radionukliden, für die in der StrISchV Freigabewerte zur Beseitigung auf einer Deponie festgelegt sind, findet sich im Anhang (Tabellen A-2 und A-3).

Tabelle 3-3: Dosis durch Direktstrahlung aus dem Deponiekörper (Freigabe von bis zu 100 Mg/a), Radionuklide mit einer Dosis von mehr als 10^{-3} $\mu\text{Sv}/\text{a}$

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung $\mu\text{Sv}/\text{a}$	Forstwirtschaftliche Nutzung $\mu\text{Sv}/\text{a}$	Freizeitnutzung $\mu\text{Sv}/\text{a}$	Bebauung $\mu\text{Sv}/\text{a}$	Verkehrsflächen $\mu\text{Sv}/\text{a}$	Maximum $\mu\text{Sv}/\text{a}$
Na-22	2,80E-01	1,40E-01	5,80E-01	1,20E+00	3,50E-02	1,2E+00
Sc-46	3,1E-03	1,6E-03	6,3E-03	1,3E-02	1,9E-04	1,3E-02
Mn-54	9,6E-03	4,8E-03	2,0E-02	3,9E-02	3,9E-04	3,9E-02
Co-56	2,2E-04	1,1E-02	4,4E-02	8,8E-02	1,3E-03	8,8E-02
Co-58	2,6E-04	1,3E-04	5,3E-04	1,1E-03	3,5E-05	1,1E-03
Co-60	3,4E-01	1,7E-01	6,9E-01	1,4E+00	4,2E-02	1,4E+00
Zn-65	2,3E-02	1,1E-02	4,7E-02	9,3E-02	2,8E-03	9,3E-02
Y-91	2,6E-04	1,3E-04	5,3E-04	1,1E-03	3,2E-05	1,1E-03
Nb-94	5,5E-02	2,8E-02	1,1E-01	2,3E-01	3,4E-03	2,3E-01
Ru-106+	3,3E-02	1,6E-02	6,7E-02	1,3E-01	4,4E-03	1,3E-01
Ag-108m+	1,6E-02	8,0E-03	3,3E-02	6,5E-02	2,0E-03	6,5E-02
Ag-110m+	4,3E-02	2,1E-02	8,7E-02	1,7E-01	5,8E-03	1,7E-01
Sb-124	2,2E-03	1,1E-03	4,5E-03	9,0E-03	3,0E-04	9,0E-03
Sb-125+	6,7E-03	3,4E-03	1,4E-02	2,8E-02	2,8E-04	2,8E-02
Cs-134	2,6E-02	1,3E-02	5,3E-02	1,1E-01	3,2E-03	1,1E-01
Cs-137+	7,5E-03	3,7E-03	1,5E-02	3,1E-02	3,1E-04	3,1E-02
Ba-133	9,8E-04	4,9E-04	2,0E-03	4,0E-03	1,6E-05	4,0E-03
Eu-152	1,7E-01	8,4E-02	3,4E-01	6,9E-01	2,1E-02	6,9E-01
Eu-154	1,6E-01	8,2E-02	3,3E-01	6,7E-01	2,0E-02	6,7E-01
Tb-160	1,0E-03	5,2E-04	2,1E-03	4,2E-03	1,3E-04	4,2E-03
Ta-182	1,1E-02	5,7E-03	2,3E-02	4,7E-02	1,4E-03	4,7E-02
Os-185	2,8E-04	1,4E-04	5,7E-04	1,1E-03	1,1E-05	1,1E-03
Bi-207	2,0E-01	1,0E-01	4,1E-01	8,2E-01	2,7E-02	8,2E-01
U-238+	3,6E-04	1,8E-04	7,4E-04	1,5E-03	2,2E-07	1,5E-03
Pu-244+	5,1E-02	2,5E-02	1,0E-01	2,1E-01	3,1E-05	2,1E-01

Tabelle 3-4: Dosis durch Direktstrahlung aus dem Deponiekörper (Freigabe von bis zu 1000 Mg/a), Radionuklide mit einer Dosis von mehr als 10^{-3} µSv/a

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung µSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung µSv/a	Freizeitnutzung µSv/a	Bebauung µSv/a	Verkehrsflächen µSv/a	Maximum µSv/a
Na-22	8,10E-02	4,00E-02	1,70E-01	3,30E-01	9,90E-03	3,3E-01
Sc-46	7,8E-04	3,9E-04	1,6E-03	3,2E-03	4,7E-05	3,2E-03
Mn-54	5,8E-03	2,9E-03	1,2E-02	2,4E-02	2,4E-04	2,4E-02
Co-56	5,4E-03	2,7E-03	1,1E-02	2,2E-02	3,3E-04	2,2E-02
Co-60	1,1E-01	5,7E-02	2,3E-01	4,6E-01	1,4E-02	4,6E-01
Zn-65	1,8E-02	9,2E-03	3,7E-02	7,5E-02	2,2E-03	7,5E-02
Y-91	2,6E-04	1,3E-04	5,3E-04	1,1E-03	3,2E-05	1,1E-03
Nb-94	1,7E-02	8,3E-03	3,4E-02	6,8E-02	1,0E-03	6,8E-02
Ru-106+	9,4E-03	4,7E-03	1,9E-02	3,8E-02	1,3E-03	3,8E-02
Ag-108m+	1,8E-03	8,9E-04	3,6E-03	7,3E-03	2,2E-04	7,3E-03
Ag-110m+	1,4E-02	7,1E-03	2,9E-02	5,8E-02	1,9E-03	5,8E-02
Sb-124	7,3E-04	3,7E-04	1,5E-03	3,0E-03	9,9E-05	3,0E-03
Sb-125+	1,7E-03	8,4E-04	3,4E-03	6,9E-03	6,9E-05	6,9E-03
Cs-134	7,8E-03	3,9E-03	1,6E-02	3,2E-02	9,5E-04	3,2E-02
Cs-137+	6,0E-03	3,0E-03	1,2E-02	2,4E-02	2,4E-04	2,4E-02
Ba-133	2,5E-04	1,2E-04	5,0E-04	1,0E-03	4,1E-06	1,0E-03
Eu-152	6,8E-02	3,4E-02	1,4E-01	2,8E-01	8,3E-03	2,8E-01
Eu-154	6,5E-02	3,3E-02	1,3E-01	2,7E-01	8,0E-03	2,7E-01
Tb-160	4,1E-04	2,1E-04	8,4E-04	1,7E-03	5,1E-05	1,7E-03
Ta-182	4,6E-03	2,3E-03	9,3E-03	1,9E-02	5,6E-04	1,9E-02
Bi-207	6,0E-02	3,0E-02	1,2E-01	2,5E-01	8,2E-03	2,5E-01
Pu-244+	1,5E-02	7,6E-03	3,1E-02	6,2E-02	9,3E-06	6,2E-02

Die ermittelten Dosen sind alle deutlich kleiner als 10 µSv im Jahr. Die Höchstwerte betragen

- 0,11 µSv/a (1000 Mg/a) bzw. 0,34 µSv/a (100 Mg/a) im Szenario „Landwirtschaftliche Nutzung“,
- 0,057 µSv/a (1000 Mg/a) bzw. 0,17 µSv/a (100 Mg/a) im Szenario „Forstwirtschaftliche Nutzung“,
- 0,23 µSv/a (1000 Mg/a) bzw. 0,69 µSv/a (100 Mg/a) im Szenario „Freizeitnutzung“,
- 0,46 µSv/a (1000 Mg/a) bzw. 1,4 µSv/a (100 Mg/a) im Szenario „Bebauung“, und
- 0,014 µSv/a (1000 Mg/a) bzw. 0,042 µSv/a (100 Mg/a) im Szenario der „Verkehrsflächen“.

Die höchsten Dosen ergeben sich in jedem Szenario für Co-60.

Beim Vorliegen mehrerer Radionuklide ist gemäß Anlage IV Teil A Nr. 1e eine „Summenformel“ anzuwenden. Die Summe der Verhältniszahlen von massenbezogener Aktivität und Freigabewert über alle Radionuklide darf den Wert 1 nicht überschreiten. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass auch für Nuklidgemische die De Minimis-Dosis von 10 µSv im Jahr eingehalten wird.

Da als maximale Dosis in den Nachnutzungsszenarien 1,4 µSv im Jahr, bezogen auf das Kleinkind im Alter ≤ 1 Jahr, ermittelt wurde, würde auch die gleichzeitige Strahlenexposition durch mehrere der fünf Nachnutzungsszenarien zu keiner Dosis von mehr als 10 µSv im Jahr führen können. Ebenso würde auch die gleichzeitige Strahlenexposition eines der Nachnutzungsszenarien mit einem der anderen Expositionsszenarien der SSK-Empfehlung (SSK 2006) zu keiner Dosis führen können, die nicht mehr im Bereich von 10 µSv im Jahr liegen würde, so dass die Voraussetzung des § 29 StrlSchV erfüllt ist.

3.1.3. Konservativität der Annahmen und bei der Dosisermittlung bei intaktem Oberflächenabdichtungssystem

Die Modellierung deckt alle oberirdischen Deponien in Baden-Württemberg, auf denen nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebene Abfälle bereits eingelagert worden sind oder zukünftig eingelagert werden sollen, ab. Nachfolgend werden die wesentlichen Aspekte genannt, die zur Konservativität der Modellierung beitragen:

- Es wird unterstellt, dass bei Stilllegung der Deponie nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebene Abfälle bis unmittelbar unter die Oberflächenabdeckung der Deponie eingelagert worden sind.
- Es wird unterstellt, dass bei allen nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebenen Abfällen die Freigabewerte der StrlSchV ausgeschöpft worden sind, was in der Praxis aufgrund von Konservativitäten im Freigabeverfahren nur selten annährend möglich ist.
- Es wird von nur einem Jahr bis zum Beginn der Nachnutzung nach Stilllegung der Deponie ausgegangen. In der Regel würde dieser Zeitraum sich auf mehrere Jahre belaufen.
- Es wird hinsichtlich der Direktstrahlung nur eine Oberflächenabdichtung in Form der Rekultivierungsschicht unterstellt, die der Mindestanforderung der DepV entspricht.
- Weitere Schichten der Oberflächenabdichtung sowie die ebenfalls erforderliche erste Abdichtungskomponente werden vernachlässigt. Insbesondere bei einer Einlagerung in Bigbags ist aber zu erwarten, dass eine Ausgleichsschicht aufgetragen werden muss.
- Bei der Freigabe zur Beseitigung auf Deponien von bis zu 1000 Mg im Jahr würde eine Masse von 1000 Mg beispielsweise bei einer Dichte von 1,2 Mg/m³ und einer Höhe der Ablagerungsschicht von 0,5 m auf einer Fläche von etwa 41 m*41 m abgelagert. Bei der Freigabe zur Beseitigung auf Deponien von bis zu 100 Mg im Jahr würde unter gleichen Annahmen eine Masse von 100 Mg eine Ablagerungsfläche von etwa 13 m*13 m benötigen. Die Annahme, dass die exponierte Person sich in den Szenarien der landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Nachnutzung während der gesamten angesetzten Arbeitszeit oberhalb der deponierten freigegebenen Abfälle aufhält ist daher insbesondere bei der Freigabe von bis zu 100 Mg im Jahr sehr konservativ, da von einer einzelnen Person größere Flächen bewirtschaftet würden.
- Die verwendeten Dosisleistungskoeffizienten beziehen sich auf eine horizontal unendlich ausgedehnte kontaminierte Fläche und eine kontaminierte Abfallschicht von 1 m Höhe. Da Dosisbeiträge durch Gamma-Strahlung von Radionukliden aus tiefer im Deponiekörper liegenden Radionukliden vernachlässigbar sind, decken die berechneten Dosen selbst den Fall ab, dass ausschließlich zur nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebene Abfälle deponiert worden sind. Sie sind damit auch unabhängig von der Deponiekapazität und Masse der deponierten nicht kontaminierten Abfälle.

3.2. Mögliche Strahlenexpositionen bei langfristig nicht intaktem Oberflächenabdichtungssystem

Die DepV fordert für die Abdichtungssysteme, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen sein muss. In den Szenarien, die bei der Herleitung der Freigabewerte der StrlSchV zugrunde gelegt wurden, wurde dementsprechend ein langfristiger Eintrag von Radionukliden in das Grundwasser mit einer Dosisabschätzung über den Brunnenpfad angenommen. Es wurde unterstellt, dass die Systeme zur Oberflächen- und Basisabdichtung nach 100 Jahren zu versagen beginnen und nach 200 Jahren keinerlei rückhaltende Wirkung mehr aufweisen.

In Kapitel 3.2 wird untersucht, ob durch die Modellierung bei der Herleitung der Freigabewerte auch Szenarien abgedeckt sind, bei denen eine Nachnutzung der Deponiefläche stattfindet.

3.2.1. Modellberechnungen zu Deponielangzeitverhalten und Radionuklidmigration in (Artemann 2014)

In einer Untersuchung der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (Artemann 2014) wurden Betrachtungen zur Langzeitsicherheit einer Deponie, auf der nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebene Abfälle abgelagert werden, durchgeführt. Damit sollten die Modellstruktur und Szenarien der SSK-Empfehlung (SSK 2006) hinsichtlich Konservativität und Variabilität überprüft werden. Die Untersuchung wurde auf die Bewertung der Langzeitsicherheit sogenannter „Strahlenschutzdeponien“ ausgerichtet. Damit sind Deponien gemeint, auf denen ausschließlich nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung freigegebene Abfälle abgelagert würden.

Als Ergebnis der Untersuchungen in (Artemann 2014) wird dort festgestellt, dass unter Langzeitbedingungen eine Deponie der Deponiekategorie 0 unter den betrachteten Randbedingungen keine ausreichende Sicherheit gewährleistet. Eine Ablagerung von zur Beseitigung freigegebenen Abfällen auf einer Deponie der Deponiekategorie 0 ist nach StrlSchV aber nicht zulässig.

Entsprechende Untersuchungen für eine modellhafte Deponie der Deponiekategorie I zeigten in (Artemann 2014) einen Sättigungsgradienten im Deponiekörper mit einem vollständig gesättigten Bereich oberhalb des Basisabdichtungssystems. Die Entwässerungsschicht, die nach DepV für eine Deponie der Deponiekategorie I gefordert ist, würde das Wasser an den Flanken der Deponie ableiten. Daher wies in den Modellberechnungen die oberhalb des Abfalls liegende mineralische Dichtungsschicht und die Ausgleichsschicht im Fall der Deponie der Deponiekategorie I fast keine Sättigung auf. Wasser, das im Modell in geringerem Umfang in den Deponiekörper versickerte, ermöglichte darin die Ausbildung eines vollständig gesättigten Bereichs, welcher den unteren Teil des Deponiekörpers, die Entwässerungsschicht sowie die mineralische Dichtungsschicht der Basisabdichtung umfasste.

In (Artemann 2014) wird darauf hingewiesen, dass die entsprechenden Modellrechnungen unter der Annahme gemacht wurden, dass die gesamte Niederschlagsmenge, die über den oberen Rand in das Modell der Deponie eintritt, als Sickerwassermenge bzw. Lösungsmenge zur Verfügung steht. Ein Oberflächenabfluss sowie eine Evaporation des Wassers fanden im Modell nicht statt. Dies wurde als konservative Abschätzung dargestellt, da nur durch Sickerwasser, die den eigentlichen Deponiekörper durchfließen, die Schadstoffe aus einer Deponie ausgewaschen werden können. Der Bericht verweist darauf, dass bei Berücksichtigung des auf den realen Deponien vorliegenden Abflusses des Oberflächenwassers oder bei Abführung des Wassers über die Entwässerungsschicht der Deponien der Deponieklassen I, II und III wesentlich weniger Sickerwasser in den Deponiekörper eindringen und Schadstoff ausgewaschen werden kann.

3.2.2. Prüfung der Einhaltung des 10 µSv-Konzepts bei langfristig nicht intaktem Oberflächenabdichtungssystem

In den uns vorliegenden Untersuchungen wird unter bestimmten Umständen die sehr langfristig mögliche Diffusion von Radionukliden in das Oberflächenabdichtungssystem gezeigt. Bei einer Deponie der Deponieklassen I, II oder III würden durch die erforderliche Entwässerungsschicht diese Radionuklide jedoch seitlich abgeführt, so dass sie nicht in die Rekultivierungsschicht gelangen können. Dass die Radionuklide in die Entwässerungsschicht und von dort in genutzten Boden gelangen könnten, ist aus folgenden Gründen nicht möglich:

- Für alle Nachnutzungsszenarien besteht die Anforderung, dass Komponenten des Oberflächenabdichtungssystems dauerhaft nicht beeinträchtigt werden dürfen, indem sie beispielsweise durchwurzelt oder durch Baumaßnahmen unwirksam gemacht würden. Daher werden zunächst lediglich kleinere Undichtigkeiten der Abdichtungskomponenten unterstellt. Langfristig kann zwar von einem Komplettversagen von Abdichtungskomponenten ausgegangen werden, wobei die Entwässerungsschicht aber weitgehend funktionsfähig bleibt.
- Eine langfristige komplett Aufsättigung ist schon allein aus Gründen der Standsicherheit der Deponie nicht zu unterstellen. Die Standsicherheit ist Voraussetzung für die Entlassung aus der Nachsorge. Würden Ursachen für eine langfristige Änderung der Standsicherheit erkannt, so müssten entsprechende Eingriffe und Sanierungsarbeiten erfolgen.
- Bei einer teilweisen Aufsättigung kann es zu keinem kapillaren Aufstieg des Sickerwassers im Deponiekörper kommen. Sollte das Kapillar(Sicker)wasser die Entwässerungsschicht erreichen, kommt hier im Fall der Deponieklassen I, II oder III deren Kapillarsperrwirkung zum Tragen. Gemäß den Anforderungen der DepV soll die Entwässerungsschicht eine kapillarbrechende Funktion haben und im Fall einer Beschädigung einer Abdichtungskomponente auch als Kapillarsperre wirken. Daher ist sichergestellt, dass die Entwässerungsschicht ihre hydraulische Leitfähigkeit nicht verliert. Ein Abfließen von Wasser in genutzten Boden ist durch weiter unten angeführte Betrachtungen zu Deponiesickerwasser abgedeckt.

Modellierung von Sickerwasser- und Brunnenpfad in (SSK 2006)

Bei der Herleitung der Freigabewerte der StrlSchV in (SSK 2006) wurde angenommen, dass während des Deponiebetriebs das Sickerwasser gefasst und einer Kläranlage zugeführt wird. Es wurde die Strahlenexposition durch Verwertung des Klärschlamm zur Düngung landwirtschaftlich genutzter Flächen bis zum rechtlich zulässigen Maß betrachtet. Für den Vorfluter der Kläranlage wurde unterstellt, dass dessen Wasser

- als Trinkwasser,
- als Beregnungswasser (Verzehr von beregneten Pflanzen und von Fleisch und Milch von auf beregneten Weideflächen gehaltenem Vieh),
- zur Viehränke (Verzehr von Fleisch und Milch des getränkten Viehs) und
- zur Speisung eines Fischteichs (Verzehr von Fisch)

genutzt wird.

Hinsichtlich der Verzehrsraten wurde in (SSK 2006) davon ausgegangen, dass eine Person ihren gesamten Jahresbedarf (Mittelwert des Bedarfs in Deutschland) an Trinkwasser aus dem kontaminierten Oberflächengewässer, ihren gesamten Jahresbedarf an Lebensmitteln von einer mit kontaminiertem Wasser beregneten Fläche und ihren gesamten Jahresbedarf an Fisch aus einem mit

dem kontaminierten Wasser gespeisten Fischteich bezieht. Beim Pfad Viehtränke wurde unterstellt, dass das Vieh ausschließlich kontaminiertes Wasser erhält und die exponierte Person ihren Jahresbedarf an Fleisch und Milch über so getränktes Vieh deckt.

Beginnend nach 100 Jahren wurde in (SSK 2006) ein Versagen sowohl des Oberflächenabdichtungssystems als auch des Basisabdichtungssystems unterstellt, so dass Radionuklide in das Grundwasser gelangen können. Es wurde dann angenommen, dass in einer Entfernung von 500 m von der Deponie in deren Grundwasserabstrom ein Brunnen angelegt wird. Für das Wasser dieses Brunnens wurde unterstellt, dass es

- als Trinkwasser,
- als Beregnungswasser (Verzehr von beregneten Pflanzen) und
- zur Viehtränke (Verzehr von Fleisch und Milch)

genutzt wird.

Hinsichtlich der Verzehrsraten wurden (in SSK 2006) die gleichen Annahmen getroffen, wie sie oben in Zusammenhang mit dem Wasser des Vorfluters dargestellt sind.

Betrachtung des Pfads „Austritt von Sickerwasser am Deponiefuß mit Übergang in ein Oberflächengewässer“

Ergänzend zu den Annahmen in (SSK 2006) wurde hier auch der Fall betrachtet, dass zwar durch das versagende Oberflächenabdichtungssystem Niederschlagswasser in den Deponiekörper eindringt, aufgrund eines (noch) nicht versagenden Basisabdichtungssystems aber nicht in das Grundwasser gelangt. In diesem Fall würde das Sickerwasser am Fuß der Deponie austreten. Von einer Fassung dieses Wassers und einer Einleitung in eine Kläranlage kann nicht ausgegangen werden, so dass dieses Sickerwasser unmittelbar in ein Oberflächengewässer gelangen kann.

Die Konzentration eines Radionuklids in einem genutzten Oberflächengewässer über den Pfad des Deponiefußes ist dann nicht höher als im in (SSK 2006) betrachteten Szenario der Nutzung von Oberflächenwasser, das durch Sickerwasser der Deponie kontaminiert wird. Dies hat folgende Gründe:

- Bei der Modellierung in (SSK 2006) wird das Sickerwasser einer Kläranlage und über diese in einen Vorfluter geleitet. Der angenommene Jahresdurchsatz der Kläranlage war dabei von Bedeutung, um die Masse des insgesamt anfallenden Klärschlamm und dessen Kontamination abschätzen zu können. Im Hinblick auf die Vermischung der Radionuklide im Wasser des Vorfluters ist die Kläranlage und ihr Jahresdurchsatz aber bedeutungslos.
- Bei der Abschätzung der Kontamination des Klärschlamm und der Kontamination des Vorfluters der Kläranlage war in (SSK 2006) aufgrund fehlender belastbarer Daten konservativ für die meisten Radionuklide angenommen worden, dass sie sowohl zu 100 % im Klärschlamm verbleiben als auch zu 100 % in den Vorfluter gelangen. Für alle Radionuklide, für die in (SSK 2006) kein vollständiger Verbleib im Wasser angenommen worden ist, wurde im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen festgestellt, dass eine Überschreitung einer Dosis von 10 µSv im Jahr im Jahr nicht möglich ist. Dies liegt jeweils an einer geringen Halbwertszeit, durch die das Radionuklid nach 100 Jahren abgeklungen ist und/oder daran, dass der Dosisbeitrag über den Expositionspfad „Nutzung von Oberflächenwasser“ vergleichsweise gering, also für die Festlegung des Freigabewerts nicht begrenzend war.

- Eine Strahlenexposition ergibt sich dann, wenn das Wasser des Oberflächengewässers als Trinkwasser, Beregnungswasser, Tränkwasser oder zur Speisung eines Fischteichs verwendet würde. Diese Nutzungen setzen einen Mindestabfluss und somit auch eine mindestens vorhandene Vermischung im Oberflächengewässer voraus. Der Mindestabfluss muss der diesbezüglichen Festlegung in (SSK 2006) entsprechen.

Über die Nutzung des Oberflächengewässers nach Austritt von Sickerwasser am Deponiefuß kann sich aus diesen Gründen keine höhere Strahlenexposition als nach (SSK 2006) ermittelt ergeben. Bei Radionukliden, die nach 100 Jahren bereits zum großen Teil abgeklungen sind, resultieren gegenüber (SSK 2006) deutlich geringere Strahlenexpositionen.

Betrachtung des Pfads „Austritt von Sickerwasser am Deponiefuß mit Versickern auf einer nachgenutzten Fläche“

Darüber hinaus wurde im Rahmen der hier durchgeföhrten Untersuchungen abgeschätzt, inwieweit Dosen von mehr als 10 µSv im Jahr resultieren könnten, wenn am Fuß der Deponie austretendes Sickerwasser nicht in ein Oberflächengewässer abfließen, sondern auf einer nachgenutzten Fläche einsickern würde. Dies deckt auch den Fall ab, dass Sickerwasser an anderer Stelle auf der Deponie austreten würde und in eine nachgenutzte Fläche auf der Deponie einsickern würde.

Für diese Abschätzung wurde unterstellt, dass nach 100 Jahren die gleiche Radionuklidkonzentration im am Deponiefuß anfallenden Sickerwasser vorliegen würde wie in der Modellierung des Sickerwasserpads nach (SSK 2006) im Jahr vor Schließung der Deponie, korrigiert mit dem jeweiligen radioaktiven Zerfall über 100 Jahre. Dies ist konservativ, da nach 100 Jahren – also mit dem unterstellten Beginn des Versagens des Oberflächenabdichtungssystems – zunächst nur ein kleiner Teil des Niederschlagswassers in den Deponiekörper eindringen kann. Der Radionuklidtransport mit dem Sickerwasser durch den Deponiekörper ist dann noch nicht so ausgeprägt wie nach dem vollständigen Versagen des Oberflächenabdichtungssystems. Erst mit dem vollständigen Versagen des Oberflächenabdichtungssystems erfolgt wieder der gleiche Eintrag von Niederschlagswasser in den Deponiekörper wie während des Betriebs der Deponie.

Auch bei einem Einsickern von kontaminiertem Sickerwasser der Deponie in Böden am Fuß der Deponie, beispielsweise auf einer landwirtschaftlich oder zur Wohnbebauung nachgenutzten Fläche, ist eine Überschreitung einer Dosis von 10 µSv im Jahr nicht möglich. Dies hat vor allem folgende Gründe:

- Viele Radionuklide sind nach 100 Jahren so stark abgeklungen, dass das am Deponiefuß austretendes Sickerwasser eine geringere Radionuklidkonzentration hat als die Radionuklidkonzentration im genutzten Oberflächengewässer in der Modellierung nach (SSK 2006). In der Modellierung nach (SSK 2006) wird das Wasser des Oberflächengewässers unter anderem zur Berechnung von landwirtschaftlich genutzten Flächen verwendet. Dieser Berechnungspfad führt zu einer deutlich höheren Kontamination des Bewuchses als ein Einsickern von Wasser in den Boden bei gleicher Kontamination des Wassers, da bei der Berechnung ein Verbleib eines größeren Anteils von 30 % der Aktivität des Berechnungswassers auf den verzehrten Pflanzen unterstellt wird. Versickert das Wasser dagegen im Boden, so resultiert nur eine Kontamination der Pflanzen über die Wurzaufnahme, was je nach Element zu einer etwa um den Faktor 7 bis 500.000 geringeren Dosis durch den Verzehr der Pflanzen führt.
- Bei einigen längerlebigen Radionukliden ist die Dosis über den Sickerwasserpaf relativ gering und ihr Freigabewert wird durch andere Szenarien begrenzt. Für viele dieser Radionuklide konn-

te festgestellt werden, dass aus diesem Grund eine Überschreitung einer Dosis von 10 µSv im Jahr nicht möglich ist.

- Schließlich ist zu berücksichtigen, dass die durch eine solche Versickerung kontaminierte Fläche räumlich begrenzt wäre, zwar einen Garten umfassen könnte, aber nicht eine gesamte Ackerfläche durchschnittlicher Größe. Es ist dann nicht möglich, dass sämtliche Nahrungsmittel einer Person von einer solchen kontaminierten Fläche bezogen werden. Der Verzehr an kontaminierten Lebensmitteln ist dann geringer als in der Modellierung in (SSK 2006).

Insgesamt konnte für alle Radionuklide, für die in der StrlSchV Freigabewerte für die Beseitigung auf einer Deponie festgelegt sind, festgestellt werden, dass durch eine Nachnutzung auf oder an der Deponie keine Dosis von mehr als 10 µSv im Jahr zu unterstellen ist, auch wenn langfristig nicht gefasstes Sickerwasser aus dem Deponiekörper austritt.

Betrachtung des Pfads „Austritt von Gasen aus dem Deponiekörper“

Hinsichtlich einer Strahlenexposition durch gasförmig aus dem Deponiekörper in die Umgebungsluft freigesetztes H-3 oder C-14 ist festzustellen:

- Die Zersetzung von Biomasse erfolgt durch zwei Prozesse, die Humifizierung und Mineralisierung. Dabei wird die abgestorbene Biomasse physisch und chemisch durch verschiedene Zersetzerorganismen der Makro-, Meso- und Mikrofauna verändert und aufgespalten. Bei Mineralisierung der Biomasse im Boden in Form von Humus wird über die bakterielle Aktivität kein Methan mehr gebildet. Die Rekultivierungsschicht kann die Funktion der Methanoxidationsschicht übernehmen, bei der Methan in Wasser und CO₂ umgewandelt wird.
- In mineralischen Abfällen, beispielsweise in Bauschutt aus dem Abbau von Kernkraftwerken, ist praktisch keine Biomasse vorhanden. Eine Gasfreisetzung aus anderen, nicht nach § 29 StrlSchV freigegebenen Abfällen, ist zwar möglich, aber ohne dass diese Gase Radionuklide aus den nach § 29 StrlSchV freigegebenen Abfällen mitführen würden.
- Selbst für den Fall einer vollständigen Freisetzung von H-3 als HT innerhalb eines Jahres aus vielen 1000 Mg nach § 29 StrlSchV zur Beseitigung auf einer Deponie freigegebenen Abfällen, die in Höhe des zulässigen Maximalwerts mit H-3 kontaminiert sind, käme es zu keiner Überschreitung einer Dosis von 10 µSv im Jahr für eine Person, die sich ganzjährig auf der Deponie aufhalten würde. Für das weniger mobile C-14, in die Umgebungsluft freigesetzt als CO₂, gilt dies ebenfalls, wenn 1 % des C-14 innerhalb eines Jahres aus einer solchen Abfallmenge in die Umgebungsluft gelangen würde.

Literaturverzeichnis

- Artmann 2014 A. Artmann et al.: Anwendung und Weiterentwicklung von Modellen für Endlagersicherheitsanalysen auf die Freigabe radioaktiver Stoffe zur Deponierung. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-342, August 2014
- BAnz 2001 Dosiskoeffizienten bei äußerer und innerer Strahlenexposition. Bundesanzeiger Nr. 160a und b vom 28. August 2001
- Bellamy 2014 M. Bellamy et al.: Gamma Shielding Factors for Soil Covered Contamination for Use in Risk and Dose Assessment Models. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2013/00, September 2014
- BMU 2012 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV - Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen. BAnz AT 05.09.2012 B1
- Chen 1991 S.Y: Chen: Calculation of Effective Dose-Equivalent Responses for External Exposure from Residual Photon Emitters in Soil. Health Physics Vol. 60, No. 3, pp 411-426, 1991
- DepV 2009 Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung zur Umsetzung der novellierten abfallrechtlichen Gefährlichkeitskriterien (AbfallRULumsV) vom 4. März 2016 (BGBl. I S. 382)
- KrWG 2012 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes zur Umsetzung der Richtlinie über Tabakerzeugnisse und verwandte Erzeugnisse (TabErzRLUmsG) vom 4. April 2016 (BGBl. I S. 569)
- Landkreistag BaWü 2015 Landkreistag Baden-Württemberg: Handlungsanleitung zur Entsorgung von freigemessenen Abfällen auf Deponien in Baden-Württemberg. August 2015
- Singh 2014 V.P. Singh et al.: Gamma-ray and neutron shielding properties of some soil samples. Indian Journal of Pure & Applied Physics Vol. 52, September 2014, pp 579-587
- SSK 2006 Strahlenschutzkommission (SSK): Freigabe von Stoffen zur Beseitigung. Empfehlung der SSK, Empfehlung der SSK, verabschiedet in der 213. Sitzung der SSK am 06. Dezember 2006, Berichte der SSK des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 54, 2007
- StrlSchV 2001 Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetzes zur Neuord-

nung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung (EndlagerNOG) vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1843)

Thierfeldt 2000

S. Thierfeldt et al.: Freigabe von Gebäuden und Bauschutt. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMU-2000-558, 2000

Anhang

Vorbemerkungen zu den Tabellen

In einigen Tabellen wird bei Ac-227 zwischen mit Ac-227+ und Ac-227++ sowie bei U-238 zwischen U-238+ und U-238sec unterschieden, da in Anlage III Tabelle 1 Spalte 9c StrlSchV jeweils unterschiedliche Freigabewerte festgelegt sind. Der Zusatz „+“ und „++“ bedeutet die Berücksichtigung eines radioaktiven Gleichgewichts mit Tochternukliden, die in Anlage III Tabelle 2 StrlSchV genannt sind. Der Zusatz „sec“ bedeutet, dass sich das Radionuklid im säkularen Gleichgewicht mit seinen Tochternukliden befindet. Bei bestimmten Uranisotopen wird – wie auch in der StrlSchV – zwischen „(M)“ für die chemischen Formen UO_3 , UF_4 , UCl_4 und sechswertige Uranverbindungen sowie „(S)“ für alle übrigen Uranverbindungen unterschieden.

Für einige Abschirmfaktoren ist in Tabelle A-1 der Wert 0 angegeben. Dies bedeutet einen Abschirmfaktor, der kleiner ist als 10^{-12} .

Bei allen Tabellen mit Angaben ermittelter Dosen ist bei Dosen $< 10^{-99} \mu\text{Sv/a}$ der Wert 0 angegeben.

Tabelle A-1: Dosisleistungskoeffizienten für Aufenthalt auf dem Deponiekörper, Abschirmfaktoren für Boden, Freigabewerte und massenbezogene Aktivität des Deponiekörpers

Nuklid	Dosisleistungskoeffizient ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)/(Bq/g)	Abschirmfaktor	Freigabewert Anlage III Tab. 1 StrlSchV		massenbezogene Aktivität nach 1 Jahr Abklingdauer	
			Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g	Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g
H-3	0,00E+00	1,0E+00	60000	6000	5,67E+04	5,67E+03
Be-7	1,23E-02	2,0E-07	300	90	2,60E+00	7,81E-01
C-14	0,00E+00	1,0E+00	4000	400	4,00E+03	4,00E+02
Na-22	5,47E-01	1,1E-04	7	2	5,36E+00	1,53E+00
Si-32	0,00E+00	1,0E+00	1000	400	9,98E+02	3,99E+02
P-32	0,00E+00	1,0E+00	1000	1000	2,05E-05	2,05E-05
P-33	0,00E+00	1,0E+00	100000	20000	4,72E+00	9,45E-01
S-35	0,00E+00	1,0E+00	5000	500	2,77E+02	2,77E+01
Cl-36	0,00E+00	0,0E+00	3	0,3	3,00E+00	3,00E-01
Ca-41	0,00E+00	0,0E+00	200	20	2,00E+02	2,00E+01
Ca-45	4,72E-13	0,0E+00	5000	500	1,06E+03	1,06E+02
Sc-46	5,06E-01	5,0E-05	8	2	3,91E-01	9,78E-02
V-48	7,29E-01	9,2E-05	6	2	1,03E-06	3,42E-07
Cr-51	7,36E-03	4,7E-08	500	100	5,41E-02	1,08E-02
Mn-53	0,00E+00	0,0E+00	600	60	6,00E+02	6,00E+01
Mn-54	2,10E-01	1,5E-05	10	6	4,45E+00	2,67E+00
Fe-55	0,00E+00	0,0E+00	10000	7000	7,74E+03	5,42E+03
Fe-59	2,98E-01	8,9E-05	10	4	3,41E-02	1,36E-02
Co-56	9,03E-01	5,0E-04	4	1	1,61E-01	4,03E-02
Co-57	2,03E-02	8,6E-08	100	50	3,93E+01	1,97E+01
Co-58	2,45E-01	1,4E-05	10	5	2,81E-01	1,40E-01
Co-60	6,28E-01	1,1E-04	6	2	5,26E+00	1,75E+00
Ni-59	0,00E+00	0,0E+00	3000	300	3,00E+03	3,00E+02
Ni-63	0,00E+00	1,0E+00	10000	1000	9,93E+03	9,93E+02
Zn-65	1,46E-01	7,1E-05	10	8	3,54E+00	2,84E+00
Ge-71	2,56E-07	0,0E+00	10000	10000	4,88E-06	4,88E-06
As-73	2,67E-04	0,0E+00	1000	1000	4,28E+01	4,28E+01
As-74	1,90E-01	5,0E-06	10	7	6,51E-06	4,56E-06
Se-75	8,29E-02	1,0E-07	40	10	4,84E+00	1,21E+00
Rb-86	2,38E-02	5,9E-05	100	60	1,29E-04	7,76E-05
Sr-85	1,27E-01	6,3E-07	30	9	6,06E-01	1,82E-01
Sr-89	3,44E-05	2,3E-05	1000	1000	6,67E+00	6,67E+00
Sr-90+	0,00E+00	1,0E+00	6	0,6	5,86E+00	5,86E-01
Y-91	9,07E-04	9,5E-05	1000	1000	1,32E+01	1,32E+01
Zr-93+	5,27E-06	0,0E+00	800	80	8,00E+02	8,00E+01
Zr-95	6,08E-01	7,7E-06	10	4	1,92E-01	7,67E-02
Nb-93m	5,27E-06	0,0E+00	10000	4000	9,50E+03	3,80E+03

Fortsetzung Tabelle A-1 (Dosisleistungskoeffizienten, Abschirmfaktoren, Freigabewerte und Aktivität des Deponiekörpers)

Nuklid	Dosisleis-tungskoeffi-zient ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)/(Bq/g)	Abschirm-faktor	Freigabewert Anlage III Tab. 1 StrlSchV		massenbezogene Aktivität nach 1 Jahr Abklingdauer	
			Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g	Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g
Nb-94	3,95E-01	1,4E-05	10	3	1,00E+01	3,00E+00
Nb-95	1,92E-01	8,3E-06	10	6	7,26E-03	4,35E-03
Mo-93	2,95E-05	0,0E+00	40	4	4,00E+01	4,00E+00
Tc-97m	7,66E-05	0,0E+00	1000	200	6,01E+01	1,20E+01
Tc-97	3,75E-05	0,0E+00	70	7	7,00E+01	7,00E+00
Tc-99	6,43E-08	0,0E+00	7	0,7	7,00E+00	7,00E-01
Ru-103+	1,20E-01	4,0E-07	30	10	4,88E-02	1,63E-02
Ru-106+	5,17E-02	2,5E-05	70	20	3,51E+01	1,00E+01
Pd-103+	1,03E-04	8,2E-09	1000	1000	3,44E-04	3,44E-04
Ag-105	1,25E-01	7,3E-06	30	9	6,56E-02	1,97E-02
Ag-108m+	3,99E-01	4,5E-06	9	1	8,95E+00	9,95E-01
Ag-110m+	6,85E-01	4,5E-05	6	2	2,20E+00	7,33E-01
Ag-111	6,18E-03	3,1E-07	700	200	1,25E-12	3,57E-13
Cd-109+	5,34E-04	0,0E+00	800	80	4,58E+02	4,58E+01
Cd-115m+	5,51E-03	5,9E-05	700	200	2,47E+00	7,05E-01
In-114m+	2,83E-02	3,1E-06	100	40	6,04E-01	2,41E-01
Sn-113+	6,25E-02	0,0E+00	60	20	6,66E+00	2,22E+00
Sn-125	7,62E-02	1,0E-04	60	20	2,27E-10	7,58E-11
Sb-124	4,67E-01	1,5E-04	9	3	1,35E-01	4,49E-02
Sb-125+	1,03E-01	2,4E-06	40	10	3,09E+01	7,74E+00
Te-123m	2,60E-02	0,0E+00	100	40	1,21E+01	4,83E+00
Te-125m	4,20E-04	0,0E+00	1000	500	1,28E+01	6,38E+00
Te-127m+	1,30E-03	1,3E-07	300	30	2,94E+01	2,94E+00
Te-129m+	1,62E-02	7,0E-06	200	70	1,05E-01	3,67E-02
I-125	4,44E-04	0,0E+00	800	80	1,20E+01	1,20E+00
I-126	1,12E-01	5,9E-06	40	10	1,41E-07	3,53E-08
I-129	3,41E-04	0,0E+00	0,6	0,06	6,00E-01	6,00E-02
I-131	9,07E-02	1,3E-06	50	20	1,08E-12	4,31E-13
Cs-131	2,85E-04	0,0E+00	1000	1000	4,56E-09	4,56E-09
Cs-134	3,89E-01	1,1E-05	10	3	7,15E+00	2,14E+00
Cs-135	0,00E+00	1,0E+00	300	30	3,00E+02	3,00E+01
Cs-136	5,36E-01	3,7E-05	9	3	3,69E-08	1,23E-08
Cs-137+	1,41E-01	5,5E-06	10	8	9,77E+00	7,82E+00
Ba-131+	1,06E-01	2,7E-06	40	10	2,79E-08	6,98E-09
Ba-133	8,47E-02	3,2E-07	40	10	3,75E+01	9,37E+00
Ba-140+	7,11E-01	1,2E-06	10	3	2,57E-08	7,70E-09
Ce-139	2,67E-02	0,0E+00	100	40	1,58E+01	6,33E+00
Ce-141	1,31E-02	0,0E+00	100	80	4,16E-02	3,33E-02

Fortsetzung Tabelle A-1 (Dosisleistungskoeffizienten, Abschirmfaktoren, Freigabewerte und Aktivität des Deponiekörpers)

Nuklid	Dosisleis-tungskoeffi-zient ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)/(Bq/g)	Abschirm-faktor	Freigabewert Anlage III Tab. 1 StrlSchV		massenbezogene Aktivität nach 1 Jahr Abklingdauer	
			Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g	Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g
Ce-144+	1,08E-02	0,0E+00	100	100	4,10E+01	4,10E+01
Pr-143	2,23E-09	7,7E-06	10000	10000	8,11E-05	8,11E-05
Nd-147	2,75E-02	1,2E-06	100	50	1,03E-08	5,13E-09
Pm-147	5,74E-07	0,0E+00	10000	10000	7,68E+03	7,68E+03
Sm-151	3,38E-08	0,0E+00	10000	10000	9,92E+03	9,92E+03
Eu-152	2,77E-01	6,6E-05	10	4	9,48E+00	3,79E+00
Eu-154	3,07E-01	6,0E-05	10	4	9,22E+00	3,69E+00
Eu-155	6,82E-03	0,0E+00	100	100	8,68E+01	8,68E+01
Gd-153	9,30E-03	0,0E+00	100	100	3,51E+01	3,51E+01
Tb-160	2,66E-01	4,7E-05	10	4	2,99E-01	1,20E-01
Er-169	2,45E-07	0,0E+00	10000	10000	2,05E-08	2,05E-08
Tm-170	4,30E-04	0,0E+00	1000	1000	1,40E+02	1,40E+02
Tm-171	3,49E-05	0,0E+00	10000	10000	6,97E+03	6,97E+03
Hf-181	1,26E-01	1,8E-07	10	9	2,56E-02	2,31E-02
Ta-182	3,11E-01	8,2E-05	10	4	1,11E+00	4,43E-01
W-181	2,31E-03	0,0E+00	1000	400	1,24E+02	4,94E+01
W-185	4,47E-06	0,0E+00	10000	3000	3,44E+02	1,03E+02
Os-185	1,68E-01	7,2E-06	10	7	6,70E-01	4,69E-01
Os-191	8,58E-03	0,0E+00	100	100	7,34E-06	7,34E-06
Ir-190+	7,14E-01	5,3E-06	6	2	2,93E-09	9,76E-10
Ir-192	1,94E-01	7,1E-07	10	6	3,31E-01	1,98E-01
Ir-194	2,19E-02	3,3E-05	6	2	1,37E+00	4,55E-01
Hg-203	5,05E-02	0,0E+00	70	20	3,14E-01	8,98E-02
Tl-202	1,05E-01	4,7E-07	40	10	3,94E-08	9,86E-09
Tl-204	9,43E-05	0,0E+00	900	90	7,49E+02	7,49E+01
Pb-210	7,15E-05	0,0E+00	30	3	2,91E+01	2,91E+00
Bi-207	3,76E-01	5,5E-05	10	3	9,82E+00	2,95E+00
Po-210	2,14E-06	1,0E-05	10	3	1,61E+00	4,82E-01
Ra-223+	6,23E-02	1,3E-07	30	10	7,38E-09	2,46E-09
Ra-225	1,65E-01	0,0E+00	50	10	1,88E-06	3,77E-07
Ra-226+	4,35E-01	2,0E-09	0,4	0,04	4,00E-01	4,00E-02
Ra-226++	4,35E-01	2,0E-09	0,4	0,04	4,00E-01	4,00E-02
Ra-228+	2,29E-01	0,0E+00	5	2	4,43E+00	1,77E+00
Ac-227+	8,43E-02	7,3E-09	0,1	0,1	9,69E-02	9,69E-02
Ac-227++	8,43E-02	7,3E-09	0,6	0,2	5,81E-01	1,94E-01
Th-227	1,82E-01	5,1E-08	10	7	1,35E-05	9,44E-06
Th-228+	3,81E-01	1,6E-09	1	1	6,96E-01	6,96E-01
Th-229+	6,65E-02	0,0E+00	1	1	1,00E+00	1,00E+00

Fortsetzung Tabelle A-1 (Dosisleistungskoeffizienten, Abschirmfaktoren, Freigabewerte und Aktivität des Deponiekörpers)

Nuklid	Dosisleis-tungskoeffi-zient ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)/(Bq/g)	Abschirm-faktor	Freigabewert Anlage III Tab. 1 StrlSchV		massenbezogene Aktivität nach 1 Jahr Abklingdauer	
			Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g	Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g
Th-230	1,75E-02	1,4E-10	0,5	0,05	5,00E-01	5,00E-02
Th-232	6,09E-01	0,0E+00	0,7	0,07	7,00E-01	7,00E-02
Th-232sec	6,09E-01	0,0E+00	0,7	0,07	7,00E-01	7,00E-02
Th-234+	4,64E-03	0,0E+00	900	300	2,48E-02	8,28E-03
Pa-230	1,57E-01	2,1E-05	10	8	6,20E-06	4,96E-06
Pa-231	9,06E-02	5,7E-08	0,1	0,01	1,00E-01	1,00E-02
Pa-233	4,55E-02	7,1E-08	80	20	6,82E-03	1,70E-03
U-230+(M)	3,85E-03	4,8E-09	10	9	5,22E-05	4,70E-05
U-230+(S)	3,85E-03	4,8E-09	10	9	5,22E-05	4,70E-05
U-232(M)	3,78E-01	2,4E-09	4	0,5	3,96E+00	4,95E-01
U-232(S)	3,78E-01	2,4E-09	4	0,5	3,96E+00	4,95E-01
U-232+	3,78E-01	2,4E-09	1	0,5	9,90E-01	4,95E-01
U-233	5,20E-04	3,0E-08	5	0,5	5,00E+00	5,00E-01
U-234	1,27E-05	5,9E-10	6	0,6	6,00E+00	6,00E-01
U-235+	3,07E-02	2,0E-09	3	0,3	3,00E+00	3,00E-01
U-236	7,57E-06	0,0E+00	6	0,6	6,00E+00	6,00E-01
U-238+	4,65E-03	1,3E-05	6	0,6	6,00E+00	6,00E-01
U-238sec	4,65E-03	1,3E-05	0,3	0,03	3,00E-01	3,00E-02
Np-237+	4,85E-02	0,0E+00	1	0,1	1,00E+00	1,00E-01
Pu-236	3,78E-02	3,0E-08	10	6	7,84E+00	4,70E+00
Pu-237	6,57E-03	9,1E-12	500	100	1,90E+00	3,80E-01
Pu-238	3,57E-06	2,9E-08	1	1	9,92E-01	9,92E-01
Pu-239	9,32E-06	5,2E-08	1	0,5	1,00E+00	5,00E-01
Pu-240	3,53E-06	8,7E-07	1	0,6	1,00E+00	6,00E-01
Pu-241	3,80E-05	0,0E+00	100	40	9,53E+01	3,81E+01
Pu-242	3,09E-06	9,6E-05	1	0,5	1,00E+00	5,00E-01
Pu-244+	8,20E-02	6,2E-04	1	0,3	1,00E+00	3,00E-01
Am-241	1,31E-03	3,2E-09	1	1	9,98E-01	9,98E-01
Am-242m+	2,67E-03	0,0E+00	1	1	9,95E-01	9,95E-01
Am-243+	3,58E-02	2,0E-09	1	0,9	1,00E+00	9,00E-01
Cm-242	4,09E-06	7,8E-07	80	20	1,69E+01	4,23E+00
Cm-243	2,39E-02	1,7E-10	1	1	9,76E-01	9,76E-01
Cm-244	3,32E-06	2,2E-05	10	5	9,62E+00	4,81E+00
Cm-245	1,09E-02	7,5E-10	1	0,6	1,00E+00	6,00E-01
Cm-246	2,57E-06	5,7E-04	1	1	1,00E+00	1,00E+00
Cm-247+	7,88E-02	7,0E-07	1	0,3	1,00E+00	3,00E-01
Cm-248	2,51E-06	6,3E-04	1	0,2	1,00E+00	2,00E-01
Bk-249	0,00E+00	1,1E-07	900	300	4,10E+02	1,37E+02

Fortsetzung Tabelle A-1 (Dosisleistungskoeffizienten, Abschirmfaktoren, Freigabewerte und Aktivität des Deponiekörpers)

Nuklid	Dosisleis-tungskoeffi-zient ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)/(Bq/g)	Abschirm-faktor	Freigabewert Anlage III Tab. 1 StrlSchV		massenbezogene Aktivität nach 1 Jahr Abklingdauer	
			Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g	Spalte 9a Bq/g	Spalte 9c Bq/g
Cf-248	2,48E-06	2,6E-04	10	10	4,68E+00	4,68E+00
Cf-249	7,75E-02	6,1E-07	1	1	9,98E-01	9,98E-01
Cf-250	4,65E-06	6,1E-04	10	4	9,48E+00	3,79E+00
Cf-251	2,05E-02	0,0E+00	1	1	9,99E-01	9,99E-01
Cf-252	3,55E-06	6,3E-04	10	7	7,69E+00	5,38E+00
Cf-253+	1,39E-05	0,0E+00	100	70	6,72E-05	4,70E-05
Cf-254	6,34E-10	6,3E-04	1	1	1,53E-02	1,53E-02
Es-253	6,32E-05	2,3E-06	100	50	4,29E-04	2,14E-04
Es-254+	2,23E-01	6,7E-08	10	4	4,00E+00	1,60E+00

Tabelle A-2: Dosis durch Direktstrahlung aus dem Deponiekörper (Freigabe von bis zu 100 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung µSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung µSv/a	Freizeitnutzung µSv/a	Bebauung µSv/a	Verkehrsflächen µSv/a	Maximum µSv/a
H-3	0	0	0	0	0	0
Be-7	1,3E-06	6,7E-07	2,7E-06	5,5E-06	3,7E-08	5,5E-06
C-14	0	0	0	0	0	0
Na-22	2,80E-01	1,40E-01	5,80E-01	1,20E+00	3,50E-02	1,2E+00
Si-32	0	0	0	0	0	0
P-32	0	0	0	0	0	0
P-33	0	0	0	0	0	0
S-35	0	0	0	0	0	0
Cl-36	0	0	0	0	0	0
Ca-41	0	0	0	0	0	0
Ca-45	0	0	0	0	0	0
Sc-46	3,1E-03	1,6E-03	6,3E-03	1,3E-02	1,9E-04	1,3E-02
V-48	4,2E-09	2,1E-09	8,6E-09	1,7E-08	1,2E-10	1,7E-08
Cr-51	2,0E-09	1,0E-09	4,1E-09	8,2E-09	3,3E-11	8,2E-09
Mn-53	0	0	0	0	0	0
Mn-54	9,6E-03	4,8E-03	2,0E-02	3,9E-02	3,9E-04	3,9E-02
Fe-55	0	0	0	0	0	0
Fe-59	1,6E-04	7,9E-05	3,2E-04	6,5E-04	1,9E-05	6,5E-04
Co-56	2,2E-02	1,1E-02	4,4E-02	8,8E-02	1,3E-03	8,8E-02
Co-57	4,5E-05	2,2E-05	9,1E-05	1,8E-04	1,8E-06	1,8E-04
Co-58	2,6E-04	1,3E-04	5,3E-04	1,1E-03	3,5E-05	1,1E-03
Co-60	3,4E-01	1,7E-01	6,9E-01	1,4E+00	4,2E-02	1,4E+00
Ni-59	0	0	0	0	0	0
Ni-63	0	0	0	0	0	0
Zn-65	2,3E-02	1,1E-02	4,7E-02	9,3E-02	2,8E-03	9,3E-02
Ge-71	0	0	0	0	0	0
As-73	0	0	0	0	0	0
As-74	4,1E-10	2,1E-10	8,4E-10	1,7E-09	5,0E-11	1,7E-09
Se-75	1,7E-05	8,4E-06	3,4E-05	6,9E-05	2,8E-07	6,9E-05
Rb-86	1,3E-08	6,5E-09	2,7E-08	5,3E-08	7,9E-10	5,3E-08
Sr-85	1,2E-05	6,1E-06	2,5E-05	4,9E-05	3,3E-07	4,9E-05
Sr-89	1,0E-06	5,2E-07	2,1E-06	4,2E-06	6,3E-08	4,2E-06
Sr-90+	0	0	0	0	0	0
Y-91	2,6E-04	1,3E-04	5,3E-04	1,1E-03	3,2E-05	1,1E-03
Zr-93+	0	0	0	0	0	0
Zr-95	2,2E-04	1,1E-04	4,5E-04	9,1E-04	9,1E-06	9,1E-04
Nb-93m	0	0	0	0	0	0
Nb-94	5,5E-02	2,8E-02	1,1E-01	2,3E-01	3,4E-03	2,3E-01
Nb-95	1,6E-06	7,9E-07	3,2E-06	6,4E-06	6,4E-08	6,4E-06

Fortsetzung Tabelle A-2 (Dosis, 100 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Freizeitnutzung μSv/a	Bebauung μSv/a	Verkehrsflächen μSv/a	Maximum μSv/a
Mo-93	0	0	0	0	0	0
Tc-97m	0	0	0	0	0	0
Tc-97	0	0	0	0	0	0
Tc-99	0	0	0	0	0	0
Ru-103+	3,6E-07	1,8E-07	7,3E-07	1,5E-06	9,8E-09	1,5E-06
Ru-106+	3,3E-02	1,6E-02	6,7E-02	1,3E-01	4,4E-03	1,3E-01
Pd-103+	2,0E-14	9,8E-15	4,0E-14	8,0E-14	5,3E-16	8,0E-14
Ag-105	9,7E-06	4,9E-06	2,0E-05	4,0E-05	4,0E-07	4,0E-05
Ag-108m+	1,6E-02	8,0E-03	3,3E-02	6,5E-02	2,0E-03	6,5E-02
Ag-110m+	4,3E-02	2,1E-02	8,7E-02	1,7E-01	5,8E-03	1,7E-01
Ag-111	7,0E-20	3,5E-20	1,4E-19	2,9E-19	4,3E-21	2,9E-19
Cd-109+	0	0	0	0	0	0
Cd-115m+	1,4E-04	7,0E-05	2,9E-04	5,7E-04	1,7E-05	5,7E-04
In-114m+	1,0E-05	5,1E-06	2,1E-05	4,2E-05	1,3E-06	4,2E-05
Sn-113+	0	0	0	0	0	0
Sn-125	6,4E-14	3,2E-14	1,3E-13	2,6E-13	8,7E-15	2,6E-13
Sb-124	2,2E-03	1,1E-03	4,5E-03	9,0E-03	3,0E-04	9,0E-03
Sb-125+	6,7E-03	3,4E-03	1,4E-02	2,8E-02	2,8E-04	2,8E-02
Te-123m	0	0	0	0	0	0
Te-125m	0	0	0	0	0	0
Te-127m+	1,9E-06	9,7E-07	3,9E-06	7,9E-06	7,9E-08	7,9E-06
Te-129m+	1,5E-06	7,7E-07	3,2E-06	6,3E-06	1,9E-07	6,3E-06
I-125	0	0	0	0	0	0
I-126	4,5E-12	2,2E-12	9,1E-12	1,8E-11	2,7E-13	1,8E-11
I-129	0	0	0	0	0	0
I-131	4,0E-18	2,0E-18	8,2E-18	1,6E-17	1,6E-19	1,6E-17
Cs-131	0	0	0	0	0	0
Cs-134	2,6E-02	1,3E-02	5,3E-02	1,1E-01	3,2E-03	1,1E-01
Cs-135	0	0	0	0	0	0
Cs-136	3,6E-11	1,8E-11	7,4E-11	1,5E-10	4,4E-12	1,5E-10
Cs-137+	7,5E-03	3,7E-03	1,5E-02	3,1E-02	3,1E-04	3,1E-02
Ba-131+	4,0E-13	2,0E-13	8,1E-13	1,6E-12	2,4E-14	1,6E-12
Ba-133	9,8E-04	4,9E-04	2,0E-03	4,0E-03	1,6E-05	4,0E-03
Ba-140+	1,2E-12	6,0E-13	2,4E-12	4,9E-12	3,3E-14	4,9E-12
Ce-139	0	0	0	0	0	0
Ce-141	0	0	0	0	0	0
Ce-144+	0	0	0	0	0	0
Pr-143	7,0E-17	3,5E-17	1,4E-16	2,8E-16	9,4E-18	2,8E-16
Nd-147	1,4E-14	7,2E-15	2,9E-14	5,9E-14	5,9E-16	5,9E-14
Pm-147	0	0	0	0	0	0

Fortsetzung Tabelle A-2 (Dosis, 100 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Freizeitnutzung μSv/a	Bebauung μSv/a	Verkehrsflächen μSv/a	Maximum μSv/a
Sm-151	0	0	0	0	0	0
Eu-152	1,7E-01	8,4E-02	3,4E-01	6,9E-01	2,1E-02	6,9E-01
Eu-154	1,6E-01	8,2E-02	3,3E-01	6,7E-01	2,0E-02	6,7E-01
Eu-155	0	0	0	0	0	0
Gd-153	0	0	0	0	0	0
Tb-160	1,0E-03	5,2E-04	2,1E-03	4,2E-03	1,3E-04	4,2E-03
Er-169	0	0	0	0	0	0
Tm-170	0	0	0	0	0	0
Tm-171	0	0	0	0	0	0
Hf-181	9,6E-08	4,8E-08	2,0E-07	3,9E-07	2,6E-09	3,9E-07
Ta-182	1,1E-02	5,7E-03	2,3E-02	4,7E-02	1,4E-03	4,7E-02
W-181	0	0	0	0	0	0
W-185	0	0	0	0	0	0
Os-185	2,8E-04	1,4E-04	5,7E-04	1,1E-03	1,1E-05	1,1E-03
Os-191	0	0	0	0	0	0
Ir-190+	5,1E-13	2,6E-13	1,0E-12	2,1E-12	6,3E-14	2,1E-12
Ir-192	1,3E-05	6,4E-06	2,6E-05	5,2E-05	7,8E-07	5,2E-05
Ir-194	0	0	0	0	0	0
Hg-203	0	0	0	0	0	0
Tl-202	8,5E-14	4,2E-14	1,7E-13	3,5E-13	5,2E-15	3,5E-13
Tl-204	0	0	0	0	0	0
Pb-210+	0	0	0	0	0	0
Pb-210++	0	0	0	0	0	0
Bi-207	2,0E-01	1,0E-01	4,1E-01	8,2E-01	2,7E-02	8,2E-01
Po-210	1,6E-08	8,0E-09	3,2E-08	6,5E-08	6,5E-10	6,5E-08
Ra-223+	2,7E-15	1,3E-15	5,4E-15	1,1E-14	7,3E-17	1,1E-14
Ra-225	0	0	0	0	0	0
Ra-226+	3,5E-07	1,7E-07	7,1E-07	1,4E-06	1,3E-09	1,4E-06
Ra-226++	3,5E-07	1,7E-07	7,1E-07	1,4E-06	1,3E-09	1,4E-06
Ra-228+	0	0	0	0	0	0
Ac-227+	5,9E-08	2,9E-08	1,2E-07	2,4E-07	9,7E-10	2,4E-07
Ac-227++	3,5E-07	1,8E-07	7,2E-07	1,4E-06	5,8E-09	1,4E-06
Th-227	9,4E-12	4,7E-12	1,9E-11	3,8E-11	1,6E-13	3,8E-11
Th-228+	3,6E-07	1,8E-07	7,3E-07	1,5E-06	1,3E-09	1,5E-06
Th-229+	0	0	0	0	0	0
Th-230	1,2E-09	6,1E-10	2,5E-09	5,0E-09	2,0E-11	5,0E-09
Th-232	0	0	0	0	0	0
Th-232sec	0	0	0	0	0	0
Th-234+	0	0	0	0	0	0
Pa-230	1,4E-09	7,1E-10	2,9E-09	5,8E-09	8,7E-11	5,8E-09

Fortsetzung Tabelle A-2 (Dosis, 100 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Freizeitnutzung μSv/a	Bebauung μSv/a	Verkehrsflächen μSv/a	Maximum μSv/a
Pa-231	5,2E-07	2,6E-07	1,1E-06	2,1E-06	8,6E-09	2,1E-06
Pa-233	2,3E-09	1,2E-09	4,7E-09	9,4E-09	2,8E-10	9,4E-09
U-230+(M)	0	0	0	0	0	0
U-230+(S)	0	0	0	0	0	0
U-232(M)	3,6E-06	1,8E-06	7,3E-06	1,5E-05	5,9E-08	1,5E-05
U-232(S)	3,6E-06	1,8E-06	7,3E-06	1,5E-05	5,9E-08	1,5E-05
U-232+	8,9E-07	4,5E-07	1,8E-06	3,6E-06	1,5E-08	3,6E-06
U-233	7,8E-08	3,9E-08	1,6E-07	3,2E-07	1,3E-09	3,2E-07
U-234	4,5E-11	2,2E-11	9,2E-11	1,8E-10	1,7E-13	1,8E-10
U-235+	1,8E-07	9,2E-08	3,8E-07	7,5E-07	3,1E-09	7,5E-07
U-236	0	0	0	0	0	0
U-238+	3,6E-04	1,8E-04	7,4E-04	1,5E-03	2,2E-07	1,5E-03
U-238sec	1,8E-05	9,1E-06	3,7E-05	7,4E-05	1,1E-08	7,4E-05
Np-237+	0	0	0	0	0	0
Pu-236	7,9E-06	3,9E-06	1,6E-05	3,2E-05	4,8E-09	3,2E-05
Pu-237	2,0E-11	1,0E-11	4,1E-11	8,2E-11	1,2E-14	8,2E-11
Pu-238	1,0E-10	5,1E-11	2,1E-10	4,2E-10	6,3E-14	4,2E-10
Pu-239	4,8E-10	2,4E-10	9,9E-10	2,0E-09	1,3E-11	2,0E-09
Pu-240	3,1E-09	1,5E-09	6,3E-09	1,3E-08	1,9E-12	1,3E-08
Pu-241	0	0	0	0	0	0
Pu-242	3,0E-07	1,5E-07	6,1E-07	1,2E-06	1,8E-10	1,2E-06
Pu-244+	5,1E-02	2,5E-02	1,0E-01	2,1E-01	3,1E-05	2,1E-01
Am-241	4,2E-09	2,1E-09	8,5E-09	1,7E-08	2,6E-12	1,7E-08
Am-242m+	0	0	0	0	0	0
Am-243+	7,2E-08	3,6E-08	1,5E-07	2,9E-07	2,7E-10	2,9E-07
Cm-242	2,7E-08	1,4E-08	5,6E-08	1,1E-07	1,0E-10	1,1E-07
Cm-243	3,9E-09	2,0E-09	8,0E-09	1,6E-08	6,5E-11	1,6E-08
Cm-244	6,9E-07	3,4E-07	1,4E-06	2,8E-06	4,2E-10	2,8E-06
Cm-245	8,2E-09	4,1E-09	1,7E-08	3,3E-08	3,0E-11	3,3E-08
Cm-246	1,5E-06	7,3E-07	3,0E-06	6,0E-06	9,0E-10	6,0E-06
Cm-247+	5,5E-05	2,8E-05	1,1E-04	2,3E-04	9,1E-07	2,3E-04
Cm-248	1,6E-06	7,9E-07	3,2E-06	6,5E-06	9,7E-10	6,5E-06
Bk-249	0	0	0	0	0	0
Cf-248	2,1E-06	1,1E-06	4,3E-06	8,6E-06	1,3E-09	8,6E-06
Cf-249	4,7E-05	2,4E-05	9,6E-05	1,9E-04	1,9E-06	1,9E-04
Cf-250	2,6E-05	1,3E-05	5,3E-05	1,1E-04	1,6E-08	1,1E-04
Cf-251	0	0	0	0	0	0
Cf-252	1,5E-05	7,6E-06	3,1E-05	6,2E-05	5,6E-08	6,2E-05
Cf-253+	0	0	0	0	0	0
Cf-254	1,4E-12	7,2E-13	2,9E-12	5,9E-12	8,8E-16	5,9E-12

Fortsetzung Tabelle A-2 (Dosis, 100 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Freizeitnutzung μSv/a	Bebauung μSv/a	Verkehrsflächen μSv/a	Maximum μSv/a
Es-253	5,1E-12	2,5E-12	1,0E-11	2,1E-11	1,4E-13	2,1E-11
Es-254+	3,9E-05	1,9E-05	8,0E-05	1,6E-04	6,5E-07	1,6E-04

Tabelle A-3: Dosis durch Direktstrahlung aus dem Deponiekörper (Freigabe von bis zu 1000 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung µSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung µSv/a	Freizeitnutzung µSv/a	Bebauung µSv/a	Verkehrsflächen µSv/a	Maximum µSv/a
H-3	0	0	0	0	0	0
Be-7	4,0E-07	2,0E-07	8,2E-07	1,6E-06	1,1E-08	1,6E-06
C-14	0	0	0	0	0	0
Na-22	8,10E-02	4,00E-02	1,70E-01	3,30E-01	9,90E-03	3,3E-01
Si-32	0	0	0	0	0	0
P-32	0	0	0	0	0	0
P-33	0	0	0	0	0	0
S-35	0	0	0	0	0	0
Cl-36	0	0	0	0	0	0
Ca-41	0	0	0	0	0	0
Ca-45	0	0	0	0	0	0
Sc-46	7,8E-04	3,9E-04	1,6E-03	3,2E-03	4,7E-05	3,2E-03
V-48	1,4E-09	7,0E-10	2,9E-09	5,7E-09	3,8E-11	5,7E-09
Cr-51	4,0E-10	2,0E-10	8,2E-10	1,6E-09	6,6E-12	1,6E-09
Mn-53	0	0	0	0	0	0
Mn-54	5,8E-03	2,9E-03	1,2E-02	2,4E-02	2,4E-04	2,4E-02
Fe-55	0	0	0	0	0	0
Fe-59	6,3E-05	3,2E-05	1,3E-04	2,6E-04	7,8E-06	2,6E-04
Co-56	5,4E-03	2,7E-03	1,1E-02	2,2E-02	3,3E-04	2,2E-02
Co-57	2,2E-05	1,1E-05	4,5E-05	9,1E-05	9,1E-07	9,1E-05
Co-58	1,3E-04	6,5E-05	2,7E-04	5,3E-04	1,8E-05	5,3E-04
Co-60	1,1E-01	5,7E-02	2,3E-01	4,6E-01	1,4E-02	4,6E-01
Ni-59	0	0	0	0	0	0
Ni-63	0	0	0	0	0	0
Zn-65	1,8E-02	9,2E-03	3,7E-02	7,5E-02	2,2E-03	7,5E-02
Ge-71	0	0	0	0	0	0
As-73	0	0	0	0	0	0
As-74	2,9E-10	1,4E-10	5,9E-10	1,2E-09	3,5E-11	1,2E-09
Se-75	4,2E-06	2,1E-06	8,6E-06	1,7E-05	7,0E-08	1,7E-05
Rb-86	7,8E-09	3,9E-09	1,6E-08	3,2E-08	4,8E-10	3,2E-08
Sr-85	3,6E-06	1,8E-06	7,4E-06	1,5E-05	9,9E-08	1,5E-05
Sr-89	1,0E-06	5,2E-07	2,1E-06	4,2E-06	6,3E-08	4,2E-06
Sr-90+	0	0	0	0	0	0
Y-91	2,6E-04	1,3E-04	5,3E-04	1,1E-03	3,2E-05	1,1E-03
Zr-93+	0	0	0	0	0	0
Zr-95	8,9E-05	4,4E-05	1,8E-04	3,6E-04	3,6E-06	3,6E-04
Nb-93m	0	0	0	0	0	0
Nb-94	1,7E-02	8,3E-03	3,4E-02	6,8E-02	1,0E-03	6,8E-02
Nb-95	9,4E-07	4,7E-07	1,9E-06	3,8E-06	3,9E-08	3,8E-06

Fortsetzung Tabelle A-3 (Dosis, 1000 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Freizeitnutzung μSv/a	Bebauung μSv/a	Verkehrsflächen μSv/a	Maximum μSv/a
Mo-93	0	0	0	0	0	0
Tc-97m	0	0	0	0	0	0
Tc-97	0	0	0	0	0	0
Tc-99	0	0	0	0	0	0
Ru-103+	1,2E-07	6,0E-08	2,4E-07	4,9E-07	3,3E-09	4,9E-07
Ru-106+	9,4E-03	4,7E-03	1,9E-02	3,8E-02	1,3E-03	3,8E-02
Pd-103+	2,0E-14	9,8E-15	4,0E-14	8,0E-14	5,3E-16	8,0E-14
Ag-105	2,9E-06	1,5E-06	6,0E-06	1,2E-05	1,2E-07	1,2E-05
Ag-108m+	1,8E-03	8,9E-04	3,6E-03	7,3E-03	2,2E-04	7,3E-03
Ag-110m+	1,4E-02	7,1E-03	2,9E-02	5,8E-02	1,9E-03	5,8E-02
Ag-111	2,0E-20	1,0E-20	4,1E-20	8,2E-20	1,2E-21	8,2E-20
Cd-109+	0	0	0	0	0	0
Cd-115m+	4,0E-05	2,0E-05	8,2E-05	1,6E-04	4,9E-06	1,6E-04
In-114m+	4,1E-06	2,1E-06	8,4E-06	1,7E-05	5,0E-07	1,7E-05
Sn-113+	0	0	0	0	0	0
Sn-125	2,1E-14	1,1E-14	4,4E-14	8,7E-14	2,9E-15	8,7E-14
Sb-124	7,3E-04	3,7E-04	1,5E-03	3,0E-03	9,9E-05	3,0E-03
Sb-125+	1,7E-03	8,4E-04	3,4E-03	6,9E-03	6,9E-05	6,9E-03
Te-123m	0	0	0	0	0	0
Te-125m	0	0	0	0	0	0
Te-127m+	1,9E-07	9,7E-08	3,9E-07	7,9E-07	7,9E-09	7,9E-07
Te-129m+	5,4E-07	2,7E-07	1,1E-06	2,2E-06	6,6E-08	2,2E-06
I-125	0	0	0	0	0	0
I-126	1,1E-12	5,6E-13	2,3E-12	4,6E-12	6,8E-14	4,6E-12
I-129	0	0	0	0	0	0
I-131	1,6E-18	8,0E-19	3,3E-18	6,6E-18	6,6E-20	6,6E-18
Cs-131	0	0	0	0	0	0
Cs-134	7,8E-03	3,9E-03	1,6E-02	3,2E-02	9,5E-04	3,2E-02
Cs-135	0	0	0	0	0	0
Cs-136	1,2E-11	6,0E-12	2,5E-11	4,9E-11	1,5E-12	4,9E-11
Cs-137+	6,0E-03	3,0E-03	1,2E-02	2,4E-02	2,4E-04	2,4E-02
Ba-131+	1,0E-13	5,0E-14	2,0E-13	4,1E-13	6,1E-15	4,1E-13
Ba-133	2,5E-04	1,2E-04	5,0E-04	1,0E-03	4,1E-06	1,0E-03
Ba-140+	3,6E-13	1,8E-13	7,3E-13	1,5E-12	9,8E-15	1,5E-12
Ce-139	0	0	0	0	0	0
Ce-141	0	0	0	0	0	0
Ce-144+	0	0	0	0	0	0
Pr-143	7,0E-17	3,5E-17	1,4E-16	2,8E-16	9,4E-18	2,8E-16
Nd-147	7,2E-15	3,6E-15	1,5E-14	2,9E-14	2,9E-16	2,9E-14
Pm-147	0	0	0	0	0	0

Fortsetzung Tabelle A-3 (Dosis, 1000 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Freizeitnutzung μSv/a	Bebauung μSv/a	Verkehrsflächen μSv/a	Maximum μSv/a
Sm-151	0	0	0	0	0	0
Eu-152	6,8E-02	3,4E-02	1,4E-01	2,8E-01	8,3E-03	2,8E-01
Eu-154	6,5E-02	3,3E-02	1,3E-01	2,7E-01	8,0E-03	2,7E-01
Eu-155	0	0	0	0	0	0
Gd-153	0	0	0	0	0	0
Tb-160	4,1E-04	2,1E-04	8,4E-04	1,7E-03	5,1E-05	1,7E-03
Er-169	0	0	0	0	0	0
Tm-170	0	0	0	0	0	0
Tm-171	0	0	0	0	0	0
Hf-181	8,6E-08	4,3E-08	1,8E-07	3,5E-07	2,4E-09	3,5E-07
Ta-182	4,6E-03	2,3E-03	9,3E-03	1,9E-02	5,6E-04	1,9E-02
W-181	0	0	0	0	0	0
W-185	0	0	0	0	0	0
Os-185	2,0E-04	9,8E-05	4,0E-04	8,0E-04	8,0E-06	8,0E-04
Os-191	0	0	0	0	0	0
Ir-190+	1,7E-13	8,6E-14	3,5E-13	7,0E-13	2,1E-14	7,0E-13
Ir-192	7,7E-06	3,9E-06	1,6E-05	3,1E-05	4,7E-07	3,1E-05
Ir-194	0	0	0	0	0	0
Hg-203	0	0	0	0	0	0
Tl-202	2,1E-14	1,1E-14	4,3E-14	8,7E-14	1,3E-15	8,7E-14
Tl-204	0	0	0	0	0	0
Pb-210+	0	0	0	0	0	0
Pb-210++	0	0	0	0	0	0
Bi-207	6,0E-02	3,0E-02	1,2E-01	2,5E-01	8,2E-03	2,5E-01
Po-210	4,8E-09	2,4E-09	9,7E-09	1,9E-08	1,9E-10	1,9E-08
Ra-223+	0,0E+00	1,3E-15	5,4E-15	1,1E-14	7,3E-17	1,1E-14
Ra-225	0	0	0	0	0	0
Ra-226+	3,5E-08	1,7E-08	7,1E-08	1,4E-07	1,3E-10	1,4E-07
Ra-226++	3,5E-08	1,7E-08	7,1E-08	1,4E-07	1,3E-10	1,4E-07
Ra-228+	0	0	0	0	0	0
Ac-227+	5,9E-08	2,9E-08	1,2E-07	2,4E-07	9,7E-10	2,4E-07
Ac-227++	1,2E-07	5,9E-08	2,4E-07	4,8E-07	1,9E-09	4,8E-07
Th-227	6,6E-12	3,3E-12	1,3E-11	2,7E-11	1,1E-13	2,7E-11
Th-228+	3,6E-07	1,8E-07	7,3E-07	1,5E-06	1,3E-09	1,5E-06
Th-229+	0	0	0	0	0	0
Th-230	1,2E-10	6,1E-11	2,5E-10	5,0E-10	2,0E-12	5,0E-10
Th-232	0	0	0	0	0	0
Th-232sec	0	0	0	0	0	0
Th-234+	0	0	0	0	0	0
Pa-230	1,1E-09	5,7E-10	2,3E-09	4,7E-09	7,0E-11	4,7E-09

Fortsetzung Tabelle A-3 (Dosis, 1000 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung μSv/a	Freizeitnutzung μSv/a	Bebauung μSv/a	Verkehrsflächen μSv/a	Maximum μSv/a
Pa-231	5,2E-08	2,6E-08	1,1E-07	2,1E-07	8,6E-10	2,1E-07
Pa-233	5,8E-10	2,9E-10	1,2E-09	2,4E-09	7,1E-11	2,4E-09
U-230+(M)	0	0	0	0	0	0
U-230+(S)	0	0	0	0	0	0
U-232(M)	4,5E-07	2,2E-07	9,1E-07	1,8E-06	7,4E-09	1,8E-06
U-232(S)	4,5E-07	2,2E-07	9,1E-07	1,8E-06	7,4E-09	1,8E-06
U-232+	4,5E-07	2,2E-07	9,1E-07	1,8E-06	7,4E-09	1,8E-06
U-233	7,8E-09	3,9E-09	1,6E-08	3,2E-08	1,3E-10	3,2E-08
U-234	4,5E-12	2,2E-12	9,2E-12	1,8E-11	1,7E-14	1,8E-11
U-235+	1,8E-08	9,2E-09	3,8E-08	7,5E-08	3,1E-10	7,5E-08
U-236	0	0	0	0	0	0
U-238+	3,6E-05	1,8E-05	7,4E-05	1,5E-04	2,2E-08	1,5E-04
U-238sec	1,8E-06	9,1E-07	3,7E-06	7,4E-06	1,1E-09	7,4E-06
Np-237+	0	0	0	0	0	0
Pu-236	4,7E-06	2,4E-06	9,7E-06	1,9E-05	2,9E-09	1,9E-05
Pu-237	4,0E-12	2,0E-12	8,2E-12	1,6E-11	2,5E-15	1,6E-11
Pu-238	1,0E-10	5,1E-11	2,1E-10	4,2E-10	6,3E-14	4,2E-10
Pu-239	2,4E-10	1,2E-10	4,9E-10	9,9E-10	6,6E-12	9,9E-10
Pu-240	1,8E-09	9,2E-10	3,8E-09	7,5E-09	1,1E-12	7,5E-09
Pu-241	0	0	0	0	0	0
Pu-242	1,5E-07	7,4E-08	3,0E-07	6,1E-07	9,1E-11	6,1E-07
Pu-244+	1,5E-02	7,6E-03	3,1E-02	6,2E-02	9,3E-06	6,2E-02
Am-241	4,2E-09	2,1E-09	8,5E-09	1,7E-08	2,6E-12	1,7E-08
Am-242m+	0	0	0	0	0	0
Am-243+	6,4E-08	3,2E-08	1,3E-07	2,6E-07	2,4E-10	2,6E-07
Cm-242	6,9E-09	3,4E-09	1,4E-08	2,8E-08	2,5E-11	2,8E-08
Cm-243	3,9E-09	2,0E-09	8,0E-09	1,6E-08	6,5E-11	1,6E-08
Cm-244	3,4E-07	1,7E-07	7,0E-07	1,4E-06	2,1E-10	1,4E-06
Cm-245	4,9E-09	2,5E-09	1,0E-08	2,0E-08	1,8E-11	2,0E-08
Cm-246	1,5E-06	7,3E-07	3,0E-06	6,0E-06	9,0E-10	6,0E-06
Cm-247+	1,7E-05	8,3E-06	3,4E-05	6,8E-05	2,7E-07	6,8E-05
Cm-248	3,2E-07	1,6E-07	6,5E-07	1,3E-06	1,9E-10	1,3E-06
Bk-249	0	0	0	0	0	0
Cf-248	2,1E-06	1,1E-06	4,3E-06	8,6E-06	1,3E-09	8,6E-06
Cf-249	4,7E-05	2,4E-05	9,6E-05	1,9E-04	1,9E-06	1,9E-04
Cf-250	1,0E-05	5,2E-06	2,1E-05	4,3E-05	6,4E-09	4,3E-05
Cf-251	0	0	0	0	0	0
Cf-252	1,1E-05	5,3E-06	2,2E-05	4,3E-05	3,9E-08	4,3E-05
Cf-253+	0	0	0	0	0	0
Cf-254	1,4E-12	7,2E-13	2,9E-12	5,9E-12	8,8E-16	5,9E-12

Fortsetzung Tabelle A-3 (Dosis, 1000 Mg/a)

Nuklid	Landwirtschaftliche Nutzung µSv/a	Forstwirtschaftliche Nutzung µSv/a	Freizeitnutzung µSv/a	Bebauung µSv/a	Verkehrsflächen µSv/a	Maximum µSv/a
Es-253	2,5E-12	1,3E-12	5,2E-12	1,0E-11	6,9E-14	1,0E-11
Es-254+	1,6E-05	7,8E-06	3,2E-05	6,4E-05	2,6E-07	6,4E-05