



ARBEITSBERICHT NAB 24-29

Analyse der Auswirkungen von Störfällen
auf die Langzeitsicherheit

September 2024



ARBEITSBERICHT NAB 24-29

Analyse der Auswirkungen von Störfällen
auf die Langzeitsicherheit

September 2024

STICHWÖRTER

Betriebssicherheit, Störfall, Auswirkung auf Nachverschluss

**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.

Zusammenfassung

In diesem Bericht werden die Auswirkungen von Störfällen während des Betriebs eines geologischen Tiefenlagers (gTL) auf die Barrieren der Langzeitsicherheit eines verschlossenen gTL untersucht und bewertet. Zu den zu betrachtenden Barrieren der Langzeitsicherheit zählen die Endlagerbehälter, die Verfüllung, das Verschlussystem sowie der einschlusswirksame Bereich.

Es wird aufgezeigt, dass bei den infolge eines Störfalls betroffenen Barrieren sicherheitsrelevante Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit eines gesamthaft betrachteten, verschlossenen gTL nicht zu unterstellen sind. Dies gilt insbesondere, da während des Betriebs für alle von einem Störfall betroffenen Barrieren korrigierende Massnahmen zur Verfügung stehen. Eine allfällige Beeinträchtigung der Langzeitsicherheitsfunktionen wird nicht nur erkannt, sondern kann – sollte es erforderlich sein – auch behoben werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass während der Betriebsphase, wenn überhaupt, nur sehr wenig Störfälle auftreten können, die insbesondere das Potenzial haben, die Sicherheitsfunktionen der Barrieren (nachhaltig) zu beeinflussen. Von einem Störfall sind zudem nur einzelne Elemente einer Barriere betroffen, und korrigierende Massnahmen – sollten sie erforderlich sein – sind auf die betroffenen Elemente begrenzt.

Im Langzeitsicherheitsnachweis werden zudem Sicherheitsszenarien betrachtet, die in ihren konservativen Annahmen deutlich abdeckend gegenüber den lokal begrenzten störfallbedingten Auswirkungen einzuordnen sind. Da selbst für diese konservativen Sicherheitsszenarien quantitativ nachgewiesen werden kann, dass das Dosischutzkriterium eingehalten wird, kann geschlossen werden, dass Störfälle während des Betriebs eines gTL auf die Barrieren der Langzeitsicherheit keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen haben. Gemäss dem Zweck eines Mehrfachbarrierensystems wird die Langzeitsicherheit eines verschlossenen gTL nicht negativ beeinflusst. Der Schutz von Mensch und Umwelt nach Verschluss des Lagers kann stets gewährleistet werden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Figurenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung, Vorgaben und Grundlagen	1
1.1 Vorgaben, Einordnung und Abgrenzung	1
1.2 Grundlagen der Analyse	2
1.2.1 Ableitung störfallbedingter Belastungsbilder	2
1.2.2 Barrieren und Sicherheitsfunktionen der Langzeitsicherheit.....	2
2 Bewertung der Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit eines verschlossenen geologischen Tiefenlagers	4
2.1 Allgemeine Einordnung.....	4
2.2 SMA-Endlagerbehälter	5
2.3 HAA-Endlagerbehälter	6
2.4 Verfüllmaterial der SMA-Lagerkavernen.....	6
2.5 Verfüllmaterial der HAA-Lagerstollen.....	7
2.6 Verschlussystem.....	8
2.7 Einschlusswirksamer Bereich	9
2.8 Fazit	11
3 Literaturverzeichnis	12

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Auflistung der Barrieren des Mehrfachbarrierensystems und Zuordnung der Sicherheitsfunktionen bzgl. der Langzeitsicherheit je Lagertyp (Nagra 2024f)	3
--	---

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1: Schematische Illustration des Mehrfachbarrierensystems für die Nachverschlussphase gemäss den aktuell verfolgten Lagerkonzepten für HAA und SMA am Standort Haberstal.....	5
--	---

Abkürzungsverzeichnis

ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EVA	Einwirkungen von aussen
EVI	Einwirkungen von innen
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
KEG	Kernenergiegesetz
LZS	Langzeitsicherheit
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle

1 Einleitung, Vorgaben und Grundlagen

In diesem Bericht wird die in ENSI (2018) geforderte Analyse zu den Auswirkungen von Störfällen während des Betriebs eines geologischen Tiefenlagers (gTL) auf die Barrieren¹ der Langzeitsicherheit (LZS) eines verschlossenen gTL untersucht und bewertet.

Dabei werden zuerst die relevanten gesetzlichen und behördlichen Vorgaben zusammengefasst und eingeordnet (Kap. 1.1) sowie die Grundlagen erläutert. Es werden die diesem Bericht zugrunde liegenden störfallbedingten Belastungsbilder abgeleitet (Kap. 1.2.1) und die einzelnen LZS-Barrieren samt ihrer Sicherheitsfunktionen² zur Gewährleistung der LZS vorgestellt (Kap. 1.2.2). Die anschliessende Analyse und Bewertung der Auswirkungen auf die technischen und geologischen Barrieren der LZS erfolgt in Kap. 2.

1.1 Vorgaben, Einordnung und Abgrenzung

Neben der Forderung in ENSI (2018) wird die Analyse der störfallbedingten Auswirkungen der Betriebsphase auf die LZS eines verschlossenen gTL auch in der ENSI-Richtlinie G03 (ENSI 2023) gefordert. Im Erläuterungsbericht zur Richtlinie (ENSI 2020) werden explizit die Auswirkungen von in der Betriebsphase potenziell auftretenden Störfällen auf Barrieren angesprochen. Im Folgenden werden unter diesen Barrieren diejenigen technischen und geologischen Barrieren des Mehrfachbarrierensystems verstanden, die eine Sicherheitsfunktion bzgl. der LZS übernehmen (siehe Kap. 1.2.2). Neben den Massnahmen zur Gewährleistung der nuklearen Betriebssicherheit sollen gemäss ENSI (2020) zusätzliche Massnahmen bereits während und/oder nach dem Störfall soweit nötig berücksichtigt werden, um Auswirkungen auf langzeitsicherheitsrelevante Barrieren zu vermeiden bzw. zu begrenzen. Die Massnahmen können eine Instandsetzung, eine Reparatur oder einen Austausch der betroffenen Barriere zum Ziel haben. Keine Beeinträchtigung ist gemäss ENSI (2020) gegeben, wenn die LZS aufgrund des Zusammenwirkens aller LZS-Barrieren trotz Veränderungen erhalten bleibt. Die schrittweise Installation des Mehrfachbarrierensystems bewirkt zudem bereits in der Einlagerungsphase eine kontinuierliche Zunahme des passiven Schutzes der Barrieren (vgl. Kap. 2.1 und Fig. 2-1). Dieser passive Schutz wird bei der Analyse der Auswirkungen berücksichtigt.

Betriebliche Störungen oder bau- bzw. produktionsbedingte Fehler, die zu Abweichungen oder Nichterfüllung von LZS-relevanten Anforderungen oder dem geplanten Anfangszustand führen können, werden nicht betrachtet, da diese keine Störfälle im Sinne der Störfalldefinition³ darstellen. Als Beispiel sei hier ein nichterkannter Fehler bei der Herstellung der HAA-Endlagerbehälter (z. B. Wandstärken ausserhalb der Toleranz) oder der Erstellung der Verfüll- und Verschlussbauwerke (z. B. erforderliche Dichte des Verfüllmaterials wurde nicht erreicht) genannt. Diese Aspekte sind durch die Sicherheitsszenarien der LZS berücksichtigt und bewertet (Nagra 2024a).

Da die Abfälle bei Annahme am gTL die Annahmebedingungen erfüllen müssen, werden Störfälle während der Zwischenlagerung bzw. bei der Verpackung in Endlagerbehälter (ELB) ebenfalls nicht betrachtet, da von einer adäquaten, die Annahmebedingungen erfüllende Instandsetzung der allenfalls betroffenen Abfallgebinde bzw. ELB vor Anlieferung ausgegangen wird.

¹ Gemäss der Richtlinie ENSI-G03 besteht ein Mehrfachbarrierensystem aus gestaffelten, passiv und verschiedenartig wirkenden technischen und geologischen Barrieren zum Einschluss und zur Rückhaltung der im Tiefenlager eingelagerten radioaktiven Stoffe. Für den Fall, dass eine Barriere ihre angedachte Funktion nicht wie geplant erfüllt, umfasst es weitere Barrieren, die dies kompensieren können.

² Die Sicherheitsfunktionen für die Nachverschlussphase des gTL sind nicht zu verwechseln mit den Sicherheitsfunktionen für Kernkraftwerke gemäss Art. 10 KEV.

³ Ein Störfall definiert sich gemäss Anhang 1 Bst. i KEV wie folgt: *Jeder vom Normalbetrieb abweichende Anlagezustand, der ein Eingreifen eines Sicherheitssystems erfordert.*

1.2 Grundlagen der Analyse

Die Grundlagen, auf denen die in Kap. 2 vorgenommene Bewertung der Auswirkungen für jede Barriere der LZS erfolgt, werden nachfolgend erläutert.

1.2.1 Ableitung störfallbedingter Belastungsbilder

Für das zu untersuchende Störfallspektrum werden grundsätzlich die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben und Verordnungen (insbesondere KEG (2003), KEV (2004) und UVEK (2009)) berücksichtigt. Das Störfallspektrum bestehend aus den zu unterstellenden Einwirkungen von aussen (EVA, z. B. Erdbeben) ist in Nagra (2025) sowie den zu unterstellenden Einwirkungen von innen (EVI, z. B. anlageninterner Brand oder ELB-Absturz) in Nagra (2024b) dokumentiert.

Mit der Rahmenbewilligung werden die Grundzüge des Projekts festgelegt (Art. 14, Abs. 1 KEG). Das Störfallspektrum als solches ist als Bewertungsgrundlage für eine Anlage, die nur in den Grundzügen festgelegt wird, nicht für die Analyse von störfallbedingten Auswirkungen auf die LZS eines verschlossenen gTL zielführend. Anstatt einem Störfallspektrum ist es zweckmässiger, typisierte Belastungsbilder zu definieren, die die Auswirkungen infolge allfälliger EVI und EVA abdecken. Unabhängig von der Eintrittshäufigkeit und dem Ausmass sind grundsätzlich drei Arten von Einwirkungen, d. h. Belastungsbilder (sowie deren Kombination), zu unterscheiden:

- thermische Einwirkungen,
- mechanische Einwirkungen und
- Einwirkungen von Flüssigkeiten (im Wesentlichen Wasser).

1.2.2 Barrieren und Sicherheitsfunktionen der Langzeitsicherheit

Gemäss (Nagra 2024f) gelten für die LZS folgende Sicherheitsfunktionen, die bei der Festlegung der Anforderungen an die einzelnen Barrieren zu beachten sind:

- Isolation radioaktiver Abfälle von Mensch und Umwelt (menschlichen Lebensraum),
- vollständiger Einschluss der Radionuklide für eine gewisse Zeit (nur für abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung),
- Immobilisierung, Rückhaltung und langsame Freisetzung der Radionuklide,
- Kompatibilität der Barrieren des Mehrfachbarrierensystems und der radioaktiven Abfälle untereinander und mit anderen Materialien sowie
- Langzeitstabilität bezüglich geologischer und klimatischer Langzeitentwicklungen.

Die Sicherheitsfunktionen werden in Tab. 1-1 den Barrieren des Mehrfachbarrierensystems zugeordnet. Die Prüfung der Auswirkungen von Ereignissen und Störfällen auf diese Barrieren erfolgt anhand der Sicherheitsfunktionen. Da im gTL ausschliesslich ELB gehandhabt werden, die die in ihnen verpackten Abfälle (Abfallgebinde bzw. -matrix) vor störfallbedingten Einwirkungen schützen, erfolgt keine separate Betrachtung der Barriere «Abfälle und Abfallmatrix». Für detailliertere Informationen je Barriere wird auf (Nagra 2024f) verwiesen.

Tab. 1-1: Auflistung der Barrieren des Mehrfachbarrierensystems und Zuordnung der Sicherheitsfunktionen bzgl. der Langzeitsicherheit je Lagertyp (Nagra 2024f)

Die Zuordnung eines Lagertyps in Klammern bedeutet, dass die Funktion durch die Barriere zwar z. T. wahrgenommen, in der Sicherheitsanalyse aber nicht explizit berücksichtigt wird.

Barrieren des Mehrfachbarrierensystems	Sicherheitsfunktionen				
	Isolation vom Lebensraum	Vollständiger Einschluss	Immobilisierung & Rückhaltung	Kompatibilität untereinander	Langzeitstabilität
Abfälle & Abfallmatrix	---	---	HAA (SMA)	HAA SMA	---
Endlagerbehälter	---	HAA	HAA (SMA)	HAA SMA	---
Verfüllmaterial der Lagerkammern	---	---	HAA SMA	HAA SMA	---
Verschlussystem	HAA SMA	---	HAA SMA	HAA SMA	---
Einschlusswirksamer Bereich (und stabilen geologische Situation) ⁴	HAA SMA	---	HAA SMA	HAA SMA	HAA SMA

⁴ Die geologische Situation wird im Rahmen dieses Berichts nicht betrachtet und bewertet, da diese in ihrer Gesamtheit nicht durch Störfälle während des Betriebs beeinflusst bzw. verändert werden kann.

2 Bewertung der Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit eines verschlossenen geologischen Tiefenlagers

Alle Barrieren des Mehrfachbarrierensystems gemäss Kap. 1.2.2 können während der Betriebsphase prinzipiell allen im Kap. 1.2.1 definierten Belastungsbildern sowie deren Kombination untereinander ausgesetzt sein. Bei der hier durchgeführten generischen Betrachtung der störfallbedingten Auswirkungen auf die Langzeitsicherheitsfunktionen sind die Auswirkungen infolge kombinierter Ereignisse durch die Auswirkungen der Einzelereignisse abgedeckt, bzw. die bei den Einzelereignissen erläuterten Massnahmen zur Wiederherstellung der Sicherheitsfunktion können auch bei kombinierten Ereignissen in gleicher Weise Anwendung finden. Aufgrund der sicherheitsoptimierten Anlagenauslegung und den durch eine entsprechende Sicherheitskultur geprägten Betriebsabläufen ist das bei den Belastungsbildern zu unterstellende Belastungsausmass zuverlässig begrenzt⁵. Nach einer allgemeinen Einordnung (Kap. 2.1) werden die technischen und geologischen Barrieren separat⁶ bewertet. Dies beinhaltet:

- die Darlegung der störfallbedingten Konsequenzen auf den Zustand der Barriere und deren Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktionen,
- die Ableitung und qualitative Bewertung von Massnahmen zur Wiederherstellung der Sicherheitsfunktion und damit der Gewährleistung der LZS (nach dem Störfall) und
- eine quantitative sicherheitstechnische Einordnung der Auswirkungen (ohne Umsetzung von Massnahmen), basierend anhand eines abdeckenden im LZS-Nachweis (Nagra 2024c) zugrunde gelegten Sicherheitsszenario⁷.

2.1 Allgemeine Einordnung

Alle Rohmaterialien und Komponenten der technischen Barrieren können stets – sollten sie durch einen Störfall betroffen sein – im Hinblick auf allfällige negative Auswirkungen geprüft und bei Bedarf entweder repariert oder ersetzt und damit nicht weiter genutzt bzw. verbaut werden. Dies betrifft beispielsweise die diversen Rohmaterialien für die Verfüllung oder den Verschluss. Die Massnahme des Ersatzes oder Austausches von Materialien und Komponenten vor deren finaler Verwendung stellt eine einfache, sichere und stets umsetzbare Massnahme dar, die unabhängig vom zu betrachtenden Störfall angewandt werden kann.

Es ist zu beachten, dass während der Betriebsphase aufgrund der geringen Häufigkeit der Störfälle – wenn überhaupt – nur sehr wenig Störfälle auftreten, die zudem aufgrund der Auslegung der Anlage das Potenzial haben, die Sicherheitsfunktionen von Barrieren des Mehrfachbarrierensystems (nachhaltig) zu beeinträchtigen. Würde ein Störfall mit Auswirkungen auf die nukleare Betriebssicherheit, den Strahlenschutz oder die LZS auftreten, würde dieser analysiert und ausgewertet, sodass neben der Bewältigung und der Wiederherstellung des erforderlichen Zustands ggf. auch zusätzliche Massnahmen zur Vermeidung des erneuten Eintretens des Ereignisses getroffen werden. Die Anzahl der bei einem Störfall betroffenen Elemente (einer Barriere) ist sehr begrenzt, sodass am Ende der Einlagerungsphase auch die Gesamtzahl betroffener Elemente, die in einem Störfall involviert waren und für die ggf. Massnahmen umgesetzt wurden, sehr begrenzt sein wird.

⁵ Beispielsweise werden bei der Auslegung Absturzhöhen begrenzt, so dass die verbleibenden mechanischen Belastungen (z.B. auf einen ELB) begrenzt sind.

⁶ Dies bedeutet nicht, dass nur eine Barriere bei einem Störfall betroffen ist. Es können auch mehrere Barrieren betroffen sein (z.B. beim Fahrzeugbrand ist neben dem geladenen ELB ggf. auch der Opalinuston der thermischen Belastung ausgesetzt. Die Auswirkungen und Massnahmen können jedoch separat je Barriere diskutiert werden.

⁷ Die Sicherheitsszenarien, die Ungewissheiten und Entwicklungen mit potenziellen Auswirkungen auf die LZS betrachten (inkl. «What-If» Szenarien), geben eine abdeckende Einordnung der betriebsbedingten Auswirkungen.

Der Schutz der Abfälle und der technischen Barrieren (ELB, Verfüllmaterial und Verschlusssystem) sowie auch der geologischen Barrieren wird bereits während des Betriebs kontinuierlich erhöht (siehe Fig. 2-1). Die in verfüllten und verschlossenen Lagerkammern eingelagerten ELB sind durch die passiven Barrieren Verfüllung und Verschluss vor Störfällen während der Betriebsphase sehr gut geschützt. Dies gilt auch für die Verfüllung, die durch das Verschlusssystem geschützt wird. Insbesondere beim HAA-Lager wird zudem das hinten liegende Verfüllmaterial durch das davor liegende Material geschützt (welches bei Bedarf entfernt und ersetzt werden kann). Folglich kann nach dem Verschluss der Lagerkammern ein Störfall nur in unmittelbarer Nähe des Verschlussbauwerks zu Auswirkungen führen, nicht aber auf die dahinterliegenden, geschützten technischen (z. B. ELB und Verfüllmaterial) oder geologische Barrieren.

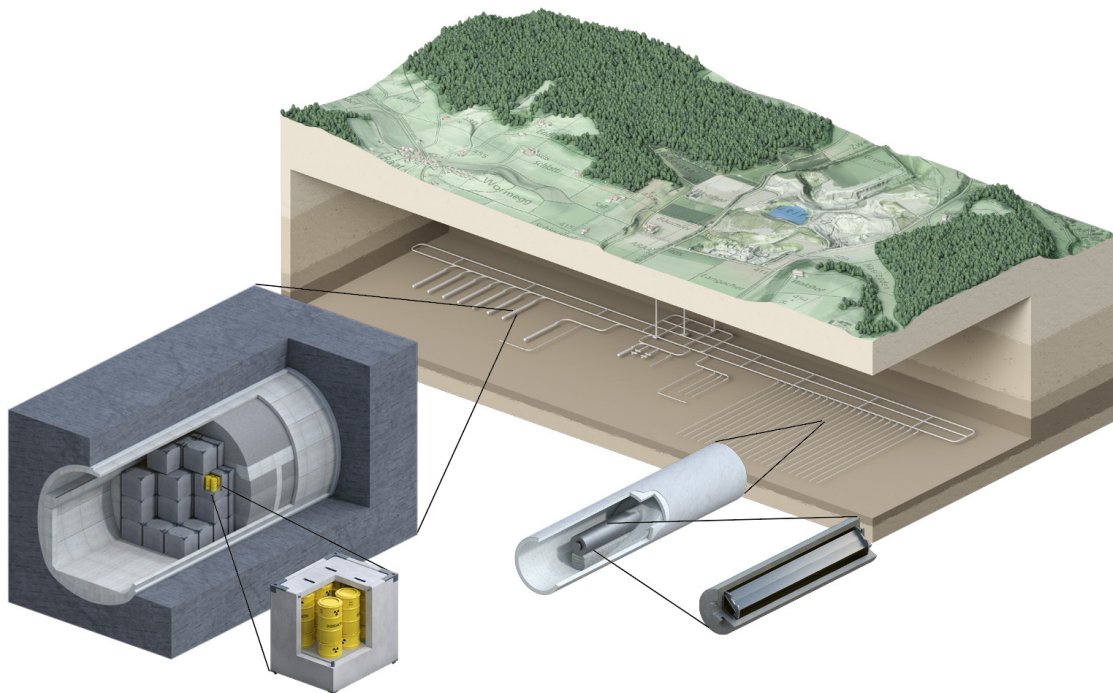


Fig. 2-1: Schematische Illustration des Mehrfachbarrierensystems für die Nachverschlussphase gemäss den aktuell verfolgten Lagerkonzepten für HAA und SMA am Standort Haberstal

2.2 SMA-Endlagerbehälter

Da von den SMA-ELB im LZS-Nachweis kein expliziter Kredit bezüglich der Sicherheitsfunktionen der *Immobilisierung und Rückhaltung* genommen wird, werden potenzielle Auswirkungen auf einen SMA-ELB infolge eines betrieblichen Störfalls nicht weiter betrachtet. Die Sicherheitsfunktion der *Kompatibilität* kann aufgrund der auch nach dem Störfall gleichbleibenden Materialien zudem weiterhin gewährleistet werden.

2.3 HAA-Endlagerbehälter

Störfallbedingte Konsequenzen und Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion

Nach einem Störfall werden nur intakte ELB eingelagert, sodass zu Beginn der Nachverschlussphase die Sicherheitsfunktionen des *vollständigen Einschlusses* und damit die *Rückhaltung* der Radionuklide durch den Behälter sicher gewährleistet sind. Jedoch kann aufgrund von mechanisch und/oder thermisch induzierten Spannungen oder (plastischen) Deformationen (z. B. Kratzer als Angriffspunkt für Korrosion) infolge eines Störfalls die Lebensdauer des betroffenen Behälters ggf. reduziert sein.

Belastungen infolge Flüssigkeiten können aufgrund der robusten und dichten ELB-Auslegung vernachlässigt werden, da von keinen Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktionen auszugehen ist. Die Sicherheitsfunktion der *Kompatibilität* der Barrieren des Mehrfachbarrierensystems untereinander kann aufgrund der auch nach dem Störfall gleichbleibenden Materialien weiterhin gewährleistet werden.

Allfällige Massnahmen

Der in einem Störfall betroffene ELB kann mit den vorhandenen Systemen und Geräten jederzeit (auch nach der Verfüllung) zurückgeholt, geprüft und, falls erforderlich, entsprechende Instandsetzungs- oder Reinigungsmassnahmen durchgeführt werden. Dies beinhaltet u. a. die Entfernung sich ggf. auf die LZS ungünstig auswirkender Stoffe (z. B. Russ, Löschmitteln oder Hydrauliköl) und in letzter Instanz auch den Ersatz des ELB. Die zu treffenden Massnahmen sind situativ zu prüfen, und deren Nutzen in Bezug zu anderen Aspekten (z. B. Strahlenschutz) ist abzuwägen. Es werden somit keine Auswirkungen auf die LZS des gesamten verschlossenen gTL erwartet.

Quantitative Bewertung (im Rahmen des LZS-Nachweises)

In der Langzeitsicherheitsanalyse zur Prüfung der Robustheit des Gesamtsystems⁸ wird ein Sicherheitsszenario betrachtet, bei dem für *alle* ELB eine gegenüber der erwartenden Lebensdauer reduzierte Lebensdauer unterstellt wird⁹. Aufgrund dieser Annahme im LZS-Nachweis, die konservativ abdeckend im Vergleich zu der geringen, bei einem Störfall betroffenen Anzahl von ELB angesehen werden kann und für die das Dosisschutzkriterium nachweislich eingehalten wird, ist eine weitergehende Analyse der Auswirkungen nicht erforderlich.

2.4 Verfüllmaterial der SMA-Lagerkavernen

Störfallbedingte Konsequenzen und Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion

Infolge von mechanisch und/oder thermisch induzierten Spannungen oder (plastischen) Deformationen infolge eines Störfalls können ggf. die Eigenschaften des Verfüllmaterials und damit die an das Material gestellten Sicherheitsfunktionen beeinflusst werden. Insbesondere können lokal, am Ort der störfallbedingten Belastungen Rissbildung und Abplatzungen ggf. nicht ausgeschlossen werden¹⁰. All dies kann lokal evtl. zu einer Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktion *Immobilisierung und Rückhaltung* führen.

⁸ Gesamtsystem meint das verschlossene gTL, in dem das Mehrfachbarrierensystems realisiert wurde.

⁹ What-If-Case: *Early failure of canister at 1'000 years*, Nagra (2024d).

¹⁰ Beispielsweise infolge eines Absturzes oder Anpralls bei der Einlagerung der ELB in der Lagerkaverne mit dem vorhandenen Verfüllmaterial.

Die Sicherheitsfunktion der *Kompatibilität* der Barrieren des Mehrfachbarrierensystems untereinander kann aufgrund der auch nach dem Störfall gleichbleibenden Materialien weiterhin gewährleistet werden.

Das Verfüllmaterial ist im Allgemeinen stabil gegenüber Belastungen durch Flüssigkeiten (i. A. Berg-/Prozesswasser). Eine Beeinträchtigung der Geochemie durch den Eintrag von Stoffen, die die Chemie / Kompatibilität signifikant beeinflusst (beispielsweise Hydrauliköl), kann zwar nicht ausgeschlossen werden, das Ausmass, d. h. die Menge und damit die betroffene Fläche oder das betroffene Volumen, ist aber begrenzt.

Allfällige Massnahmen

Im Hinblick auf den LZS-Nachweis sind störfallbedingte Auswirkungen bzgl. dem Verfüllmaterial nicht von Bedeutung, da die lokalen Schäden – sollte es erforderlich sein – infolge Inspektion und ggf. anschliessender Instandsetzungs- oder Reinigungsmaßnahmen ermittelt, bewertet und, falls notwendig, reduziert oder ganz behoben werden können (z. B. Nachverfüllung oder Entfernung und Ersatz des beschädigten Materials). Es werden somit keine Auswirkungen auf die LZS des gesamten verschlossenen gTL erwartet.

Quantitative Bewertung (im Rahmen des LZS-Nachweises)

In der Langzeitsicherheitsanalyse werden zur Prüfung der Robustheit des Gesamtsystems Szenarien betrachtet, bei denen flächendeckend ungünstige Eigenschaften bzgl. dem Transport, der Rückhaltung und Immobilisierung der Radionuklide im Nahfeld (d. h. im Verfüllmaterial) unterstellt werden¹¹. Aufgrund dieser Annahmen, die bzgl. der (räumlich) begrenzten Auswirkungen des im Störfall betroffenen Verfüllmaterials als abdeckend angesehen werden können, ist eine weitergehende Analyse der Auswirkungen nicht erforderlich.

2.5 Verfüllmaterial der HAA-Lagerstollen

Störfallbedingte Konsequenzen und Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion

Unabhängig vom Ausmass der Belastungen beschränkt sich die Einwirkung auf das Verfüllmaterial auf die zugänglichen Randbereiche der Barriere (hin zum offenen Lagerstollen, vgl. Fig. 2-1), die prozessbedingt noch nicht vollständig die an sie gestellten Anforderungen erfüllen (beispielsweise die Schüttdichte). Mechanische und/oder thermische Belastungen können zudem nur beim Prozess der Verfüllung selbst oder der Einlagerung auftreten.

Rein mechanische Belastungen können zu einer Änderung des Schüttwinkels (Abrutschen) und lokal zu Veränderungen der Dichte in den Randbereichen der Barriere führen. Diese Änderungen werden jedoch mit der nachfolgenden Verfüllkampagne, in der die erforderliche Schüttdichte in den Randbereichen überhaupt erst erzeugt wird, behoben, sodass von keinen bedeutenden Auswirkungen bzgl. der LZS (*Immobilisierung und Rückhaltung*) auszugehen ist.

Thermische Belastungen können ggf. die Eigenschaften des Verfüllmaterials (chemische Eigenschaften, Mineralumwandlung) beeinflussen, welche sich negativ auf die *Kompatibilität* des Materials und auf die Eigenschaften der *Immobilisierung und Rückhaltung* auswirken können; dies auch unter Berücksichtigung der Verschmutzung mit Russ oder Löschmitteln.

Das eingebrachte, verdichtete Verfüllmaterial ist im Allgemeinen stabil gegenüber Belastungen durch Flüssigkeiten (i. A. Berg-/Prozesswasser). Eine aus Sicht LZS gewünschte Folge bei Kontakt mit wässrigen Medien ist das Aufquellen und die Selbstabdichtung des Materials, was unmit-

¹¹ What-If-Case: *No near-field sorption in L/ILW disposal section*, Nagra (2024d).

telbar zu einer begrenzten Wasserausbreitung im Verfüllmaterial führt. Eine allfällige inhomogene Aufsättigung kann sich hingegen negativ auf die Homogenität der gesamten Verfüllung auswirken und so unter Umständen die Sicherheitsfunktionen *Immobilisierung und Rückhaltung* beeinflussen. Eine durch Eintrag von flüssigen Stoffen induzierte Beeinträchtigung der geochemischen Verhältnisse kann auch im HAA-Lager nicht ausgeschlossen werden, wobei die betroffene Fläche bzw. das betroffene Volumen ebenfalls begrenzt sind.

Allfällige Massnahmen

Im Hinblick auf den LZS-Nachweis sind störfallbedingte Auswirkungen bzgl. dem Verfüllmaterial nicht von Bedeutung, da die lokalen Schäden – sollte es erforderlich sein – infolge Inspektion und ggf. anschliessender Instandsetzungsmassnahmen ermittelt, bewertet und falls notwendig behoben werden können (z. B. Entfernung und Ersatz des beschädigten Materials). Es werden somit keine Auswirkungen auf die LZS des gesamten verschlossenen gTL erwartet.

Quantitative Bewertung (im Rahmen des LZS-Nachweises)

In der Langzeitsicherheitsanalyse zur Prüfung der Robustheit des Gesamtsystems werden Szenarien betrachtet, bei denen flächendeckend ungünstige Eigenschaften bzgl. dem Transport, der Rückhaltung und Immobilisierung der Radionuklide im Verfüllmaterial unterstellt werden¹². Aufgrund dieser Annahmen, die bzgl. der (räumlich) begrenzten Auswirkungen des im Störfall betroffenen Verfüllmaterials abdeckend angesehen werden können, ist eine weitergehende Analyse der Auswirkungen nicht erforderlich.

2.6 Verschlussystem

Störfallbedingte Konsequenzen und Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion

Da die an das Verschlussystem gestellten Sicherheitsfunktionen gleich sind wie bei den Verfüllmaterialien der Lagerkammern (vgl. Tab. 1-1) sind auch die infolge eines Störfalls zu erwartenden Auswirkungen auf die LZS als vergleichbar anzunehmen, sodass auf die in Kap. 2.4 und 2.5 dokumentierten Konsequenzen und Auswirkungen verwiesen wird. Dies gilt analog auch für die zusätzliche Funktion des Verschlussystems: die *Isolation vom Lebensraum*.

Allfällige Massnahmen

Ereignisse bzw. Störfälle können auf das Verschlussystem nur auf der zugänglichen Seite der Barriere einwirken. Im Hinblick auf den LZS-Nachweis sind diese störfallbedingten Auswirkungen nicht von Bedeutung, da die lokalen Schäden – sollte es erforderlich sein – infolge Inspektion und ggf. anschliessender Instandsetzungs- oder Reinigungsmassnahmen ermittelt, bewertet und, falls notwendig, reduziert oder ganz behoben werden können (z. B. Entfernung und Ersatz des beschädigten Materials). Es werden somit keine Auswirkungen auf die LZS des gesamten verschlossenen gTL erwartet.

¹² What-If-Cases: (i) *no solubility limits*, (ii) *no sorption in the near-field*, (iii) *hypothetically high diffusion coefficients* or (iv) *a hypothetically high permeability of the bentonite buffer*, Nagra (2024d).

Quantitative Bewertung (im Rahmen des LZS-Nachweises)

In der Langzeitsicherheitsanalyse werden zur Prüfung der Robustheit des Gesamtsystems Szenarien analysiert und bewertet, bei denen ein Versagen des Verschlusssystems angenommen wird¹³. Solche Betrachtungen können konservativ abdeckend im Vergleich zu (einem) lokal, an der noch zugänglichen Seite beeinträchtigten Verschlussbauwerk angesehen werden. Eine weitergehende Analyse der Auswirkungen ist nicht erforderlich.

2.7 Einschlusswirksamer Bereich

In diesem Kapitel wird der einschlusswirksame Bereich betrachtet. Die relevanten, zu bewertenden Zustände sind die unverfüllten und unverschlossenen Tunnel und Hohlräume auf Lagerebene. Die nachfolgende Bewertung bezieht sich im Speziellen auf die primär für die LZS-relevanten Tunnel und Hohlräume wie Lagerkammern und Lagerfelder (bzw. die Tunnelwände). Die vorgestellten Massnahmen sind jedoch auf alle untertägigen Tunnel und Hohlräume übertragbar und – soweit sinnvoll – anwendbar.

Störfallbedingte Konsequenzen und Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion

Störfälle durch EVI sind grundsätzlich lokal und räumlich begrenzt und können daher auch nur lokal, am Ort des Ereignisses oder Störfalls Auswirkungen auf die Eigenschaften und Sicherheitsfunktionen des einschlusswirksamen Bereichs haben. Insbesondere ist hervorzuheben, dass – wenn überhaupt – nur der oberflächennahe Bereich i. d. R. unmittelbar beim Ort der Einwirkung betroffen ist. Das bedeutet auch, dass allfällige Schäden und Auswirkungen nur im (oberflächen-nahen) Bereich der bereits bau- und betriebsbedingt vorhandenen Auflockerungszone zu erwarten sind. Infolge des Ausbaus der untertägigen Anlage wirken potenzielle Belastungen zudem primär auf den Ausbau ein (z. B. Betonschalung) und nicht bzw. nur in reduzierter, abgeschwächter Form auf den einschlusswirksamen Bereich selbst¹⁴.

Mechanische Belastungen können prinzipiell zu Rissbildungen und Abplatzungen im Bereich der Einwirkungen (Betonschalung) führen. Insbesondere wäre hier ein Abplatzen / Niederbruch an der Tunneldecke (First) bedeutsam, da dies die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Bereichs (leicht) reduziert¹⁵ und damit den Transportpfad der Radionuklide durch diesen Bereich theoretisch verringert. Bei thermischer Belastung ist lokal mit einer (weiteren) thermischen Konsolidierung oder Versprödung des Opalinustons zu rechnen, ggf. auch mit Abplatzungen und Ablagerung von Russ, wobei Temperaturen deutlich über 100 °C auch zu einer Umwandlung von Tonmineralen führen können. Dies kann sich ggf. lokal auf die Eigenschaften der *Immobilisierung und Rückhaltung* auswirken, wird aber global die Sicherheitsfunktion nicht beeinträchtigen.

Eine aus Sicht LZS gewünschte Folge bei Kontakt mit wässrigen Medien ist das Aufquellen und die Selbstabdichtung des Opalinustons, was unmittelbar zu einer begrenzten Wasserausbreitung führt. Bei bereits verfüllten Hohlräumen und Tunneln (insbesondere HAA-Lagerstollen) sorgt der Wasserzutritt und die damit verbundene Aufsättigung zudem dafür, dass die bau- und betriebsbedingt vorhandene Auflockerungszone dank der kombinierten Wirkung des Selbstabdichtungsvermögens des Opalinustons und des Quellvermögens der Verfüllung behoben und die anfänglich hohe hydraulische Durchlässigkeit der ehemaligen Auflockerungszone stark reduziert wird (was die *Immobilisierung und Rückhaltung* der Radionuklide unterstützt).

¹³ What-If-Cases: *failure of the closure system leads to five calculation cases with hypothetically high permeabilities for the different types and locations of seals. In these cases, each seal is conceptually removed, such that the material assumes the same properties as that of the adjacent back-fill*, Nagra (2024d).

¹⁴ Beispielsweise wird bei einem Fahrzeugunfall (Kollision mit Tunnelwand) die Energie primär durch das Fahrzeug selbst und die Betonschalung in Form von Verformungen (plastische Deformationen) absorbiert.

¹⁵ Im Bereich von einigen cm bis wenige dm.

Betriebsbedingte Störfälle, die – wie dargelegt – lediglich lokal auf den einschlusswirksamen Bereich einwirken können, besitzen nicht das Potenzial, die an den einschlusswirksamen Bereich gestellten Sicherheitsfunktionen *Isolation* und *Langzeitstabilität* zu beeinträchtigen.

Die infolge lokaler Störfälle (d. h. infolge EVI) verursachte Schäden am einschlusswirksamen Bereich können auch als Folge eines Erdbebens (d. h. infolge EVA) in gleicher Art und Ausprägung auftreten, sodass zur Bewältigung in Bezug auf die LZS die gleichen nachfolgend aufgezählten Massnahmen angewendet werden können¹⁶. Zudem sorgen die Verfüllung und das Verschlussystem neben dem Schutz der technischen Barrieren auch für eine Stützwirkung (mechanische Stabilisierung) gegenüber dem einschlusswirksamen Bereich, sodass bedeutende, die LZS beeinflussende, erdbebenbedingte Schäden in den verfüllten Bereichen des gTL vermieden bzw. durch die Eigenschaft der Selbstabdichtung intrinsisch behoben werden. In noch unverfüllten Bereichen können jedoch, insbesondere bei sehr seltenen Erdbeben, weitergehende Schäden nicht ausgeschlossen werden. Diese möglicherweise zu erwartenden Schäden sind beispielsweise weiter in den einschlusswirksamen Bereich hineinreichende strukturelle Änderungen bzw. Deformationen wie verästelte Risse, Versatz oder Auflockerungen sowie ggf. ein Einsturz eines Tunnels.

Allfällige Massnahmen

Infolge der Mächtigkeit des einschlusswirksamen Bereichs und der bei EVI ausschliesslich lokal auftretenden sowie im Ausmass begrenzt zu erwartenden Belastungen beschränken sich die Auswirkungen auf reparierbare bzw. unbedeutende Schäden¹⁷ an der Oberfläche der Tunnelwände, die aufgrund der begrenzten Lokalität und begrenzten Eindringtiefe in den Opalinuston entweder behoben (Nachschnitt bzw. Ausbesserung) oder toleriert werden können. In der Regel werden sich die Schäden auf die Betonschalung beschränken, ohne Auswirkungen auf den einschlusswirksamen Bereich. Im Fall von Niederbrüchen oder weitergehenden Schäden – insbesondere im Einlagerungsbereich – ist auch eine (grossräumige) Verfüllung der betroffenen Bereiche um den Ort des Ereignisses ohne Einlagerung radioaktiver Abfälle denkbar, d. h. situativ abzuwägen. Es werden somit keine Auswirkungen auf die LZS des gesamten verschlossenen gTL erwartet.

Quantitative Bewertung (im Rahmen des LZS-Nachweises)

Im LZS-Nachweis deckt insbesondere der Rechenfall der flächendeckend reduzierten Dicke des einschlusswirksamen Bereichs¹⁸ die Auswirkungen infolge von Störfällen ab. Zudem werden weitere Rechenfälle zur Berücksichtigung von Ungenauigkeit der Exploration sowie allgemein der Ungewissheiten betrachtet (Nagra 2024d). Dazu zählen (i) ein erhöhter Wasserfluss durch den einschlusswirksamen Bereich, (ii) ungünstige Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre und (iii) ungünstige Eigenschaften im Nah- und Fernfeld betreffend Sorption. Diese konservativen, den ganzen einschlusswirksamen Bereich betreffende Rechenfälle relativieren die betriebs- oder störfallbedingt lokal auftretenden Auswirkungen bzw. decken diese bei Weitem ab.

¹⁶ Diese Aussage gilt analog auch für die technischen Barrieren und deren Massnahmen aus Kap. 2.3 bis 2.6.

¹⁷ Reparierbare bzw. unbedeutende Schäden an der Oberfläche der Tunnelwände sind lokal begrenzte Schäden wie beispielsweise kleine Risse oder Abplatzungen, die nicht weit in den einschlusswirksamen Bereich hineinreichen (bzw. auf die Ausdehnung der bereits vorhandenen Auflockerungszone beschränkt sind). Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung des Ausbaus (Betonschalung) der Tunnel und Hohlräume.

¹⁸ Reference safety scenario: (i) *a single sensitive parameter (e.g. thickness) is set to its conservative, bounding value*, (ii) *all sensitive parameters are set to their unfavourable bounding values* and (iii) *upper and lower confining units disregarded*, Nagra (2024d).

Die in der LZS-Analyse zur Prüfung der Robustheit des Gesamtsystems verwendeten Sicherheits-szenarien können einzeln und in ihrer Gesamtheit auch in Bezug auf das Erdbeben herangezogen werden. Dies betrifft insbesondere die Rechenfälle, bei denen die Auswirkungen von beispielsweise einer (ereignisbedingt) neuen oder reaktivierten Störung mit mangelnder Selbstabdichtung bewertet werden¹⁹ und womit u. a. eine Reduzierung der Länge bzw. die Rückhaltewirkung der Radionuklidtransportpfade abgedeckt wird. Zudem werden auch Rechenfälle infolge unverfüllter und unverschlossener Tunnel bewertet²⁰. Letzteres deckt den Einsturz eines oder mehrerer Tunnel über grössere Strecken ab. Der Einfluss eines Erdbebens auf ein verschlossenes (oder aufgegebenes) Tiefenlager ist somit durch die Sicherheitsszenarien der LZS, für die quantitativ nachgewiesen werden kann, dass das Dosischutzkriterium eingehalten wird, abgedeckt.

2.8 Fazit

Störfälle während der Betriebsphase können ggf. die Sicherheitsfunktionen einzelner betroffener LZS- Barrieren beeinflussen, es stehen aber – neben vorbeugenden Massnahmen zur Vermeidung der Störfälle – je nach Ausmass und Barriere weitere Massnahmen zur Verfügung, um eine nachhaltige bzw. bedeutende Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen zu beheben bzw. im Gesamtsystem (des Mehrfachbarrierensystems) ein sicheres gTL zu realisieren. Es sind somit keine sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen auf die LZS des gesamten verschlossenen gTL zu unterstellen. Der Schutz von Mensch und Umwelt nach Verschluss des gTL kann gewährleistet werden.

Dies wird auch quantitativ durch die im LZS-Nachweis zugrunde liegenden Sicherheitsszenarien – die z. T. mit ihren konservativen Annahmen die störfallbedingten Auswirkungen weit überschreiten – bestätigt, das Dosischutzkriterium wird auch für diese Rechenfälle eingehalten.

¹⁹ What-If-Case: *generation of a new fault or the re-activation of an existing, non-transmissive fault*, Nagra (2024d).

²⁰ Future human action scenario: *Repository abandonment*, Nagra (2024e).

3 Literaturverzeichnis

- 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.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Nagra (2024a): Development of Safety Scenarios. Nagra Technical Report NTB 24-21.
- Nagra (2024b): Generische Sicherheitsbetrachtungen der Einwirkungen von innen für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-02.
- Nagra (2024c): Post-closure safety report. Nagra Technical Report NTB 24-10.
- Nagra (2024d): Radiological Consequence Analysis for a Deep Geological Repository in Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-18.
- Nagra (2024e): Radiological Consequences of Future Human Actions. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-09.
- Nagra (2024f): Safety and Repository Concept and Provisional Design. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-18 Rev. 1.
- Nagra (2025): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-01.
- UVEK (2009): Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen vom 17. Juni 2009, Stand am 1. Februar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts, SR 732.112.2, Schweiz.