



ARBEITSBERICHT NAB 24-02

Generische Sicherheitsbetrachtungen der
Einwirkungen von innen für ein
geologisches Tiefenlager

September 2024



ARBEITSBERICHT NAB 24-02

Generische Sicherheitsbetrachtungen der
Einwirkungen von innen für ein
geologisches Tiefenlager

September 2024

STICHWÖRTER

Betriebssicherheit, Sicherheitsbetrachtung, Einwirkungen von
innen, geologisches Tiefenlager

**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

Vorliegender Bericht beinhaltet eine generische Sicherheitsbetrachtung der Einwirkungen von innen für ein geologisches Tiefenlager (gTL). Der Bericht bewertet und legt nachvollziehbar dar, dass die gesetzlichen und behördlichen Anforderungen erfüllbar sind.

Dabei wird bei der Auslegung der Anlage (über- sowie untertag) auf eine langjährige, breite und weltweite Erfahrungsbasis sowohl von Zwischenlagern (übertag) als auch vergleichbaren Projekten (untertag, Tiefenlager, Tunnel, Minen) zurückgegriffen, mit der das gesamte Spektrum der potenziell vorkommenden intern auslösenden Ereignissen bereits konstruktiv vermieden oder deren Weiterentwicklung zu radiologischen Störfällen verhindert sowie entstandene Störfälle beherrscht, beendet und eine unzulässige Freisetzung zuverlässig vermieden wird. Dies wird einerseits durch eine geeignete bautechnische Auslegung und andererseits durch zuverlässig ausgelegte mechanisch-elektrische Hebe-/Transportfahrzeuge und Ausrüstungen sowie durch eine entsprechende Qualifikation des Personals sichergestellt.

Im gTL werden ausschliesslich in Endlagerbehälter verpackte Abfälle gehandhabt, die zum Teil noch zusätzlich durch Transportbehälter geschützt werden. Der Einschluss der Abfälle in Endlagerbehälter und der zusätzliche Schutz durch Transportbehälter stellen das hauptsächliche Sicherheitsdispositiv dar. Die Behälter – insbesondere für die hochaktiven Abfälle – sind so ausgelegt und geprüft, dass sie – in Verbindung mit den auslegungsbedingt nur begrenzt auftretenden Belastungen innerhalb des gTL – auch im Fall eines Störfalls intakt bleiben. Folglich ist der Einschluss der radioaktiven Stoffe sichergestellt und eine Freisetzung ausgeschlossen. Einzig bei der Schachtförderung der radioaktiven Abfälle nach untertag kann derzeit – im Rahmenbewilligungsgesuch ist die Anlage in den Grundzügen darzulegen – eine ereignisbedingte Freisetzung nicht in allen Fällen vollständig ausgeschlossen werden. Das bei einem solchen Ereignis jedoch betroffene Nuklidinventar ist auslegungsbedingt auf die geförderten Endlagerbehälter begrenzt. Mit einer sicherheitsoptimierten Auslegung, Konstruktion und Ausführung der Schachtförderanlage und ihrer Systeme und Komponenten sowie der qualitätssichernden Massnahmen beim Betrieb (periodischer Wartung und Instandhaltung) wird eine unzulässige Freisetzung von Radionukliden in die Umwelt aber verhindert, sodass die Dosisgrenzwerte nach Art. 123 StSV in jedem Fall eingehalten bzw. weit unterschritten werden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Vorgehen und Grundlagen der Sicherheitsbetrachtung	1
1.2 Randbedingungen und Massnahmen	2
1.3 Ermittlung des Spektrums bzgl. der Einwirkungen von innen	3
2 Ergebnisse der Sicherheitsbetrachtung	5
2.1 Reaktivitätsstörung und Verlust der Wärmesenke.....	5
2.2 Anlageninterner Brand und Explosion	5
2.3 Anlageninterne Überflutung	6
2.4 Fehlhandlungen des Personals (inkl. beeinträchtigtes Personal)	7
2.5 Fehlerhafte Handhabung von radioaktivem Material	8
2.6 Abweichungen bzw. Nichterfüllung der Annahmebedingungen.....	8
2.7 Versagen oder Fehlfunktion von Betriebssystemen: Transport-, Hebe- und Handhabungsmitteln	9
2.8 Versagen oder Fehlfunktion von Betriebssystemen: Störfälle im Rahmen des ELB-Schachttransports	10
2.9 Versagen oder Fehlfunktion von Betriebssystemen: Stromversorgung.....	11
2.10 Komponentenversagen	11
3 Literaturverzeichnis	13

Abkürzungsverzeichnis

ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EVA	Einwirkungen von aussen
EVI	Einwirkungen von innen
gTL	Geologisches Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
KEG	Kernenergiegesetz
OFA	Oberflächenanlage
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SSK	Strukturen, Systeme und Komponenten
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TB	Transportbehälter

1 Einleitung

In diesem Bericht wird die in ENSI (2018) geforderte generische Sicherheitsbetrachtung bzgl. der Einwirkungen von innen (EVI) für ein geologisches Tiefenlager¹ (gTL) dokumentiert². Die Sicherheitsbetrachtung zeigt im Zuge des Rahmenbewilligungsgesuchs auf, dass allfällige EVI mit etablierten Massnahmen beherrschbar sind und die sicherheitstechnische Machbarkeit gegeben ist.

1.1 Vorgehen und Grundlagen der Sicherheitsbetrachtung

Die Sicherheitsbetrachtung basiert auf der systematischen Charakterisierung und Bewertung der im Störfallspektrum identifizierten EVI (siehe Kap. 1.3) unter Einbezug des in Nagra (2024) für das gTL zugrunde liegenden exemplarischen Anlagen- und Betriebskonzepts. Der Fokus liegt auf der Identifizierung betrieblich nicht vorgesehener innerer Einwirkungen und der daraus resultierenden Belastungen (mechanisch und/oder thermisch) der in Endlagerbehältern³ verpackten radioaktiven Abfälle, die unter Umständen zu einer Reduzierung oder zum Verlust der Abschirmwirkung oder zu einer Freisetzung von Radionukliden (innerhalb / ausserhalb der Anlage) führen. Ziel ist es, eine unzulässige störfallbedingte Direktstrahlung oder Freisetzung radioaktiver Stoffe für das strahlenexponierte Personal in der Anlage bzw. für die Bevölkerung in der Umgebung durch eine sicherheitsgerichtete Auslegung und Betrieb der Anlage zu vermeiden bzw. zu begrenzen. Es wird plausibel aufgezeigt, dass die Schutzziele (siehe Nagra (2025a)) eingehalten werden können. Die dabei aufgezeigten Massnahmen dienen somit der Reduzierung der Häufigkeit und/oder des Ausmasses bzw. der Konsequenzen des betrachteten Ereignisses. Die finale Ausgestaltung und Funktionalität der Massnahmen erfolgt nach Kernenergiegesetz im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens.

Einordnung Betriebsphase

Die Betriebsphase beginnt mit der Betriebsbewilligung und endet mit dem ordnungsgemässen Verschluss des Tiefenlagers (ENSI 2020). Da die Hauptaktivitäten in der Einlagerungsphase stattfinden, fokussiert sich die in diesem Bericht dokumentierte Sicherheitsbetrachtung auf diese Phase. In der sich anschliessenden Beobachtungs- und Verschlussphase befinden sich alle radioaktiven Abfälle in den Lagerkammern, die durch die während der Einlagerungsphase erstellten Verfüll- und Verschlussbauwerke der Lagerkammern passiv vor Einwirkungen geschützt sind. Für die Lesbarkeit wird vereinfacht vom «Betrieb» des geologischen Tiefenlagers geschrieben.

¹ Für die Lesbarkeit wird im Bericht vereinfacht von «geologischen Tiefenlager» geschrieben. Diese Terminologie umfasst sowohl die Definition nach Art. 64 KEV – «Ein geologisches Tiefenlager besteht aus dem Hauptlager zur Aufnahme der radioaktiven Abfälle, aus einem Pilotlager und aus Testbereichen» – als auch die weiteren Bauten auf Lagerebene, die Zugangsbauwerke sowie der Oberflächenanlage.

² Eine standortspezifische Charakterisierung der Einwirkungen von aussen (EVA) erfolgt mit der Charakterisierung und Bewertung der Standorteignung in Nagra (2025a).

³ Die Endlagerbehälter (ELB) sind zum Teil zum Schutz und zur Abschirmung zusätzlich in robusten Transportbehältern (TB) verpackt, dies betrifft insbesondere die HAA-ELB.

1.2 Randbedingungen und Massnahmen

Im Folgenden werden relevante Randbedingungen und Massnahmen aufgelistet, die der Sicherheitsbetrachtung zugrunde liegen:

- Die Sicherheitsbetrachtung erfolgt für ein gTL mit voneinander ausreichend räumlich getrennten SMA- und HAA-Lagerteilen. Das zugrunde liegende Anlagen- und Betriebskonzept des gTL ist in Nagra (2024) dokumentiert.
- Die Verpackung der Abfallgebinde in ELB erfolgt am Standort Zwiilag (Nagra 2025b).
- Am Standort des gTL werden nur ELB, z. T. verpackt in TB (bei den HAA), gehandhabt. Am Standort sind plangemäss keine Arbeiten an offenen radioaktiven Quellen vorgesehen.
- Die an die Oberflächenanlage angelieferten ELB werden beim Absender bezüglich der Anforderungen an die Annahmebedingungen (z. B. Nachweis der Kontaminationsfreiheit) kontrolliert und freigegeben.
- Die an die Oberflächenanlage angelieferten Transportgebinde erfüllen die Transportvorschriften (ADR 1957, SDR 2002).
- Sicherheits- und strahlenschutztechnische Grundsätze werden bei der Auslegung und bei den Betriebsprozessen wie folgt berücksichtigt:
 - Die verschlossenen ELB (z. T. verpackt in Transportbehältern (TB)) sind robust gegen externe und interne Einwirkungen ausgelegt und nicht brennbar.
 - Die Ortsdosisleistung der ELB – u. a. in Verbindung mit ihren TB – ist begrenzt (entsprechend den Transportbedingungen).
 - Der Bau und die Montage aller relevanten über- und untertägigen Anlagen ist zum Zeitpunkt des jeweiligen Einlagerungsbetriebs (SMA/HAA) vollständig abgeschlossen, die Strukturen, Systeme und Komponenten (SSK) sind entsprechend ihrer Auslegung qualitätsgeprüft, installiert, in Betrieb gesetzt und im Rahmen einer Kaltinbetriebnahme auf Betriebseignung und -sicherheit getestet.
 - Ein Zonenkonzept (Einrichtung von Zonen und Gebieten) wurde entsprechend den strahlenschutztechnischen Anforderungen umgesetzt. Gemäss aktueller Planung (Nagra 2025a) bedeutet dies die Einrichtung von Überwachungsbereichen (d. h. Zone 0). Das gTL ist im Normalbetrieb und bei Betriebsstörungen kontaminationsfrei.
 - Die erforderlichen Prüf-, Wartungs- und Instandhaltungsroutinen sind implementiert.
 - Bei Bedarf besteht die Möglichkeit, den Betrieb (vorbeugend oder im Ereignisfall) jederzeit kontrolliert zu unterbrechen, um eine Beeinträchtigung oder eine Gefährdung des Personals bzw. von Systemen auszuschliessen. Ein paralleles Auftreten von ereignisbedingten Fehlhandlungen bzw. -funktionen lässt sich somit vermeiden.
 - Zugänge für Intervention und Rettung sind vorhanden.
- Die Grundsätze zur Organisation und zum Personal gemäss Nagra (2025a) sind entsprechend umgesetzt. Dies betrifft insbesondere, dass das Personal in ausreichender Anzahl vorhanden, entsprechend qualifiziert, geschult⁴ und ausgerüstet sowie eingewiesen und vertraut mit der Anlage, den Ausrüstungen, dem Betrieb und der Instandhaltung ist.

⁴ Im Betrieb erfolgen periodisch oder nach Bedarf weitere Unterweisungen, Schulungen und Notfallübungen zur Aufrechterhaltung bzw. Aktualisierung des Sicherheitsbewusstseins.

- Der plangemäss während des SMA-Einlagerungsbetriebs zeitgleich stattfindende Bau des HAA-Lagerteils sowie die während des Einlagerungsbetriebs beim HAA-Lagerteil zeitgleich stattfindende Lagererweiterung ist nach aktuellem Projektstand sowohl über- als auch untertag räumlich getrennt von den Überwachungsbereichen, in denen die ELB gehandhabt werden (vgl. auch Nagra 2024). Sicherheitsrelevante Auswirkungen von potenziell möglichen konventionellen Unfällen im Baubereich auf den Einlagerungsbereich bzw. den Einlagerungsbetrieb werden somit im Rahmen dieser Analyse als ausgeschlossen bewertet⁵ bzw. sind durch das inhärent sichere Anlagenverhalten und die Möglichkeit eines kontrollierten Unterbruchs des Einlagerungsbetriebs sicher beherrschbar.

1.3 Ermittlung des Spektrums bzgl. der Einwirkungen von innen

Die Bestimmung des Spektrums der zu unterstellenden Einwirkungen von innen ergibt sich unter Berücksichtigung anlagentechnischer Gegebenheiten. Für die Erstellung des Spektrums werden grundsätzlich die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben und Verordnungen (insbesondere KEG (2003), KEV (2004) und UVEK (2009)) berücksichtigt⁶. Vertiefend werden diese mit allfälligen Vorgaben und Hinweisen von internationalen Fachdokumentationen zum Thema gTL (u. a. IAEA, EGOS⁷) abgeglichen. Als EVI gelten folgende Ereignisse:

- Reaktivitätsstörung
- Verlust der Wärmesenke
- Anlageninterner Brand
- Anlageninterne Explosion
- Anlageninterne Überflutung
- Fehlhandlung des Personals (inkl. beeinträchtigtes Personal)
- Fehlerhafte Handhabung von radioaktivem Material
- Abweichungen bzw. Nichterfüllung der Annahmebedingungen
- Versagen oder Fehlfunktion von Betriebssystemen und
- Komponentenversagen

⁵ Der Bau erfolgt komplett getrennt (ausreichend räumliche Entfernung und/oder physische Trennung) über das separat erschlossene Areal für Bau und Betrieb und dem explizit dafür auf diesem Areal vorgesehenen Bau- und Betriebsschacht sowie den Baubereichen auf Lagerebene. Auf dem Areal für die Einlagerung werden keine Bauaktivitäten während des Einlagerungsbetriebs stattfinden. Weitere Information zur Aufteilung der Aktivitäten sowie ihren Beschrieb finden sich in Nagra (2024) sowie Nagra (2020).

⁶ Dabei wird mindestens auf die in Art. 4 UVEK (Gefährdungsannahmen für Störfälle mit Ursprung innerhalb der Anlage) genannten Störfalltypen sowie weitere anlagenspezifische Störfälle eingegangen, soweit sie für das gTL zutreffen.

⁷ Für die Erstellung der zu berücksichtigenden Ereignisse bzw. Störfälle wurden neben den gesetzlichen und behördlichen Vorgaben auch Unterlagen internationaler Organisationen sowie relevante Projektberichte von vergleichbaren Anlagen (z. B. Endlagerprojekte, Bergbau, Tunnelbau) verwendet. Beispielsweise Expert Group on Operational Safety (EGOS), eine Arbeitsgruppe der NEA: "Hazard Database" für Betriebssicherheitsanalysen eines gTL.

2 Ergebnisse der Sicherheitsbetrachtung

2.1 Reaktivitätsstörung und Verlust der Wärmesenke

Reaktivitätsstörung und Verlust der Wärmesenke sind – wie bereits in Nagra (2025a) ausführlich erläutert – für ein gTL nicht relevant und können daher ausgeschlossen werden.

2.2 Anlageninterner Brand und Explosion

Ziel

Die Entstehung von anlageninternen Bränden oder Explosionen wird durch die Auslegung weitestgehend ausgeschlossen. In den Bereichen, in denen die ELB gehandhabt werden, werden Brandlasten und Zündquellen vermieden bzw. begrenzt, sodass in Verbindung mit den robusten ELB eine Freisetzung radioaktiver Stoffe durch einen Brand verhindert wird.

Massnahmen und generische Bewertung

Die SSK des gTL – übertägig wie untertägig – sind nicht brennbar oder schwer brennbar, wobei nicht brennbare Materialien gemäss z. B. den Brandschutzrichtlinien der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen⁸ verwendet werden. Die Brandlasten werden auf das notwendige Mindestmass begrenzt, sodass keine bedeutenden Mengen an mobilen oder ortsfesten Brandlasten vorhanden sind. Zudem werden in einlagerungsrelevanten Bereichen des gTL – auf Basis der eingesetzten Betriebsmittel – keine bzw. keine bedeutenden Mengen explosionsfähiger Stoffe aufbewahrt oder gehandhabt. Dies gilt insbesondere für den Überwachungsbereich, in denen die ELB gehandhabt werden⁹. Zudem ist die Anzahl der bei einem potenziellen Brand betroffenen Behälter durch das Betriebskonzept, das auf einer bedarfsgerechten Anlieferung, Abfertigung und Einlagerung der ELB basiert, begrenzt¹⁰. Periodisch durchgeführte Brandlastinspektionen verhindern die Akkumulation von deponiertem brennbarem Material, insbesondere im Bereich von Flucht- und Interventionswegen.

Sowohl die konditionierten SMA-Gebinde als auch die HAA selbst sind als nicht brennbar einzustufen. Die Abfälle sind immer in robusten Behältern verpackt, die ebenfalls nicht brennbar sind und zudem einen ausreichenden Schutz gegen allfällige thermische Belastungen bieten. Die Annahmebedingungen schliessen zudem selbstentzündliche oder explosive Stoffe als Abfälle aus.

Durch die Einrichtung von Brandzonen und -abschnitten werden die verbleibenden Brandlasten entsprechend ihrem Gefahrenpotenzial räumlich getrennt. Ein entsprechender Feuerwiderstand der brandabschnittsbegrenzenden Strukturen verhindert eine Brandausbreitung bzw. einen Brandübergreif in benachbarte Bereiche. Dies wird auch dadurch unterstützt, dass die Auslegung und Abstände benachbarter Gebäude an der Oberfläche entsprechend den dann gültigen Richtlinien ausgeführt werden. Alle Bauten sind zudem mit adäquaten Blitzschutzeinrichtungen (intern und extern) ausgerüstet.

⁸ VKF-Brandschutzvorschriften: <https://www.bsvonline.ch/de/vorschriften/#c-richtlinien>

⁹ Es wird nochmal auf die Fussnote 5, d. h. die räumliche Trennung über- wie untertag hingewiesen.

¹⁰ Die in den Lagerkammern befindlichen ELB werden unmittelbar (HAA) oder in Kampanien (SMA/ATA) verfüllt, sodass auch hier eine Begrenzung der im Ereignis betroffenen Anzahl an ELB sichergestellt werden kann. In einer SMA-Lagerkaverne befinden sich zudem keine relevanten Brandlasten oder Explosionsquellen, sodass ein Brand bzw. Explosion gemäss heutigem Planungsstand ausgeschlossen werden kann.

Das gTL wird – wo nötig – entsprechend den Anforderungen der Brandzonen und -abschnitte überwacht. Durch eine Brandmeldeanlage (oder Personal) wird ein möglicher Brandherd frühzeitig erkannt, lokalisiert und kann zeitnah in der Entstehungsphase bekämpft werden. Dem Gefahrenpotenzial angepasste Brandbekämpfungssysteme werden bereitgestellt. Die Brandbekämpfung kann zudem durch weitere, ggf. externe Einsatzkräfte, für die eine adäquate Zugänglichkeit zu jedem Objekt zu gewährleisten ist, unterstützt werden (Grubenwehr und externe Feuerwehr). Über die Brandmeldezentrale erfolgt die kontrollierte Brandfallsteuerung, wie z. B. das Steuern der Lüftungsanlage und das Schliessen der Brandschutztore/-türen.

Fazit

In den Überwachungsbereichen existieren keine oder keine relevanten Brandlasten. Eine unzulässige Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Anlage bzw. in die Umwelt ist aufgrund der begrenzt vorhandenen Brandlasten, der zeitnahen Brandbekämpfung, der widerstandsfähigen ELB (z. T. in TB) und der Nichtbrennbarkeit der gehandhabten radioaktiven Stoffe nicht zu unterstellen. Insgesamt wird das gTL die Anforderungen an einen Brandschutz gemäss Stand der Technik erfüllen (in Anlehnung an ENSI (*in Überarbeitung*)).

2.3 Anlageninterne Überflutung

Ziel

Anlageninterne Überflutungen – insbesondere in den untertägigen Lagerbereichen – sind zu vermeiden.

Massnahmen und generische Bewertung

Die in den Anlagen des gTL betriebenen wasserführenden Systeme¹¹ und darin gehandhabten Flüssigkeitsmengen werden auf ein für den Betrieb notwendiges Minimum begrenzt und – wenn erforderlich – bezüglich Leckage überwacht. Relevante Einrichtungen bzw. Systeme werden gegen Auswirkungen einer (lokalen) Überflutung geschützt, um deren Funktionserhalt im Ereignisfall sicherzustellen (z. B. erhöhte Lage elektrischer Systeme auf Sockeln). In den Bereitstellungshallen bzw. Lagerkammern (d. h. den Überwachungsbereichen) befinden sich keine (bedeutenden) wasserführenden Systeme¹² (oder andere Flüssigkeiten). Die Abfälle sind stets in ELB eingeschlossen, und das gTL ist kontaminationsfrei. Eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt ist somit auslegungsbedingt ausgeschlossen.

Ein Bergwasserzutritt während des gTL-Betriebs wird aufgrund bewährter Massnahmen bei der Auslegung der Zugangsbauwerke nach etabliertem Stand der Technik begrenzt. Sollte aufgrund des gewählten Abdichtungskonzepts für die Zugangsbauwerke eine (permanente) Bergwasserentsorgung nötig sein, wird ein ereignisbedingter Ausfall der Bergwasserentsorgung in einem Zugang durch Redundanzen, die auslegungsbedingt räumlich getrennt in den einzelnen Zugangsbauwerken angeordnet sind, vermieden. Ein kompletter Ausfall der Bergwasserentsorgung infolge temporären Verlusts der Energieversorgung führt aufgrund begrenzter permanenter Bergwasserzutritte und vorhandenem Retentionsvolumen nicht zu einer Überflutung der untertägigen Anlagen.

¹¹ Bei einem gTL sind das primär die Trink-, Brauch- und ggf. Löschwassersysteme sowie die in einem geschlossenen Kreislauf betriebenen Kühl- und Wärmesysteme.

¹² Aufgrund der nicht vorhandenen Brandlasten (vgl. auch Kap. 2.2) trifft das gemäss aktuellem Planungsstand auch auf die Löschwasserversorgung zu, die in den Bereitstellungshallen entweder nicht oder nur als Trockenleitungen vorgesehen ist.

Fazit

In den Überwachungsbereichen befinden sich keine (bedeutenden) wasserführenden Systeme (oder andere Flüssigkeiten). Eine anlageninterne lokale Überflutung ist äusserst unwahrscheinlich; unzulässige Auswirkungen sind aufgrund der Kontaminationsfreiheit des gTL sowie dem steten Einschluss der radioaktiven Abfälle in ELB nicht zu erwarten. Eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen infolge einer internen Überflutung ist daher ausgeschlossen.

2.4 Fehlhandlungen des Personals (inkl. beeinträchtigtes Personal)

Ziel

Die langjährigen Betriebserfahrungen vergleichbarer Anlagen werden bei der Auslegung der SSK des gTL berücksichtigt. Menschliche Fehlhandlungen sind, soweit wie möglich und nötig, unter Nutzung technischer, administrativer und/oder überwachender Massnahmen zu vermeiden bzw. rechtzeitig zu erkennen.

Massnahmen und generische Bewertung

Fehlhandlungen des Personals beziehen sich auf eine Fehlbedienung im Rahmen der Tätigkeiten¹³ und können weder im Normalbetrieb noch bei der Beherrschung eines Störfalls grundsätzlich ausgeschlossen werden. Die kognitiven Begrenzungen des Menschen sind anzuerkennen und bei der Arbeitsumgebung, den Prozessen und Tätigkeiten so zu berücksichtigen, dass menschlichen Fehlern vorgebeugt wird (z. B. durch Automatisierung). Dabei bilden die Erfahrungen im Bereich der menschlichen und organisatorischen Faktoren (HOF-Erfahrungen) von vergleichbaren Anlagen (insbesondere Zwiilag) die Basis, um potenzielle Fehlerquellen und deren systematischen Ursache(n) bei der Auslegung des gTL zu vermeiden. Die periodische Schulung des entsprechend ihren Aufgaben ausgebildeten Personals und der über alle Organisationseinheiten verankerten Sicherheitskultur zielt zudem darauf ab, die Häufigkeit von Fehlhandlungen zu minimieren und auch ihre möglichen Auswirkungen zu begrenzen.

Weitere Fehlhandlungen können im Rahmen der Strahlenschutz Tätigkeiten auftreten, wobei aufgrund der Kontaminationsfreiheit des gTL eine Kontamination bzw. Kontaminationsverschleppung – wenn überhaupt – ausschliesslich im Zusammenhang mit einem bereits vorliegenden radiologischen Störfall vorkommen könnte. Aufgrund der robusten Auslegung (der ELB, z. T. verpackt in TB) wird auch im Fall eines Auslegungsstörfalls eine Kontamination ausgeschlossen. Zudem kann es zur Verletzung von Abschirm- und/oder Zutrittsbestimmungen kommen (z. B. unkontrollierter Zutritt von Personal in Überwachungsbereiche), die aber keine Auswirkungen auf die Bevölkerung oder die Umwelt ausserhalb des Betriebsareals haben und ebenfalls durch eine entsprechende Auslegung und Organisation soweit wie möglich vermieden werden.

Fazit

Infolge einer hohen Sicherheitskultur durch eine adäquate fachliche Ausbildung und periodische Weiterbildung des Personals sowie aufgrund des Anlagendesigns und einer dem etablierten Stand der Technik entsprechenden Automatisierung der wesentlichen Betriebsabläufe wird die Häufigkeit von Fehlhandlungen praktisch ausgeschlossen und deren Auswirkungen begrenzt. In Verbindung mit der Verwendung robuster ELB und TB sind keine radiologischen Folgen für die Bevölkerung zu erwarten.

¹³ Beispielsweise bei der Nutzung der Krananlagen oder Transportfahrzeugen, die u. a. zu einem Lastanprall/-absturz führen können.

2.5 Fehlerhafte Handhabung von radioaktivem Material

Die Handhabung radioaktiven Materials beschränkt sich im gTL auf die Einlagerung von ELB. Im gTL bleiben die ELB jederzeit verschlossen. Es finden demnach keine Eingriffe und Handhabungen an den konditionierten SMA-Gebinden oder den eigentlichen radioaktiven Abfällen (SMA, HAA) statt. Es sind somit – gemäss aktuellem Planungsstand – betrieblich zu keiner Zeit offene radioaktive Stoffe im gTL vorhanden. Eine Freisetzung aufgrund von fehlerhafter Handhabung von radioaktivem Material ist somit grundsätzlich ausgeschlossen.

2.6 Abweichungen bzw. Nichterfüllung der Annahmebedingungen

Ziel

Die in den ELB verpackten Abfallgebinde als auch die ELB entsprechen bei Annahme am gTL den geltenden Annahmebedingungen für die Tiefenlagerung. Allfällige Abweichungen zu den Annahmebedingungen sind frühzeitig durch Qualitätskontrollen zu erkennen, zu bewerten und bei Bedarf durch (Instandsetzungs-)Massnahmen zu beheben (oder können toleriert werden).

Massnahmen und generische Bewertung

Die Produktion von selbstentzündlichen oder unter Druck stehenden Abfallgebinden ist bereits durch die Annahmebedingungen, Prüf- und Qualitätskontrollen und die zulässigen Konditionierungsarten im Vorfeld beim Abfallproduzenten bzw. den Zwischenlagern ausgeschlossen und sind demnach nicht zu erwarten. Eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen ist aufgrund dieser Eigenschaften der (konditionierten) Abfälle ausgeschlossen. Zudem stellt die Verpackung der Gebinde in robuste ELB (z. T. gasdicht) eine weitere Barriere für den Einschluss dar. Dies betrifft insbesondere die HAA-ELB.

Durch vorgängige Prüfung und Abnahme der Abfallgebinde und der beladenen ELB beim Absender werden zudem allfällige weitere Abweichungen¹⁴ bereits vor dem Versand zum gTL erkannt und durch entsprechende Massnahmen behoben. Bedeutende Abweichungen als Folge des Normaltransports (d. h. der Transport erfolgt nach Vorschrift (keine Unfallbedingungen)) können ebenfalls ausgeschlossen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei der Annahme von endlagerfertig verpackten Abfällen (d. h. den ELB) an der OFA bedeutsame Abweichungen von den Annahmebedingungen auftreten bzw. festgestellt werden, ist daher nahezu ausgeschlossen. Nichtsdestotrotz können mit den in der OFA vorhandenen Prüf- und Kontrollsystemen (z. B. im Rahmen des Strahlenschutzes) bedeutende Abweichungen erkannt, charakterisiert und bei Bedarf mit entsprechend bewährten Massnahmen behoben werden. Bei grösseren Abweichungen kann situativ ggf. auch eine Rücksendung (entsprechend verpackt) zum Absender bzw. zu den Verpackungsanlagen und eine Instandsetzung bzw. Neuverpackung in Betracht gezogen werden.

Fazit

Abweichungen bzw. die Nichterfüllung der Annahmebedingungen können durch Prüf- und Qualitätskontrollen vermieden bzw. bereits vor Anlieferung an das gTL erkannt und behoben werden. Eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen wird zum einen aufgrund der Eigenschaften der (konditionierten) Abfallgebinde und zum anderen aufgrund der Verpackung der Abfälle in robuste ELB ausgeschlossen.

¹⁴ Dies kann u. a. beinhalten: Falschbeladung von Abfallgebinden oder ELB, Abweichungen zur Dokumentation bzw. Identifizierbarkeit ist nicht gegeben, Beschädigungen, Verformung und/oder Korrosion der Behälter bzw. der Anschlagmittel oder Abweichungen bei Oberflächenkontamination bzw. Dosisleistung (ggü. der Dokumentation).

2.7 Versagen oder Fehlfunktion von Betriebssystemen: Transport-, Hebe- und Handhabungsmitteln

Die unter dem Thema Versagen oder Fehlfunktion der Transport-, Hebe- und Handhabungsmittel zugeordneten und im Rahmen der generischen Sicherheitsbetrachtung berücksichtigten Ereignisse fokussieren sich auf Ereignisse im Zusammenhang mit dem horizontalen Transport und der (Kran-)Handhabung der ELB (z. T. verpackt in TB) innerhalb der Anlage. Folgende abdeckende Ereignisse sind dabei relevant:

- Kollision eines ELB-Transportfahrzeugs¹⁵ mit einem Hindernis¹⁶
- Brand eines ELB-Transportfahrzeugs
- ELB-Anprall/Absturz bei Krantransport und
- Absturz (schwerer) Lasten auf ELB

Ziel

Grundsätzlich sollen die genannten Ereignisse sowohl durch die Auslegung der SSK als auch durch einen sicherheitsgerichteten Betrieb möglichst verhindert bzw. die Auswirkungen begrenzt werden.

Massnahmen und generische Bewertung

Aus dem langjährigen nationalen und internationalen Betrieb von Kernanlagen und der etablierten Handhabung von Behältern (beispielsweise im Zwiilag) liegen umfangreiche Erfahrungen und Massnahmen zur Vermeidung bzw. Bewältigung dieser Ereignisse vor, die bei der Planung und Auslegung des gTL berücksichtigt werden.

Das hauptsächliche Sicherheitsdispositiv stellen die robusten ELB (z. T. in TB) dar. Diese sind so ausgelegt und geprüft, dass der Einschluss der radioaktiven Stoffe – insbesondere die HAA-ELB und deren TB – auch nach sehr hohen Belastungen (z. B. bei einem Transportunfall auf der Strasse) gewährleistet ist und es dabei zu keiner bzw. keiner bedeutenden Freisetzung von Radionukliden kommt. Derartige mechanische und thermische Unfallbelastungen gehen weit über die im gTL auslegungsbedingt maximal möglichen Belastungen der internen Ereignisse hinaus (infolge der begrenzten Transport-/Handhabungsgeschwindigkeiten oder -höhen als auch den begrenzten Brandlasten (vgl. Kap. 2.2)). Der Einschluss der radioaktiven Stoffe in den Behältern ist somit auch bei den genannten Ereignissen sichergestellt, bzw. eine unzulässige Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Anlage bzw. in die Umwelt kann ausgeschlossen werden.

Fazit

Die robust ausgelegten ELB (z. T. verpackt in TB) bleiben auch nach einem Ereignis intakt und die radioaktiven Stoffe eingeschlossen, sodass eine unzulässige Freisetzung von Radionukliden ausgeschlossen werden kann.

¹⁵ Transportfahrzeug meint in diesem Zusammenhang ein Fahrzeug, das für den Transport der ELB eingesetzt wird und beinhaltet u. a. auch das HAA-Einlagerungsgerät.

¹⁶ Das Wort «Hindernis» steht synonym für ein physisches Objekt (Wand, Fahrzeug, System, Tore etc.) als auch für eine Person des Betriebspersonals (Personenunfall).

2.8 Versagen oder Fehlfunktion von Betriebssystemen: Störfälle im Rahmen des ELB-Schachttransports

Ziel

Allfällige Abweichungen oder Störfälle im Rahmen des ELB-Schachttransports¹⁷ sollen durch die Auslegung der Schachthalle, der Schachtförderanlage, der ELB/TB als auch dem sicherheitsgerichteten Betrieb möglichst verhindert bzw. die Auswirkungen einer Abweichung oder eines Störfalles auf die in ELB verpackten radioaktiven Abfälle begrenzt werden.

Massnahmen und generische Bewertung

Störfälle im Rahmen des Schachttransports mit Auswirkungen auf die nukleare Sicherheit sind nur während ELB-Förderung möglich, wobei betriebsbedingt die Anzahl gleichzeitig geförderter ELB – und damit die Zahl durch einen Störfall evtl. betroffener ELB – begrenzt wird¹⁸. Die nachfolgende Bewertung bzgl. Zuverlässigkeit und Störfällen von Schachtförderanlagen basiert auf den in Sindern & Borowski (2014) und Nagra (2023) dokumentierten Grundlagen.

Die zentralen Elemente der Schachtförderanlage (z. B. Fördermaschinen, die Umrichteranlage sowie der zentrale Maschinensteuerstand) werden sich nach aktuellem Planungsstand an der Oberfläche befinden, wodurch einerseits eine einfachere und sichere Erstmontage der Anlagenteile und andererseits jederzeit eine optimale Zugänglichkeit für Instandsetzungs- und Wartungsarbeiten (beispielsweise Seilwechsel) gegeben ist.

Der Förderkorb ist mit einer vorgegebenen und begrenzten Fahrgeschwindigkeit im Schacht unterwegs. Das Anlagenkonzept sieht einen definierten Fahrweg zwischen Schachtkopf und Schachtfussebene vor. Je nach Wahl der Schachtförderanlage wird durch bewährte Massnahmen gewährleistet, dass die Anlage sicher zum Stillstand gebracht wird bzw. der Förderkorb nicht unkontrolliert in die Haltestellen einfährt. Ein Übertreiben der Anlage ist somit ausgeschlossen.

Ein Absturz eines beladenen Förderwagens (oder sonstigen Last) in den Schacht sowie eine unkontrollierte Bewegung des Förderkorbs nach oben/unten bei der Beladung können konstruktionsbedingt infolge komplementärer Massnahmen ausgeschlossen werden (z. B. infolge inhärent sicherer, mechanischer Verriegelung). Befindet sich der Förderkorb somit nicht in seiner arretierten Endposition, kann das Schachttor nicht geöffnet werden, d. h., es ist verriegelt und wird erst freigegeben, wenn die entsprechenden Endschalter betätigt sind. Sicherheitsrelevante Endschalter sollen dabei redundant ausgeführt werden. Der gesamte Schacht ist zudem mit einer Absturzsicherung umzäunt, sodass der Zutritt zum Schacht vermieden wird.

Der Absturz von Schachteinbauten im Schacht ist infolge regelmässiger Wartung und Instandsetzung ebenfalls nicht zu erwarten. Andere schwere Lasten, wie Gegengewicht (wenn vorhanden) oder ein Hilfsfahrkorb, können nicht auf den Förderkorb stürzen, da sie durch Spurlatten oder Führungsschienen parallel zum Förderkorb geführt werden.

Ein Förderkorbabsturz wird beispielsweise infolge der Nutzung eines Mehrseilsystems sowie diverser Bremssysteme, die im Fall eines Steuerungsausfalls, Stromausfalls oder eines hydraulischen Druckverlustes automatisch zum Einsatz gebracht werden, als auch infolge periodischer Wartung und Instandhaltung ausgeschlossen. Im Gesamtsystem wird die Anlage den zum Zeit-

¹⁷ Im Fall einer Rampe als Zugangsbauwerk würde dieser Störfall entfallen. Störfälle bei Transport mittels Rampe sind durch die Ereignisse Kollision und/oder Brand eines ELB-Transportfahrzeugs (vgl. Kap. 2.7) abgedeckt.

¹⁸ Beispielsweise wird aufgrund der Dimensionen und Masse eines HAA-ELB plangemäss nur ein ELB gefördert.

punkt der Erstellung gültigen Anforderungen an die Seilsicherheit gemäss TAS 6.8.1 (TAS 1977) genügen, sodass im Fall eines sehr unwahrscheinlichen Seilrisses¹⁹ das Fördermittel mit ausreichender Seilsicherheit im Schacht gehalten wird.

Fazit

Aufgrund der sicherheitsoptimierten Auslegung, Konstruktion und Ausführung der Schachtförderanlage und ihrer Systeme und Komponenten sowie der qualitätssichernden Massnahmen beim Betrieb kann von einer sehr geringen Störfallhäufigkeit ausgegangen werden. Die mechanischen Belastungen auf den ELB sind dabei auslegungsbedingt gering, wodurch davon auszugehen ist, dass der betroffene ELB/TB intakt bleibt und eine Freisetzung von Radionukliden nicht zu erwarten ist. Der schwerwiegendste Störfall (Schachtabsturz) kann infolge der Nutzung eines Mehrseilsystems sowie periodischer Wartung und Instandhaltung nahezu ausgeschlossen werden.

2.9 Versagen oder Fehlfunktion von Betriebssystemen: Stromversorgung

Ziel

Das gTL wird zuverlässig und bedarfsgerecht mit elektrischer Energie versorgt.

Massnahmen und generische Bewertung

Der teilweise oder totale Ausfall der Stromversorgung (intern / extern) führt zu einem teilweisen oder totalen Ausfall der elektrisch versorgten Systeme des gTL. Durch das sichere Anlagenverhalten, das bei einem Stromausfall dadurch charakterisiert ist, dass die Prozesse unterbrochen werden bzw. stehen bleiben, kann es zu keinen Freisetzungen von Radionukliden kommen. Der Stromausfall ist in der Auslegung der Systeme zu berücksichtigen.

Fazit

Bei einem Ausfall der Stromversorgung (inkl. Totalausfall (Blackout)) ist infolge der sicheren Anlagen- und Behälterauslegung eine Freisetzung von Radionukliden ausgeschlossen. Der Einschluss der radioaktiven Abfälle bleibt gewährleistet, und somit sind keine radiologischen Folgen für die Bevölkerung und die Umwelt zu erwarten.

2.10 Komponentenversagen

Im gesamten gTL befinden sich zu keiner Zeit betriebliche Komponenten mit gasförmigem oder flüssigem radioaktivem Inventar. Demnach kann auch kein Versagen von betrieblichen Komponenten unterstellt werden, bei dem es zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung kommen kann.

¹⁹ Wie in Sindern & Borowski (2014) beschrieben, waren bei allen Vorkommnissen, bei denen Förderseile rissen, die Seilrisse Folgeschäden, nicht Ursache des jeweiligen Vorkommnisses. Durch normale betriebliche Schwächung als Folge von Drahtbrüchen, Korrosion oder Verschleiss ist seit einem halben Jahrhundert kein Förderseil mehr gerissen. Seilrisse aufgrund von Seilversagen durch vernachlässigte Prüfungen und/oder unerkannte Schädigungsmechanismen sind in keinem einzigen Fall vorgekommen. Bei entsprechender Überwachung (u. a. Seilprüfung) und Wartung der Seile werden Seilbeschädigungen und Seilchwächungen rechtzeitig detektiert. Die entsprechenden Massnahmen für den Austausch der Seile können frühzeitig getroffen werden.

3 Literaturverzeichnis

- ADR (1957): Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR), vom 30. September 1957 (Stand 01. Januar 2023), Stand am 19. Juni 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 0.741.621, Schweiz.
- 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. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (202X): Brandschutz. Richtlinie für schweizerische Kernanlagen ENSI-G18, in Überarbeitung. ENSI, Brugg.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Februar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Nagra (2020): Standortunabhängiger Vergleich eines Kombilagers mit zwei Einzellagern hinsichtlich Bau- und Betriebsabläufe sowie Umwelt. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-15.
- Nagra (2023): Schachtförderanlagen für geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-23.
- Nagra (2024): Anlagen- und Betriebskonzept für das geologische Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NTB 24-11.
- Nagra (2025a): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-01.
- Nagra (2025b): Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage - Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-02.
- SDR (2002): Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (SDR), vom 29. November 2002, Stand am 01. Januar 2019. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 741.621, Schweiz.
- Sindern, W. & Borowski, S. (2014): Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Schachtförderanlagen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-75.
- TAS (1977): Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS) vom 14.12.1977, Stand Dezember 2005. Vorschriftensammlung Bergbau der Bezirksregierung Arnsberg.
- 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.