



ARBEITSBERICHT NAB 24-05

Abfallzuteilung und Betrachtungszeitraum
für den Standortvergleich und Nachweis-
zeitraum für den Sicherheitsnachweis für
das geologische Tiefenlager

August 2024



ARBEITSBERICHT NAB 24-05

Abfallzuteilung und Betrachtungszeitraum
für den Standortvergleich und Nachweis-
zeitraum für den Sicherheitsnachweis für
das geologische Tiefenlager

August 2024

STICHWÖRTER

Abfallzuteilung, Betrachtungszeitraum, Nachweiszeitraum,
Langzeitsicherheit, Tiefenlager, radioaktive Abfälle

**Nagra | Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz
+41 56 437 11 11 | info@nagra.ch | nagra.ch

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Aktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen.

Dieser Bericht «Abfallzuteilung und Betrachtungszeitraum für den Standortvergleich und Nachweiszeitraum für den Sicherheitsnachweis für das geologische Tiefenlager» begründet die Abfallzuteilung für den Standortvergleich (in SMA- und HAA-Lager) und für den Sicherheitsnachweis für den vorgeschlagenen Standort «Haberstal» im Standortgebiet Nördlich Lägern (mit SMA- und HAA-Lagerteilen des Kombilagers).

Autoren: R.A.J. Wüst¹, S. Pudollek¹, G. Mayer², P. Hunkeler¹, Th.U. Kämpfer³, V. Bykov¹

¹ Nagra

² CSD Aarau

³ Ostschweizer Fachhochschule, Rapperswil

Gutachter: Dieses Dokument wurde extern von Dr. J. Wolf (GRS, Deutschland) begutachtet, und die wertvollen Beiträge zum Manuskript wurden integriert.

Danksagung: Die Autoren danken mehreren Einzelpersonen für ihre Unterstützung, wertvollen Diskussionen und produktiven Vorschlägen, insbesondere P. Zuidema, P. Gribi, T. Vietor, und das Nagra Team «Safety and Performance». Nagra's Grafikdesignteam wird ebenfalls für ihre Bemühungen bei der Fertigstellung des Dokuments und der Abbildungen anerkannt.

Zusammenfassung

In der Schweiz ist gemäss Kernenergiegesetz die geologische Tiefenlagerung das vorgeschriebene Entsorgungskonzept für alle radioaktiven Abfälle. Das schweizerische Entsorgungskonzept unterscheidet zwischen zwei Lagertypen: einem für schwach- und mittelaktive (SMA-Lager) und einem für hochaktive Abfälle (HAA-Lager). Beide Lager können als ein sogenanntes Kombilager im gleichen Standortgebiet platziert werden.

Die Nagra ist zum Schluss gekommen, dass Nördlich Lägern (NL) sowohl für HAA als auch für SMA das bestgeeignete Standortgebiet ist und beantragt daher eine Rahmenbewilligung (RBG) für ein Kombilager für HAA und SMA am Standort «Haberstal».

In diesem Bericht wird die Abfallzuteilung für den Standortvergleich (in SMA- und HAA-Lager) und für den Sicherheitsnachweis für den vorgeschlagenen Standort (in SMA- und HAA-Lagerteile des Kombilagers) begründet:

- Dabei wird die Abfallzuteilung sowohl für den Standortvergleich als auch für den Sicherheitsnachweis konsistent verwendet. Es werden alle SMA und Alphatoxische Abfälle (ATA) dem SMA-Lager, bzw. -Lagerteil, und alle HAA dem HAA-Lager, bzw. -Lagerteil, zugeordnet. Wo im Kombilager die einzelnen Abfallkategorien angeordnet werden, wird in nachfolgenden Bewilligungsschritten festgelegt.
- Die Methodik wird mit der aus Etappe 1 des Sachplans geologischer Tiefenlager (SGT) verglichen und es wird gezeigt, dass sowohl die geologischen als auch die technischen Barrieren die gestellten Anforderungen erfüllen, wodurch mit der vorgenommenen Abfallzuteilung die Langzeitsicherheit gewährleistet werden kann.
- Eine alternative Abfallzuteilung, in der gewisse ATA/SMA dem HAA-Lager/Lagerteil zugeordnet würden, hat für die in Etappe 3 betrachteten Standortgebiete keine sicherheitstechnischen Vorteile und beeinflusst auch die Standortwahl nicht. Eine grosse Tiefenlage, genügende räumliche Ausdehnung und günstige Eigenschaften des Opalinustons, wie geringe hydraulische Durchlässigkeit und guten Sorptionseigenschaften, sind in allen drei verbleibenden Standortgebieten anzutreffen.

Weiter wird in diesem Bericht der Betrachtungszeitraum für den Standortvergleich und der Nachweiszeitraum für den Sicherheitsnachweis begründet:

- Die bisherigen Betrachtungen konnten durch radiologische Konsequenzenanalysen und Betrachtungen zur Radiotoxizitätsentwicklung bestätigt werden. Der Betrachtungszeitraum des HAA-Lagers liegt somit wie bisher bei einer Million Jahren, der Betrachtungszeitraum des SMA-Lagers wie bisher bei 100'000 Jahren.
- Der Nachweiszeitraum für das Kombilager, der aufgrund der in ihren Eigenschaften dominanten hochaktiven Abfälle (Individualdosis, Radiotoxizität) vom HAA-Lagerteil bestimmt wird, beträgt eine Million Jahre, im Einklang mit der Vorgabe zum Nachweiszeitraum in der ENSI-Richtlinie G03.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Figurenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Ziele.....	1
1.2 Einordnung des Berichtes	2
1.3 Aufbau des Berichtes	2
2 Vorgaben und Randbedingungen	5
2.1 Gesetzliche und behördliche Vorgaben	5
2.2 Weitere Randbedingungen.....	7
3 Methodik.....	9
3.1 Methodik und Grundsätze.....	9
3.2 Vergleich zu Etappe 1	11
3.3 Abschätzungen des radiologischen Gefährdungspotenzials	11
3.3.1 Aktivität.....	11
3.3.2 Individualdosis.....	12
3.3.3 Radiotoxizität.....	13
4 Abfallzuteilung für den Standortvergleich und den Sicherheitsnachweis.....	15
4.1 Beschreibung der Abfälle und ihrer Eigenschaften	15
4.1.1 Hochaktive Abfälle (HAA).....	15
4.1.2 Alphatoxische Abfälle (ATA)	16
4.1.3 Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)	16
4.1.4 Eigenschaften der Abfälle.....	16
4.1.4.1 Inventar	17
4.1.4.2 Aktivität.....	18
4.1.4.3 Individualdosis.....	19
4.1.4.4 Radiotoxizität.....	21
4.2 Vorschlag Abfallzuteilung.....	22
5 Betrachtungszeitraum für SMA und HAA und Nachweiszeitraum für das Kombilager.....	25
5.1 Betrachtungszeitraum HAA-Lager	25
5.2 Betrachtungszeitraum SMA-Lager	25
5.3 Nachweiszeitraum Kombilager	25

6	Schlussfolgerung	27
7	Literaturverzeichnis	31
Anhang A	Radiotoxizität von natürlichen Materialien	A-1
A.1	Erze mit unterschiedlichem Urangehalt.....	A-1
A.2	Granit.....	A-2
Anhang B	Top 20 dosisdominierende AGTs im SMA.....	B-1

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Abfallzuteilung für die Standortwahl und für den Sicherheitsnachweis.....	5
Tab. 2-2:	Betrachtungszeitraum und Nachweiszeitraum.....	6
Tab. 4-1:	Gesamtvolumen des Abfallinventars MIRAM-RBG ohne und mit Endlagerverpackung (letzteres in Klammern) in m ³ , aufgeschlüsselt nach KEV-Kategorie und Kategorie gemäss Eigentümerschaft.....	17
Tab. 6-1:	Begründung der Abfallzuteilung für die Standortwahl und für den Sicherheitsnachweis.....	28
Tab. 6-2:	Begründung Betrachtungszeitraum und Nachweiszeitraum.....	29
Tab. A-1:	Spezifische Aktivität der natürlichen Radionuklide in verschiedenen Uranerzen.....	A-1
Tab. A-2:	Radiotoxizität von natürlichen Radionukliden in verschiedenen Uranerzen.....	A-2
Tab. A-3:	Spezifische Aktivität der natürlichen Radionuklide in Böttstein-Granit	A-2
Tab. B-1:	Liste der dosisdominierenden Abfallgebindetypen (AGT) des SMA-Lagers (bzw. des SMA-Lagerteils).....	B-1

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Tabellarische Übersicht der Berichtstruktur für die Standortwahl und den Sicherheitsnachweis für das Rahmenbewilligungsgesuch des geologischen Tiefenlagers	3
Fig. 3-1:	Methodik zur Festlegung der Abfallzuteilung, des Betrachtungs- zeitraums für den Standortvergleich und des Nachweiszeitraums für den Nachweis der Langzeitsicherheit für das RBG unter Berücksichtigung der aktualisierten Erkenntnisse, Daten und Prozesse	10
Fig. 4-1:	Zeitliche Entwicklung der Aktivität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV.....	18
Fig. 4-2:	Rechenfall R1 (Rechenfall K = 10 ⁻¹³ m/s): Freisetzung aus dem Wirtgestein (Opalinuston) für das HAA-Lager (Abfälle der Abfall- kategorie HAA), das SMA-Lager (Abfälle der Abfallkategorien SMA und ATA) sowie die Summe aller Abfälle (Kombilager)	19
Fig. 4-3:	Individualdosis in Abhängigkeit des kumulierten Volumenanteils der SMA und ATA	20
Fig. 4-4:	Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität (RT) der Abfallkategorien gemäss Definition KEV für MIRAM RBG als auch MIRAM 2014	21

Abkürzungsverzeichnis

AGT	Abfallgebindetypen
ATA	Alphatoxische Abfälle
BA	Betriebsabfälle
BE	Abgebrannte Brennelemente
BFE	Bundesamt für Energie
CERN	Europäische Organisation für Kernforschung
ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
IAEA	International Atomic Energy Agency
JO	Jura Ost
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
KKW	Kernkraftwerk
MIF	Medizin, Industrie und Forschung
MIRAM	Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien
MOX	Mixed oxide fuel (MOX Brennelemente)
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NL	Nördlich Lägern
NTB	Nagra Technischer Bericht
OFA	Oberflächenanlage
PSI	Paul Scherrer Institut
RA	Austauschbare Kernkomponenten der KKW
RB	Rahmenbewilligung
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
RT	Radiotoxizität
SA	Stilllegungsabfälle
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
VA	Verpackungsanlage

VKKL	Versuchskernkraftwerk Lucens
WA-HAA	Verglaste hochaktive Abfälle
ZNO	Zürich Nordost
Zwilag	Zwischenlager Würenlingen AG

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Ziele

In der Schweiz ist die Entsorgung der radioaktiven Abfälle mit dem Kernenergiegesetz (KEG 2003) und der Kernenergieverordnung (KEV 2004) gesetzlich geregelt. Die Kernenergieverordnung (KEV) unterteilt die radioaktiven Abfälle der Schweiz in schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA), alphanukleare Abfälle (ANA) und hochaktive Abfälle (HAA). Die HAA bestehen aus abgebrannten Brennelementen (BE) und verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente (WA-HAA). Das Kernenergiegesetz (KEG) schreibt vor, alle Arten von radioaktiven Abfällen in einem geologischen Tiefenlager zu entsorgen. Der Nachweis der Machbarkeit von langfristig sicheren geologischen Tiefenlagern in der Schweiz (Entsorgungsnachweis) wurde für SMA im Projekt Gewähr (Nagra 1985) und für HAA im Projekt Opalinuston (Nagra 2002) erbracht.

Der Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) regelt das Standortwahlverfahren für geologische Tiefenlager (gTL) in der Schweiz. Dieser Prozess ist in drei Etappen aufgeteilt (BFE 2008). Etappen 1 und 2 wurden bereits abgeschlossen, die Etappe 3 (SGT-E3) steht kurz vor dem Abschluss. Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für diese letzte Etappe finden sich in ENSI 33/649 (ENSI 2018), während die ENSI-Richtlinie G03 und der dazugehörige Erläuterungsbericht (ENSI 2023, ENSI 2020) die Schutzkriterien, die Auslegungsgrundsätze sowie das Verfahren zur Beurteilung der Langzeitsicherheit für geologische Tiefenlager festlegen.

Die drei verbleibenden Standortgebiete Jura Ost (JO), Nördlich Lägern (NL) und Zürich Nordost (ZNO), wurden in SGT-E3 vertieft untersucht und verglichen. Dies mit dem Ziel, für HAA und SMA das jeweils bestgeeignete Standortgebiet auszuwählen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager in allen drei Standortgebieten gewährleistet werden kann. Die Nagra ist zum Schluss gekommen, dass NL sowohl für HAA als auch für SMA das bestgeeignete Standortgebiet ist und beantragt daher eine Rahmenbewilligung für ein Kombilager für HAA und SMA am Standort «Haberstal».

Gemäss Artikel 14 des Kernenergiegesetzes werden in der Rahmenbewilligung (RB) u.a. die Kategorien des Lagergutes und die maximale Lagerkapazität definiert. Das aktualisierte modellhafte Inventar radioaktiver Materialien für das Rahmenbewilligungsgesuch (d. h. MIRAM-RBG) dient dabei als Grundlage. Zusätzlich müssen die Entsorgungspflichtigen die Abfallzuteilung definieren und prüfen, ob die in Etappe 1 abgeleiteten Betrachtungszeiträume (Nagra 2008) für das SMA- und das HAA-Lager angepasst werden müssen (ENSI 33/649).

Im vorliegenden Bericht wird die Abfallzuteilung begründet, welche sowohl für den Standortvergleich als auch für den Sicherheitsnachweis für den gewählten Standort (Nagra 2025c) konsistent verwendet wird. Es werden dafür alle ANA und SMA dem SMA-Lager (für ein Einzelager) bzw. Lagerteil (für ein Kombilager) zugeordnet. In Anlehnung an NTB 08-05 (Nagra 2008) wird gezeigt, dass diese Abfallzuteilung sicherheitsgerichtet ist. Es wird zudem plausibilisiert, dass alternative Abfallzuteilungen die Standortwahl nicht beeinflussen.

Im vorliegenden Bericht wird ferner gezeigt, dass die Betrachtungszeiträume für das HAA- und SMA-Lager, so wie sie in NTB 08-05 (Nagra 2008) festgelegt wurden, für den Standortvergleich weiterhin gültig sind. Für den Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase wird für das Kombilager ein Nachweiszeitraum¹ von 1 Million Jahren verwendet.

¹ Auf die Unterscheidung zwischen Betrachtungs- und Nachweiszeitraum in den ENSI-Vorgaben wird im Kapitel 2 eingegangen. Aus Sicht der Nagra handelt es sich dabei um sehr ähnliche Begriffe, die aber für zwei verschiedene Zwecke verwendet werden.

1.2 Einordnung des Berichtes

Die Begründung der Standortwahl und der Sicherheitsnachweis der Nachverschlussphase des geologischen Tiefenlagers sind Teil der Unterlagen für das Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) und werden zusammen mit diesem eingereicht. Die Unterlagen umfassen u.a. einen übergeordneten Sicherheitsbericht (Nagra 2025c), einen Bericht zur Begründung der Standortwahl (Nagra 2025a) und einen Synthesebericht zum Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase (Nagra 2024d).

Der vorliegende Bericht zur Abfallzuteilung und zum Betrachtungszeitraum (mit roter Umrandung hervorgehoben in Fig. 1-1) gehört zu den Grundlagenberichten für den Standortvergleich und den Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase.

1.3 Aufbau des Berichtes

Dieser Bericht fasst die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben sowie die weiteren Randbedingungen in Kapitel 2 zusammen. Kapitel 3 präsentiert die methodischen Ansätze und einen Vergleich zur Argumentation in SGT Etappe 1 (in Etappe 2 wurde die Argumentation aus Etappe 1 übernommen). Kapitel 4 beschreibt und begründet die Abfallzuteilung, anschliessend werden die Betrachtungs- bzw. Nachweiszeiträume, basierend auf der Abfallzuteilung, überprüft und festgelegt (Kapitel 5). Kapitel 6 enthält die Schlussfolgerungen.

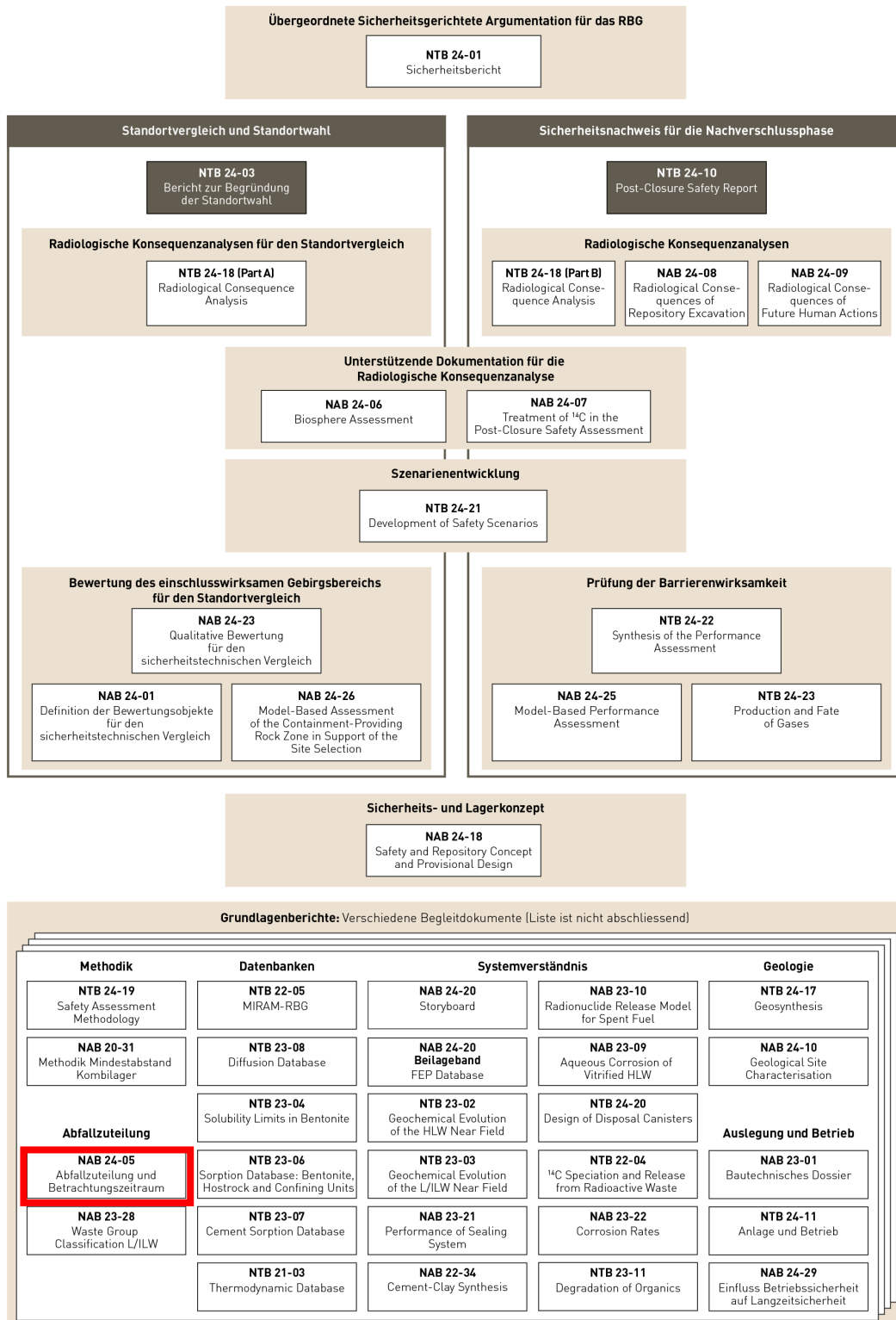


Fig. 1-1: Tabellarische Übersicht der Berichtstruktur für die Standortwahl und den Sicherheitsnachweis für das Rahmenbewilligungsgesuch des geologischen Tiefenlagers

Der vorliegende Bericht gilt als Grundlagenbericht und ist mit roter Umrandung markiert.

2 Vorgaben und Randbedingungen

In diesem Kapitel werden die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben sowie weitere Randbedingungen zusammengefasst, welche als Grundlage für die Abfallzuteilung und die Festlegung des Betrachtungs- bzw. Nachweiszeitraumes für das Rahmenbewilligungsgesuch dienen.

2.1 Gesetzliche und behördliche Vorgaben

Für eine breite Übersicht der gesetzlichen und behördlichen Vorgaben wird auf (Nagra 2024g) verwiesen. Gemäss «Sachplan geologische Tiefenlager» (BFE 2008), wird von den Entsorgungspflichtigen ein Vorschlag zur Abfallzuteilung verlangt. Diese gilt für die zwei vorgesehenen Lagertypen für die geologische Tiefenlagerung im schweizerischen Entsorgungskonzept, d. h. für das SMA-Lager und für das HAA-Lager. Durch den Vorschlag eines Kombilagers im Standortgebiet Nördlich Lägern bezieht sich die Abfallzuteilung in diesem Bericht auch auf die SMA- und HAA-Lagerteile des Kombilagers, die sich insbesondere durch die Ausgestaltung der technischen Barrieren unterscheiden.

Die relevanten Auszüge aus der aktuellen ENSI-Richtlinie G03 (ENSI 2023), aus den Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für SGT Etappe 3 (ENSI 2018) sowie aus Gutachten zu früheren Etappen (ENSI 2010) werden nachfolgend zusammengestellt.

Tab. 2-1: Abfallzuteilung für die Standortwahl und für den Sicherheitsnachweis
Zusammenfassung der behördlichen Vorgaben und Verweis auf nachfolgende Kapitel

Konsistenz Abfallzuteilung	ENSI 33/649 (ENSI 2018)	Die Abfallzuteilung muss sowohl für den Standortvergleich als auch für den Sicherheitsnachweis für den gewählten Standort konsistent verwendet werden.
	Verweis	Kapitel 3
Methodik Abfallzuteilung	ENSI 33/649 (ENSI 2018)	Die Entsorgungspflichtigen müssen zeigen, dass die gewählte Abfallzuteilung, beispielsweise mit der Methodik wie in Etappe 1 (NTB 08-05), sicherheitsgerichtet ist.
	Verweis	Kapitel 3.1
Auswirkungen alternativer Abfallzuteilungen	ENSI 33/649 (ENSI 2018)	Die Auswirkungen alternativer Abfallzuteilungen auf die Standortwahl sind aufzuzeigen. Dazu haben sie (die Entsorgungspflichtigen) beispielsweise die sicherheitsrelevanten Konsequenzen der Abfallzuteilung unter Berücksichtigung eines standortspezifischen und auf diese Abfallzuteilung angepassten Lagerkonzepts (z. B. grösserer Platzbedarf) aufzuzeigen.
	Verweis	Kapitel 3.3

Das ENSI präzisiert im Glossar von ENSI 33/649 (ENSI 2018) den Begriff Betrachtungszeitraum:

«Der Zeitraum, für den in der Sicherheitsanalyse die Einhaltung der Schutzkriterien quantitativ aufzuzeigen ist, richtet sich nach dem radiologischen Gefährdungspotenzial der Abfälle. Falls gezeigt werden kann, dass durch das geologische Tiefenlager aufgrund des radiologischen Gefährdungspotenzials der Abfälle bereits nach weniger als einer Million Jahre nur noch vernachlässigbar kleine radiologische Auswirkungen für Mensch und Umwelt zu erwarten sind, kann der Nachweis für einen kürzeren Betrachtungszeitraum geführt werden.»

In ENSI G03 (ENSI 2023) wird im Kapitel zum Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase der Begriff Nachweiszeitraum (Kapitel 9.3.2) eingeführt:

«Für den Sicherheitsnachweis ist ein Nachweiszeitraum von bis zu einer Million Jahre festzulegen. Die zeitliche Entwicklung des radiologischen Gefährdungspotenzials der eingelagerten Abfälle und die Prognostizierbarkeit der geologischen Langzeitentwicklung sind zu berücksichtigen.»

In Tab. 2-2 werden die Zeiträume für den Betrachtungszeitraum (angewandt auf die Standortwahl) und den Nachweiszeitraum (angewandt auf den Sicherheitsnachweis) vorweggenommen.

Tab. 2-2: Betrachtungszeitraum und Nachweiszeitraum

Zusammenfassung der behördlichen Vorgaben und Verweis auf nachfolgende Kapitel

	Standortwahl		Sicherheitsnachweis	
Begriff	Betrachtungszeitraum		Nachweiszeitraum	
Zeitraum	SMA-Lager	100'000 Jahre	Kombilager (i.e. SMA und HAA Lagerteile)	1 Mio. Jahre
	HAA-Lager	1 Mio. Jahre		
Behördliche Vorgaben	ENSI 33/649 Kapitel 4: Sicherheitstechnische Vorgaben für den Standortvergleich: [...] Die Entsorgungspflichtigen haben ausserdem zu prüfen, ob die in Etappe 1 hergeleiteten Betrachtungszeiträume für das SMA- und das HAA-Lager (ENSI 33/070, S. 53) angepasst werden müssen.		ENSI G03 – Kapitel 9.3.2 Nachweiszeitraum a. Für den Sicherheitsnachweis ist ein Nachweiszeitraum von bis zu einer Million Jahre festzulegen. Die zeitliche Entwicklung des radiologischen Gefährdungspotenzials der eingelagerten Abfälle und die Prognostizierbarkeit der geologischen Langzeitentwicklung sind zu berücksichtigen.	
Verweis	Kapitel 5.1/5.2		Kapitel 5.3	

Der Betrachtungszeitraum wurde im Rahmen der sicherheitstechnischen Arbeiten für Etappe 1 definiert (Nagra 2008), in Etappe 2 übernommen (Nagra 2014b) und durch die Behörden als nachvollziehbar beurteilt. Die für die Bestimmung des Betrachtungszeitraums verwendeten Modelle 1 bis 3 (NTB 08-05, S. 60 – 68) (Nagra 2008) sind aus Sicht des ENSI geeignet (ENSI 2015), die radiologischen Konsequenzen der Freisetzung von im Grundwasser gelösten Radionukliden aus den nahe an der Erdoberfläche liegenden Lagerkammern sowie der Freisetzung durch Erosion aufzuzeigen. Die Überprüfung der Annahmen und Resultate durch das ENSI (ENSI 2015) zeigt ebenfalls, dass die von der Nagra hergeleiteten Betrachtungszeiträume von 100'000 Jahren (SMA-Lager) und 1 Million Jahren (HAA-Lager) nachvollziehbar sind.

Für den Kontext werden auch die folgenden grundlegenden Vorgaben aus ENSI G03 (ENSI 2023) wiedergegeben:

Abschnitt 4.3.2 (Schutzkriterien für die Nachverschlussphase):

-
- a. *Für keine zukünftige Entwicklung eines Tiefenlagers darf die Freisetzung von Radionukliden zu einer Individualdosis grösser als 0.1 mSv pro Jahr oder zu einer Überschreitung des Risikorichtwerts gemäss Kriterium (b) in Absatz 2.15 des IAEA Safety Standard SSR-5 (IAEA 2011) führen.*
 - b. *Im Nachweiszeitraum sind die radiologischen Folgen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens ins Tiefenlager anhand der Kriterien (c) und (e) gemäss Absatz 2.15 des IAEA Safety Standard SSR-5 zu beurteilen.*
 - c. *Nach Ende des Nachweiszeitraums dürfen die Auswirkungen an der Oberfläche nicht wesentlich höher sein als die durchschnittliche heutige Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung.*
-

Kapitel 9.3.2 (Nachweiszeitraum für den Sicherheitsnachweis):

-
- a. *Für den Sicherheitsnachweis ist ein Nachweiszeitraum von bis zu einer Million Jahre festzulegen. Die zeitliche Entwicklung des radiologischen Gefährdungspotenzials der eingelagerten Abfälle und die Prognostizierbarkeit der geologischen Langzeitentwicklung sind zu berücksichtigen.*
 - b. *In der Sicherheitsanalyse sind Dosisberechnungen bis zum Zeitpunkt der maximalen radiologischen Auswirkungen des geologischen Tiefenlagers durchzuführen, mindestens jedoch bis zum Ende des Nachweiszeitraums.*
 - c. *Für die Zeit nach Ablauf des Nachweiszeitraums ist der Variationsbereich der möglichen radiologischen Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers unter Berücksichtigung der inhärent vorhandenen Unsicherheiten zu ermitteln. Szenarien, in denen der Tiefenlagerbereich aufgrund geologischer Vorgänge zunehmend Einflüssen der Erdoberfläche ausgesetzt wird, sind in diese Betrachtungen einzubeziehen.*
-

2.2 Weitere Randbedingungen

Für die Etappe 3 des SGT hat der Bundesrat im November 2018 der Fokussierung auf Opalinuston (OPA) als Wirtgestein für die oder das Tiefenlager für alle zu entsorgenden radioaktiven Abfälle zugestimmt und entschieden, dass die geologischen Standortgebiete JO, NL und ZNO für beide Lagertypen (HAA und SMA) zu evaluieren sind (BFE 2018). Relevant für die nachfolgenden Betrachtungen ist, dass der Opalinuston, zusammen mit adäquaten technischen Barrieren, in allen drei Standortgebieten die sicherheitstechnischen Anforderungen für ein SMA-Lager, HAA-Lager oder Kombilager erfüllt (Nagra 2024e).

In den Standortgebieten befindet sich die Lagerebene im Opalinuston in einer Tiefe von ca. 500 m (JO) bis zu ca. 900 m (NL) (Nagra 2025b). Die Mächtigkeit des Wirtgesteins variiert zwischen 100 – 130 m. Das Wirtgestein weist neben sehr guten Selbstabdichtungseigenschaften auch eine geringe hydraulische Durchlässigkeit (Referenzwert von $K = 5 \times 10^{-13}$ m/s) auf und verfügt über günstige Sorptionseigenschaften für kationische Radionuklide (Nagra 2024b, Marques Fernandes et al. 2024). Zudem verfügen alle Standortgebiete über einen mächtigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich, der vertikal weit über das Wirtgestein hinausgeht. Die Rahmengesteine zwischen dem Opalinuston und den nächstliegenden Aquiferen oberhalb und unterhalb steuern nachweislich weitere Beiträge zu den Sicherheitsfunktionen bei. Damit werden auch die Voraussetzungen erfüllt, dass Erosion innerhalb des Betrachtungszeitraums keine Beeinträchtigung darstellt. Auch die räumliche Ausdehnung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ist in allen Standortgebieten gross genug, um sowohl ein Einzellager als auch ein Kombilager aufnehmen zu können.

3 Methodik

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Festlegung der Abfallzuteilung und des Betrachtungs- bzw. Nachweiszeitraums aufgezeigt. Dazu wird auch dargelegt, welche Methodik in Etappe 1 verwendet wurde und wie die methodischen Ansätze für das RBG übernommen werden. Weiter werden charakteristische Grössen für das radiologische Gefährdungspotential eingeführt, auf welchen die weiteren Überlegungen beruhen.

3.1 Methodik und Grundsätze

Die einzulagernden Abfälle mit ihren Eigenschaften, wie Aktivität, Radiotoxizität, Halbwertszeit, Materialzusammensetzung, etc., bestimmen die Anforderungen an den Einschluss (Wirkung der technischen und natürlichen Barrieren), an die erforderliche Zeitdauer der Barrierewirkung und somit auch die sicherheitstechnischen Anforderungen an den Standort.

Die Methodik der Abfallzuteilung zum SMA- bzw. HAA-Lager basiert auf jener von Etappe 1, wobei die Bewertungsgrundlagen und die darauf basierenden Modellrechnungen in Etappe 3 aktualisiert wurden (Fig. 3-1). Die Rechenfälle in diesem Bericht beziehen sich vorwiegend auf die Rechenfälle aus der Abfallzuteilung in NTB 08-05 (Nagra 2008). Hypothetische Rechenfälle werden im Vergleich zu Etappe 1 aufgrund von neuen Randbedingungen (insb. aktualisiertes Abfallinventar, die Festlegung des Opalinustons als Wirtgestein und neue Erkenntnisse zur geologischen Langzeitstabilität) nicht mehr betrachtet.

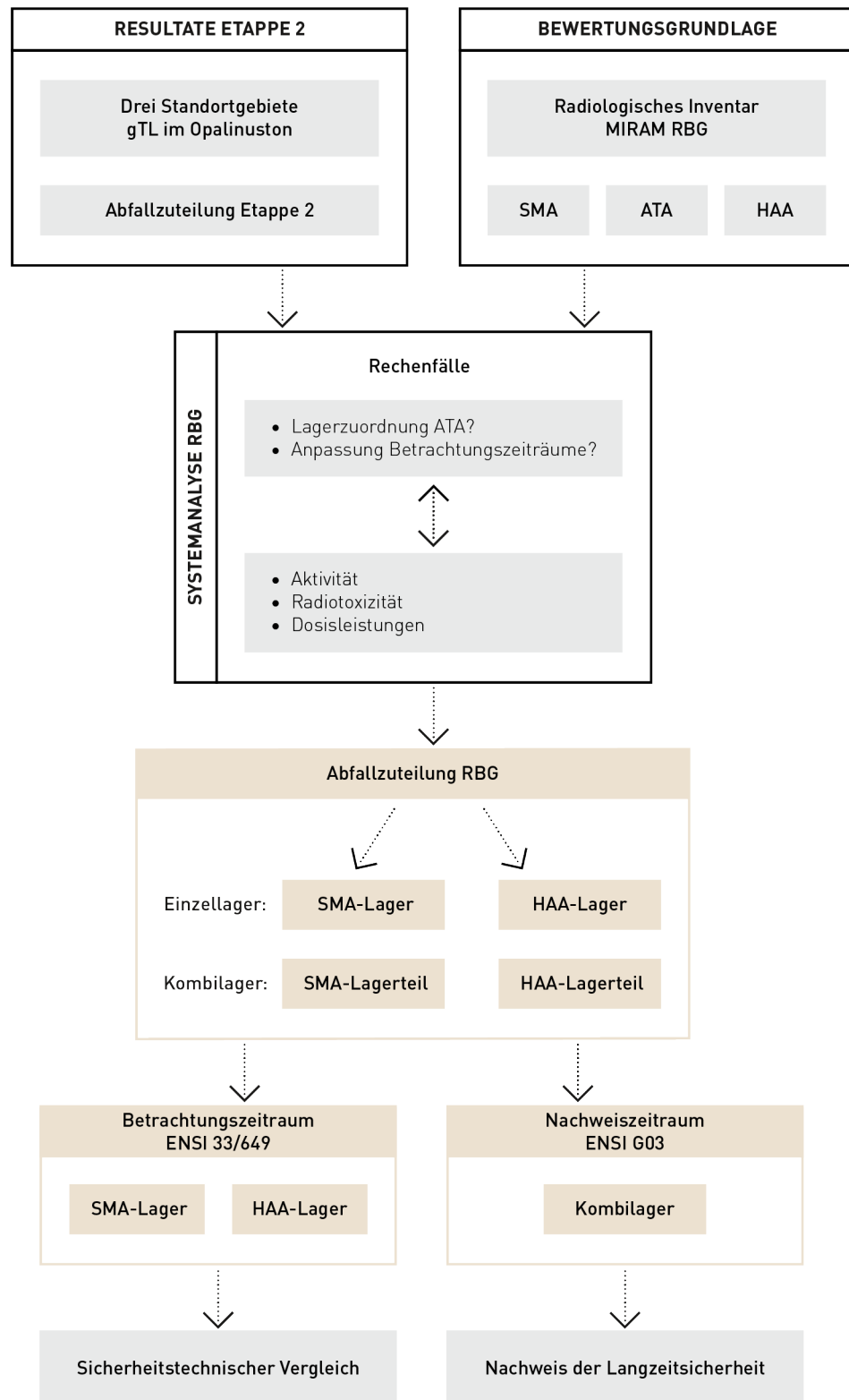


Fig. 3-1: Methodik zur Festlegung der Abfallzuteilung, des Betrachtungszeitraums für den Standortvergleich und des Nachweiszeitraums für den Nachweis der Langzeitsicherheit für das RBG unter Berücksichtigung der aktualisierten Erkenntnisse, Daten und Prozesse

3.2 Vergleich zu Etappe 1

In Etappe 1 wurde die Abfallzuteilung auf das HAA- und SMA-Lager anhand von Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung definiert, hauptsächlich unter Berücksichtigung der folgenden Abfalleigenschaften (Nagra 2008):

- Radionuklidinventar (Aktivität) und Halbwertszeiten
- Radiotoxizität der sicherheitstechnisch relevanten Nuklide
- Abfallvolumen
- Materialeigenschaften (Abfallmatrix, -behälter) und ihre möglichen Auswirkungen auf die Nuklidrückhaltung im Nahfeld und auf das Wirtgestein, die Wärmeentwicklung, auf die potenziell gasproduzierenden Bestandteilen wie Metalle und Organika sowie Komplexbildner

In Etappe 1 sind die sicherheitstechnischen Berechnungen zur Abfallzuteilung für ein generisches geologisches Tiefenlager SMA und HAA und basierend auf dem gesamten Inventar aller Abfälle der KEV-Abfallkategorien durchgeführt worden (Nagra 2008). Dabei wurden für verschiedene Wirtgesteinstypen und -situationen (d. h. Wirtgesteinstyp, Wasserführung des Wirtgesteins, Transport in Störungszonen und erosive Freilegung des Lagers nach verschiedenen Zeiträumen) Dosisberechnungen durchgeführt, um die Sicherheitsfunktionen des Barriersystems und den Einfluss der Abfallzuteilung auf die Individualdosen zu evaluieren. Die Berechnungen erlaubten im Besonderen diejenigen Abfälle zu identifizieren, welche entweder für die Freisetzung der Radionuklide über den Grundwasserpfad und/oder im Falle einer erosiven Freilegung des Lagers die höchsten Dosisbeiträge lieferten.

Das gewählte Vorgehen für Etappe 3 behält die obigen Grundsätze bei. Die in Etappe 2 im Zusammenhang mit der Standortwahl getroffenen Entscheide erlauben es, sich bei den Modellrechnungen zur Nuklidfreisetzung über den Grundwasserpfad auf wenige relevante Rechenfälle zu konzentrieren. Dies wird detaillierter im Abschnitt 3.3.2 erläutert. Im Rahmen der erwarteten langfristigen Entwicklung kann eine natürliche, erosive Freilegung der Tiefenlager innerhalb des Betrachtungszeitraums an allen drei Standorten ausgeschlossen werden (Nagra 2024a). Aus diesem Grund wird auf eine Modellierung der Individualdosen als Folge der erosiven Freilegung, wie sie für die Abfallzuteilung in Etappe 1 durchgeführt wurde (Nagra 2008), in diesem Bericht verzichtet. Radiologische Konsequenzen von äusserst unwahrscheinlichen Freilegungsszenarien, die keinen Einfluss auf die Standortwahl und die Abfallzuteilung haben, wurden in (Nagra 2024f) ermittelt.

3.3 Abschätzungen des radiologischen Gefährdungspotenzials

Für die Abschätzungen des radiologischen Gefährdungspotenzials werden wie bisher drei charakteristische Grössen herangezogen: Die Aktivität, die Individualdosis und die Radiotoxizität.

3.3.1 Aktivität

Die durch den Zerfall von Atomkernen begründete Ausstrahlung von Teilchen (Alpha- oder Beta-Strahlung) bzw. Energie (Gamma-Strahlung) wird als Radioaktivität, kurz auch Aktivität, bezeichnet. Die Aktivität wird mit der Messgrösse Becquerel (Bq) erfasst, welche die Anzahl der Zerfälle eines Radionuklids pro Zeiteinheit (Zerfälle/s) angibt.

3.3.2 Individualdosis

Die Individualdosis ist die Strahlendosis, die eine einzelne Person aufgrund der Exposition gegenüber ionisierender Strahlung erhält und ist oft bestimmt in Millisievert pro Jahr. Für keine zukünftige Entwicklung eines Tiefenlagers darf die Freisetzung von Radionukliden innerhalb des Nachweiszeitraums zu einer Individualdosis grösser als 0.1 mSv pro Jahr oder zu einer Überschreitung des Risikorichtwerts (Kapitel 2.1) führen. Daher werden Dosisberechnungen zur Bewertung der möglichen Auswirkungen der Abfälle in einem geologischen Tiefenlager herangezogen.

In NTB 08-05 (Nagra 2008) wurden Modellrechnungen zur Festlegung der Abfallzuteilung für eine breite Palette unterschiedlicher generischer geologischer Situationen durchgeführt. Für die in Etappe 3 verbleibenden Standortgebiete Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost mit Opalinuston als Wirtgestein trifft der Rechenfall aus der Rechenfallfamilie R1, analog zum homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungzonen, ausgewertet mit dem Geosphären-Sorptionsdatensatz «Tonstein» aus NTB 08-05 (Nagra 2008) zu. Zur Überprüfung der in Etappe 2 berechneten Individualdosen wurden die entsprechenden Modellrechnungen in Etappe 3 mit aktualisierten Daten wiederholt.

Die verwendeten Rechencodes und die Konzeptualisierung aus Etappe 1 wurden weitgehend übernommen und werden im Folgenden zusammengefasst:

Rechencodes (siehe auch Nagra 2024e):

- Nahfeld SMA-Lager: VPAC (homogen-poröses Medium ohne Störungzonen), Nahfeld HAA-Lager: STMAN
- Geosphäre: PICNIC-TD (homogen-poröses Medium)
- Biosphäre: Referenzbiosphäre (siehe Nagra 2024c)

Konzeptualisierung und wichtige Parameter:

- Radionuklidfreisetzung in die EDZ (VPAC) bildet Quellterm für PICNIC-TD
- Inventar: ATA, SMA, HAA aus MIRAM-RBG (Nagra 2023b)
- Behälterlebensdauer (HAA): Versagen der Behälter wird nach einer Zeitdauer von 10'000 Jahren angenommen
- Vertikaler hydraulischer Gradient i : 1 m/m. Dies entspricht dem Maximum der oberen Eckwerte in den Standortgebieten Jura Ost, Nördlich Lägern, und Zürich Nordost (Nagra 2024b) und ist ein pessimistischer Wert im Vergleich zu (Nagra 2008) wo ein Gradient von 0.1 m/m verwendet wurde
- Hydraulische Durchlässigkeit K : 1×10^{-13} m/s (dies entspricht dem oberen Eckwert der vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit von Opalinuston in den Standortgebieten Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost) (Nagra 2024b)
- Geosphären-Transportpfadlänge L : 48 m (HAA), bzw. 43m (SMA). Analog zu Etappe 1 wurde eine Mächtigkeit von 100 m für den Opalinuston angenommen (Nagra 2008). Aufgrund der Ausdehnung der HAA Tunnels und der SMA/ATA Kavernen wurden jedoch eine entsprechend kürzere Transportlänge angesetzt
- Sorptions- und Diffusionskoeffizienten von Opalinuston: Referenzwerte für Nördlich Lägern (Marques Fernandes et al. 2024, Glaus et al. 2024)

3.3.3 Radiotoxizität

Der vorherige Abschnitt berücksichtigt die Individualdosis unter der Annahme der Entsorgung der Abfälle in einem geologischen Tiefenlager. Über lange Zeiträume hinweg ist jedoch die Individualdosis mit Unsicherheiten behaftet, und daher bietet die Radiotoxizität (RT) eine Masseinheit, die nicht von der Biosphäre oder den Lebensgewohnheiten abhängt (siehe auch Anhang A). Obwohl dies im Kontext der geologischen Tiefenlagerung keine direkte Aussage hinsichtlich der Schutzkriterien erlaubt (sie berücksichtigt in diesem Fall nicht die Mobilität der Radionuklide), ermöglicht sie den direkten Vergleich des radiologischen Gefährdungspotenzials der Radionuklide in den eingelagerten Abfällen mit demjenigen von verschiedenen natürlichen Materialien.

Ein Mass für die Radiotoxizität ist die Abschätzung der effektiven Dosis bei hypothetischer direkter Aufnahme der Radionuklide in gelöster Form in den menschlichen Körper. Dieses Mass wird als Radiotoxizität (RT) bezeichnet. Die RT berechnet sich aus der Aktivität A_j eines Nuklids j zu einem Zeitpunkt t und dem Ingestionsdosiskoeffizienten F_j des entsprechenden Nuklids j :

$$RT(t) = \sum A_j(t) F_j$$

Die Ingestionsdosiskoeffizienten können, soweit vorhanden, der Tab. 2 im Anhang 5 der Strahlenschutzverordnung (StSV 2017) und ansonsten dem Anhang F der ICRP Publication 119 (ICRP 2012) entnommen werden. Dies steht im Einklang mit dem Nagra-Biosphärenmodell (Nagra 2024c).

Auf eine Normierung der RT analog zu früheren Etappen (siehe z. B. Gera & Jacobs 1972, Hamstra 1975, Hedin 1997, Nagra 2008) wird verzichtet. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich des radiologischen Gefährdungspotenzials von Radionukliden, die aus dem Abfall freigesetzt werden, mit denen verschiedener, natürlich vorkommender Materialien und Gesteinen. Der Vergleich mit natürlichen Materialien und Gesteinen hinsichtlich ihrer Radiotoxizität dient als anschauliche Darstellung und ergänzt die Ergebnisse der Individualdosisberechnungen.

4 Abfallzuteilung für den Standortvergleich und den Sicherheitsnachweis

4.1 Beschreibung der Abfälle und ihrer Eigenschaften

Auf Basis des schweizerischen Kernenergiegesetzes (KEG 2003) und der Kernenergieverordnung (KEV 2004) wird definiert, unter welchen Voraussetzungen Stoffe als radioaktiver Abfall zu betrachten sind und wie mit ihnen umzugehen ist. Alle heute vorhandenen und in Zukunft voraussichtlich anfallenden radioaktiven Abfälle der Schweiz werden in einer speziell für die Zwecke der Nagra entwickelten Datenbank MIRAM («Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien») erfasst.

Das MIRAM-RBG in (Nagra 2023b) erfasst den gegenwärtigen Stand des sich stetig weiterentwickelnden MIRAM und wurde speziell für das Rahmenbewilligungsgesuch für das gTL erstellt und aufdatiert. Das MIRAM-RBG dokumentiert das Konzept zur Erstellung der MIRAM-RBG Datenbank, die Kategorisierung der in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle, die Methoden der Charakterisierung und Inventarisierung der radioaktiven Materialien, eine Auflistung der Behältertypen und Zusatzverpackungen von Abfallgebinden (Fass, Container, isoliert handhabbare Einheit) sowie die sogenannten Abfallsortenreports, die eine benutzerfreundliche Übersicht über die spezifischen Eigenschaften der radioaktiven Abfälle geben.

In den folgenden Abschnitten 4.1.1, 4.1.2 und 4.1.3 werden die Abfälle der für die Abfallzuteilung massgeblichen Abfallkategorien gemäss Definition KEV (KEV 2004) (siehe Kapitel 3) kurz beschrieben. In Abschnitt 4.1.4 werden die für die Abfallzuteilung, Lagerauslegung und Festlegung von geologischen Standortgebieten relevanten Abfalleigenschaften gemäss MIRAM-RBG (Nagra 2023b) zusammengefasst.

4.1.1 Hochaktive Abfälle (HAA)

Abgebrannte Brennelemente (BE)

Abgebrannte Brennelemente (BE) werden endgültig dem Reaktorkern entnommen und nicht weiterverwendet. Hier handelt es sich um Brennelemente aus Kernkraftwerken und, zu einem kleinen Teil, aus Forschungsreaktoren.

Verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen (WA-HAA)

Bei diesen Abfällen handelt es sich um verglaste hochaktive Abfälle, welche den grössten Teil der Spaltprodukte aus den wiederaufgearbeiteten Brennelementen enthalten. Das flüssige Glas wird bei der Herstellung dieser Abfälle in zylindrische Stahlkokillen eingegossen, welche dann anschliessend versiegelt werden. Nach der Abkühlung bildet das Glas eine homogene Abfallmatrix.

4.1.2 Alphatoxische Abfälle (ATA)

Bei den ATA handelt es sich um ein breites Spektrum von radioaktiven Abfällen:

- Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen (Strukturteile aufgearbeiteter Brennelemente und Abfälle aus dem Betrieb der Wiederaufarbeitungsanlagen)
- Betriebsabfälle der Forschungsanlagen, vor allem des PSI und des CERN, diverse Abfälle aus Medizin und Industrie

Diese Abfälle bestehen aus metallischen, organischen und anorganischen Materialien. Sie werden in der Regel vor der Zwischenlagerung konditioniert, d.h. für die Zwischen- und Endlagerung vorbereitet. Dazu gehören insbesondere die mechanische Verkleinerung, Dekontamination, Verpressen, Verbrennung, Einbettung in Abfallmatrizen wie Zement, Bitumen oder Polystyrol und die Verpackung.

4.1.3 Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)

Auch bei den SMA handelt es sich um ein breites Spektrum von radioaktiven Abfällen:

- Betriebsabfälle der KKW (Harze, Konzentrate, Schlämme, Mischabfälle), des Zwiilag und der Verpackungsanlagen des geologischen Tiefenlagers
- Reaktorabfälle der KKW (im Wesentlichen aktivierte austauschbare Reaktorkomponenten)
- Stilllegungsabfälle der KKW (aktivierte und kontaminierte Reaktor- und Gebäudekomponenten sowie Sekundärabfälle, die während der Konditionierung der Stilllegungsabfälle anfallen), des Zwiilag und der Verpackungsanlagen des geologischen Tiefenlagers
- Betriebs- und Stilllegungsabfälle der Forschungsanlagen, vor allem des PSI und des CERN, diverse Abfälle aus Medizin und Industrie

Diese Abfälle bestehen aus metallischen, organischen und anorganischen Materialien. Sie werden in der Regel vor der Zwischenlagerung konditioniert, d.h. für die Zwischen- und Endlagerung vorbereitet. Dazu gehört insbesondere die mechanische Verkleinerung, Dekontamination, Verpressen, Verbrennung, Einbettung in Abfallmatrizen wie Zement, Bitumen oder Polystyrol und die Verpackung.

4.1.4 Eigenschaften der Abfälle

Im Vergleich zu Etappe 2 (Nagra 2014a) hat sich das radiologische Gesamtinventar nur wenig verändert (Nagra 2023c) und die Datengrundlagen in MIRAM 14 und MIRAM-RBG stimmen weitgehend überein (insbesondere in den durch die Abfallverursacher deklarierten Informationen). Unterschiede ergeben sich vor allem durch Weiterentwicklungen sowohl beim Kenntnisstand zu den radioaktiven Abfällen, vor allem hinsichtlich der prognostizierten, zukünftig anfallenden Abfälle², als auch durch die Entwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik³. Die vergleichbare Grössenordnung des Gesamtinventars der Abfallkategorien zeigt dabei, dass das Inventar der schweizerischen radioaktiven Abfälle in MIRAM-RBG (Nagra 2023b) insgesamt verlässlich abgebildet wird.

² Z. B. sind inzwischen die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung vollständig in die Schweiz zurückgeliefert und die Charakterisierung der Abfälle aus der Stilllegung wurde unter Berücksichtigung aktueller Randbedingungen und Daten aus den Kernkraftwerken aktualisiert.

³ Z. B. wurden die Berechnungen zum radiologischen Inventar der abgebrannten Brennelemente gegenüber MIRAM 14 (Nagra 2014a) mit aktuellen Werkzeugen und Rechenkonzepten neu durchgeführt.

4.1.4.1 Inventar

Das MIRAM-RBG (Nagra 2023b) enthält ein klar definiertes und transparent abgeleitetes modellhaftes Radionuklid- und Materialinventar. Dabei sind alle Grössen mit Bezug zum Radionuklidinventar für einen gemeinsamen Referenzzeitpunkt, nämlich das Jahr 2075, angegeben. Die Abfallmengen des erwarteten Inventars MIRAM-RBG sind in Tab. 4-1 zusammengefasst.

Tab. 4-1: Gesamtvolumen des Abfallinventars MIRAM-RBG ohne und mit Endlagerverpackung (letzteres in Klammern) in m³, aufgeschlüsselt nach KEV-Kategorie und Kategorie gemäss Eigentümerschaft.

Die mit «(KKW)» gekennzeichneten Kategorien beinhalten alle Abfälle (Betrieb und Stilllegung) der KKW, Zwiilag und des Versuchsreaktors Lucens. Zusätzlich beinhaltet BA (KKW) die Abfälle der TLB-Entsorgung. In der Kategorie MIF sind alle Betriebs- und Stilllegungsabfälle aus Medizin, Industrie und Forschung enthalten. Unter OFA sind die Betriebs- und Stilllegungsabfälle der Verpackungsanlagen für SMA/ATA und HAA zu verstehen.

BE: abgebrannte Brennelemente, WA-HAA: verglaste hochaktive Abfälle, BA: Betriebsabfälle, RA: austauschbare Kernkomponenten der KKW, SA: Stilllegungsabfälle. Die hier angegebenen Totale der exakten Volumina können vernachlässigbare Abweichungen zur Summe der gerundeten einzelnen Volumina aufweisen.

	BE (KKW)	WA-HAA (KKW)	BA (KKW)	RA (KKW)	SA (KKW)	MIF	OFA	Total
HAA	1'433 (8'895)	115 (377)				3 (22)		1'550 (9'295)
ATA		99 (433)			25 (25)	165 (607)		228 (1'065)
SMA			10'994 (36'657)	404 (1'629)	21'449 (28'645)	9'506 (15'119)	219 (727)	42'572 (82'776)
Total	1'433 (8'895)	213 (810)	10'994 (36'657)	404 (1'629)	21'474 (28'670)	9'673 (15'748)	219 (727)	44'410 (93'135)

4.1.4.2 Aktivität

Fig. 4-1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Aktivität für die verschiedenen Abfallkategorien (gemäss Definition KEV) im Zeitraum bis zu 1 Mio. Jahren. Der zeitliche Verlauf unterscheidet sich kaum von demjenigen in Etappe 1 (Nagra 2008). Die Aktivität wird von HAA dominiert (ca. 1.9×10^{19} Bq zu Beginn), gefolgt von SMA (ca. 2.9×10^{16} Bq) und ATA (ca. 1.3×10^{16} Bq). Deutlich sichtbar ist die während der ersten 10'000 Jahre erfolgende Aktivitätsabnahme von ca. 2 Grössenordnungen für alle Abfallkategorien.

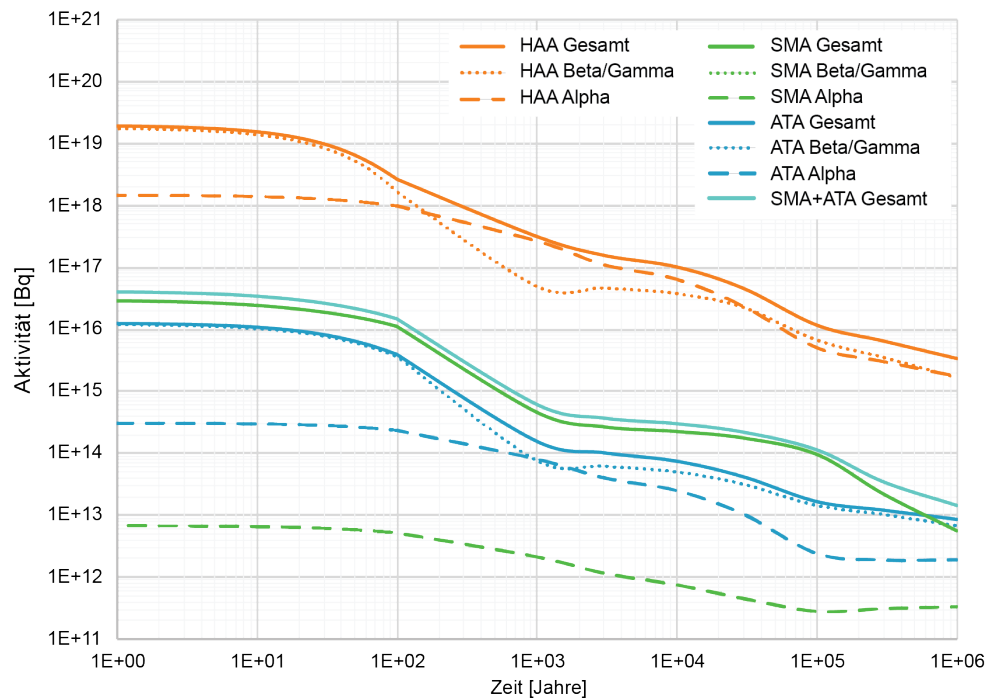


Fig. 4-1: Zeitliche Entwicklung der Aktivität der Abfallkategorien gemäss Definition KEV

Die Beiträge zur Aktivität sind auch noch unterteilt in Alpha- und Beta/Gamma-Strahlung emittierende Nuklide.

Der Abnahmeverlauf der Aktivität der hochaktiven Abfälle (HAA Gesamt) erscheint ähnlich zu denen der alphatoxischen Abfällen (ATA Gesamt) und zu den schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA Gesamt). Die Aktivitätswerte sind jedoch deutlich höher (mehr als zwei Grössenordnungen). Nach 100'000 Jahren erreicht die Aktivität der hochaktiven Abfälle (HAA Gesamt) ähnliche Werte wie die Anfangswerte der schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA Gesamt), und zeigen eine Abnahme von drei Grössenordnungen (Fig. 4-1). Nach 1 Million Jahren haben die hochaktiven Abfälle eine Aktivität von etwa einer Grössenordnung unterhalb der Anfangsaktivität der schwach- und mittelaktiven Abfälle. Die Summe der Aktivitäten der schwach- und mittelaktiven Abfälle und der alphatoxischen Abfälle (SMA+ATA Gesamt) zeigt einen nahezu identischen Verlauf wie die Entwicklung von den schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA Gesamt).

Die Gesamtaktivität aller schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA Gesamt) ist nur geringfügig höher als die Gesamtaktivität der alphatoxischen Abfälle (ATA Gesamt), obwohl ein markanter Volumenunterschied zwischen diesen Abfallkategorien besteht.

Die Unterscheidung zwischen Alpha- und Beta/Gamma-Strahlern (gestrichelte und gepunktete Linien in Fig. 4-1) zeigt, dass bei den schwach- und mittelaktiven und alphatoxischen Abfällen die Beta/Gamma-Strahlung emittierenden Nuklide die Gesamtaktivität dominieren.

4.1.4.3 Individualdosis

In Analogie zu Rechenfall R1 aus NTB 08-05 (Nagra 2008) wird ein HAA- und SMA-Lager im homogen-porösen Wirtgestein (Opalinuston) ohne Störungzonen betrachtet. Die verwendeten Rechencodes, die Konzeptualisierung und die Inputdaten sind in Kap. 3.3.1 zusammengefasst mit aufdatierten Diffusions- und Sorptionswerten aus NTB 24-18 (Nagra 2024e).

Fig. 4-2 zeigt den Verlauf der Individualdosis für den Rechenfall R1. Die maximale Individualdosis beträgt für HAA 7.9×10^{-4} mSv/a, während das Dosismaximum für die SMA und ATA bei 2.9×10^{-5} mSv/a liegt. Beide Werte liegen deutlich unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv pro Jahr gemäss ENSI-Richtlinie G03. Auch die Gesamtsumme der Individualdosis aller Abfälle (8.1×10^{-4} mSv/a) (HAA+SMA+ATA) bleibt weit unterhalb des vorgegebenen Schutzkriteriums.

Die Entwicklung der Individualdosis eines Kombilagers repräsentiert eine Kombination der Beiträge der SMA/ATA während einer frühen Phase (ab 10'000 Jahren) und der HAA (nach 20'000 Jahren) (Fig. 4-2). Die Entwicklung zeigt, dass die gesamte Individualdosis (SMA + HAA) im Rechenfall R1 mehr als zwei Grössenordnungen unter dem Schutzkriterium von 0.1 mSv pro Jahr liegt.

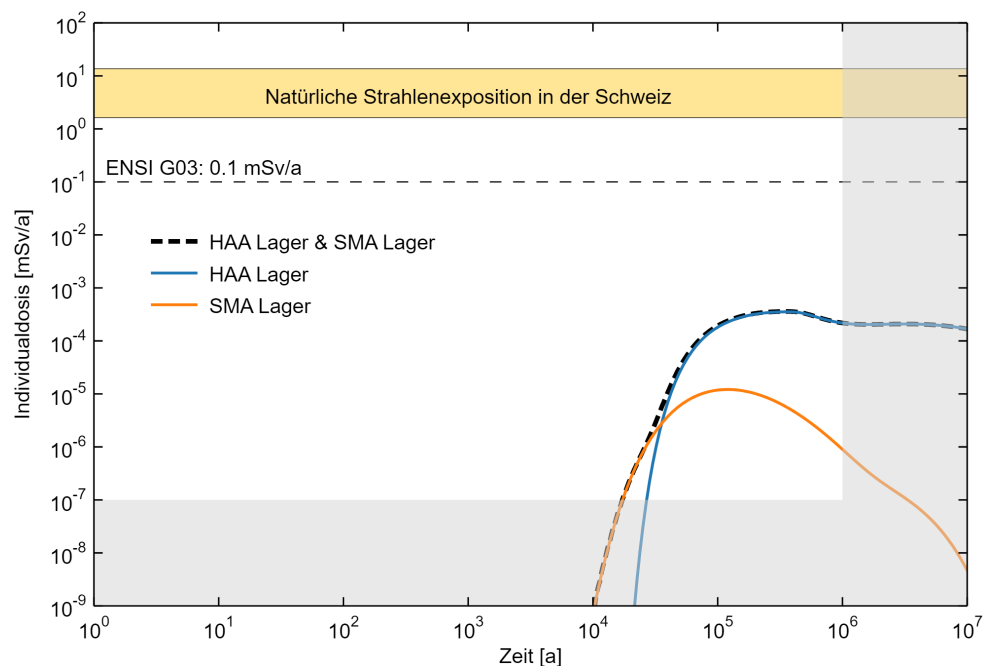


Fig. 4-2: Rechenfall R1 (Rechenfall K = 10^{-13} m/s): Freisetzung aus dem Wirtgestein (Opalinuston) für das HAA-Lager (Abfälle der Abfallkategorie HAA), das SMA-Lager (Abfälle der Abfallkategorien SMA und ATA) sowie die Summe aller Abfälle (Kombilager)

In Etappe 1 (Nagra 2008) wurde aufgrund verschiedener Standortmöglichkeiten und unterschiedlicher Wirtgesteine eine Aufteilung der Abfälle (ATA, SMA und HAA) berücksichtigt. Mit den neuen Rahmenbedingungen und dem gleichen Wirtgestein in tiefer Lage in Etappe 3 haben eine Zuordnung einzelner Abfallgebindetypen (AGT) von ATA- oder SMA- ins HAA-Lager bzw. in den HAA-Lagerteil des Kombilagers nur untergeordnete dosisbezogene Auswirkungen ohne sicherheitstechnische Relevanz. Anhang Tab. B-1 zeigt, als Vergleich zu analogen Betrachtungen in vorherigen Etappen des SGT, eine detaillierte Zusammenstellung der 20 dosisdominierenden AGT des SMA/ATA-Inventars: Diese tragen zu ca. 10 % des Gesamtvolumens der SMA und ATA bei und zu etwa 90 % der Gesamtdosis des SMA-Lagerteils, wobei der höchste Dosisbeitrag (von ca. 22 %) von einem AGT⁴ mit einem Volumenanteil von lediglich 180 m³ stammt.

Fig. 4-3 illustriert die maximale Individualdosis für den Rechenfall in Abhängigkeit des kumulierten eingelagerten Volumenanteils der SMA und ATA. Bei vollständiger Einlagerung aller SMA und ATA (100 % Volumenanteil) beträgt die Dosis 2.9×10^{-5} mSv/a, was vier Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums gemäss ENSI G03 liegt.

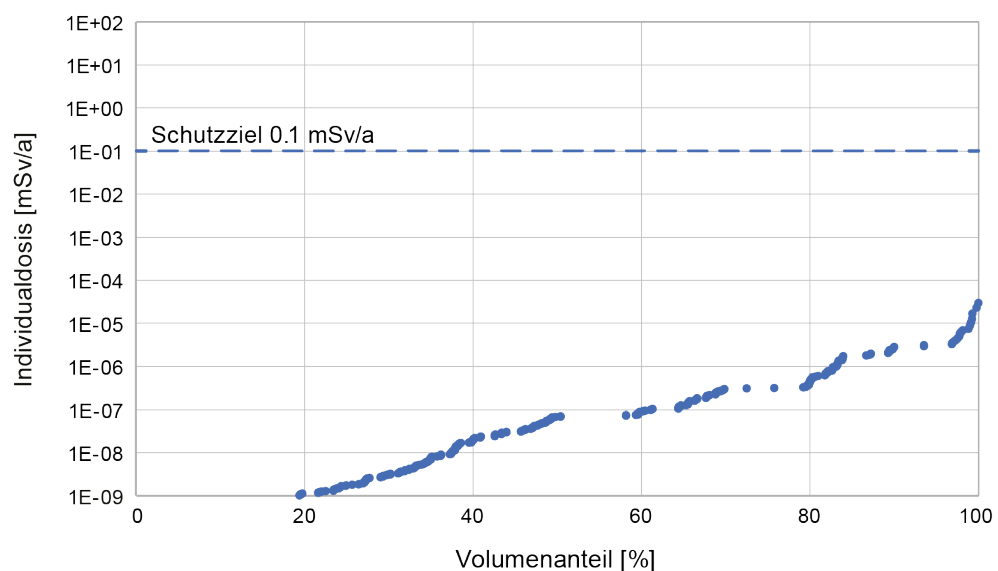


Fig. 4-3: Individualdosis in Abhängigkeit des kumulierten Volumenanteils der SMA und ATA

Bei einem eingelagerten Volumen von 100 % der SMA und ATA Abfälle beträgt die Dosis 2.9×10^{-5} mSv/a und liegt somit rund vier Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums gemäss ENSI G03.

Der oberste Datenpunkt entspricht dem berechneten Dosismaximum für den Fall, dass alle Abfallsorten der Kategorien ATA + SMA (gemäss KEV) im SMA-Lager eingelagert werden; dies entspricht einem Volumenanteil von 100 %. Für die Berechnung des zweitobersten Datenpunkts wurde derjenige Abfallgebindetyp aus dem SMA-Lager entfernt, der den höchsten Dosisbeitrag liefert, u.s.w. Eine Liste der dosisdominierenden Abfälle ist in Tab. B-1 enthalten.

⁴ Ein Modell-Abfallgebindetyp (AGT J-B-9320191) für prognostizierte Abfälle aus der Stilllegung mit aktivierten Kerneinbauten aus dem Reaktor (SMA gemäss KEV) mit einem Volumenanteil von 0.21 % (d. h. 180 m³) weist den höchsten Dosisbeitrag auf (siehe Tab. B-1).

4.1.4.4 Radiotoxizität

Der grösste Teil der gesamten Radiotoxizität des schweizerischen radioaktiven Abfalls stammt von Aktiniden aus den hochaktiven Abfällen, welche während sehr langer Zeit fast vollständig in der Brennstoff-Matrix eingeschlossen bleiben.

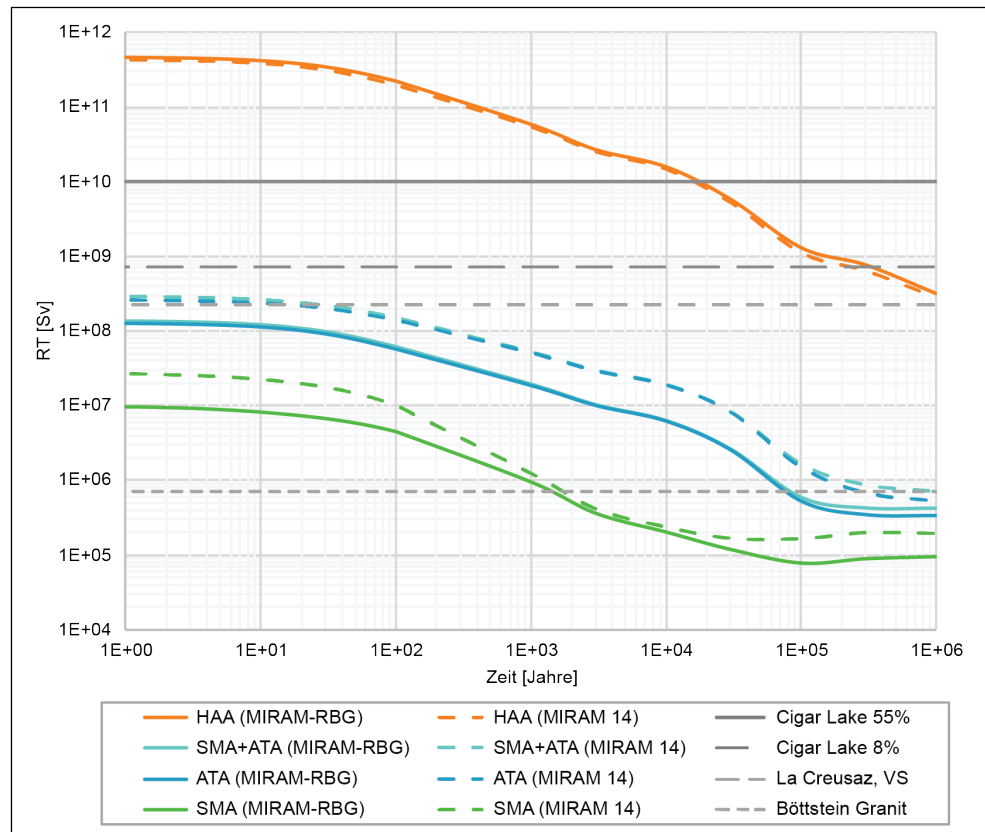


Fig. 4-4: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität (RT) der Abfallkategorien gemäss Definition KEV für MIRAM RBG als auch MIRAM 2014

HAA – hochaktive Abfälle, SMA – schwach- und mittelaktive Abfälle, ATA – alphanukleare Abfälle. Die horizontalen Referenzlinien (gestrichelt) entsprechen der Radiotoxizität derjenigen Mengen spezifischer, natürlicher Gesteine und Erze (Kanada und Schweiz), die dem Volumen der für alle Abfälle benötigten Lagerstollen und Kavernen entsprechen.

Um die Radiotoxizität in den Kontext natürlicher Materialien zu stellen, sind in Fig. 4-4 die Radiotoxizitäts-Werte von ausgewählten Gesteinen und Erzen eingezeichnet. Die Vergleichsbeispiele stammen aus Kanada (Eisenerzkörper von Cigar Lake mit zwei verschiedenen Urankonzentrationen) und der Schweiz (Erzablagerung in La Creusaz, VS, und ein typischer Granit in der Nordschweiz). Die Ablagerungen von La Creusaz zeigen erhöhte Uranit-Konzentrationen an der Erdoberfläche, die als Gänge zwischen den Vallorcine-Graniten (Karbon) und dem prävariszischem Gneiss des Grundgebirges vorkommen (Gilliéron 1988). Beim Granit handelt es sich um den biotitreichen Böttstein-Granit (Peters 1986).

Die Radiotoxizitätsentwicklung der HAA ist ähnlich zu derjenigen für SMA/ATA, jedoch mit deutlich höheren RT-Werten (ca. drei Grössenordnungen) (Fig. 4-4). Nach 100'000 Jahren erreichen die RT-Werte der HAA ein Niveau von einem gering uranhaltigen Gestein (8 %) wie dasjenige von Cigar Lake (Cramer & Smellie 1994), und nach 1 Mio. Jahren liegen die RT-Werte unmerklich höher als die der uranhaltigen Gesteine von La Creusaz.

Die Radiotoxizität der SMA+ATA liegt zur Zeit der Einlagerung unterhalb derjenigen von natürlichen uranhaltigen Gesteinen (d. h. Cigar Lake, Kanada, mit 8 % Uran-Gehalt) oder den Pechblende-reichen Gesteinen in La Creusaz. Nach 100'000 Jahren weisen diese SMA+ATA eine geringere RT auf als ein Böttstein-Granit (Nordschweiz).

Zusammenfassend zeigen die Analysen zur Aktivität und Radiotoxizität klare Unterschiede in den Absolutwerten zwischen den HAA einerseits und den ATA+SMA andererseits (mehrere Grössenordnungen zwischen HAA und SMA+ATA). Hingegen weisen die zeitlichen Verläufe (d. h. Abnahme) der Aktivität und Radiotoxizität zwischen den HAA und SMA+ATA Ähnlichkeiten auf.

4.2 Vorschlag Abfallzuteilung

Im Hinblick auf den Standortvergleich in Etappe 3 werden die hochaktiven Abfälle (HAA) dem HAA-Lager und die alphanuklearen (ATA) und schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) dem SMA-Lager zugeteilt.

Für das im RBG vorgeschlagene Kombilager umfasst das Lagergut alle drei KEV-Abfallkategorien HAA, ATA und SMA. Im Hinblick auf den Sicherheitsnachweis für das RBG wird folgende Abfallzuteilung auf die Lagerteile des Kombilagers berücksichtigt:

- Die Abfälle der KEV-Kategorie HAA werden dem HAA-Lagerteil des Kombilagers zugewiesen, welches über entsprechende Barrieren verfügt.
- Die Abfälle der KEV-Kategorien SMA und ATA werden dem SMA-Lagerteil des Kombilagers zugeordnet, welches über entsprechende Barrieren verfügt.

Diese Abfallzuteilung beruht im Besonderen auf folgenden Analysen bzw. Beobachtungen:

- Die Ergebnisse der generischen (standortunabhängigen) Dosisberechnungen (siehe Kap. 4.1.4.3) für den Rechenfall R1 mit homogen porösem Wirtgestein, analog zur Rechenfallfamilie R1 in NTB 08-05 (Nagra 2008), bestätigen, dass unabhängig von der Abfallzuteilung das festgelegte Schutzkriterium über den gesamten Nachweiszeitraum um mehrere Grössenordnungen unterschritten wird. Im Besonderen gilt, dass auch die Individualdosis aus einem Kombilager über den gesamten Nachweiszeitraum das festgelegte Schutzkriterium um mehrere Grössenordnungen unterschreitet. Die alternative Abfallzuteilung, die in SGT Etappe 1 für verschiedene Wirtgesteine mit höheren hydraulischen Durchlässigkeiten abgeleitet wurde, ist für die verbleibenden Standorte in SGT Etappe 3 (JO, NL, ZNO) wegen dem ausgewählten Opalinuston als Wirtgestein nicht mehr relevant. Für die Modellrechnungen wurde dabei für den Opalinuston im Rechenfall R1 ein oberer (konservativer) Eckwert von $K = 1 \times 10^{-13}$ m/s angewandt. Dies entspricht der Annahme für den Sicherheitsnachweis (Nagra 2024b). Auf die Zuordnung gewisser AGTs von SMA/ATA zum HAA-Lagerteil, welcher sich lediglich durch die Nahfeldbarrieren unterscheidet, wird aus diesem Grund verzichtet.
- Die geringen Volumina der SMA/ATA, die für eine Umverteilung in früheren Etappen in Betracht gezogen wurden, hätten in Etappe 3 keinen relevanten Einfluss auf die Gesamtdosisraten, da in Etappe 3 dieselben Rahmenbedingungen für die drei Standorte vorherrschen. Diese Bedingungen umfassen natürliche Barrieren mit Opalinuston und barrierewirksamen Rahmengesteinen in tiefer Lage. Damit sind alternative Abfallzuteilungen nicht mehr erforderlich bzw. haben keine sicherheitstechnische Relevanz mehr. Die absoluten Werte und die zeitliche Entwicklung der Aktivität und Radiotoxizität der SMA und ATA im Vergleich zu den HAA plausibilisieren eine solche Schlussfolgerung zusätzlich.
- Da die obigen Beobachtungen für alle verbleibenden Standortgebiete gleichermassen gelten, beeinflussen alternative Abfallzuteilungen auch die Standortwahl⁵ nicht.

⁵ Die Tab. B-1 im Anhang stellt eine Liste der dosisdominierenden Abfallgebindetypen (AGT) im SMA-Lager (Lagerteil) dar und beinhaltet sowohl ATA als auch SMA. Die jeweiligen Dosisbeiträge und die respektiven Volumen der AGT sind auch aufgezeichnet. Die bis hierher im Bericht präsentierten Überlegungen stützen sich zusätzlich auf die geringen Volumina resp. Platzbedarf. 90 % der Dosisbeiträge stammen aus einem Gesamtvolumen von 5'500 m³ der Abfälle (Top-20 dosisdominierende AGTs im SMA).

5 Betrachtungszeitraum für SMA und HAA und Nachweiszeitraum für das Kombilager

In diesem Kapitel werden mithilfe von Betrachtungen der zeitlichen Entwicklung der Radiotoxizität im Vergleich mit natürlichen Materialien die Betrachtungszeiträume für die Standortwahl und der Nachweiszeitraum für den Sicherheitsnachweis des Kombilagers in NL begründet.

5.1 Betrachtungszeitraum HAA-Lager

Fig. 4-4 zeigt, dass die Radiotoxizität der HAA innerhalb von 100'000 Jahren um nahezu drei Grössenordnungen abnimmt und nach 1 Million Jahren etwa eine Grössenordnung unter der Radiotoxizität des natürlichen Cigar Lake Uranerzes (Cramer & Smellie 1994) mit einem Urangehalt von 8 % liegt. Die Resultate von MIRAM-RBG (SGT-E3) werden dabei auch mit den Resultaten von MIRAM-2014 (SGT-E2) verglichen. Im Vergleich zu SGT-E1 (Nagra 2008) (nicht in Fig. 4-4 dargestellt) und SGT-E2 (Nagra 2014b) ändert sich der Radiotoxizitätsverlauf des HAA-Lagers in SGT-E3 nur geringfügig und daher wird der Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren für das HAA-Lager auch im RBG beibehalten.

5.2 Betrachtungszeitraum SMA-Lager

Wie bei den hochaktiven Abfällen nimmt auch die Radiotoxizität der SMA und ATA im Verlauf der Zeit deutlich ab (Fig. 4-4). Dabei liegt zur Zeit der Einlagerung in einem geologischen Tiefenlager die Radiotoxizität unterhalb derjenigen von natürlichen Uran-reichen Gesteinen, wie beispielsweise den Pechblende-reichen Gesteinen von La Creusaz (Wallis, Schweiz; Gilliéron 1988). Innerhalb von 100'000 Jahren nimmt die Radiotoxizität rasch ab und liegt dann um etwa 2 Grössenordnungen unterhalb der RT-Werte verglichen mit denjenigen während der Einlagerung. Somit ist die Radiotoxizität dieser Abfälle nach 100'000 Jahren vergleichbar mit der Radiotoxizität eines natürlichen Granitgesteins in der Schweiz, wie zum Beispiel des Böttstein-Granits in der Nordschweiz.

Im Vergleich zu SGT-E1 (Nagra 2008) und SGT-E2 (Nagra 2014b) verschiebt sich der Radiotoxizitätsverlauf des SMA-Lagers in SGT-E3 zu geringfügig tieferen Radiotoxizitätswerten. Die maximale Individualdosis für das SMA-Lager liegt am Ende des Betrachtungszeitraums deutlich mehr als 3 Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv pro Jahr gemäss ENSI-Richtlinie G03.

Aus diesen Gründen wird der Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren für das SMA-Lager auch im RBG beibehalten.

5.3 Nachweiszeitraum Kombilager

Da die radiologischen Eigenschaften aller Abfälle im Kombilager von den HAA dominiert werden, wird der für das HAA-Lager festgelegte Betrachtungszeitraum auch im Sicherheitsnachweis für das Kombilager im RBG verwendet. Dies steht im Einklang mit der Vorgabe zum Nachweiszeitraum in der ENSI-Richtlinie G03 (ENSI 2023), vgl. Kap. 2.1.

6 Schlussfolgerung

Das schweizerische Entsorgungskonzept für radioaktive Abfälle geht von zwei Lagertypen aus: einem für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA-Lager) und einem für hochaktive Abfälle (HAA-Lager), mit der Möglichkeit, alle Abfälle gemeinsam in einem Kombilager zu entsorgen (Nagra 2021).

Aufgrund den vergleichbaren geologischen Gesteinseigenschaften des Opalinustons in den verschiedenen Standortgebieten der Etappe 3 und den Überlegungen in diesem Bericht, z.B. zum radiologischen Gefährdungspotential, wird von der Nagra die folgende Abfallzuteilung vorgeschlagen:

- Im Hinblick auf den Standortvergleich werden die hochaktiven Abfälle (HAA) dem HAA-Lager und die alphanuklearen (ANA) und schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) dem SMA-Lager (Kategorien gemäss KEV) zugeteilt.
- Im Sicherheitsnachweis für das Kombilager für das RBG werden die HAA dem HAA-Lagerteil und die SMA/ANA dem SMA-Lagerteil zugeteilt.

Somit bleibt das bestehende Entsorgungskonzept (d. h. getrennte Lager/Lagerteile) für hoch- und schwach-/mittelaktive Abfälle erhalten, wobei jeweils auf die Abfallkategorien abgestimmte Barrierensysteme verwendet werden.

Wie in SGT-E1 und SGT-E2 liegt der für den Standortvergleich in SGT-E3 verwendete Betrachtungszeitraum eines SMA-Lagers bei 100'000 Jahren und der Betrachtungszeitraum eines HAA-Lagers bei einer Million Jahre. Für diese Abschätzungen wurden Berechnungen zur Individualdosis und Radiotoxizität herangezogen.

Der Nachweiszeitraum für den Sicherheitsnachweis für das Kombilager im RBG, der vom Betrachtungszeitraum des HAA-Lagers übernommen wird, beträgt eine Million Jahre, im Einklang mit der Vorgabe zum Nachweiszeitraum in der ENSI-Richtlinie G03.

Wie aus den Betrachtungen zu Volumina und Dosisbeiträgen der einzelnen Abfälle bzw. Abfallkategorien hervorgeht, sind alternative Abfallzuteilungen nicht mehr erforderlich bzw. haben keine sicherheitstechnische Relevanz mehr. Sie würden im Besonderen auch die Standortwahl nicht beeinflussen.

Schliesslich seien die Tabellen aus der Einleitung (Tab. 2-1 und Tab. 2-2) hier nochmals aufgeführt und mit einer zusammenfassenden Begründung versehen. Tab. 6-1 betrifft die Begründungen der Abfallzuteilung für die Standortwahl und für den Sicherheitsnachweis, während Tab. 6-2 die Begründungen der Betrachtungszeiträume für die Standortwahl und für den Nachweiszeitraum für den Sicherheitsnachweis für das Kombilager im RBG aufgreift.

Tab. 6-1: Begründung der Abfallzuteilung für die Standortwahl und für den Sicherheitsnachweis

Konsistenz Abfallzuteilung	ENSI 33/649	Die Abfallzuteilung muss sowohl für den Standortvergleich als auch für den Sicherheitsnachweis für den gewählten Standort konsistent verwendet werden.
	Begründung	Die behördliche Anforderung wird erfüllt, weil die Abfallzuteilung sowohl für den Standortvergleich als auch für den Sicherheitsnachweis für den gewählten Standort konsistent verwendet wird. Es werden alle SMA und ATA dem SMA-Lager bzw. -Lagerteil zugeordnet.
Methodik Abfallzuteilung	ENSI 33/649	Die Entsorgungspflichtigen müssen zeigen, dass die gewählte Abfallzuteilung, beispielsweise mit der Methodik wie in Etappe 1 (Nagra 2008), sicherheitsgerichtet ist.
	Begründung	Die behördliche Anforderung wird erfüllt. Sowohl die geologischen als auch die technischen Barrieren erfüllen die gestellten Anforderungen, wodurch mit der vorgenommenen Abfallzuteilung die Langzeitsicherheit gewährleistet werden kann.
Auswirkungen alternativer Abfallzuteilungen	ENSI 33/649	Die Auswirkungen alternativer Abfallzuteilungen auf die Standortwahl sind aufzuzeigen. Dazu haben sie (die Entsorgungspflichtigen) beispielsweise die sicherheitsrelevanten Konsequenzen der Abfallzuteilung unter Berücksichtigung eines standortspezifischen und auf diese Abfallzuteilung angepassten Lagerkonzepts (z. B. grösserer Platzbedarf) aufzuzeigen.
	Begründung	Alternative Abfallzuteilungen, wie sie in Etappe 1 durchgeführt wurden, erweisen sich aufgrund der aktuellen Bedingungen und Eigenschaften des Wirtgesteins und der geologischen Langzeitentwicklung der drei verbleibenden Standortgebiete als sicherheitstechnisch nicht mehr sinnvoll. Sie beeinflussen die letzte Etappe der Standortwahl somit nicht.

Tab. 6-2: Begründung Betrachtungszeitraum und Nachweiszeitraum

	Standortwahl		Sicherheitsnachweis	
Begriff	Betrachtungszeitraum		Nachweiszeitraum	
Zeitraum	SMA	100'000 Jahre	Kombilager	1 Mio. Jahre
	HAA	1 Mio. Jahre		
Behördliche Vorgaben	ENSI 33/649 Kapitel 4: Sicherheitstechnische Vorgaben für den Standortvergleich: [...] Die Entsorgungspflichtigen haben ausserdem zu prüfen, ob die in Etappe 1 hergeleiteten Betrachtungszeiträume für das SMA- und das HAA-Lager (ENSI 33/070, S. 53) angepasst werden müssen.		ENSI G03 – Kapitel 9.3.2 Nachweiszeitraum a. Für den Sicherheitsnachweis ist ein Nachweiszeitraum von bis zu einer Million Jahre festzulegen. Die zeitliche Entwicklung des radiologischen Gefährdungspotenzials der eingelagerten Abfälle und die Prognostizierbarkeit der geologischen Langzeitentwicklung sind zu berücksichtigen.	
Begründung	Die behördlichen Anforderungen werden erfüllt, denn die bisherigen Betrachtungen konnten bestätigt werden. Im Besonderen sind die Individualdosiswerte im Rechenfall R1 mehrere Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums und die Radiotoxizitätsentwicklung der SMA/ATA bzw. HAA zeigt, dass nach 100'000 Jahren bzw. nach 1 Million Jahre die Radiotoxizität das Niveau von natürlichem Gestein erreicht.		Die behördlichen Anforderungen werden erfüllt, indem der Nachweiszeitraum des Kombilagers gleich dem Betrachtungszeitraum des HAA-Lagerteils auf eine Million Jahre gesetzt wird. Die zeitliche Entwicklung des radiologischen Gefährdungspotenzials der eingelagerten Abfälle und die Prognostizierbarkeit der geologischen Langzeitentwicklung werden wie bisher berücksichtigt.	

7 Literaturverzeichnis

- Baertschi, P. (1995): Strahlenrisiko eines HAA-Endlagers im Vergleich zu anderen Risiken. Nagra Informiert / Informe / Bulletin 25, 56-68.
- BFE (2008): Sachplan Geologische Tiefenlager: Konzeptteil. BFE 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011). Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- BFE (2018): Sachplan geologische Tiefenlager : Ergebnisbericht zu Etappe 2: Festlegungen und Objektblätter. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Cramer, J. & Smellie, J. (1994): Final report of the AECL/SKB Cigar Lake analog study. Technical Report TR 94-04. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB), Stockholm.
- ENSI (2010): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. ENSI 33/070. ENSI, Brugg.
- ENSI (2015): Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Überprüfung der Abfallzuteilung und der Rechenfälle für die Radionuklidenausbreitung. ENSI 33/55. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2020): Geologische Tiefenlager. Erläuterungsbericht zur Richtlinie ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2023): Geologische Tiefenlager. Ausgabe Dezember 2020 (Änderung vom 1. November 2023). Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- Gera, F. & Jacobs, D.G. (1972): Considerations in the Long-Term Management of High-Level Radioactive Wastes. ORNL-4762. Oak Ridge National Laboratory.
- Gilliéron, F. (1988): Zur Geologie der Uranmineralisation in den Schweizer Alpen. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie Lieferung 77, Ergänzung zur Studie 41. Kümmerly und Frey, Bern.
- Glaus, M.A., Kulik, D.A., Miron, G.D., Van Loon, L.R., Wüst, R., Becker, J. & Li, X. (2024): Diffusion Databases for Opalinus Clay, Confining Geological Units, and bentonite: Methods, Concepts, and Upscaling of Data. Nagra Technical Report NTB 23-08.
- Hamstra, J. (1975): Plant safety features: Radiotoxic hazard measure for buried solid radioactive waste. Nuclear Safety 16/2, 180-189.
- Hedin, A. (1997): Spent nuclear fuel - how dangerous is it?: a report from the project 'Description of risk'. Technical Report TR 97-13. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB), Stockholm.

- IAEA (2011): Disposal of radioactive waste. Specific Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna.
- ICRP (2012): Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Annals of the ICRP, vol. 41 (Suppl.), 2012. Edited by C. H. Clement. International commission on radiological protection ICRP.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2022. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Marques Fernandes, M., Marinich, O., Miron, G.D., Kulik, D.A., Baeyens, B., Wüst, R., Becker, J. & Li, X. (2024): Sorption databases for Opalinus Clay, confining geological units, and bentonite: Methods, concepts, and upscaling of data. Nagra Technical Report NTB 23-06.
- Nagra (1985): Projekt Gewähr 1985: Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Sicherheitsbericht. Nagra Gewähr Bericht NGB 85-08.
- Nagra (2002): Project Opalinus Clay: Safety report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05.
- Nagra (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Nagra Technical Report NTB 08-05.
- Nagra (2014a): Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien – MIRAM 14. Nagra Technischer Bericht NTB 14-04.
- Nagra (2014b): SGT-Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme. Nagra Technischer Bericht NTB 14-03.
- Nagra (2021): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.
- Nagra (2023a): Bautechnisches Dossier Standortvergleich – Band 6: Technischer Beschrieb und Pläne Lagerprojekte. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 6.
- Nagra (2023b): Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien MIRAM-RBG. Nagra Technischer Bericht NTB 22-05.
- Nagra (2024a): Geological long-term evolution: Erosion. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-15.
- Nagra (2024b): Geosynthesis of Northern Switzerland. Nagra Technischer Bericht NTB 24-17.
- Nagra (2024c): Post-closure biosphere assessment. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-06.
- Nagra (2024d): Post-closure safety report. Nagra Technical Report NTB 24-10.
- Nagra (2024e): Radiological consequence analysis for a deep geological repository in Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-18.

- Nagra (2024f): Radiological consequences of deep geological repository excavation by erosive processes. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-08.
- Nagra (2024g): Safety and Repository Concept and Provisional Design. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-18.
- Nagra (2025a): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Begründung der Standortwahl. Nagra Technischer Bericht NTB 24-03.
- Nagra (2025b): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager - Umweltverträglichkeitsbericht 1. Stufe mit Pflichtenheft für die 2. Stufe. Nagra Technischer Bericht NTB 24-05.
- Nagra (2025c): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-01.
- Peters, T. (1986): Structurally incorporated and water extractable chlorine in the Boettstein granite (N. Switzerland). Contributions to Mineralogy and Petrology 94, 272-273.
- StSV (2017): Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 26. April 2017, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.501, Schweiz.

Anhang A Radiotoxizität von natürlichen Materialien

Viele Radionuklide kommen natürlich in der Umwelt vor. In diesem Abschnitt wird die Radiotoxizität für ausgewählte natürliche Materialien berechnet, um den Kontext für die abnehmende Radiotoxizität des in Abschnitt 4.1 vorgestellten Abfallinventars zu zeigen. Die Auswahl dieser Materialien umfasst natürliche uranhaltige Erze von Kanada sowie Gesteine in der Schweiz. Ein Beispiel ist der Böttstein-Granit, ein kristallines Gestein in der Nordschweiz, das ähnliche Eigenschaften wie andere granitoide Gesteine in den Schweizer Alpen aufweist. Zusätzlich wurde ein oberflächennaher Urankörper im Wallis (La Creusaz) als Vergleich zu den kanadischen uranhaltigen Gesteinen ausgewählt.

Das HAA-Inventar wird mit Uranerzen verschiedener Grade und das SMA-Inventar mit Böttstein-Granit verglichen. Die zugehörigen Berechnungen werden in Abschnitt 3.3.3 beschrieben. Die Auswahl der Materialien und ihre Zusammensetzungen basieren auf Anhang 3 des Entsorgungsnachweises HAA (Nagra 2002).

Es wird die in Abschnitt 3.3.3 vorgestellte Definition der Radiotoxizität verwendet. Die Berechnung der Aktivität der natürlichen Radionuklide basiert auf dem Volumen der entsprechenden Lagerkammern. Das heisst, bei der Berechnung wird die Menge des jeweiligen Materials berücksichtigt, die hypothetisch die Lagerkammern füllen würde, in denen sich die dem obigen Vergleich entsprechende Abfallart befindet (HAA-Lagerstollen für Uranerz und SMA-Kavernen für Granit). Die Tunnelvolumina werden mit 100'000 m³ für HAA und 200'000 m³ für SMA veranschlagt, basierend auf den Abmessungen aus (Nagra 2023a).

A.1 Erze mit unterschiedlichem Urangehalt

Die Radiotoxizität von HAA-Inventar wird mit Erzen mit verschiedenen Urangehalten verglichen. Insbesondere werden Beispiele von Cigar Lake, einem bekannten, grossen Uranerzkörper in Kanada, und einem kleinen Uranerzkörper von La Creusaz im Wallis in der Schweiz ausgewählt.

Die Uranlagerstätte Cigar Lake enthält Urangehalte im Bereich zwischen etwa 2 % und 60 % (Cramer & Smellie 1994). Tab. A-1 zeigt die Aktivitäten natürlicher Radionuklide in Verbindung mit Erzen, die 8 % (durchschnittlicher Gehalt) und 55% (nahe dem oberen Ende der Spanne) Uran enthalten. Das 8 %ige Erz hat eine Dichte von 2.8 g/cm³, während das 55 %ige Erz eine Dichte von 5.8 g·cm⁻³ hat.

Der Uranerzkörper von La Creusaz im Wallis enthält bis zu etwa 3 % Uran (Gilliéron 1988) und hat eine Dichte von 2.4 g·cm⁻³. Die Aktivitäten der natürlichen Radionuklide, die mit diesem Erz assoziiert sind, sind ebenfalls in Tab. A-1 aufgeführt.

Tab. A-1: Spezifische Aktivität der natürlichen Radionuklide in verschiedenen Uranerzen

Basierend auf Cramer & Smellie (1994) und Gilliéron (1988).

Spezifische Aktivität [Bq/kg]	Cigar Lake 55 %	Cigar Lake 8 %	La Creusaz, VS
U-238	6.80E+06	1.00E+06	3.70E+05
U-235	3.10E+05	4.50E+04	1.70E+04

Die in Tab. A-1 aufgeführten Radionuklide haben mehrstufige Zerfallsketten, zu denen auch eine Reihe anderer Radionuklide gehören. Da sich die gesamte Kette im radiologischen Gleichgewicht befindet, sind die Aktivitäten aller enthaltenen Radionuklide bekannt. Diese Aktivitäten werden verwendet, um die Radiotoxizität pro kg des Erzes zu berechnen. Anschliessend kann mit Hilfe der oben genannten Erzdichten die Radiotoxizität pro m³ des Erzes bestimmt werden. Schliesslich wird das HAA-Tunnelvolumen verwendet, um die Radiotoxizität des gegebenen Erzes zu bestimmen (in Mengen, die hypothetisch die HAA-Tunnel füllen würden). Diese Werte sind in Tab. A-2 aufgeführt.

Tab. A-2: Radiotoxizität von natürlichen Radionukliden in verschiedenen Uranerzen

	Cigar Lake 55 %	Cigar Lake 8 %	La Creusaz, VS
Radiotoxizität [Sv]	1.01E+10	7.19E+08	2.28E+08

Diese Radiotoxizitäten sind in Fig. 4-4 in Kap. 4.1 angegeben.

A.2 Granit

Die Radiotoxizität des SMA-Inventars wird mit Böttstein-Granit verglichen – einem gut charakterisierten, typischen Granit der Nordschweiz. Er hat eine Dichte von 2.6 g·cm⁻³ und enthält eine Reihe von natürlichen Radionukliden, die in Tab. A-3 aufgeführt sind (Baertschi 1995).

Tab. A-3: Spezifische Aktivität der natürlichen Radionuklide in Böttstein-Granit

Basierend auf Baertschi (1995).

Spezifische Aktivität [Bq/kg]	Böttstein-Granit
K-40	1.30E+03
U-238	1.20E+02
U-235	5.60E+00
Th-232	1.00E+03

Die in Tab. A-3 aufgeführten Radionuklide Uran und Thorium haben lange Zerfallsketten, die auch eine Reihe anderer Radionuklide enthalten. Da sich die gesamte Kette im radiologischen Gleichgewicht befindet, sind die Aktivitäten aller enthaltenen Radionuklide bekannt. Diese Aktivitäten werden verwendet, um die Radiotoxizität pro kg Granit zu berechnen. Anschliessend kann die oben erwähnte Granitdichte verwendet werden, um die Radiotoxizität pro m³ des Granits zu bestimmen. Schliesslich wird das SMA-Kavernenvolumen verwendet, um die Radiotoxizität der Granitmenge zu bestimmen, die hypothetisch die SMA-Kavernen füllen würde. Dieser Wert wird auf 7.18E+05 Sv berechnet. Dieser Radiotoxizitätswert ist in Fig. 4-4 im Abschnitt 4.1 angegeben.

Anhang B Top 20 dosisdominierende AGTs im SMA

Tab. B-1 enthält eine Liste der dosisdominierenden Abfallgebindetypen (AGT) im SMA-Lager (Lagerteil) und beinhaltet sowohl ATA als auch SMA. Ebenfalls aufgeführt sind die jeweiligen Dosisbeiträge und Volumina der betreffenden AGT.

Tab. B-1: Liste der dosisdominierenden Abfallgebindetypen (AGT) des SMA-Lagers (bzw. des SMA-Lagerteils)

Nr.	AGT	Abfallsorte-KEV	Beschrieb	Anzahl Gebinde	V [m³]	[%]	Dosisbeitrag [%]
1	J-B-9320191	SA-B-ME-M2-SMA	@ SA-KKB Kernumfassung (Stahl) / M-II[110Pb]	40	180	0.21 %	21.66 %
2	J-Z-003000	WA-F-MX-K2-ATA	Compacted H&E + mTW / CSD-C (AREVA)	532	417	0.50 %	21.20 %
3	J-Z-003003	WA-F-SG-K2-ATA	AREVA CSD-B	20	16	0.02 %	14.05 %
4	J-B-9320183	SA-B-ME-M2-SMA	@ SA-KKB Kernbehälter (Stahl) / M-II[90Pb]	28	126	0.15 %	7.66 %
5	J-G-9320181	SA-G-ME-M2-SMA	@ SA-KKG Kernumfassung inkl. Formbleche (Stahl) / M-II[75Pb]	24	108	0.13 %	5.56 %
6	J-M-9320133	SA-M-ME-M2-SMA	@ SA-KKM Kernmantel (Stahl) / M-II[90Pb]	31	139	0.17 %	4.71 %
7	J-P-970301	SA-PW-MS-C1-SMA	@ SA-PSIW Stahl A / KC-T12	122	549	0.65 %	1.89 %
8	J-B-9320171	SA-B-ME-M2-SMA	@ SA-KKB Thermischer Schild (Stahl) / M-II[65Pb]	42	189	0.23 %	1.79 %
9	J-L-9320171	SA-L-ME-M2-SMA	@ SA-KKL Oberes Kerngitter (Stahl) / M-II[90Pb]	22	99	0.12 %	1.55 %
10	J-B-9320181	SA-B-ME-M2-SMA	@ SA-KKB Unterer Rost (Stahl) / M-II[90Pb]	10	45	0.05 %	1.50 %
11	J-L-9320173	SA-L-ME-M2-SMA	@ SA-KKL BE-Fuss-Verankerungen (Stahl) / M-II[90Pb]	7	31	0.04 %	1.45 %
12	J-M-000122	RA-M-ME-B1-SMA	RA-4-04B geschn Vergiftungsbl in Zement	30	135	0.16 %	1.38 %
13	J-B-920001	RA-B-MX-M2-SMA	@ RA-KKB / M-II	30	135	0.16 %	1.35 %
14	J-L-9320161	SA-L-ME-M2-SMA	@ SA-KKL Kernmantel (Stahl) / M-II[65Pb]	42	189	0.23 %	0.93 %
15	J-G-9320161	SA-G-ME-M2-SMA	@ SA-KKG Kernbehälter (Stahl) / M-II[30Pb]	40	180	0.21 %	0.90 %
16	J-G-000087	RA-G-MX-M2-SMA	CORESCHROTT SPHÄROGUSSBEHÄLTER	15	67	0.08 %	0.67 %

Tab. B-1: Cont.

Nr. .	AGT	Abfallsorte-KEV	Beschrieb	Anzahl Gebinde	V [m³]	[%]	Dosisbeitrag [%]
17	J-P-001400	BA-PB-X-Z2-ATA	H-3/C-14/Ra-226..(MIF) PSI-5X (1983-90)	23	21	0.03 %	0.63 %
18	J-M-000089	BA-M-H-F2-SMA	BA-1a-01K Harze P1 verfestigt mit CVRS	3'018	2'789	3.33 %	0.58 %
19	J-L-000066	RA-L-MX-M2-SMA	Aktiv. NFML LPRM in Al-/Stahl-Beh. etc.	3	13	0.02 %	0.47 %
20	J-B-9320301	SA-B-MS-L4-SMA	@ SA-KKB Bioschild und Reaktorbecken (armierter Beton) / LC-86	312	2'934	3.50 %	0.39 %
			Total	4'391	8'362	9.97 %	90.32 %