



TECHNISCHER BERICHT 24-01

Rahmenbewilligungsgesuch für das
geologische Tiefenlager –
Sicherheitsbericht

Mai 2025



TECHNISCHER BERICHT 24-01

Rahmenbewilligungsgesuch für das
geologische Tiefenlager –
Sicherheitsbericht

Mai 2025

Die Unterlagen zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein geologisches Tiefenlager (RBG gTL) finden Sie digital auf drbg.ch.

Fragen an die Nagra, die sich aus der Begutachtung des RBG gTL ergeben, werden im Nagra Arbeitsbericht NAB 26-01 sowie auf drbg.ch beantwortet.

ISSN 1015-2636

Copyright © 2025 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten. Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw.

Zweck des Berichts

Die Nagra beantragt eine Rahmenbewilligung für ein geologisches Tiefenlager mit der Oberflächenanlage am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel, Kanton Zürich). Beim vorliegenden Dokument handelt es sich um den gemäss Art. 23 KEV und ENSI 33/649 erforderlichen Sicherheitsbericht. Der Bericht legt die Grundzüge des Projekts dar und dokumentiert die Sicherheitsnachweise für die Betriebs- und Nachverschlussphase.

Zusammenfassung - Ein sicheres Tiefenlager am Standort Haberstal

Eine Rahmenbewilligung kann erteilt werden, *wenn der Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt werden kann*. Der vorliegende Sicherheitsbericht zeigt auf, dass dieser Schutz für die Betriebs- und die Nachverschlussphase des geologischen Tiefenlagers gewährleistet ist und die Anlage am Standort Haberstal sicher ausgelegt, betrieben und verschlossen werden kann. Der Standort des geologischen Tiefenlagers umfasst einen Projektperimeter zur Anordnung der Oberflächenanlage (Haberstal) sowie einen vorläufigen Schutzbereich für die Umsetzung der Untertaganlage.

Das geologische Tiefenlager kann sicher gebaut und betrieben werden

- Der Projektperimeter und der vorläufige Schutzbereich sind ausreichend bemessen, um die Oberflächenanlage und die Untertaganlage entsprechend ihren Anforderungen zu realisieren.
- Der Baugrund für die Oberflächenanlage und die Untertaganlage ist mit üblichen bautechnischen Methoden beherrschbar.
- Der Standort zeichnet sich durch ein geringes Gefährdungspotenzial aus, selbst bei Ereignissen die statistisch nur 1-mal in 10'000 Jahren auftreten.
- Die radioaktiven Abfälle sind bei der Anlieferung verpackt und kontaminationsfrei. Deshalb erfolgt im Normalbetrieb keine Abgabe von radioaktiven Stoffen. Das nukleare Gefährdungspotenzial ist selbst bei einem allfälligen Störfall sehr klein.
- Die Organisationsstruktur wird sicherheitsgerichtet aufgebaut und wird sich an der bewährten Organisationsstruktur von anderen Schweizer Kernanlagen orientieren.

Das geologische Tiefenlager bleibt langfristig sicher

- In der Nachverschlussphase werden die Radionuklide der eingelagerten Abfälle durch ein gestaffeltes Mehrfachbarrierensystem aus technischen und geologischen Barrieren eingeschlossen oder zurückgehalten.
- Der Grossteil der Radionuklide zerfällt innerhalb der technischen Barrieren. Die Endlagerbehälter schliessen die hochaktiven Abfälle für mindestens tausend Jahre vollständig ein.
- Die geologischen Barrieren bestehen aus dem Wirtgestein Opalinuston und seinen Rahmengesteinen. Der Opalinuston gewährleistet die Rückhaltung der Radionuklide. Der hohe Tonmineralgehalt sorgt für ein hohes Sorptions- und Selbstabdichtungsvermögen sowie eine sehr geringe Durchlässigkeit für Wasser und Gas. Die Rahmengesteine leisten einen zusätzlichen Beitrag zur Rückhaltung.
- Der Standort zeichnet sich durch eine mehr als ausreichende Ausdehnung des Opalinustons und günstige hydrogeologische Verhältnisse aus. Er liegt in einem seismisch und tektonisch ruhigen Gebiet. In Folge der Tiefenlage ist auch der Schutz vor Erosion gewährleistet. Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften bleiben am Standort langfristig erhalten.
- In der Nachverschlussphase werden die vom ENSI vorgegebenen Schutzkriterien für alle möglichen bzw. denkbaren und selbst unrealistischen Entwicklungsszenarien mit grossen Sicherheitsmargen eingehalten.
- Bei den Sicherheitsanalysen werden für alle nicht ausschliessbaren Aspekte konservative Annahmen gemacht. Diese konservativen Annahmen führen dazu, dass die allfälligen radiologischen Auswirkungen für Mensch und Umwelt mit hoher Wahrscheinlichkeit überschätzt werden. Trotzdem liegen die Ergebnisse der Sicherheitsanalysen deutlich unter der maximal zulässigen Individualdosis von 0.1 Millisievert (mSv) pro Jahr.

Das geologische Tiefenlager mit den zugehörigen Oberflächenanlagen am Standort Haberstal kann den *Schutz von Mensch und Umwelt* gewährleisten. Damit ist die Voraussetzung für die Erteilung der Rahmenbewilligung erfüllt.

Dem Rahmenbewilligungsgesuch ist für die Nachweisführung eine exemplarische Umsetzung des Vorhabens geologisches Tiefenlager zugrunde gelegt. Diese wird unter Berücksichtigung des technologischen und wissenschaftlichen Fortschritts weiterentwickelt, so dass für die nachfolgenden Bewilligungsschritte ein weiterentwickeltes Lagerprojekt vorliegt.

Summary - A safe deep geological repository at the Haberstal site

A general licence can be granted *if the protection of humans and the environment can be ensured*. The present safety report demonstrates that this protection can be ensured for the operational and post-closure phases of the deep geological repository and that the facility can be designed, operated and closed safely at the Haberstal site. The repository site comprises a project perimeter for the layout of the surface facility (Haberstal) and a provisional protection zone for the implementation of the underground facility.

The deep geological repository can be constructed and operated safely

- The dimensions of the project perimeter and the provisional protection zone are large enough to realise the surface facility and the underground facility in accordance with their requirements.
- Due to the geological subsurface conditions, the surface facility and underground facility can be built using conventional construction methods.
- The site is characterised by a low hazard potential, even in the case of events that are statistically expected to occur only once every 10,000 years.
- The radioactive waste will be delivered packaged in disposal canisters that have no surface contamination. Therefore, no radioactive substances will be released during normal operation. The nuclear hazard potential is very low, even in the event of an accident.
- The organisational structure is safety-oriented and will be based on that of proven organisational structures used for other Swiss nuclear facilities.

The deep geological repository will remain safe in the long term

- During the post-closure phase, the radionuclides in the emplaced waste will be enclosed or retained by means of a staged multi-barrier system consisting of engineered and geological barriers.
- The majority of radionuclides will decay within the engineered barriers. The disposal canisters will completely enclose the high-level waste for at least one thousand years.
- The geological barrier consists of the Opalinus Clay host rock and its confining geological units. The Opalinus Clay ensures the retention of radionuclides. The high clay-mineral content allows for a high sorption and self-sealing capacity as well as a very low permeability for water and gas. The confining geological units provide additional retention.
- The site is characterised by a more than sufficient extent of Opalinus Clay and favourable hydrogeological conditions. It is located in a seismically and tectonically quiet area. The depth of the Opalinus Clay ensures that the repository will be protected against erosion. The safety-relevant properties can be preserved at the site due to its long-term geological stability.
- During the post-closure phase, the protection criteria specified by ENSI can be met with substantial safety margins for all potential, conceivable or even unrealistic evolution scenarios.
- For all aspects that cannot be ruled out entirely, the safety analyses are based on conservative assumptions. This means that any potential radiological impacts on humans and the environment are, in all likelihood, overestimated. Nonetheless, the results of the safety analyses remain well below the maximum permissible individual dose of 0.1 millisieverts (mSv) per year.

The deep geological repository with the associated surface facilities at the Haberstal site can ensure the *protection of humans and the environment*, thus fulfilling the requirement for the granting of the general licence.

For demonstration purposes, the general licence application is based on a provisional implementation of the deep geological repository project. This will be developed further for the subsequent licensing steps, taking into account technological and scientific progress.

Résumé – un dépôt en couches géologiques profondes sûr sur le site de Haberstal

Une autorisation générale peut être accordée *si la protection de l'homme et de l'environnement peut être assurée*. Le présent rapport de sûreté montre que cette protection est assurée pour les phases d'exploitation et post-fermeture du dépôt en profondeur, et que les installations sur le site du Haberstal peuvent être construites, exploitées et fermées de manière sûre. Le site du dépôt en couches géologiques profondes comprend un périmètre de projet destiné à accueillir les installations de surface (Haberstal), ainsi qu'une zone de protection provisoire pour la réalisation des installations en profondeur.

Le dépôt en profondeur peut être construit et exploité de manière sûre

- Le périmètre de projet et la zone de protection provisoire sont suffisamment étendus pour pouvoir accueillir les installations de surface et les installations en profondeur, conformément aux exigences dont elles font l'objet.
- Le terrain de fondation devant accueillir les installations de surface et les installations en profondeur est maîtrisable avec les méthodes de construction usuelles.
- Ce site se distingue par un faible potentiel de risques, même lors d'événements qui ne se produisent statistiquement qu'une fois en 10'000 ans
- Les déchets radioactifs sont conditionnés dans des conteneurs exempts de toute contamination lors de leur livraison. Il n'y a donc pas de rejets de substances radioactives en fonctionnement normal. Le potentiel de risque nucléaire est très faible, y compris en cas d'accident.
- La structure organisationnelle est orientée sur la sûreté et basée sur la structure organisationnelle établie d'autres installations nucléaires suisses.

Le dépôt en profondeur restera sûr à long terme

- Dans la phase post-fermeture, les radionucléides des déchets mis en dépôt seront confinés ou retenus, grâce à un système de barrières multiples, techniques et géologiques.
- La grande majorité des radionucléides se désintégreront à l'intérieur des barrières techniques. Les conteneurs pour stockage définitif confinent entièrement les déchets hautement radioactifs pendant au moins mille ans.
- La barrière géologique est constituée par la roche d'accueil – l'Argile à Opalinus – et les roches encaissantes. L'Argile à Opalinus assure la rétention des radionucléides. Sa haute teneur en argile assure une capacité élevée d'adsorption et d'auto-colmatage d'éventuelles fissures, ainsi qu'une très faible perméabilité à l'eau et aux gaz. Les roches encaissantes offrent, quant à elles, une rétention supplémentaire.
- Le site se distingue par une extension plus que suffisante de l'Argile à Opalinus et par des conditions hydrogéologiques favorables. Il est situé dans une région sismiquement et tectoniquement calme. La profondeur du futur dépôt en profondeur offre également une protection contre l'érosion. Les caractéristiques pertinentes pour la sûreté du dépôt en profondeur se maintiendront durablement sur ce site.
- Dans la phase post-fermeture, les critères de protection prescrits par l'IFSN seront respectés pour tous les scénarios possibles et imaginables, y compris les plus improbables avec de grandes marges de sécurité.

- Dans le cadre des analyses de sûreté, des hypothèses prudentes ont été faites pour tous les aspects ne pouvant pas être exclus. Ces hypothèses prudentes conduisent très probablement à une surestimation des conséquences radiologiques potentielles pour l'homme et l'environnement. Malgré cela, les résultats de ces analyses de sûreté restent nettement en dessous de la dose individuelle maximale admissible de 0,1 millisievert (mSv) par an.

Le dépôt en profondeur avec les installations de surface correspondantes sur le site du Haberstal est en mesure d'assurer *la protection de l'homme et de l'environnement*. La condition pour l'octroi de l'autorisation générale est ainsi remplie.

La demande d'autorisation générale est basée, pour la démonstration de la sûreté, sur une mise en œuvre modélisée du projet de dépôt en profondeur. Celle-ci sera développée en tenant compte des progrès techniques et scientifiques, afin d'élaborer un projet de stockage profond optimisé pour les prochaines démarches en matière d'autorisation.

Inhaltsverzeichnis

Zweck des Berichts	I
Zusammenfassung - Ein sicheres Tiefenlager am Standort Haberstal	II
Summary - A safe deep geological repository at the Haberstal site.....	IV
Résumé – un dépôt en couches géologiques profondes sûr sur le site de Haberstal	VI
Inhaltsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung	1
1.1 Entsorgungskonzept.....	1
1.2 Standortwahl.....	2
1.3 Qualitätsmanagement für das Rahmenbewilligungsgesuch.....	2
2 Vorhaben geologisches Tiefenlager	4
2.1 Standort.....	4
2.2 Zweck der Anlage.....	5
2.3 Grundzüge des Projektes	6
2.4 Beschreibung des Vorhabens geologisches Tiefenlager.....	10
3 Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase.....	16
3.1 Auslegungsgrundlagen zur nuklearen Sicherheit und Einordnung des Gefährdungspotenzials eines gTL	16
3.2 Strahlenschutztechnische Auslegungsgrundlagen	21
3.3 Charakterisierung der Standorteigenschaften und Einwirkungen von aussen.....	23
3.4 Nachweis für die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle	46
4 Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase	47
4.1 Sicherheits- und Lagerkonzept für die Nachverschlussphase.....	47
4.2 Funktionen der technischen Barrieren	48
4.3 Charakterisierung der geologischen Situation für die Langzeitsicherheit	51
4.4 Eigenschaften und Funktionen der geologischen Barrieren	55
4.5 Eigenschaften und Funktionen des Standorts	60
4.6 Systemanalysen	64
4.7 Ganzheitlicher Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase.....	75
4.8 Weiterentwicklung seit dem Entsorgungsnachweis	75
5 Vorschläge für den vorläufigen Schutzbereich und die Eignungskriterien	77
5.1 Vorschlag für den vorläufigen Schutzbereich	77
5.2 Vorschlag für die Eignungskriterien.....	82

6	Wichtigste personelle und organisatorische Angaben.....	85
6.1	Grundsätze der Organisation	85
6.2	Entwicklung der Organisation	85
6.3	Menschliche und organisatorische Faktoren (HOF).....	88
6.4	Fazit	88
7	Literaturverzeichnis	89
	Tabellenverzeichnis.....	XI
	Figurenverzeichnis	XI
	Abkürzungsverzeichnis	XIII
Anhang A	Herleitung der maximalen Lagerkapazität für die Abfallkategorien HAA, ATA und SMA	A-1

1 Einleitung

Die Nagra beantragt eine Rahmenbewilligung für ein geologisches Tiefenlager (gTL) mit der Oberflächenanlage am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel, Kanton Zürich). Der vorliegende Sicherheitsbericht ist Bestandteil des Rahmenbewilligungsgesuchs (RBG) für das gTL und behandelt gemäss Art. 23 Bst. a KEV folgende Themen:

- die Standorteigenschaften
- den Zweck und die Grundzüge des Projektes
- die voraussichtliche Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage
- die wichtigen personellen und organisatorischen Angaben
- die Langzeitsicherheit

Des Weiteren werden die in ENSI (2018a) geforderten Sicherheitsnachweise für die Betriebs- und Nachverschlussphase dokumentiert sowie Vorschläge für die Eignungskriterien (Art. 14 Abs. 1 Bst. f Ziff. 1 KEG) und den vorläufigen Schutzbereich (Art. 14 Abs. 1 Bst. f Ziff. 2 KEG) gemacht.

Der Sicherheitsbericht hat die Aufgabe, nachvollziehbar darzulegen, dass die gesetzlich geforderten sicherheitstechnischen Vorgaben durch einen geeigneten Standort und eine geeignete Auslegung der Anlage erfüllbar sind und beim Bau, Betrieb und Verschluss des gTL erreicht werden können. Die anzuwendenden Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Normen sind in den jeweiligen Kapiteln, d. h. jeweils bei den einzelnen Themen, aufgeführt. Wo auf Ergebnisse und Aussagen aus Referenzberichten abgestützt wird, werden diese im Bericht referenziert.

Der Sicherheitsbericht enthält eine exemplarische Umsetzung der Gesamtanlage am Standort auf Stufe Konzept. Das Bewilligungsverfahren nach KEG sieht vor, dass dem Baugesuch ein spezifisches Projekt zugrunde zu legen ist. Dieses hat die Festlegungen der Rahmenbewilligung nach KEG zu berücksichtigen, wird aber ansonsten den Stand der Erfahrung und von Wissenschaft und Technik widerspiegeln und das Ergebnis von Weiterentwicklungen sein.

1.1 Entsorgungskonzept

Die Grundsätze für die Nutzung der Kernenergie legt Art. 4 KEG fest. So sind Mensch und Umwelt vor Gefährdungen durch ionisierende Strahlen zu schützen und es muss insbesondere Vorsorge getroffen werden, dass es zu keiner unzulässigen Freisetzung radioaktiver Stoffe kommt. In der Schweiz müssen radioaktive Abfälle in einem gTL so entsorgt werden, dass der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist (Art. 3 und Art. 30 Abs. 3 KEG). Die Entsorgung radioaktiver Abfälle in einem gTL, d. h. ihr langfristig wirksamer Einschluss in geeigneten tiefliegenden Gesteinsformationen, entspricht der internationalen Praxis.

Die radioaktiven Abfälle werden vorgängig in eine für das gTL geeignete Form gebracht (z. B. durch Konditionierung bzw. Verpackung) bevor sie im gTL sicher entsorgt werden. Die radioaktiven Abfälle sind bei der Anlieferung an das gTL verpackt und kontaminationsfrei.

Das aktuelle Lagerkonzept, das dem RBG zu Grunde liegt, geht von einem gTL mit zwei Lagerteilen aus:

- einem SMA-Lagerteil für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) und alphanukleare Abfälle (ATA)
- und einem HAA-Lagerteil für abgebrannte Brennelemente (BE) und verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA-HAA).

Das Lagerkonzept wird im Rahmen der weiteren Bewilligungsschritte weiterentwickelt.

1.2 Standortwahl

Der «Sachplan geologische Tiefenlager» (SGT) legte das Verfahren und die Kriterien fest, wie in der Schweiz das Wirtgestein und der Standort für ein gTL ausgewählt wurde (BFE 2008). Das Verfahren umfasste drei Etappen. Ausgehend von der gesamten Schweiz wurden in der letzten Etappe die verbliebenen drei Standortgebiete Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost mit einem umfangreichen erdwissenschaftlichen Untersuchungsprogramm vertieft untersucht. Die Standortwahl der Nagra erfolgte in einem sicherheitstechnischen Vergleich (Nagra 2025a) gemäss den behördlichen Vorgaben (ENSI 2018a). Der qualitative Vergleich entsprechend der vom SGT vorgegebenen Kriterien zur Sicherheit und technischer Machbarkeit (BFE 2008) ergab eindeutig Nördlich Lägern (NL) als bestes Standortgebiet sowohl für ein HAA- als auch für ein SMA-Lager. Die Vorgaben aus ENSI (2018a) sehen vor, dass beide Lager in einem gTL realisiert werden können. Weil sich das Standortgebiet NL sowohl für ein HAA-Lager als auch für ein SMA-Lager als bestes Standortgebiet erwiesen hat, beantragt die Nagra eine Rahmenbewilligung für ein gTL für alle Kategorien von radioaktiven Abfällen gemäss Art. 51 KEV (vgl. Kap. 2.3.3) am Standort Haberstal¹ (Nagra 2024k). Der Standort des gTL (vgl. Kap. 2.1) umfasst einen Projektperimeter zur Anordnung der Oberflächenanlage sowie einen vorläufigen Schutzbereich für die Umsetzung der Untertaganlage.

1.3 Qualitätsmanagement für das Rahmenbewilligungsgesuch

Untersuchungen, Analysen und Nachweise sowie deren Dokumentation, die im Hinblick auf die Standorteignung und für die Erstellung der dazu gehörenden Dokumente im Zuge des RBG durchgeführt wurden, wurden durch eine systematische Qualitätssicherung begleitet, unterstützt und freigegeben. Damit werden relevante Anforderungen und Erwartungen aus gesetzlichen, behördlichen und öffentlichen Bereichen² als auch die Ansprüche der Nagra selbst an die Qualität der Gesuchs- und Referenzdokumente sichergestellt und entsprechend berücksichtigt.

Für die Erarbeitung des RBG inkl. der Referenzdokumentation wurde ein Kernteam von hochqualifizierten Fachpersonen mit dem für ihre Aufgaben erforderlichen Wissen und Sicherheitsbewusstsein zusammengestellt. Das Team wurde bei seiner Arbeit durch Experten der Schweizer Kernenergiebranche sowie von weiteren nationalen und internationalen Experten/Firmen unterstützt. Die Verantwortung für die Expertenbeauftragung, die Koordination deren Arbeiten und die Qualitätssicherung der Ergebnisse bzw. deren Dokumentation liegt beim Kernteam. Zusätzlich erarbeiten und prüfen die beauftragten Experten/Firmen ihren Arbeitsfortschritt und Ergebnisse im Rahmen ihrer eigenen, zertifizierten Qualitätssicherungsprogramme. Bei der Auftragsvergabe an qualifizierte Auftragnehmer wurde darauf geachtet, dass die Aufgabe genügend klar definiert und die Schnittstellen zu anderen Aufgaben gut beherrschbar sind sowie eine Begleitung durch einen ebenfalls qualifizierten Auftraggeber/Projektleiter stets gewährleistet ist.

¹ Im weiteren Verlauf des Berichts wird für Standort Haberstal nur «Standort» benutzt.

² Die Datengrundlage orientiert sich am Informationsstand per 31.01.2024.

Die Beauftragung und Abwicklung der Arbeiten sowie die Erstellung der RBG-Dokumente erfolgt innerhalb eines klar definierten Management-Systems der Nagra, welches seit 2005 als Qualitätsmanagement-System gemäss ISO 9001 zertifiziert ist. Innerhalb dieses Systems sind u. a.

- Prozesse und Abläufe definiert (bspw. Qualifikationsbeurteilung und Qualitätskontrolle von externen Experten/Firmen, Erstellung und Prüfung der Gesuchsunterlagen etc.),
- Anforderungen an die einzelnen Aufgaben (Umfang, Detaillierungsgrad etc.) sowie an die auszuführenden Bearbeiter (Qualifikation, Erfahrung etc.) spezifiziert,
- Funktionen und Rollen der Organisationseinheiten bzgl. Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Schnittstellen (insb. Fortschritts- und Qualitätsprüfungen, Entscheidungen bzw. Entscheidungsfindung) geregelt und festgelegt.

Die Hauptziele sind die Etablierung wiederholbarer, beständiger Arbeitsprozesse sowie eine stetige Verbesserung von Projekt und Gesuchsunterlagen. Umfangreiche und systematische Reviews (intern und/oder extern) spielen dabei eine zentrale Rolle und stellen einen formellen Prozess dar, bei dem Prüfergebnisse und daraus resultierende Massnahmen, Entscheide bzw. Anpassungen dokumentiert werden. Ebenso führt das System dazu, dass das Qualitätsbewusstsein für interne Arbeitsabläufe sowie für die externe Berichterstattung bereits in der Planungsphase entscheidend gefördert wird. In Anbetracht der Langfristigkeit des Vorhabens ist dieser Aspekt bereits heute – und auch in den nachfolgenden Phasen – von Bedeutung.

2 Vorhaben geologisches Tiefenlager

Die mit der Rahmenbewilligung zu treffenden Festlegungen für ein gTL sind in Art. 14 KEG vorgegeben. Sie geben den Rahmen für die weitere Projektentwicklung vor und werden im Dispositiv der Rahmenbewilligung formal festgehalten. Aus Sicht der Nagra könnten die Festlegungen mit der Rahmenbewilligung wie folgt in das Dispositiv übernommen werden:

- Die Bewilligungsinhaberin (Art. 14 Abs. 1 Bst. a KEG), siehe Nagra (2024k)
- Der Standort (Art. 14 Abs. 1 Bst. b KEG), Kap. 2.1. Dieser umfasst auch den vorläufigen Schutzbereich (Art. 14 Abs. 1 Bst. f Ziff. 2 KEG), Kap. 2.1 und Kap. 5.1
- Der Zweck der Anlage (Art. 14 Abs. 1 Bst. c KEG), Kap. 2.2
- Die Grundzüge des Projektes (Art. 14 Abs. 1 Bst. d KEG), Kap. 2.3
 - Die ungefähre Grösse und Lage der wichtigsten Bauten (Art. 14 Abs. 2 KEG), Kap. 2.3.1 und 2.3.2
 - Die Kategorien des Lagergutes (Art. 14 Abs. 2 Bst. b KEG), Kap. 2.3.3
 - Die maximale Lagerkapazität (Art. 14 Abs. 2 Bst. b KEG), Kap. 2.3.4
- Die maximal zulässige Strahlenexposition für Personen in der Umgebung der Anlage (Art. 14 Abs. 1 Bst. e KEG 2003), Kap. 3.2.3
- Die Eignungskriterien (Art. 14 Abs. 1 Bst. f Ziff. 1 KEG), Kap. 5.2

Im Zusammenhang mit den Festlegungen gemäss Art. 14 KEG wird auf Folgendes hingewiesen: Werden die quantitativen Angaben zur Grösse der wichtigsten Bauten und zur maximale Lagerkapazität bzw. flächenbezogenen Angaben zum Projektperimeter und zum vorläufigen Schutzbereich mit der Rahmenbewilligung gegenüber den Angaben in diesem Bericht reduziert, kann dies zu (erheblichen) Einschränkungen bei der weiteren Projektentwicklung führen. Die Erweiterung der Angaben kann indes den Handlungsspielraum erhöhen.

Weitergehende Festlegungen erfolgen nach KEG im Rahmen der weiteren Bewilligungsverfahren. Somit ist sichergestellt, dass im langen Zeithorizont der Realisierung des gTL als «Jahrhundertprojekt» zukünftige Erfahrungen und der etablierte Stand der Technik berücksichtigt werden können.

Die Gesamtanlage besteht aus einer Oberflächenanlage (OFA) und einer Untertaganlage (UTA), welche über Zugangsbauwerke miteinander verbunden werden. Die gemäss Art. 64 KEV erforderlichen Elemente eines gTL (Hauptlager, Pilotlager und Testbereich) sind ebenso wie die Zugangsbauwerke Bestandteil der UTA.

2.1 Standort

Der Standort des gTL umfasst einen Projektperimeter zur Anordnung der OFA sowie einen vorläufigen Schutzbereich für die Umsetzung der UTA.

Für die benötigte OFA hat die Nagra als Ergebnis des Partizipationsprozesses im Rahmen des SGT den Standort Haberstal bestimmt (Nagra 2025b). Für die Realisierung der OFA stellt der Projektperimeter (Fig. 2-1) den raumplanerisch festzulegenden Standort an der Oberfläche dar (Art. 14 Abs. 1 Bst. b KEG). Er besteht aus Anlagenperimeter und Eingliederungssaum. Die Beschreibung des Projektperimeters ist in Kap. 2.3.2 und Kap. 2.4.3 und seine Standorteigenschaften sind in Kap. 3.3 zu finden.

Im Untergrund stellt der vorläufige Schutzbereich (Art. 14 Abs. 1 Bst. f Ziff. 2 KEG) den raumplanerisch festzulegenden bzw. zu schützenden Bereich für die Realisierung der UTA dar. Der vorläufige Schutzbereich ist in Kap. 5.1 und die Standorteigenschaften für den Sicherheitsnachweis der Nachverschlussphase in Kap. 4.3 bis 4.5 beschrieben.

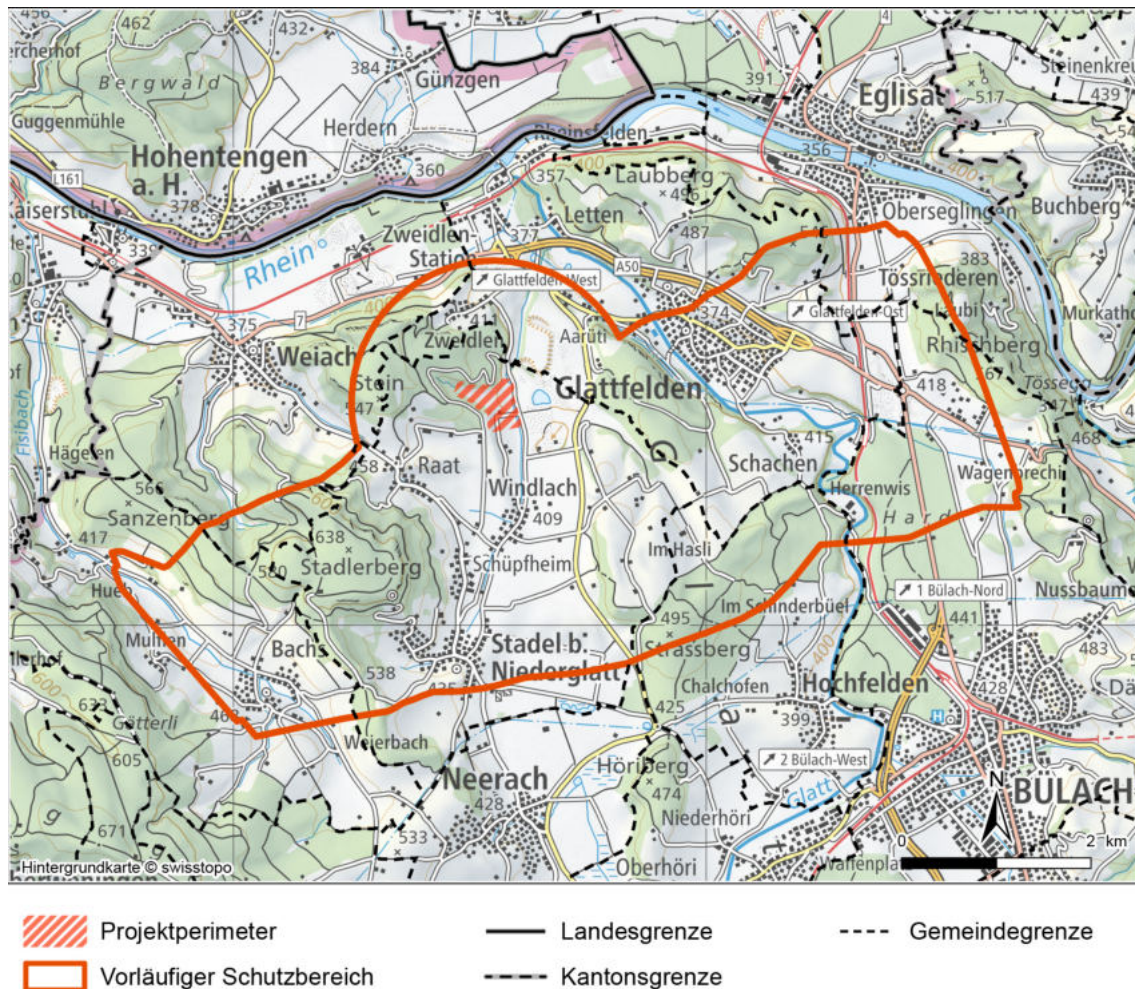


Fig. 2-1: Übersichtskarte mit dem Projektperimeter und dem Vorschlag für den vorläufigen Schutzbereich

2.2 Zweck der Anlage

Der Zweck (Art. 14 Abs. 1 Bst. c KEG) des geologischen Tiefenlagers ist die Entsorgung radioaktiver Abfälle.

2.3 Grundzüge des Projektes

In den folgenden Unterkapiteln 2.3.1 bis 2.3.4 werden die Grundzüge des Projektes gemäss Art. 14 Abs. 1 Bst. d KEG und Art. 14 Abs. 2 KEG dargelegt.

2.3.1 Ungefähre Grösse der wichtigsten Bauten

Als die wichtigsten Bauten der OFA werden die Bereitstellungshalle und die Schachtkopfanlagen³ erachtet.

In der Bereitstellungshalle werden die verpackten Abfälle nach der Anlieferung für die Verbringung nach untertag bereitgestellt. Die Bereitstellungshalle ist so bemessen, dass das gTL auch bei Lieferunterbrüchen oder Unterbrüchen bei der Verbringung von Endlagerbehältern nach untertag weiter betrieben werden kann.

Für den Zugang nach untertag sind mehrere Zugangsbauwerke von der OFA erforderlich. In der exemplarischen Umsetzung wird von drei Schächten mit Schachtkopfanlagen ausgegangen (Kap. 2.4.3). Mit der Rahmenbewilligung wird jedoch weder die Anzahl der Zugangsbauwerke noch deren Art (Schacht oder Rampe) festgelegt.

Die ungefähren Grössen der wichtigsten Bauten der OFA sind in Tab. 2-1 als Bandbreiten angegeben. Die exakte Dimensionierung der wichtigsten und der anderen für das gTL vorgesehenen Bauten erfolgt im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens nach KEG.

Tab. 2-1: Ungefähre Grösse der wichtigsten Bauten der OFA

Bauten	Funktion	Länge [m]	Breite [m]	Höhe über Terrain [m]
Bereitstellungshalle ⁴	Bereitstellung von verpackten Abfallgebinden für die untertägige Einlagerung	40 – 80	30 – 50	15 – 25
Schachtkopfanlagen bzw. Rampenportal ⁵	Bau und Betrieb des gTL	60 – 120	40 – 90	30 – 45
	Einlagerung radioaktiver Abfälle			
	Lüftung des geologischen Tiefenlagers	30 – 50	20 – 40	10 – 20 (45 ⁶)

³ bzw. die Schachtkopfanlagen und ein Rampenportal

⁴ Anstatt einer Bereitstellungshalle sind auch mehrere Gebäude denkbar, die im Rahmen der Gesamtgrösse realisiert werden.

⁵ Verändert sich die Anzahl der Zugänge, so ändert sich auch die Anzahl wichtigster Bauten.

⁶ Für den Fall, dass ein Förderturm / Fortluftkamin benötigt wird.

Als die wichtigsten Bauten der UTA gelten Haupt- und Pilotlager, da in diesen die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Die exemplarische Umsetzung der UTA ist in Kap. 2.4.3 und detailliert in Nagra (2024d) beschrieben.

Für die Grösse der wichtigsten untertägigen Bauten sind der Platzbedarf für die exemplarische Umsetzung gemäss aktuellem Lagerkonzept, die laterale Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und Platzreserven für die Projektentwicklung und Unvorhergesehenes (ENSI 2018a) relevant. Der Flächenbedarf beträgt unter Berücksichtigung dieser Platzreserven gemäss Kap. 3.1.6 von Nagra (2024f) rund 10 km². Zur Bestimmung einer abdeckenden Grösse für die wichtigsten untertägigen Bauten muss die maximale Lagerkapazität berücksichtigt werden (Kap. 2.3.4 und Anhang A). Wird die maximale Lagerkapazität vollumfänglich in Anspruch genommen, verdoppelt sich der Platzbedarf unter Berücksichtigung von Platzreserven und beträgt somit maximal 20 km². Die exakte Dimensionierung der UTA erfolgt im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens nach KEG.

2.3.2 Ungefähre Lage der wichtigsten Bauten

Die wichtigsten Bauten der OFA kommen im Anlagenperimeter (ca. 0.13 km²) zu liegen. Die exakte Platzierung erfolgt im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens nach KEG. Zusätzlich zu den wichtigsten Bauten gemäss Art. 14 Abs. 2 KEG werden für den Bau, Betrieb und Verschluss des gTL weitere Bauten an der Oberfläche benötigt. Der Flächenbedarf des Anlagenperimeters ergibt sich aus den Platzanforderungen der auf ihm zu errichtenden Funktionsbereiche mit zugehörigen Bauten, Anlagen, Verkehrs- und Logistikflächen (vgl. Kap. 2.4.2 und ausführlicher in Anhang C von Nagra (2025b)). Die Beschreibung der exemplarischen Umsetzung der OFA findet sich in Kap. 2.4.3 und ausführlicher in Nagra (2024d).

Um den Anlagenperimeter herum befindet sich ein ca. 50 m breiter Eingliederungssaum (ca. 0.11 km²). Im Eingliederungssaum werden u. a. Massnahmen für die Sicherheit und Sicherung des Anlagenperimeters bzw. der Kernanlage sowie für die Landschaftseingliederung und für einen ökologischen Ausgleich umgesetzt⁷. Sicherheit und Sicherung werden im bewaldeten Bereich des Eingliederungssaums durch einen 30 m breiten Freihaltestreifen (vgl. Fig. 2-6) erreicht, wodurch auch ein wirksamer Schutz vor Windwurf und Waldbrand gewährleistet wird und die Umgebung der Anlage sicherungstechnisch einsehbar wird (Nagra 2025e). Die exemplarische Umsetzung zeigt Möglichkeiten dazu auf (Nagra 2024d).

Der Anlagenperimeter und der Eingliederungssaum bilden zusammen den Projektperimeter (Fig. 2-2), der eine Gesamtfläche von ca. 0.24 km² umfasst.

Die wichtigsten Bauten der UTA kommen in der potenziellen Lagerzone (ca. 22 km²) zu liegen, die in den vorläufigen Schutzbereich (ca. 29 km²) integriert ist (vgl. Kap. 5.1.1). Die exakte Platzierung erfolgt im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens nach KEG.

⁷ Die Möglichkeiten der landschaftlichen Eingliederung und die davon betroffenen raumplanerischen Aspekte sind in Nagra (2025b) beschrieben.

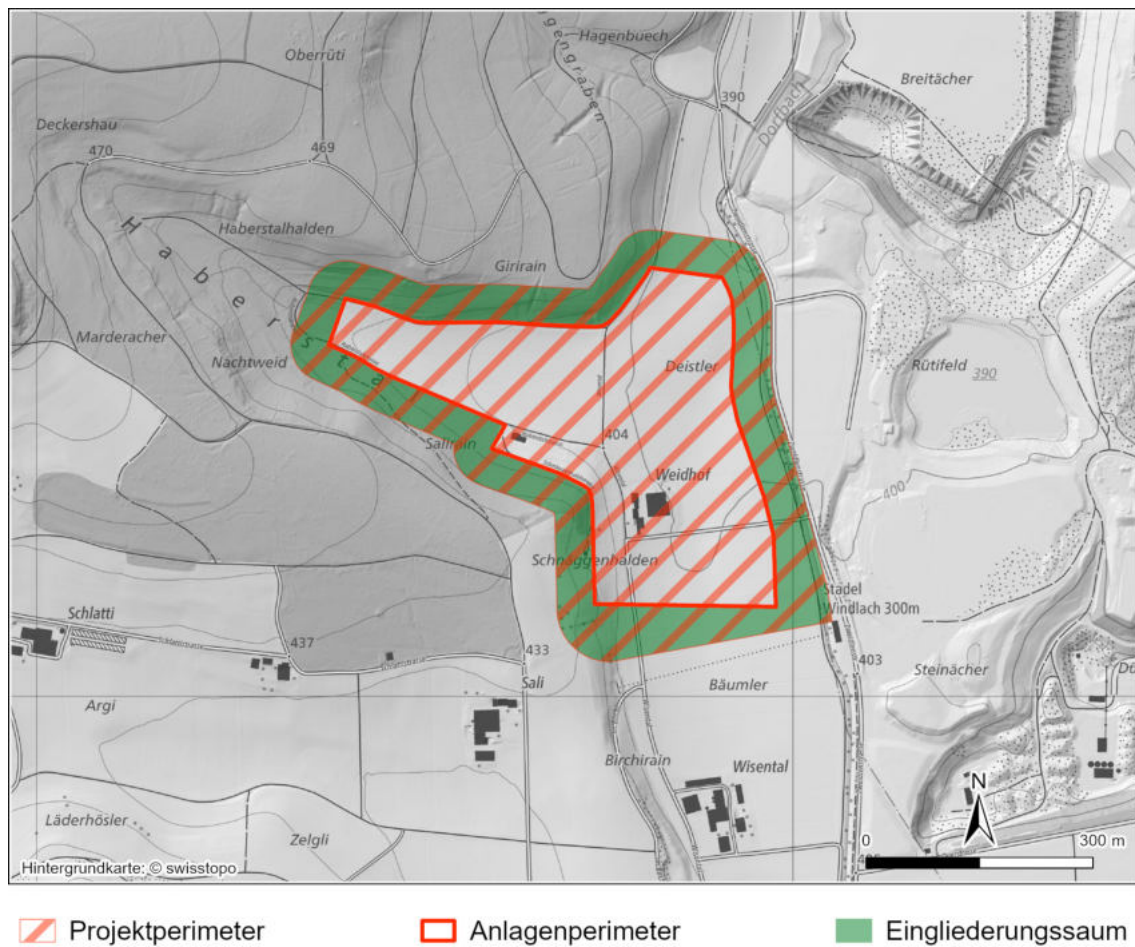


Fig. 2-2: Projektperimeter mit Anlagenperimeter und Eingliederungssaum

2.3.3 Kategorien des Lagergutes

Für die Beschreibung der radioaktiven Abfälle werden die Kategorien gemäss Art. 51 KEV verwendet. Sie basieren auf den physikalischen Eigenschaften der in der Schweiz vorkommenden radioaktiven Abfälle:

- Hochaktive Abfälle (HAA) umfassen abgebrannte Brennelemente (BE), die nicht weiter verwendet werden, sowie verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung (WA-HAA) von abgebrannten Brennelementen
- Alphatoxische Abfälle (ATA) sind Abfälle, deren Gehalt an Alphastrahlern den Wert von 20'000 Bq/g konditionierter Abfall übersteigt
- Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) sind alle anderen radioaktiven Abfälle

Diese drei Abfallkategorien werden im gTL entsorgt und stellen somit das Lagergut des gTL dar (Art. 14 Abs. 2 Bst. b KEG). Wo im gTL die einzelnen Abfallkategorien zu liegen kommen, ist in nachfolgenden Bewilligungsschritten festzulegen. Damit wird der erforderliche Handlungsspielraum für eine zweckorientierte Einlagerung über die Rahmenbewilligung hinaus bewahrt.

Für das RBG ist dem Sicherheitsnachweis der Nachverschlussphase, wie in ENSI (2018a) gefordert, eine beispielhafte Abfallzuteilung auf unterschiedliche Lagerteile zugrunde gelegt, bei der SMA und ATA dem SMA-Lagerteil und HAA dem HAA-Lagerteil zugeordnet sind (Nagra 2024b).

2.3.4 Maximale Lagerkapazität

Das modellhafte Inventar für radioaktive Materialien (MIRAM) wurde für das RBG gemäss den Anforderungen aus ENSI (2018a) aktualisiert und in Nagra (2023c) dokumentiert. MIRAM spiegelt das realistische, erwartete Inventar wider. In Nagra (2023c) wurde in Anlehnung an Nagra (2021a) für die bestehenden Kernkraftwerke KKB, KKG und KKL eine 60-jährige Betriebszeit unterstellt. KKM hat im Jahr 2019 den 47-jährigen Leistungsbetrieb eingestellt und wird aktuell zurückgebaut. Das erwartete unverpackte Gesamtvolumen des gesamten Abfallinventars liegt gemäss Nagra (2023c) bei 44'850 m³ und setzt sich zusammen aus:

- Abfallkategorie HAA: 1'550 m³ unverpacktes Abfallvolumen
- Abfallkategorie SMA: 43'000 m³ unverpacktes Abfallvolumen
- Abfallkategorie ATA: 300 m³ unverpacktes Abfallvolumen

Im Rahmen der Grundzüge des Projektes wird mit der Rahmenbewilligung die maximale Lagerkapazität gemäss Art. 14 Abs. 2 Bst. b KEG festgelegt. Die maximale Lagerkapazität ist im Gegensatz zum erwarteten Inventar als sog. Höchstvolumen (Botschaft KEG 2001, 2766 f.) zu verstehen, welches das gTL im Rahmen der rechtsgültigen Rahmenbewilligung aufnehmen darf. Die maximale Lagerkapazität umfasst zusätzliche Planungsreserven, die bei Eintritt bestimmter Ereignisse anfallen können (u. a. Verlängerung der Betriebszeiten der Kernkraftwerke, verlängerte Einlagerung von radioaktiven Abfällen aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF) ins gTL, betriebsbedingte Abweichungen bei der Abfallbehandlung, allfällige Änderungen gesetzlicher Grenzwerte) und zu grösseren Abfallvolumina führen würden.

Als Richtgrösse wird dem gTL die folgende maximale Lagerkapazität zu Grunde gelegt:

- Abfallkategorie HAA: 2'500 m³ unverpacktes Abfallvolumen
- Abfallkategorie SMA: 100'000 m³ unverpacktes Abfallvolumen
- Abfallkategorie ATA: 600 m³ unverpacktes Abfallvolumen

Die Herleitung dieser Vorschläge für die maximale Lagerkapazität ist in Anhang A erläutert. In Anhang A werden zudem die Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit und den Platzbedarf des gTL dargelegt, die sich aus einer Ausnutzung der maximalen Lagerkapazität allfällig ergeben.

2.4 Beschreibung des Vorhabens geologisches Tiefenlager

Die nachfolgende Beschreibung ist eine exemplarische Umsetzung des Vorhabens auf Stufe Konzept. Sie stellt die Grundlage der sicherheitstechnischen Bewertung für den Nachweis der Standorteignung für einen sicheren und zweckmässigen Betrieb des gTL sowie für eine sichere Nachverschlussphase dar. Die exemplarische Umsetzung des gTL beruht auf dem aktuellen Sicherheits- und Lagerkonzept (vgl. Kap. 4.1), welches aus einem bezüglich Langzeitsicherheit optimierten Mehrfachbarrierensystem (Fig. 2-3) besteht, und wurde aus den Auslegungsgrundsätzen von Art. 11 Abs. 2 KEV abgeleitet. Dabei sind auch die Bestimmungen von Art. 64 bis 69 KEV berücksichtigt. Die exemplarische Umsetzung berücksichtigt sowohl die Anforderungen an die Langzeitsicherheit als auch die Anforderungen an den Bau und den Betrieb sowie die Beobachtungsphase⁸ bzw. die Überwachung. Für eine ausführlichere Dokumentation der exemplarischen Umsetzung der Gesamtanlage wird auf Nagra (2024d) verwiesen.

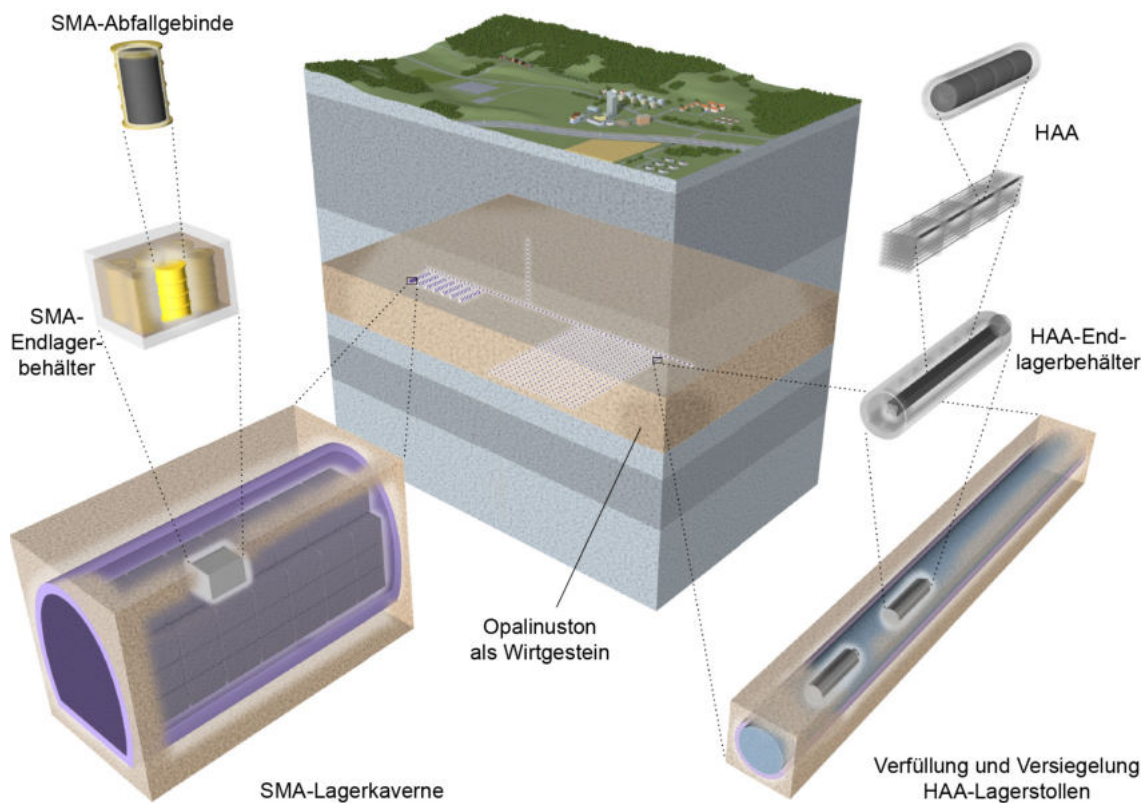


Fig. 2-3: Das aktuelle Sicherheits- und Lagerkonzept für die Nachverschlussphase HAA rechts und SMA links.

⁸ Die Beobachtungsphase beginnt nach Abschluss der Einlagerungsphase und endet mit der Verschlussverfüllung.

2.4.1 Ablauf der Realisierung des Vorhabens

Fünf wesentliche Tätigkeiten beschreiben den Ablauf der Realisierung des Vorhabens (Fig. 2-4). Im Phasenmodell aus ENSI (2023a) sind diese Tätigkeiten der Bauphase (Erstellen) und der Betriebsphase (Bestätigen, Einlagern, Beobachten, Verschiessen) zugeordnet. Die Tätigkeiten fassen übergeordnete Anforderungen an die Funktionsbereiche (Fig. 2-5) zusammen, bilden die vorgesehenen Phasen und Bewilligungsschritte ab und setzen so die Vorgaben der Kernenergiegesetzgebung um⁹.



Fig. 2-4: Abfolge der fünf wesentlichen Tätigkeiten zur Realisierung des Vorhabens gTL

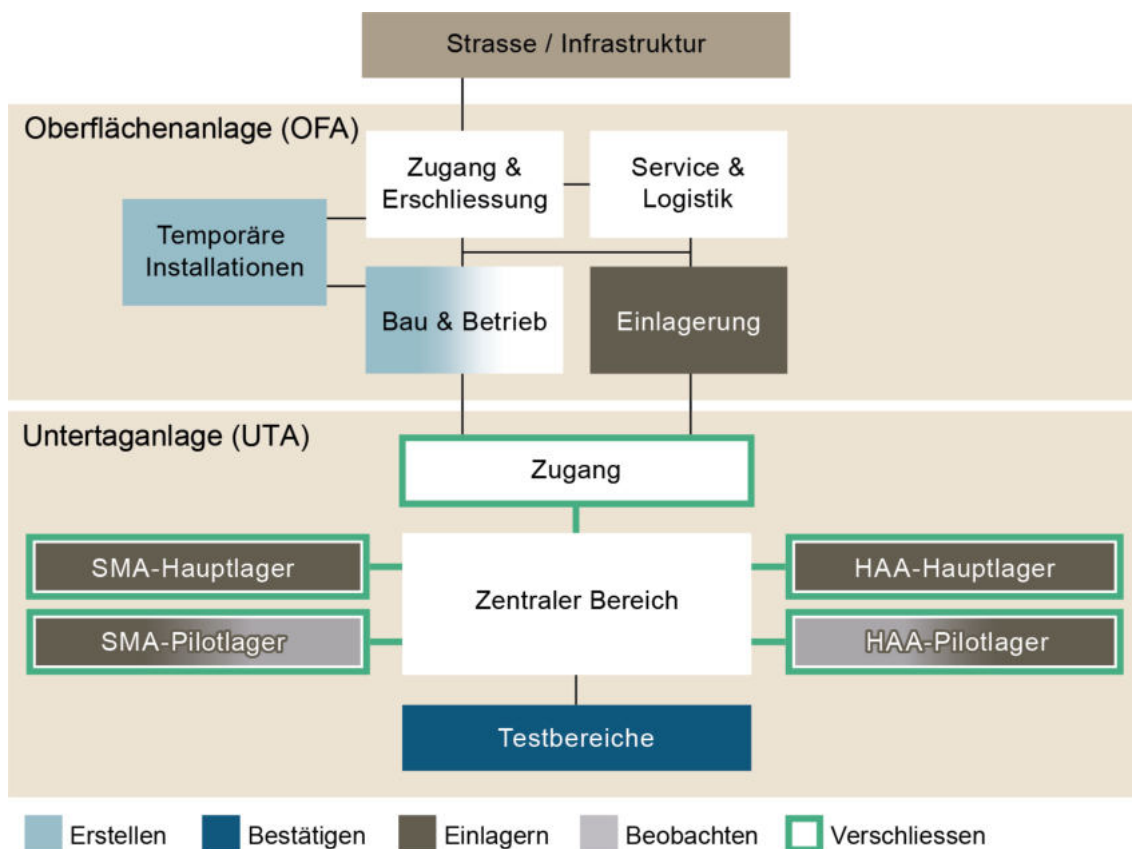


Fig. 2-5: Funktionsbereiche der Gesamtanlage des gTL

Die Farbe der Funktionsbereiche ordnet die wesentlichen Tätigkeiten zu. Weisse Funktionsbereiche dienen allen Tätigkeiten. Gemäss gegenwärtigen Verschlusskonzept (Nagra 2021c) sind im zentralen Bereich und den Testbereichen keine Versiegelungsbauwerke sondern Verfüllungen geplant.

⁹ Zeitliche Angaben zur Realisierung bzw. der Realisierungsplan mit seinen Realisierungsphasen und dem entsprechenden Arbeitsprogramm findet sich im Entsorgungsprogramm, welches alle 5 Jahre aktualisiert wird.

2.4.2 Funktionsbereiche der Gesamtanlage

Die Gesamtanlage wird, abgestimmt auf die fünf wesentlichen Tätigkeiten, modular in Funktionsbereiche unterteilt, die in Fig. 2-5 dargestellt sind. Die Funktionsbereiche verteilen sich auf OFA und UTA, wobei die Zugangsbauwerke der UTA zugeordnet sind.

Die OFA dient der Annahme der radioaktiven Abfälle und stellt Flächen für die Erschliessung, den Bau und den Betrieb bereit.

In der UTA findet als erstes das Bestätigen statt. Das Bestätigen umfasst einerseits die Demonstration sicherheitsrelevanter Techniken (z. B. die Rückholbarkeit) im Hinblick auf die Betriebsphase und andererseits die Erfüllung der Eignungskriterien. Anschliessend erfolgt das Einlagern in den Hauptlagern und einer kleinen repräsentativen Abfallmenge in den Pilotlagern. Letztere dienen anschliessend der Beobachtung. Der zentrale Bereich dient dauerhaft allen Tätigkeiten in der UTA und erfüllt logistische Funktionen. Der Zugang verbindet UTA und OFA und dient daher ebenfalls allen Tätigkeiten.

2.4.3 Exemplarische Umsetzung der Gesamtanlage

Die exemplarische Umsetzung für das RBG zeigt, wie die Funktionsbereiche in Bauten und Anlagen umgesetzt werden können und ordnet dazu die Gebäude und Anlagen der OFA auf dem Anlagenperimeter (vgl. Fig. 2-2) und die UTA im vorläufigen Schutzbereich (vgl. Fig. 2-1) an. Eine ausführlichere Beschreibung der exemplarischen Umsetzung der Gesamtanlage gibt Nagra (2024d).

Oberflächenanlage

Die OFA umfasst im Wesentlichen fünf sog. Funktionsbereiche:

- Einlagerung
- Service & Logistik
- Bau & Betrieb
- Temporäre Installationen
- Zugang & Erschliessung

Die Funktionsbereiche der OFA (z. B. die temporären Installationen und Bau & Betrieb) sind nicht als scharf abgegrenzte Flächen zu verstehen und können sich phasenweise auch überlappen. Der Funktionsbereich «Einlagerung» grenzt die Handhabung der radioaktiven Abfälle räumlich ab und ist als Sicherungsareal geschützt im Westen angeordnet (Fig. 2-6). Hier befindet sich der Einlagerungsschacht, die Bereitstellungshalle und an der Grenze zum konventionellen Areal die Sicherungsschleuse und die Sicherungszentrale sowie die Aufbereitungsanlage für das Verfüll- und Versiegelungsmaterial. Im konventionellen Areal liegen die Funktionsbereiche «Bau und Betrieb», «Zugang und Erschliessung», «temporäre Installationen» und «Service und Logistik». Auf dem Funktionsbereich «Bau und Betrieb» sind, aus Sicherheitsgründen räumlich getrennt, die Schachtkopfanlagen des Lüftungsschachts und des Bau- und Betriebsschachts platziert. «Zugang und Erschliessung» stellt die Schnittstelle zur Umgebung des Standorts dar und verbindet alle Funktionsbereiche untereinander. Der Funktionsbereich «temporäre Installationen» befindet sich v. a. im Südosten des Anlagenperimeters, aber auch im übrigen konventionellen Areal und stellt temporäre Installationsflächen für den Bau sowie den Rückbau und Verschluss zur Verfügung. «Service und Logistik» erfüllt systemübergreifende Funktionen und grenzt daher an alle weiteren Funktionsbereiche.

Der Projektperimeter liegt in einer strassenverkehrstechnisch gut erschlossenen Umgebung (vgl. Kap. 3.3.1).

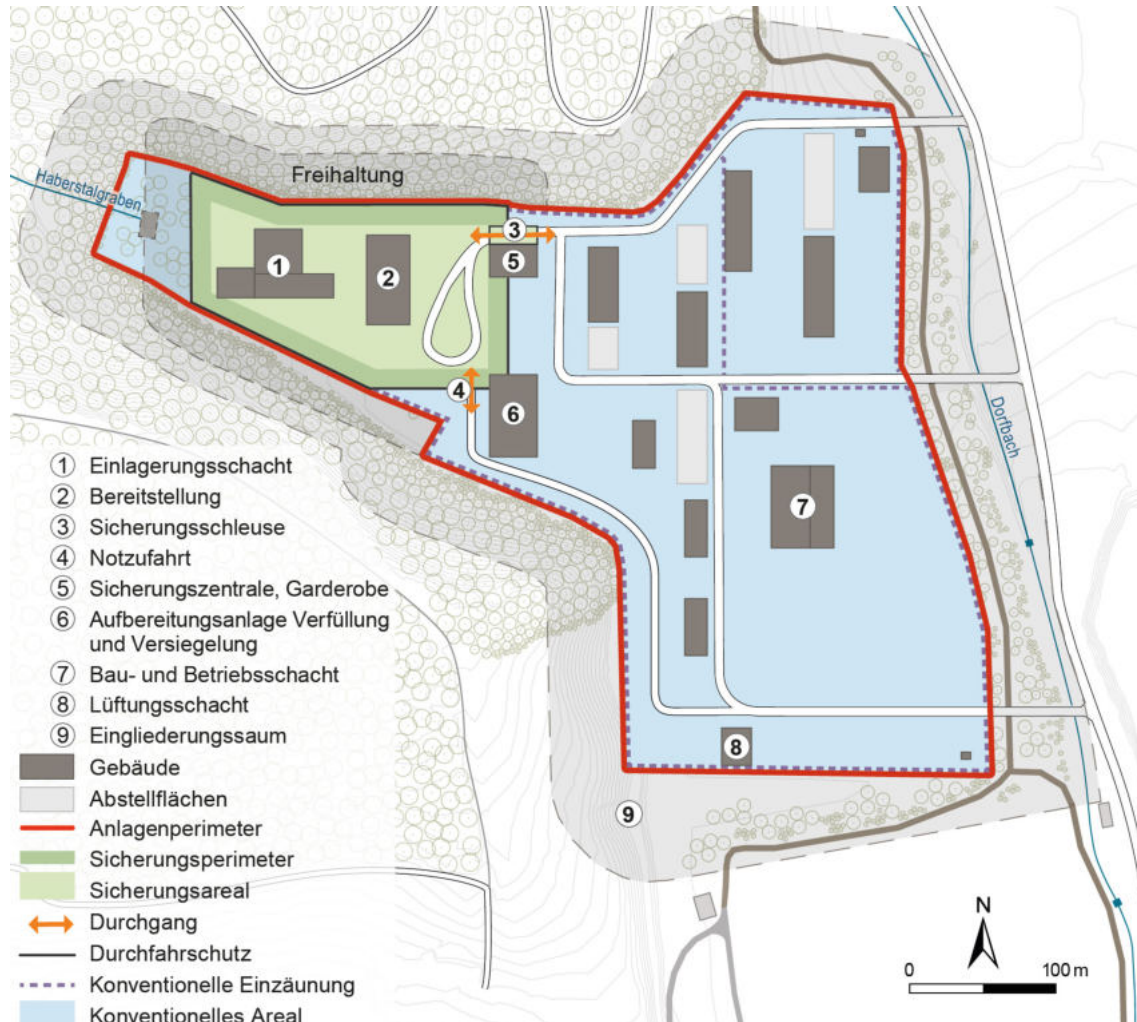


Fig. 2-6: Exemplarische Umsetzung der OFA mit wichtigsten Bauten (vgl. Tab. 2-1), Sicherungsareal und ausgewählter weiterer Bauten, Anlagen und Areale

Auf dem Anlagenperimeter werden je nach zeitlich änderndem Bedarf für Bau und Betrieb notwendige weitere Bauten und Anlagen angeordnet, die in der Figur nur ansatzweise angedeutet sind. Anhang C in Nagra (2025b) zeigt ein Beispiel für eine detaillierte exemplarische Anordnung von Bauten und Funktionsflächen für die raumplanerische Beurteilung.

Untertaganlage

Die UTA umfasst das gemäss Art. 64 KEV erforderliche Hauptlager zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle mit entsprechendem Pilotlager sowie Testbereiche. Die UTA wird in der exemplarischen Umsetzung für das RBG so ausgelegt, dass die HAA- und SMA-Lagerteile räumlich getrennt sind und die Sicherheit in der Betriebsphase¹⁰ und der Nachverschlussphase (vgl. Kap. 4.6.3) gewährleistet ist. Die Pilotlager sind ein eigenständiger, vom Hauptlager räumlich und hydraulisch abgetrennter Teil des gTL und entsprechen in ihrer Auslegung und den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen dem jeweiligen Hauptlager. Die Testbereiche werden gemäss Art. 65 KEV so ausgelegt, dass die sicherheitsrelevanten Techniken erprobt werden können. Zusätzlich sind für die Gewährleistung des Baus und Betriebs der UTA ein zentraler Bereich sowie Zugänge für die Verbindung der UTA zur OFA notwendig. Aus baulichen, betrieblichen und sicherheitstechnischen Gründen sind mehrere funktional getrennte Zugänge erforderlich. Fig. 2-7 zeigt die exemplarische Umsetzung der UTA mit einer möglichen Ausgestaltung des Zugangs nach untertag in Form von drei Schächten.

In Nagra (2023a) wird gezeigt, dass die bautechnische Machbarkeit der UTA unter Verwendung von konventionellen und im Untertagbau bekannten Bauverfahren gewährleistet ist.

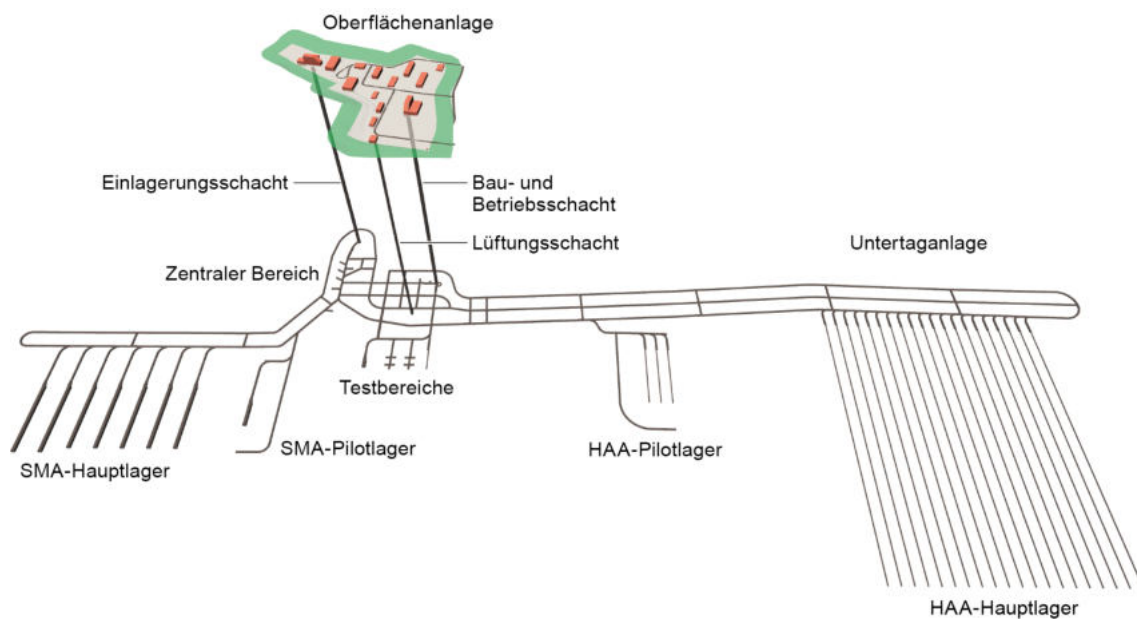


Fig. 2-7: Exemplarische Umsetzung der Gesamtanlage
Blickrichtung Norden.

¹⁰ Die UTA wird in der exemplarischen Umsetzung für das RBG so ausgelegt, dass der Bau des HAA-Lagerteils räumlich getrennt zum Betrieb (zur Einlagerung) des SMA-Lagerteils erfolgen kann.

2.4.4 Betrieb des geologischen Tiefenlagers

Das Einlagern stellt eine zentrale Tätigkeit in der Gesamtanlage dar, worauf im Folgenden näher eingegangen wird. Für weitere Ausführungen wird auf Nagra (2024d) verwiesen. Zum Einlagern gehören die tatsächliche Einlagerung der radioaktiven Abfälle, das Verfüllen und der Verschluss der Lagerkammern¹¹. Gemäss gegenwärtiger Planung werden die Abfälle verpackt im Funktionsbereich «Einlagerung» in die Bereitstellungshalle angeliefert und dort für die Verbringung nach untertag bereitgestellt. Sie werden durch den Einlagerungsschacht in die UTA transportiert, durch den zentralen Bereich zu den Haupt- und Pilotlagern gebracht und dort eingelagert. Begleitend wird die Verfüllung der Lagerkammern eingebracht. Ist eine Lagerkammer verfüllt, so wird sie verschlossen. Mit dem Verschluss aller Lagerkammern ist die Einlagerung abgeschlossen.

Bei der Einlagerung sind Anforderungen der nuklearen Sicherheit (inkl. des Strahlenschutzes) und der Sicherung (inkl. Safeguards) zu erfüllen, welche in Kap. 3.1 und 3.2 respektive in Nagra (2025e) beschrieben sind.

Die Auslegung für die Einlagerung geht gemäss derzeitiger Planung und modellhaften Annahmen von einem Durchsatz von ca. 800 SMA-Endlagerbehältern und ca. 200 HAA-Endlagerbehältern pro Jahr aus. Mit diesem Durchsatz lässt sich das heute realistisch erwartete Inventar (Nagra 2023c) in je rund 15 Jahren in den jeweiligen Lagerteilen sicher einlagern.

Zum Betrieb gehören auch die Tätigkeiten Bestätigen, Beobachten und Verschliessen sowie die bauliche Erhaltung als Hintergrundtätigkeit für die Gewährleistung der Zuverlässigkeit der Gesamtanlage. Aus bereits erstellten konventionellen Übertage- und Untertagebauwerken existiert eine breite Erfahrung und der konventionelle Betrieb wird im gTL gemäss Stand der Technik umgesetzt.

2.4.5 Frist für die Einreichung des Baugesuchs

Das Baugesuch wird gemäss aktuellem Realisierungsplan (Nagra 2021a) innerhalb von ca. 5 Jahren nach Rechtsgültigkeit der Rahmenbewilligung eingereicht. Die durch den Bundesrat festzulegende Frist für die Einreichung des Baugesuchs (Art. 14 Abs. 3 KEG) muss indes auch mögliche zukünftige Entwicklungen bzw. unvorhersehbare Veränderungen abdecken:

- Die Arbeiten nach rechtsgültiger Rahmenbewilligung bis zur Einreichung des Baugesuchs (u. a. allfällige Erkundungsbohrungen für die Zugänge nach untertag, Ausarbeitung des Baugesuchs, erste technische Spezifikationen für Ausschreibungen und die Bauvorbereitung) sind aufeinander abzustimmen. Dafür muss bei allfälligen Verzögerungen ausreichend Zeit zur Verfügung stehen.
- Der Realisierungsplan für das gTL wird alle 5 Jahre im Entsorgungsprogramm der Entsorgungspflichtigen dargelegt und begutachtet. Er kann sich aus mehreren Gründen ändern. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass im weiteren Verfahren Rechtsmittel ergriffen werden, es zu Änderung des gesetzlichen Rahmens kommt oder sich unvorhersehbare Veränderungen (z. B. infolge gesellschaftspolitischer Anliegen oder Ereignisse bei Tiefenlagerprojekten im Ausland) mit Auswirkungen auf den Realisierungsplan ergeben.

Mit einer Frist von 25 Jahren bis zur Einreichung des Baugesuchs wird möglichen zukünftigen Entwicklungen Rechnung getragen.

¹¹ Lagerkammer ist der Oberbegriff für Lagerstollen im HAA-Lagerteil und Lagerkaverne im SMA-Lagerteil.

3 Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase

Die Betriebsphase umfasst die Einlagerungsphase, die Beobachtungsphase und den Verschluss (ENSI 2023a). In diesem Kapitel wird entsprechend der Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des SGT (ENSI 2018a) der Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase gemäss den Vorgaben von KEG, KEV und ENSI G03 (ENSI 2023a) für das gTL inklusive OFA und Zugangsanlagen am gewählten Standort dokumentiert. Generell ist für das RBG festzuhalten, dass beim Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase der Hauptfokus auf der Standorteignung für den sicheren Betrieb des gTL inklusive OFA und Zugangsbauwerken¹² liegt (ENSI 2018a). Die dafür notwendige Charakterisierung der relevanten Standorteigenschaften sowie die Bewertung der Einwirkungen von aussen (EVA) und damit letztlich der Nachweis der Standorteignung für die Betriebsphase erfolgt in Kap. 3.3.

3.1 Auslegungsgrundlagen zur nuklearen Sicherheit und Einordnung des Gefährdungspotenzials eines gTL

Damit eine Kernanlage in der Schweiz betrieben werden darf, wird gemäss Art. 4 KEG der Schutz von «Mensch und Umwelt vor Gefährdungen durch ionisierende Strahlen» gefordert. Diesem Anspruch folgend, dürfen somit radioaktive Stoffe «nur in nicht gefährdendem Umfang freigesetzt werden» und «es muss insbesondere Vorsorge getroffen werden gegen eine unzulässige Freisetzung radioaktiver Stoffe sowie gegen eine unzulässige Bestrahlung von Personen im Normalbetrieb und bei Störfällen».

Der Schutz von Mensch und Umwelt wird im Folgenden beim Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase anhand der Einhaltung der grundlegenden Schutzziele und dem gTL zugrundeliegenden gestaffelten Barrierenkonzept dargelegt¹³. Dabei wird das Gefährdungspotenzial eines gTL aufgezeigt und im Vergleich zu anderen Kernanlagen eingeordnet.

3.1.1 Nukleartechnische Schutzziele

Die Gewährleistung ausreichender nuklearer Sicherheit während der Betriebsphase einer Kernanlage wird gemäss Art. 7 KEV und in Anlehnung an Art. 1 Bst. d der UVEK-Verordnung (UVEK 2009) durch die Einhaltung der grundlegenden Schutzziele,

- Kontrolle der Reaktivität
- Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle
- Einschluss radioaktiver Stoffe und
- Begrenzung der Strahlenexposition

gewährleistet. Diese Schutzziele werden nach Art. 2 Abs. 3 UVEK-Verordnung in jedem Fall eingehalten, wenn für Kernanlagen, die keine Kernkraftwerke sind, die Anforderungen nach Art. 7 und Art. 8 UVEK-Verordnung¹⁴ erfüllt sind.

¹² Für die Lesbarkeit wird in den folgenden Kapiteln vereinfacht «geologisches Tiefenlager (gTL)» geschrieben.

¹³ Eine Rahmenbewilligung kann erteilt werden, wenn «der Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt werden kann» (Art. 13 KEG). Die Bau- bzw. Betriebsbewilligung wird erteilt, wenn «der Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet wird» (Art. 16 bzw. Art. 20 KEG).

¹⁴ Art. 7 UVEK: «...für jeden angenommenen Störfall [ist] nachzuweisen, dass die Dosiswerte gemäss Art. 8 KEV und Art. 125 StSV eingehalten werden» und «die Strahlenexposition bei Störfällen durch Massnahmen gemäss Art. 9 StSG begrenzt wird».

In den folgenden Kapiteln wird die Einhaltung der Schutzziele für die Betriebsphase anhand des gestaffelten Barrieren- und Schutzkonzepts und des Gefährdungspotenzials eines gTL – auf Basis dessen die Einhaltung der Dosiswerte gemäss Art. 7 der UVEK-Verordnung aufgezeigt wird – diskutiert. Zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit im Normalbetrieb und bei Störfällen wird zudem entsprechend Art. 7 KEV eine gestaffelte Sicherheitsvorsorge gefordert. Für das gTL wird die gestaffelte Sicherheitsvorsorge in angemessenem Umfang umgesetzt und geeignete Vorkehrungen getroffen, um die Anforderungen nach Art. 7 und 8 der UVEK-Verordnung zu erfüllen.

3.1.2 Gestaffeltes Barrieren- und Schutzkonzept

Um während der gesamten Betriebsphase des gTL einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, d. h. den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe und die Begrenzung der Strahlenexposition von Mensch und Umwelt jederzeit sicherzustellen, werden die radioaktiven Stoffe durch ein gestaffeltes Barrieren- und Schutzkonzept bestehend aus voneinander unabhängigen Barrieren eingeschlossen. Das Barrieren- und Schutzkonzept ist in Tab. 3-1 zusammengefasst.

Art. 8 UVEK: «...für jeden angenommenen Störfall [ist] nachzuweisen, dass die zur Umsetzung des Konzepts der gestaffelten Sicherheitsvorsorge getroffenen technischen und organisatorischen Schutzmassnahmen wirksam sind.» Insbesondere ist aufzuzeigen, «... dass die benötigten Bauwerke und Anlageteile die auf sie wirkenden Störfalllasten abtragen können.»

Tab. 3-1: Barrieren- und Schutzkonzept für die Betriebsphase des gTL

Barriere	HAA	SMA
Abfallmatrix	Die Radionuklide sind in einer für den Betrachtungszeitraum der Betriebsphase wasserunlöslichen Matrix fest eingebunden (Glas- oder Keramikmatrix).	Die Radionuklide sind im Rohabfall (z.B. aktivierte Metalle) oder in einer robusten, festen Abfallmatrix (z.B. Zement) fest eingebunden. Gasförmige RN sind in gasdichten Behältern eingeschlossen.
Umschliessung	Die Matrix ist entweder in einem Hüllrohr (BE) oder in einem Stahlzylinder (WA-HAA) eingeschlossen. Das Hüllrohr bzw. der Stahlzylinder ist gasdicht verschweisst.	Der Rohabfall und die Abfallmatrix sind in einer entsprechend robust und z.T. gasdicht ausgelegten Gebindehülle eingestellt und fixiert (z.B. 200 l-Stahlfass, Stahlzylinder, Mosaik-II-Behälter).
Behälter	Die radioaktiven Abfälle sind immer in einem robust ausgelegten und ausreichend technisch dicht verschlossenen Endlagerbehälter eingeschlossen. Während der Anlieferung und ggf. der Verbringung nach untertag sind die Endlagerbehälter zusätzlich zum Schutz gegen äussere Einflüsse und zur Abschirmung in robusten Transportbehältern verpackt. Die Behälter dienen dem Schutz der Barrieren (Matrix und Umschliessung) und stellen den Einschluss bzw. die Rückhaltung von radioaktiven Stoffen im Ereignissfall als auch die erforderliche Abschirmung der Direktstrahlung sicher.	

Die radioaktiven Stoffe sind während der Betriebsphase somit stets durch mehrere Barrieren von der Umwelt isoliert, eingeschlossen und abgeschirmt. Nach der Verfüllung und dem Verschluss der Lagerkammern (bzw. auch bei einzelnen Lagerkammerabschnitten) sind die Endlagerbehälter zudem in den Lagerkammern passiv geschützt vor äusseren betriebs- oder störfallbedingten Einwirkungen (vgl. Fig. 2-3).

Da im gTL die Abfälle stets in Endlagerbehältern eingeschlossen und die an die OFA angelieferten Endlagerbehälter kontaminationsfrei sind, ist auch das gTL kontaminationsfrei, so dass keine Abgaben von radioaktiven Stoffen über den Luft- oder Wasserpfad zu unterstellen sind. Entsprechend dem Strahlenschutzkonzept ist daher nach heutigem Konzept ausschliesslich die Einrichtung von Überwachungsbereichen erforderlich (vgl. Kap. 3.2).

3.1.3 Gefährdungspotenzial eines gTL und Einordnung der Schutzziele

Nachfolgend wird das Gefährdungspotenzial eines gTL in der Betriebsphase anhand der Einhaltung der Schutzziele eingeordnet und bewertet sowie der Schutz von Mensch und Umwelt gegen eine unzulässige Strahlenexposition (Störfälle) aufgezeigt.

Kontrolle der Reaktivität

Das Schutzziel ist für SMA/ATA und WA-HAA aufgrund der Abfalleigenschaften, Beschaffenheit und Konditionierung stets eingehalten¹⁵. Ein entsprechender Nachweis ist für jeden Abfallgebindetyp im Rahmen der Spezifikation erbracht worden bzw. zu erbringen.

Für die BE wird das Schutzziel im Normalbetrieb als auch bei Betriebsstörungen oder Störfällen durch die Auslegung (Kleinheit der Anordnung und fehlender Moderator) und den für jeden Endlagerbehälter spezifischen Beladeplan zuverlässig eingehalten. Eine spezifische Auslegung des gTL oder aktive Massnahmen sind daher für die Einhaltung dieses Schutzziels nicht notwendig.

Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle

Bei der Betriebsphase ist – im Gegensatz zu KKW – die Nachzerfallswärme grundsätzlich durch die bereits vorgängige, in der Regel seit Jahrzehnten erfolgte Zwischenlagerung auf ein unkritisches Mass abgeklungen. Bereits bei der Zwischenlagerung wird eine ausreichende Wärmeabfuhr ausschliesslich durch passive natürliche Konvektion nachweislich auch im konservativen Fall sichergestellt. Dies gilt auch für die nachgelagerte gTL-Prozessführung. Das gTL benötigt somit auch im Störfall keine aktiven Auslegungsmassnahmen zur Wärmeabfuhr. Aus diesen Gründen wird die Einhaltung des Schutzziels durch die vorgesehene passive Auslegung gewährleistet.

Einschluss radioaktiver Stoffe

Der permanente Einschluss der radioaktiven Stoffe wird sowohl im Normalbetrieb als auch bei Störfällen durch das gestaffelte Barrieren- und Schutzkonzept (vgl. Kap. 3.1.2) sichergestellt. Nach erfolgter Einlagerung der Endlagerbehälter und der Verfüllung und dem Verschluss der Lagerkammern tragen während der Betriebsphase zusätzlich die für die Langzeitsicherheit ausgelegten technischen und geologischen Barrieren zum Schutz der Endlagerbehälter und letztlich zum Einschluss der radioaktiven Stoffe bei.

¹⁵ Aufgrund der Begrenzung der Menge spaltbaren Materials je Gebinde und Einbindung von spaltbarem Material in einer entsprechenden Matrix (d. h. Fixierung der Anordnung und Geometrie spaltbaren Materials im Gebinde).

Begrenzung der Freisetzung

Das im gTL gehandhabte Aktivitätsinventar ist infolge der langen Abklingzeiten und der begrenzten Anzahl gehandhabter Abfälle¹⁶, die ausschliesslich in Endlagerbehälter¹⁷ verpackt sind, relativ klein. Zu jeder Zeit sind nur wenige, für den reibungsfreien Betrieb erforderliche Endlagerbehälter auf dem Anlagenperimeter (Bereitstellungshalle) vorhanden. Die sicherheitsgerichtete Auslegung und Betrieb des gTL gewährleistet dabei, dass allfällige Belastungen auf die Endlagerbehälter infolge von Abweichungen und Störfällen effektiv begrenzt sind und der Einschluss der radioaktiven Stoffe auch nach einem Störfall weiter gewährleistet ist. Beim Betrieb des gTL liegen zudem die treibenden Kräfte «Reaktivität» und «Nachzerfallswärme» nicht mehr in system- und anlagegefährdender Masse vor¹⁸. Das Gefährdungspotenzial im Hinblick auf potenzielle radiologische Konsequenzen (ausserhalb des Anlagenareals) ist damit begrenzt und sehr klein.

Die von der Zwischenlager Würenlingen AG (Zwilag) im Rahmen von Sicherheitsanalysen bereits heute abgeschätzte Individualdosis weist die Einhaltung der maximal zulässigen Betriebs- sowie Störfalldosiswerte (Zwilag 1999) gemäss Art. 123 StSV (2017) für Personen aus der Bevölkerung mit grossen Reserven nach. Für das gTL entsprechen diese Abschätzungen konservativen Werten¹⁹, insbesondere aufgrund der Aktivitätsreduktion durch die zeitlich spätere Handhabung derselben, jedoch zusätzlich tiefenlagerverpackten Abfälle (im Endlagerbehälter, z. T. verpackt in Transportbehälter). Die Einhaltung der maximal zulässigen Betriebs- sowie Störfalldosiswerte für Personen aus der Bevölkerung sind somit in jedem Fall auch bei einem gTL eingehalten, da sie nicht höher als am Zwilag sein können.

Am Standort kann deshalb auf Notfallschutzmassnahmen verzichtet werden, da die geltenden Dosissschwellen im Dosis-Massnahmenkonzept (Bevölkerungsschutzverordnung, BevSV 2020) für die Einleitung von Notfallmassnahmen aufgrund des kleinen Gefährdungspotenzials nicht überschritten werden. Gleichwohl ist in der Region um den Standort die Infrastruktur (z. B. Verkehrswege) im Hinblick auf einen Notfall bereits gut ausgebaut (vgl. Kap. 3.3.1).

Grundwasserschutz

Das in Kap. 3.1.2 beschriebene Barrierensystem stellt den Einschluss der radioaktiven Stoffe in den Abfällen für die Betriebsphase sicher. Somit kann eine Kontamination des Grundwassers mit radioaktiven Stoffen sicher ausgeschlossen werden. Als vorsorgliche Massnahme sieht der heutige Planungsstand ein adäquates Grundwasserschutzkonzept nach Stand der Technik vor.

¹⁶ Durch die unmittelbare Verfüllung der Lagerkammern sowie der Verschluss von vollständig bestückten Lagerkammern stellen die eingelagerten radioaktiven Abfälle – aufgrund des passiven Barrierensystems – keine Gefahr bezüglich betriebstechnischer Störfälle dar.

¹⁷ Am Standort sind plangemäss keine Arbeiten an offenen radioaktiven Quellen vorgesehen.

¹⁸ D.h. bei einem gTL gibt es keine treibenden Kräfte, die die Integrität der Barrieren beschädigt können und es gibt kein Containment. Somit bedarf es auch keiner Systeme für eine gefilterte Druckentlastung, wie diese zum Schutz des Containments in KKW vorhanden sind (Schutzziel 4 «Begrenzung der Strahlenexposition»). Daher wird das Schutzziel 4 bei einem gTL im Rahmen der «Begrenzung der Freisetzung» behandelt.

¹⁹ Für die Handhabung, den Transport und die Einlagerung der Endlagerbehälter im gTL werden gemäss aktuellem Planungsstand auslegungsbedingt vergleichbare störfallbedingte Belastungen zugrunde gelegt wie sie bei den Handhabungen und Transporten im Zwischenlager unterstellt werden. Dies betrifft z. B. die Begrenzung von Geschwindigkeit und Fallhöhe bei der Handhabung/Transport der Endlagerbehälter.

3.1.4 Fazit

Die Schutzziele *Kontrolle der Reaktivität und Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle* stellen keine aktiv oder passiv zu begrenzenden Grössen dar. Es ist im Gegensatz zu den Bedingungen eines KKW als deutlicher sicherheitstechnischer Vorteil festzustellen, dass es während der Betriebsphase des gTL zu keiner bedeutenden Erwärmung und folglich Zerstörung von Barrieren kommen kann. Der geeignete Standort (vgl. Kap. 3.3), das zugrundeliegende gestaffelte Barrierenkonzept zum *Einschluss radioaktiver Stoffe* und die internationalen sowie nationalen Erfahrungen im Umgang mit in Behältern verpackten radioaktiven Stoffen zeigen, dass sich mithilfe entsprechender Auslegung eventuelle Störungen und Störfälle vermeiden oder beherrschen lassen und eine unzulässige Strahlenexposition der Bevölkerung definitiv ausgeschlossen werden kann.

3.2 Strahlenschutztechnische Auslegungsgrundlagen

In diesem Kapitel werden die strahlenschutztechnischen Auslegungsgrundsätze für den Normalbetrieb der Anlage dargestellt. Dabei wird auf Basis des Gefährdungspotenzials eines gTL die voraussichtliche Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage diskutiert, wie sie entsprechend Art. 23 KEV verlangt wird. Damit ist gemäss Botschaft zum KEG (Botschaft KEG 2001, Kap. 8.4.1.3) der quellenbezogene Dosisrichtwert (vgl. Kap. 3.2.3) im Sinne von Art. 7 StSV gemeint.

3.2.1 Grundsätze des Strahlenschutzes

Die Grundsätze des Strahlenschutzes gelten entsprechend den Art. 8 bis 10 StSG für Mensch und Umwelt und sind universell sowohl für das Anlagepersonal als auch für die Bevölkerung gültig. Die Anforderungen der ENSI-G12 (ENSI 2021) gelten sinngemäss.

Rechtfertigung der Strahlenexposition

Eine Tätigkeit, bei der Menschen oder die Umwelt ionisierenden Strahlen ausgesetzt sind (Strahlenexposition), darf nur ausgeübt werden, wenn sie sich mit den damit verbundenen Vorteilen und Gefahren rechtfertigen lässt (Art. 8 StSG). In der Schweiz wird die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle gesetzlich verlangt. Aufgrund der mit der geologischen Tiefenlagerung verbundenen gesellschaftlichen Vorteile der sicheren und langfristigen Entsorgung von radioaktiven Abfällen ist im Sinne der Strahlenschutzgesetzgebung die Rechtfertigung in einem bestimmten Rahmen gegeben.

Im Rahmen der Auslegung und im Betrieb des gTL werden Strukturen, Systeme und Komponenten sowie die Prozesse so gewählt, dass die mit ihnen verbundenen Vorteile die strahlungsbedingten Nachteile deutlich überwiegen und gesamthaft für Mensch und Umwelt keine vorteilhaftere Alternative mit geringerer oder ohne Strahlenexposition zur Verfügung steht (Art. 3 StSV).

Dosisgrenzwerte, Begrenzung der Strahlenexposition und Optimierung

Das StSG und die StSV legen Dosisgrenzwerte für jene Personen fest, die aufgrund ihrer Tätigkeit innerhalb des gTL als beruflich strahlenexponiertes Personal gelten, als auch für nichtberuflich strahlenexponierte Personen auf dem Betriebsareal sowie für die Bevölkerung. Zum Schutz für Personen aus der Bevölkerung wird unter Bezugnahme auf Art. 7 StSV ein quellenbezogener Dosisrichtwert für den gesamten Standort vorgeschlagen (vgl. Kap. 3.2.3).

Es werden adäquate Massnahmen ergriffen, die nach der Erfahrung und dem etablierten Stand von Wissenschaft und Technik geboten sind, um die Strahlenexposition jeder einzelnen Person sowie der Gesamtheit der Betroffenen durch den Betrieb der Anlage und ihrer Stilllegung wirksam zu begrenzen, d. h. so gering wie vernünftigerweise erreichbar zu halten (Art. 9 StSG). Dies soll durch die intensive fachbezogene strahlenschutztechnische Mitarbeit und Begleitung des Vorhabens von Beginn an durch erfahrene Strahlenschutzfachpersonen erreicht werden. Dabei wird im Rahmen des Strahlenschutzkonzeptes des gTL ein adäquates radiologisches Zonen- und Überwachungskonzept vorgesehen, um die jeweiligen gesetzlich geforderten Dosisbegrenzungen innerhalb der Anlage, auf dem Anlageareal und in der Umgebung zu gewährleisten und nachzuweisen. Insbesondere die langjährigen Betriebserfahrungen aus vergleichbaren Anlagen wie der Zwiilag oder dem Zwischenlager Beznau (Zwibez) werden für die Auslegung und Optimierung der Strahlenschutzmassnahmen herangezogen, da diese Anlagen bereits heute in jedem Fall alle gesetzlichen und behördlichen Grenz- und Richtwerte bei weitem unterschreiten.

3.2.2 Strahlenexposition in der Umgebung (Gefährdungspotenzial)

Die radioaktiven Abfälle sind bei der Anlieferung an die OFA in Endlagerbehälter verpackt und damit eingeschlossen (vgl. Kap. 3.1). Die Endlagerbehälter sowie das gTL sind zudem kontaminationsfrei, wodurch eine Strahlenexposition infolge von luftgetragenen Abgaben radioaktiver Stoffe oder Abgaben über den Wasserpfad gemäss gegenwärtigem Konzept ausgeschlossen ist.

Die Abschirmung der Direktstrahlung wird im Wesentlichen durch die Endlagerbehälter (z. T. in Transportbehälter verpackt) aber auch durch die Abschirmwirkung der Gebäude²⁰ erzielt. Durch den Abstand bis zum Zaun wird die Direktstrahlung weiter reduziert, so dass die voraussichtliche Strahlenexposition ausserhalb des Anlagenperimeters sich im Normalbetrieb auf die natürliche Strahlenexposition beschränkt. Zur Überwachung der Direktstrahlung wird ein Überwachungsbereich eingerichtet. Es existiert dabei ein grosser und langer Erfahrungshintergrund für Überwachungsbereiche (z. B. Zwiilag oder Paul Scherrer Institut (PSI)), der aufzeigt, in welchem Rahmen sich die künftige strahlenschutztechnische Auslegung der Anlage bewegen wird.

Für die erwartete Strahlenexposition infolge von Störfällen ist davon auszugehen, dass die vom gTL verursachte Strahlenexposition für Mensch und Umwelt nicht höher sein wird als die der Zwischenlager und Verpackungsanlagen (vgl. 3.1.3).

3.2.3 Vorschlag für den quellenbezogenen Dosisrichtwert am Standort

Die Nagra hat gemäss den Vorgaben der Aufsichtsbehörde (ENSI 2018a) im Sicherheitsbericht beim RBG für den gewählten Standort einen quellenbezogenen Dosisrichtwert vorzuschlagen. Als quellenbezogenen Dosisrichtwert bzw. für die maximal zulässige Strahlenexposition für Personen in der Umgebung der Anlage (Art. 14 Abs. 1 Bst. e KEG) wird 0.3 mSv pro Jahr vorgeschlagen. Der Vorschlag orientiert sich am Gebot zur stufengerechten Optimierung gemäss ENSI-G03 (ENSI 2023a) und stellt sicher, dass mit der Rahmenbewilligung der erforderliche Handlungsspielraum für eine sicherheitsgerichtete Optimierung über alle Phasen hinweg bis zum Verschluss des gTL erhalten bleibt.

²⁰ Die Direktstrahlung der radioaktiven Abfälle, die sich bereits untertag befinden, wird durch wenige Meter Gestein (geologischen Barrieren) vollständig abgeschirmt.

3.2.4 Überwachung der Umgebung

Beim gTL sind gemäss der exemplarischen Auslegung keine luftgetragenen Immissionen zu unterstellen. Dennoch können allfällige Immissionen und insbesondere die Ortsdosisleistung ausserhalb der OFA im Rahmen eines radiologischen Überwachungsprogramms überwacht werden (Nagra 2025c). Zur Überwachung gehört im Sinne einer Kontrollmassnahme – wie sie in Art. 113 StSV vorgesehen sind – ebenfalls die Aufnahme von Nullmessungen während einiger Jahre vor der Betriebsaufnahme. Mittels dieser Messungen zur Überwachung der Umgebung soll für die OFA innerhalb der Gesamtüberwachung des Standorts insbesondere die Einhaltung des quellenbezogenen Dosisrichtwerts nachgewiesen werden.

3.2.5 Gegenwärtige radiologische Standortsituation

Da es am Standort noch keine nukleare Anlage gibt, ist die gegenwärtige und vergangene radiologische Situation des Standorts bisher nicht dokumentiert und wird erst mit den Nullmessungen erfasst. Es ist davon auszugehen, dass die gegenwärtige Situation sich auf die natürliche Strahlenexposition beschränkt.

3.2.6 Fazit

Die Strahlenexposition für die Bevölkerung in der Umgebung der OFA ist aufgrund der vernachlässigbaren Direktstrahlung (am Zaun) und fehlender radiologischer Abgaben über den Luft- und Wasserpfad während des Normalbetriebs nach heutigem Planungsstand auf die natürliche Strahlenexposition beschränkt. Mit den kerntechnischen Auslegungsprinzipien und mit einem geeigneten Strahlenschutz- und Überwachungskonzept wird sichergestellt, dass der Betrieb für Personal und Bevölkerung keine unzulässige Zusatzbelastung darstellt. Das gTL wird zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme eine strahlenschutztechnisch optimiert ausgelegte und ausgereifte Anlagecharakteristik aufweisen.

3.3 Charakterisierung der Standorteigenschaften und Einwirkungen von aussen

In diesem Kapitel wird der Standort und dessen Umgebung charakterisiert, die Einwirkungen von aussen (EVA) bewertet und damit die Standorteignung für den Bau und Betrieb des gTL aufgezeigt²¹. Für die Erstellung des Spektrums der zu unterstellenden EVA werden grundsätzlich die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben und Verordnungen berücksichtigt²².

Die Standorteigenschaften mit Relevanz für die Langzeitsicherheit sind in Kap. 4.3 bis 4.5 behandelt.

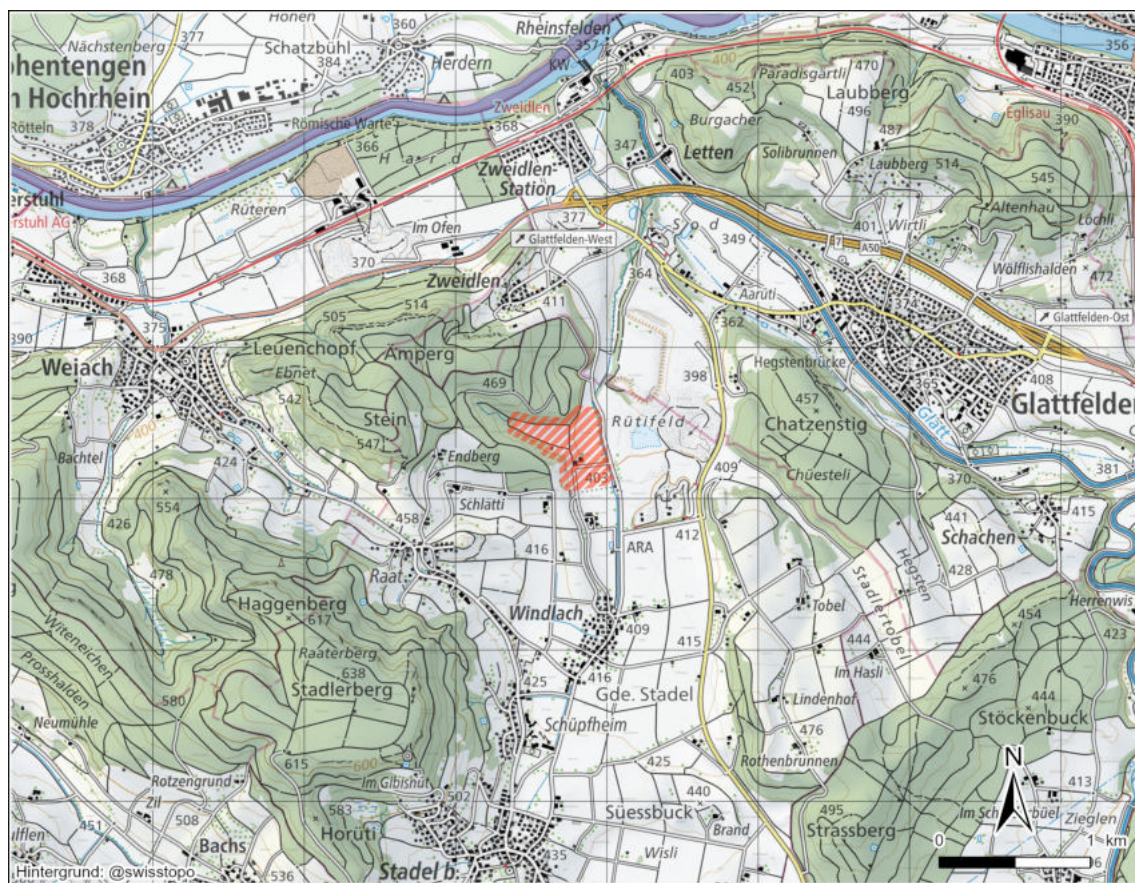
²¹ Eine generische Sicherheitsbetrachtung der Einwirkungen von innen (EVI) ist in Nagra (2024l) dokumentiert.

²² Es wird auf die in Art. 8, Abs. 3 KEV und Art. 5 Abs. 1 UVEK genannten Störfälle mit Ursprung ausserhalb der Anlage eingegangen, soweit sie für das gTL bzw. den Standort relevant sind und zutreffen. Dabei werden auch Folgeereignisse betrachtet (bspw. Explosion und Waldbrand). Kombinierte Ereignisse von Einzelereignissen – die kausal zusammenhängen können wie hohe Temperaturen und Trockenheit – sind bei einem gTL nicht relevant, da die Schutzziele *Kontrolle der Reaktivität* und *Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle* keine aktiv oder passiv zu begrenzenden Grössen bei den vorgesehenen und bereits vorgängig zwischengelagerten hochaktiven Abfällen darstellen (vgl. Kap. 3.1.3).

3.3.1 Beschreibung des Standorts und der Umgebung

Lage

Der Projektperimeter befindet sich auf dem Gemeindegebiet von Stadel im Kanton Zürich (Fig. 3-1). Er liegt zwischen den Ortschaften Zweidlen (Gemeinde Glattfelden) im Norden und dem südlich gelegenen Ort Windlach (Gemeinde Stadel) und weist zu beiden Dorfkernen rund 1 km Entfernung auf. Der Dorfkern von Stadel befindet sich in rund 2.5 km Entfernung. Weitere naheliegende Gemeinden sind im Osten Glattfelden sowie Weiach im Westen, deren Dorfkerne auch rund 2.5 km entfernt liegen. Die Entfernung zur deutsch-schweizerischen Landesgrenze beträgt rund 2.4 km.



 Projektperimeter

Fig. 3-1: Übersichtskarte zur Lage des Projektperimeters

Topographie

Der Projektperimeter befindet sich auf der Ostseite des Ämpers im Gebiet Haberstal am Westrand des Nord-Süd verlaufenden Tals «Windlacherfeld». Die glazial geprägte Landschaft um das «Windlacherfeld» ist durch die vier Molasseerhebungen Ämpers (514 m ü. M. im Westen), Stadlerberg (638 m ü. M. im Südwesten), Strassberg (495 m ü. M. im Südosten) und Chatzenstig (457 m ü. M. im Osten) umgeben (Fig. 3-1). Alle vier Erhebungen sind mit ausgedehnten Wäldern bestockt und umrahmen die Talebene, welche durch die landwirtschaftliche Nutzung sowie den Kiesabbau geprägt ist.

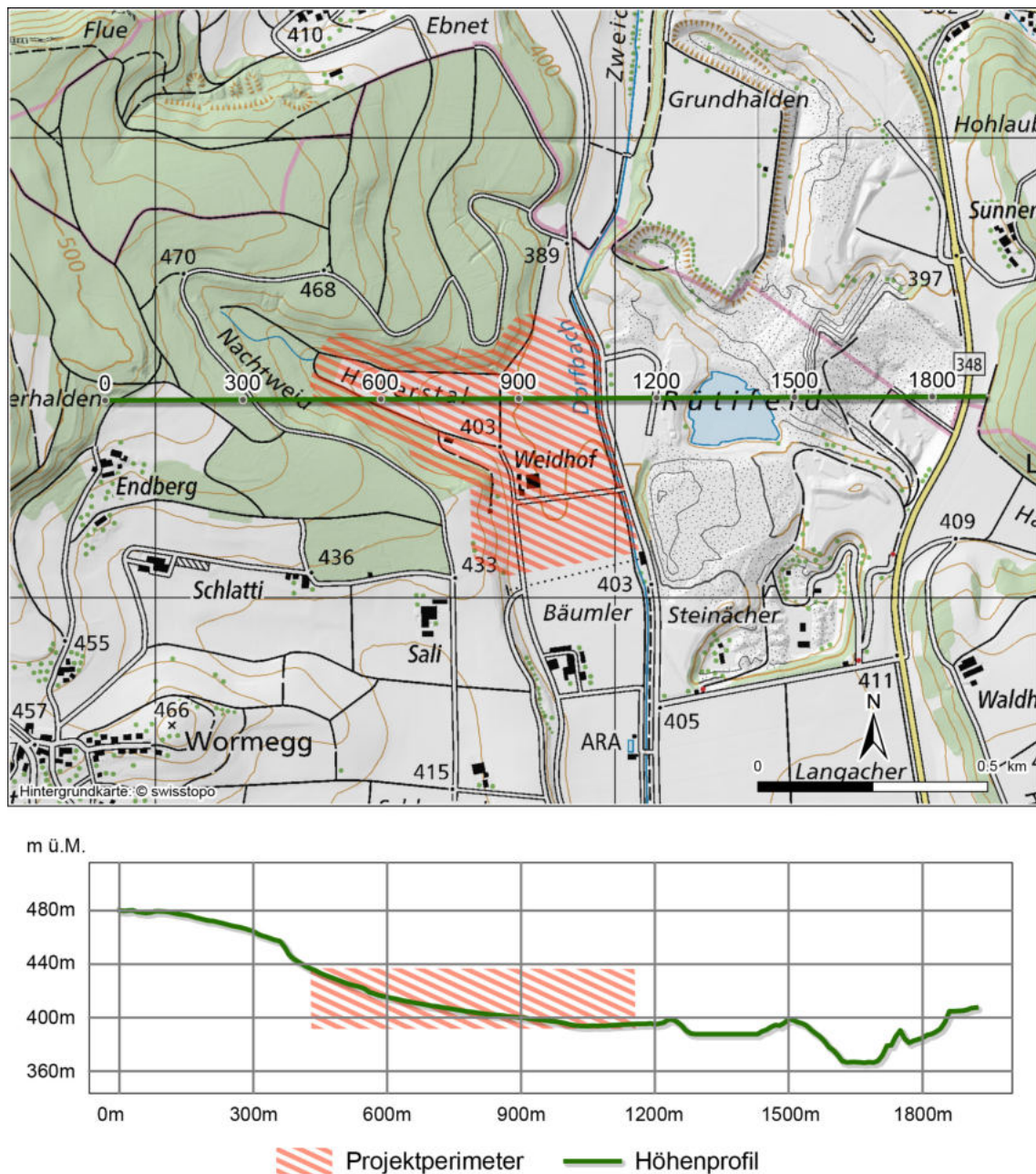


Fig. 3-2: Topographie des Gebiets Haberstal

Die grüne Linie ist die Achse des dargestellten Profils.

Die Höhenlage des Projektperimeters steigt von ca. 390 m ü. M. im Osten auf ca. 425 m ü. M. im Westen leicht an (Fig. 3-2). Im Westen des Projektperimeters liegt das namensgebende Gebiet Haberstal, welches sich in einem Ost-West ausgerichteten kleinen Seitental des «Windlacherfelds» befindet und auf der Nord-, West- und Südseite von bewaldeten Talhängen umrahmt wird. Der Osten des Perimeters besteht aus dem sogenannten «Dorfbachtal», einem Gebiet des «Windlacherfelds». Der Projektperimeter wird im Osten durch den Dorfbach begrenzt. Östlich des Projektperimeters befinden sich aktiv bewirtschaftete Kiesgruben.

Das Gebiet Haberstal wird durch den Haberstalgraben entwässert, der entlang der Talsohle verläuft, im Bereich des Projektperimeters eingedolt ist und in den Dorfbach fliesst. Der Dorfbach fliesst nach Norden und entwässert in die Glatt, welche bei Rheinsfelden dem Rhein zufliesst, der die Landesgrenze zu Deutschland bildet.

Boden- und Landnutzung

Die Boden- bzw. Landnutzung ist in Tab. 3-2 für die im Umkreis von 3 km liegenden Gemeinden²³ separat aufgelistet. Danach wird der Boden von den Gemeinden zu 54% landwirtschaftlich genutzt, 35% ist bewaldet und 8% ist überbaut (Industriegebiete, Wohn- und Gewerbezone, Verkehr). Die restliche Fläche umfasst kommunale Erholungszonen, Freihaltezone und Gewässer. Einen graphischen Überblick über die Boden- bzw. Landnutzung ist in Fig. 3-3 dargestellt.

Tab. 3-2: Boden- bzw. Landnutzung in den Gemeinden um den Standort

E: Kommunale Erholungszone, F: Freihaltezone, L: Landwirtschaftszonen, G: Gewässer, W: Wald, B: Bauzone - Industriegebiete, Wohn- und Gewerbezone.

Gemeinden	Gesamtfläche	E	F	L	G	W	B
	[km ²]						
Glattfelden	11.90	0.13	0.07	6.36	0.25	3.62	1.45
Stadel	12.89	0.01	0.03	8.27	0.04	3.81	0.72
Weiach	9.58	0.01	0.00	4.04	0.17	4.71	0.65
Gesamtfläche	34.4	0.15	0.11	18.67	0.47	12.15	2.82
Gesamtfläche [%]	100	0.4	0.3	54.3	1.4	35.4	8.2

²³ Gemeinden, deren Fläche nur marginal den Betrachtungsradius tangieren, sind nicht berücksichtigt.

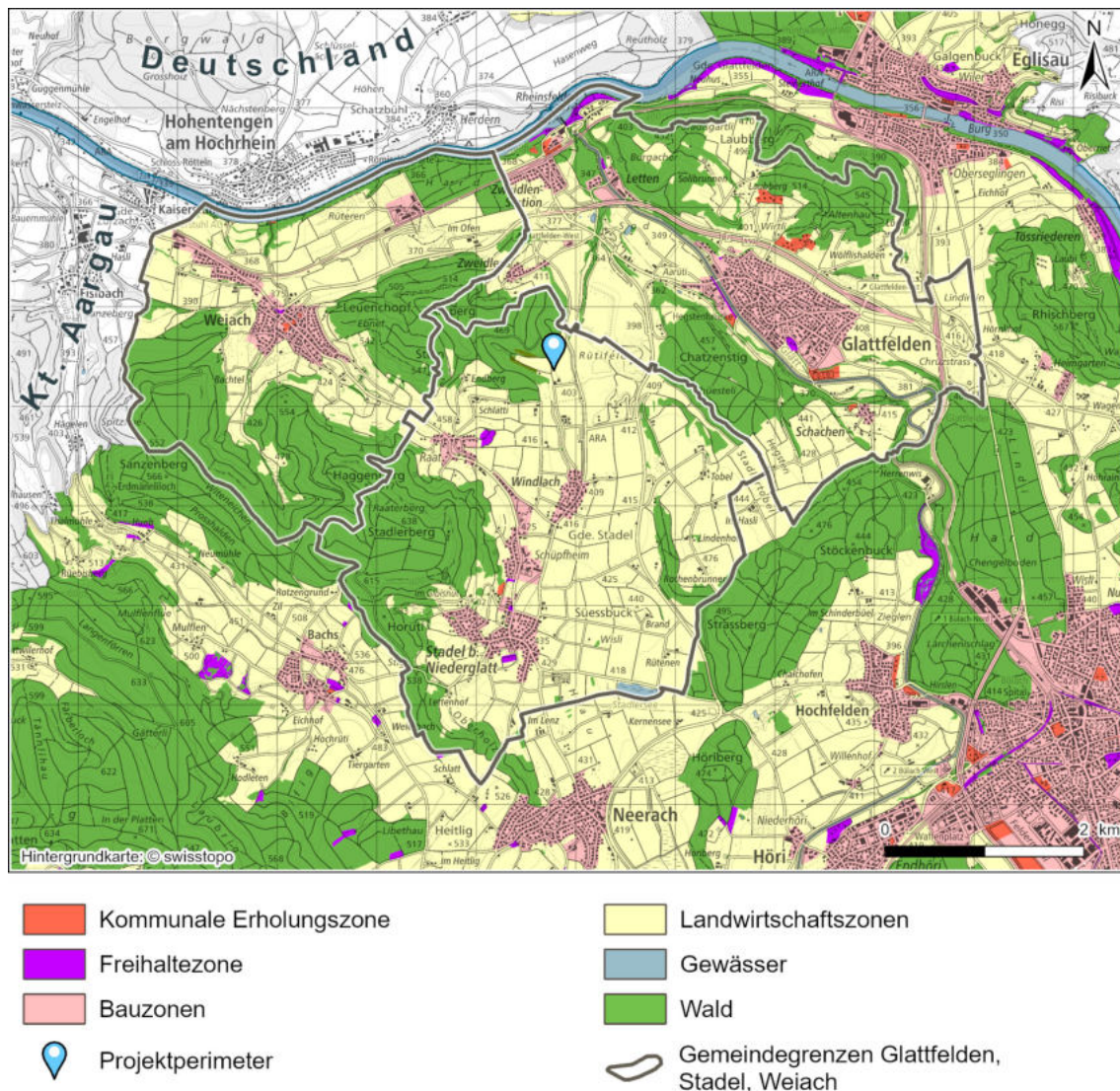


Fig. 3-3: Übersicht über die Boden- und Landnutzung im Umkreis des Standorts

Bevölkerung und Besiedelung

Der Standort liegt in einem dünn besiedelten Gebiet (Fig. 3-4 und Fig. 3-5). Im Umkreis von 1 km befinden sich einige Häuser mit etwa 50 Einwohnern, z. B. in den Siedlungen Schlatti und Endberg. In einem Umkreis von 1 km bis 2 km liegen die Siedlungen Oberraat, Schüpfheim, Unterraat, Windlach und Zweidlen mit insgesamt etwa 1'600 Einwohnern. Im Umkreis von 2 km bis 3 km liegen die Siedlungen Glattfelden, Stadel und Weiach mit insgesamt etwa 6'760 Einwohnern. Die Bevölkerungsdichte in der Umgebung des Standorts liegt mit 3.0 Pers./ha unter dem durchschnittlichen Wert der Kantone Zürich (9.4 Pers./ha) und Aargau (5.0 Pers./ha).

In Deutschland leben ca. 500 Einwohner innerhalb des 3 km Umkreises, die sich auf den Ortsteil Herdern der Gemeinde Hohentengen mit etwa 430 Einwohnern²⁴ und Ausläufer des Orts Hohentengen am Hochrhein mit etwa 80 Einwohnern aufteilen.

²⁴ Quelle: <https://www.hohentengen.de/de/daten-zahlen.html>, abgerufen September 2023.

Die Bevölkerung in den drei Schweizer Gemeinden hat sich seit den 90er Jahren verdoppelt. Gemäss der Prognose «Trend ZH 2023» wächst die Bevölkerung des Kantons Zürich weiter, von rund 1.58 Millionen Einwohner im Jahr 2022 auf knapp 2 Millionen Einwohner im Jahr 2050 (Weingartner 2023). Das entspricht einem Wachstum um knapp 420'000 Personen oder 27 % im gesamten Kanton Zürich. Basierend auf dieser Annahme wächst die Bevölkerung in den drei Schweizer Gemeinden auf etwa 12'500 Einwohner im Jahr 2050, was für den Umkreis von 3 km um den Standort rund 10'700 Einwohner entspricht.

Bei den deutschen Gemeinden wird von einer vergleichbaren Entwicklung ausgegangen.

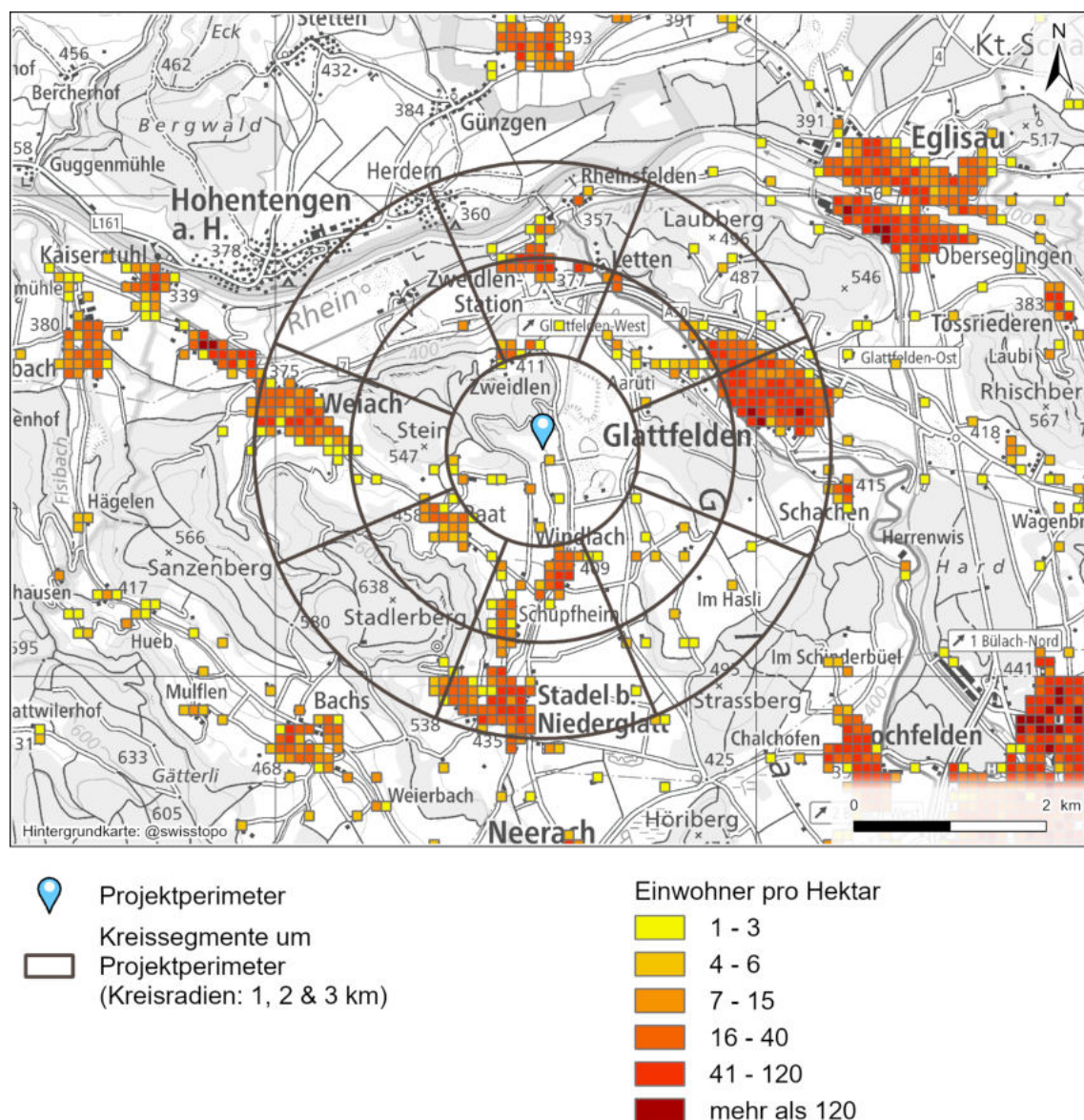


Fig. 3-4: Ständige Wohnbevölkerung in der Nähe des Projektperimeters

BFS, Statistik der Bevölkerung (STATPOP), Daten für 2022, veröffentlicht am 24.08.2023 (Bevölkerung und Haushalte ab 2010 | Bundesamt für Statistik (admin.ch)). Dargestellt ist nur die Schweizer Wohnbevölkerung.

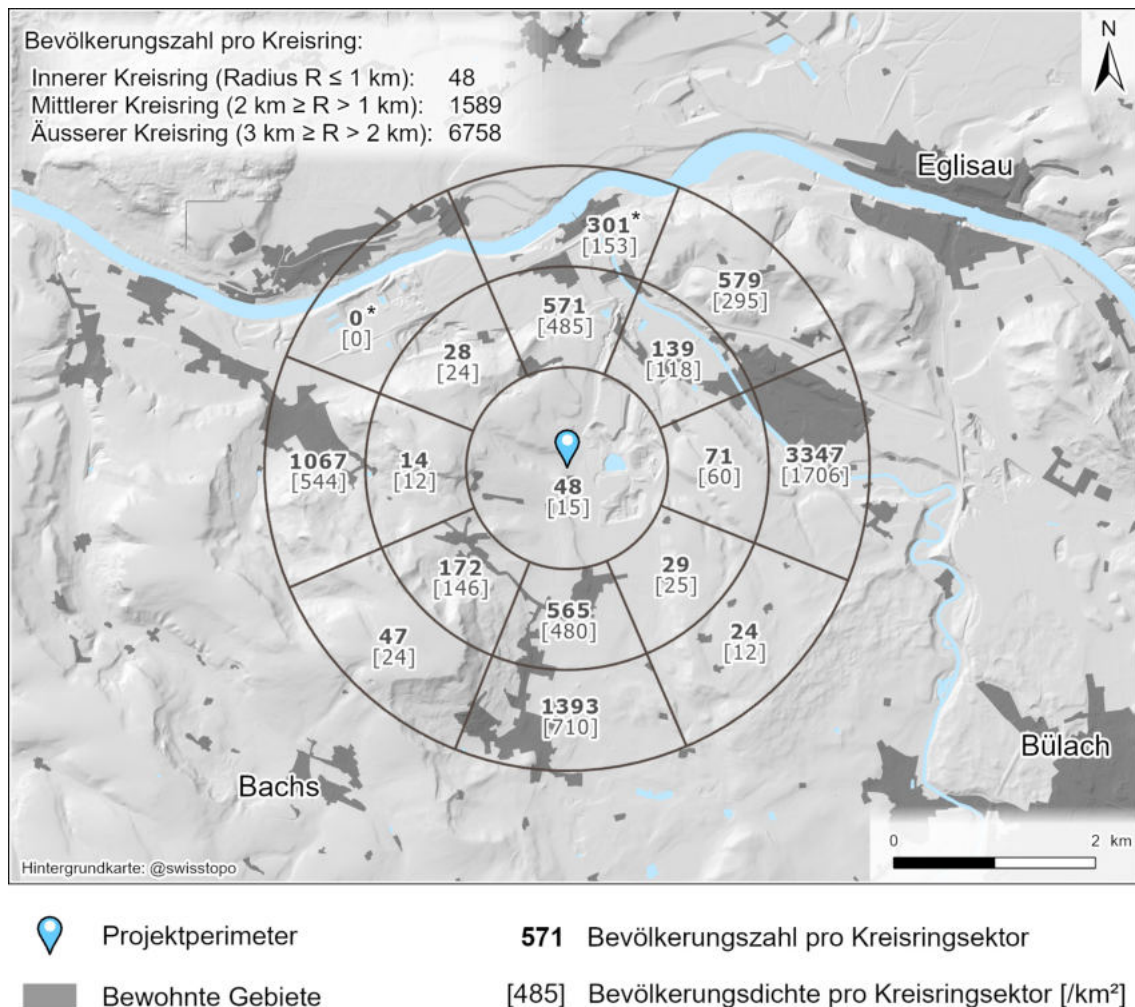


Fig. 3-5: Bevölkerungsanzahl und -dichte in der Nähe des geologischen Tiefenlagers
 Die mit * gekennzeichneten Werte repräsentieren nur die Schweizer Bevölkerungszahlen.

Eisenbahnanlagen und Durchgangsstrassen

Etwa 1.5 km nördlich des Standorts verläuft die Hauptstrasse Nr. 7²⁵, welche von der deutschen Grenze bei Basel bis zu der österreichischen Grenze bei St. Margrethen führt. Der Standort ist von der Hauptstrasse Nr. 7 über die zweispurige Schwarzüstrasse (Nebenstrasse) erschlossen, die in die Zweidlenstrasse übergeht. Im Osten, ca. 750 m entfernt, verläuft in Nord-Süd-Richtung die Verbindungsstrasse Nr. 348, die im Norden an die Hauptstrasse Nr. 7 und im Süden an die ost-westausgerichtete Hauptstrasse Nr. 355 anschliesst. Die Kantonalen Autobahnen, Umfahrung Glattfelden (A50) und Bülach – Kloten (A51) werden aktuell ausgebaut und befinden sich ebenfalls in der Nähe (etwa 1.5 km bzw. 5 km entfernt).

Entlang der Landesgrenze zwischen der Schweiz und Deutschland, etwa 2 km nördlich des Standorts, verläuft die Eisenbahnstrecke Bülach – Koblenz. Im Osten, in etwa 4 km Entfernung, verläuft die Eisenbahnstrecke Zürich – Schaffhausen, die über Glattfelden und Bülach führt.

²⁵ Gemäss Durchgangstrassenverordnung, DgStrVO: Kat A mit Nummerntafel

Auf deutscher Seite befindet sich die west-ost-orientierte Landstrasse L161 (in etwa den Rhein entlang) bzw. die nordorientierte Landstrasse L161a, die beide durch Hohentengen am Hochrhein führen. Die Bundesstrasse B34, auf die die L161a anschliesst, verläuft etwa 8 km nördlich von Hohentengen am Hochrhein und ist eine regionale Strassenverbindung.

Eine Übersicht über die Verkehrs- und Transportwege ist in Fig. 3-6 gezeigt. Eine Bewertung von Transportunfällen bei Eisenbahnanlagen und Strassen erfolgt in Kap. 3.3.2.

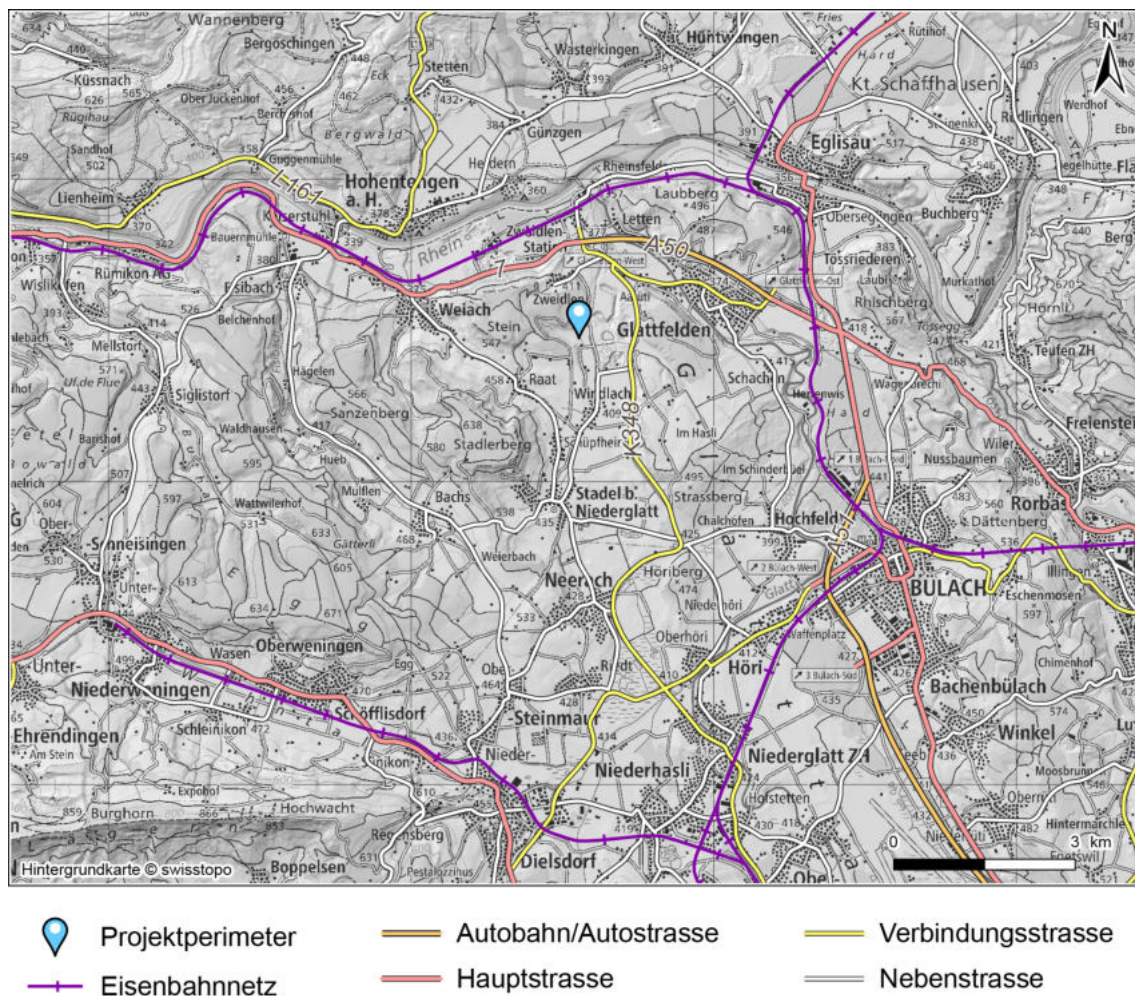


Fig. 3-6: Verkehrs- und Transportwege im Umkreis des Projektperimeters

Luftverkehr

Der internationale Flughafen Zürich-Kloten, der sich südlich in ca. 9 km Entfernung zum Projektperimeter befindet, ist der nächstgelegene Flughafen. Der Projektperimeter liegt damit, bei Berücksichtigung eines Umkreises von 50 km gemäss ENSI-A05 (ENSI 2018b), im Einflussbereich des An- und Abflugverkehrs des Flughafens Zürich-Kloten, der zum überwiegenden Teil von Verkehrsflugzeugen angefliegen wird. Der Standort befindet sich im Kontrollnahbezirk des Flughafens Zürich-Kloten. Die Flugbewegungen an den grossen Schweizer Flughäfen sind seit den 1990er Jahren aufgrund der infrastrukturellen und sicherheitsbedingten Begrenzungen nur

unwesentlich gestiegen und es ist davon auszugehen, dass sich dies auch in den nächsten Jahrzehnten nicht wesentlich ändert. Im Jahr 2019²⁶ haben in Zürich 262'026 Flugbewegungen stattgefunden (Nagra 2024e).

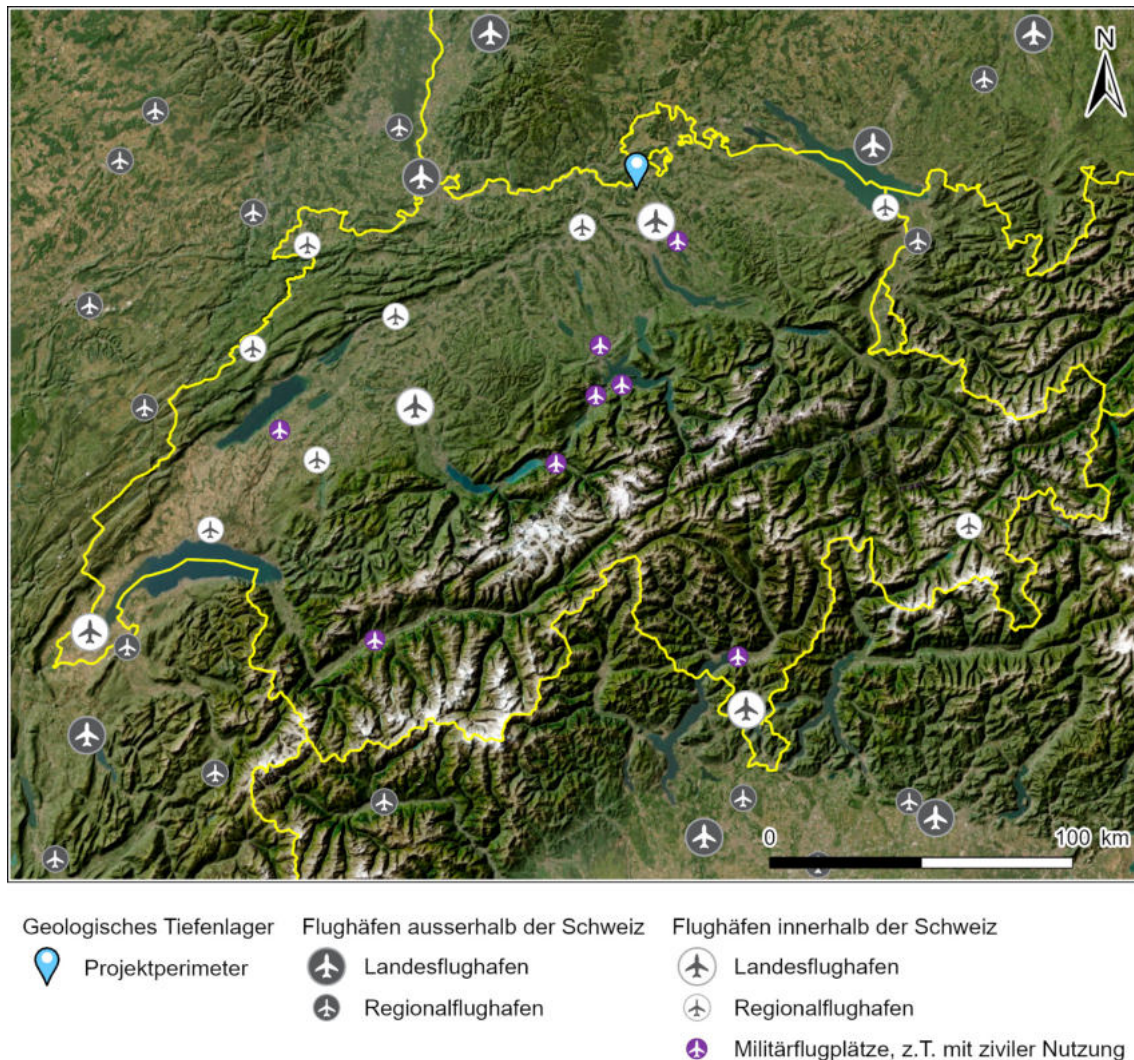


Fig. 3-7: Übersichtskarte zur Infrastruktur der Luftfahrt

Weiterhin gibt es in der weiteren Umgebung einen Regionalflugplatz (Birrfeld, ca. 21 km Luftlinie), mehrere Flugfelder (Fricktal-Schupfart, Olten, Buttwil, Winterthur, Schaffhausen) und ein Heliport (Würenlingen) für kleine Motorflugzeuge, Helikopter und Segelflugzeuge. Der Regionalflugplatz bzw. die Flugfelder haben allesamt – infolge der Flughöhe und Entfernung, insb. aber aufgrund der begrenzten Höchststartmasse – keine Relevanz für den Standort. Der nächstgelegene Militärflugplatz, der auch für zivile Zwecke nutzbar ist, ist Dübendorf in etwa 20 km Entfernung (Luftlinie). Eine Übersicht über die Infrastruktur der Luftfahrt zeigt Fig. 3-7.

²⁶ Das Jahr 2019 ist aufgrund der COVID-19-Pandemie das repräsentative Jahr für die Ermittlung der Flugbewegungen zum Zeitpunkt der Erarbeitung.

Der von Verkehrsflugzeugen zu benutzende Luftraum ist strukturiert und wird von Skyguide als Flugsicherungsdienst betreut. Der Verkehr erfolgt auf festgelegten Routen und wird ständig überwacht und aktiv beeinflusst, wozu Verkehrsflugzeuge über Einrichtungen zum Instrumentenflug verfügen. Eine Bewertung von Unfällen im Luftverkehr erfolgt in Kap. 3.3.2.

Betriebe

Für die Standortbewertung hinsichtlich Einwirkungen aus Betrieben (bzw. Arbeitsstätten) in der Umgebung der Anlage werden die Betriebe in einem Umkreis von 3 km um den Standort betrachtet, die der Störfallverordnung (StFV 1991) unterstellt sind. Wie in Fig. 3-8 dargestellt, sind keine derartigen Betriebe in den Gemeinden registriert. Für Informationen zu den Betrieben ausserhalb des Umkreis von 3 km wird auf Nagra (2024i) verwiesen.

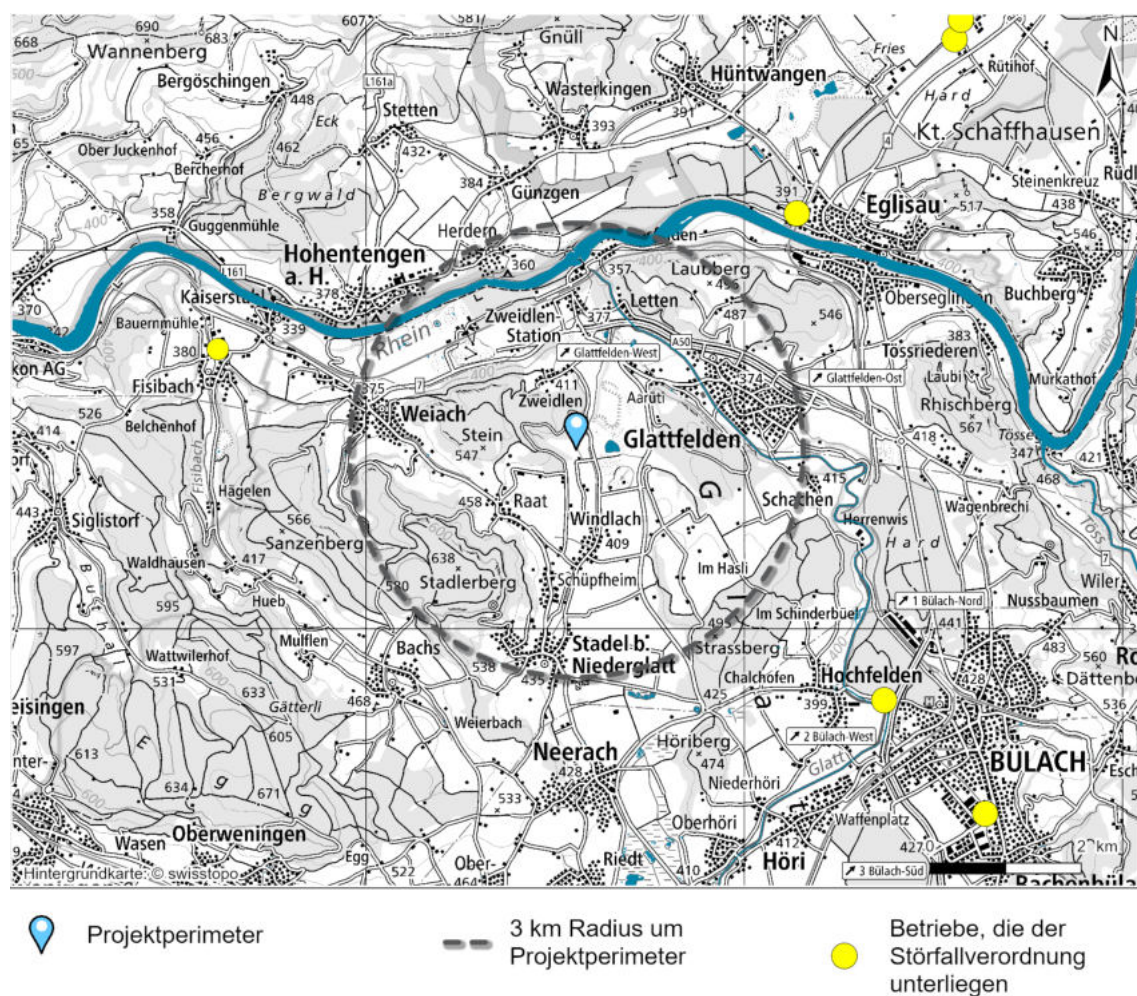
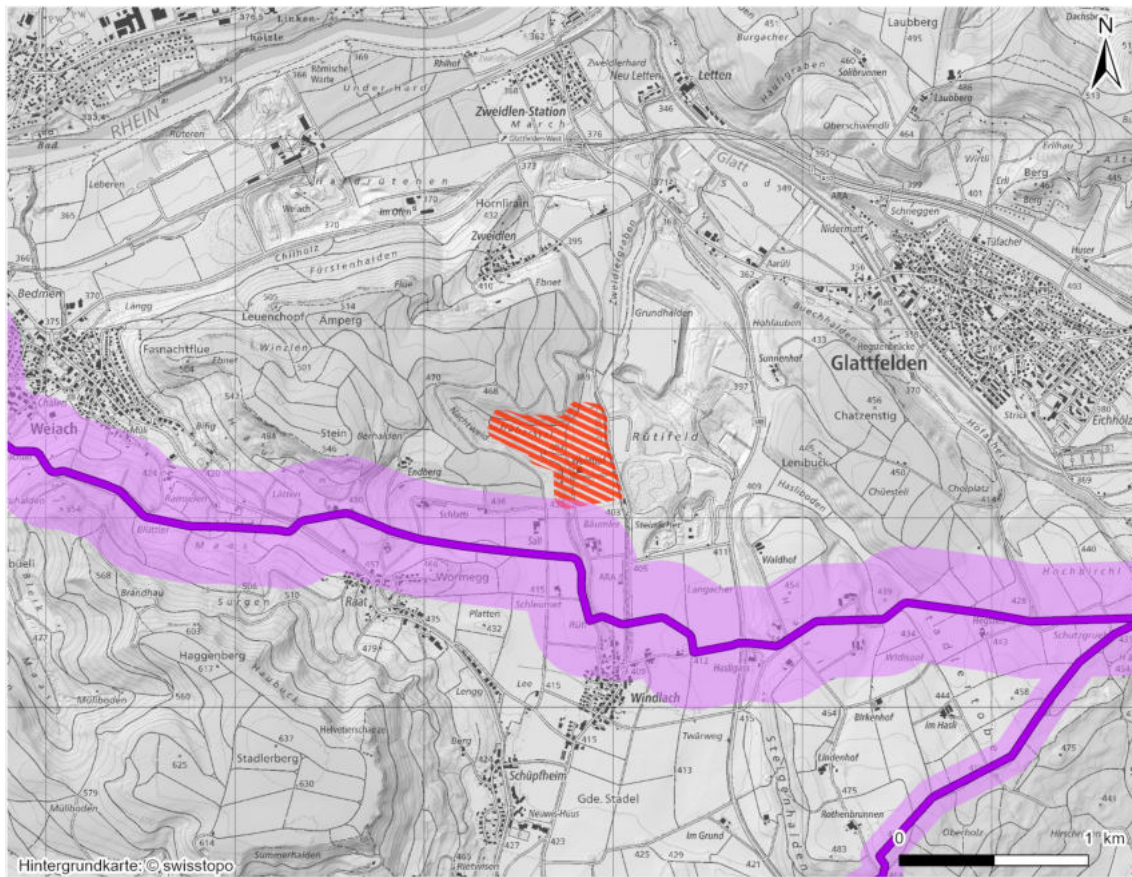


Fig. 3-8: Standorte der StFV-Betriebe um den Projektperimeter

Rohrleitungen

Südlich des Projektperimeters verläuft eine im Boden verlegte Hochdruckgasleitung der Erdgas Ostschweiz AG (Fig. 3-9), die einen maximal zulässigem Betriebsdruck von 70 bar aufweist. Der Verlauf der Leitung weist einen minimalen Abstand von etwa 250 m zum Projektperimeter auf. Bzgl. des Anlagenperimeters hat die Gasleitung einen Abstand von etwa 330 m und liegt damit ausserhalb des 300 m betragenden Konsultationsbereichs. Die technischen Daten der Gasleitung sind in Tab. 3-3 dargestellt. Eine Bewertung der Gasleitungen erfolgt in Kap 3.3.2.



 Projektperimeter

Risikokataster Kanton Zürich

 Gasleitung

 Konsultationsbereich Erdgasleitungen

Fig. 3-9: Verlauf der Erdgasleitung

Tab. 3-3: Leistungskennzahlen der Erdgashochdruckleitung

Angabe	70 bar Hochdruckgasleitung
Baujahr	1997
Material / Typ	StE 480.7 TM
Nennweite	DN 700
Aussendurchmesser	711.2 mm
Rohrwandstärke	10.0 mm
Innendurchmesser	691.2 mm
Betriebsdruck	Max. 70 bar
Überdeckung	1.2 m bis 3.0 m (nach Plan Nr. 95-35)

3.3.2 Einwirkungen bei Störfällen in der Nachbarschaft

Ausgehend von den Angaben in Kap. 3.3.1 zur Verkehrsinfrastruktur und den Betrieben in der Umgebung werden in diesem Kapitel die Einwirkungen bei Störfällen in der Nachbarschaft abgeleitet.

Transportunfälle auf Verkehrswegen

In Nagra (2024i) ist eine systematische Bewertung denkbarer Transportunfälle auf Verkehrswegen in der Umgebung des Standorts dokumentiert.

Sowohl auf der Bahnstrecke Koblenz – Eglisau als auch auf der nahezu parallel dazu verlaufenden Hauptstrasse Nr. 7 (vgl. Fig. 3-6) können Flüssigpropan-, Benzin- und Flüssigchlortransporte als einzig in Frage kommende Gefahrguttransporttypen durchgeführt werden. Diese Stoffgruppen stellen für die Gefahrenanalyse die relevanten Leitstoffe dar. Transporte von in Endlagerbehältern verpackten radioaktiven Abfällen aus der Brennelementverpackungsanlage oder den Zwischenlagern zum gTL stellen keine Gefahr dar, da diese Transporte sowie die verwendeten Behälter bewilligt bzw. zertifiziert sind und strengen Sicherheitsanforderungen unterliegen.

Die Nebenstrassen westlich und östlich des Standorts werden aufgrund ihrer Lage und Ausrichtung nicht durch Schwerverkehr oder durch grosse Gefahrguttransporte befahren. Sie stellen keine Haupt- oder Durchgangsverkehrsrouten dar und werden im Wesentlichen zur Verbindung verschiedener Gemeinden genutzt. Die kleinste Distanz der im Osten gelegenen Verbindungsstrasse (Nr. 348) hat eine Entfernung von ca. 750 m. Schwerlast- und Gefahrguttransporte werden vorrangig auf der vom Standort ca. 5 km entfernten Autobahn A51 durchgeführt. Die im Westen gelegene Verbindungsstrasse (Nr. 566) hat als enge Nebenstrasse eine kleinste Luftliniendistanz von 1.1 km und eignet sich mit engen kurvigen Dorfdurchfahrten ebenfalls nicht zum Schwerlast- resp. Gefahrguttransport. Auf diesen Strecken werden somit keine Propan- oder andere explosible oder gefährliche Gütertransporte (von bedeutender Menge) durchgeführt.

Die Resultate der Analysen und Bewertungen zeigen, dass eine Gefährdung des Standorts durch Brand, Explosion oder luftgetragene Toxizität eines mit feuergefährlichen oder toxischen Gütern beladenen Lastkraftwagens oder Bahnwaggon ausgeschlossen werden kann. Der Standort ist geeignet. Dies ist in den natürlichen Schutzigenschaften begründet, charakterisiert einerseits durch einen grossen Abstand sowie andererseits durch die natürlichen topologischen Barrieren zwischen den Gefahrguttransportrouten und dem Standort.

Unfälle im Luftverkehr (unfallbedingter Flugzeugabsturz)

Zur Charakterisierung des Standorts in Bezug auf das Potenzial der Gefährdung durch einen unfallbedingten Flugzeugabsturz werden in Nagra (Nagra 2024e) die jährlichen Absturzhäufigkeiten von Flugzeugen jeweils für die zu untersuchenden Flugzeug- sowie Gewichtskategorien gemäss den Vorgaben in ENSI-A05 (ENSI 2018b) ermittelt. Die Bestimmung der Absturzhäufigkeiten erfolgt für die folgenden drei Flugzeugkategorien:

- Verkehrsflugzeuge
- Strahlgetriebene Kampfflugzeuge
- Leichtflugzeuge und Hubschrauber

Zur Ermittlung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten von Verkehrsflugzeugen werden die jährlichen Flugbewegungen der in der Nähe des Standorts befindlichen Flughäfen (d. h. Starts und Landungen) sowie die jährlichen Transitflugbewegungen in einem definierten Umkreis um den Standort zu Grunde gelegt. Die Anzahl jährlicher Flugbewegungen wird grundsätzlich unter Berücksichtigung der Schwankungen in der Vergangenheit sowie der erwarteten zukünftigen Schwankungen ermittelt. Für die Bestimmung der Flugbewegungen in Flughafennähe werden alle Flughäfen innerhalb eines Radius von 50 km um den Anlagenstandort berücksichtigt (vgl. Fig. 3-7). Hinsichtlich der jährlichen Transitflugbewegungen sind alle Luftkorridore in einem Radius von 100 km um den Standort zu betrachten. Darüber hinaus werden weitere Randbedingungen wie bspw. die mittlere Flughöhe in Flughafennähe bei Starts und Landungen sowie bei Transitflügen über dem zu betrachtenden Standort ermittelt. Die jährliche Absturzhäufigkeit von Kampfflugzeugen sowie Leichtflugzeugen und Hubschraubern wird direkt aus der Absturzstatistik dieser Flugzeugkategorien für das Gebiet der Schweiz berechnet.

In der Tab. 3-4 sind die in Nagra (2024e) ermittelten jährlichen Absturzhäufigkeiten für die verschiedenen Flugzeugkategorien bezogen auf eine normierte Trefferfläche zusammengestellt. Für eine für Verkehrsflugzeuge nach den Flugphasen Start/Landung und Transitflug einzeln aufgeschlüsselte Betrachtung der Absturzhäufigkeiten wird auf Nagra (2024e) verwiesen.

Tab. 3-4: Zusammenstellung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten der verschiedenen Flugzeugkategorien, bezogen auf eine normierte Trefferfläche

Flugzeugkategorie	Absturzhäufigkeit [a ⁻¹ m ⁻²]	Verteilung [%]
Verkehrsflugzeuge	3.99E-11	25.9
davon		
> 300 t	1.44E-12	0.9
> 100 t bis ≤ 300 t	3.69E-13	2.4
> 50 t bis ≤ 100 t	3.00E-11	19.5
≤ 50 t	4.73E-12	3.1
Kampfflugzeuge	4.21E-12	2.7
Leichtflugzeuge & Hubschrauber	1.10E-10	71.4
Summe	1.54E-10	100

Mit der beschriebenen Vorgehensweise ergibt sich gemäss den ENSI-Berechnungsvorschriften für eine normierte virtuelle Trefferfläche eine unfallbedingte Absturzhäufigkeit über alle Flugzeugkategorien von $1.54\text{E-}10 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$. Die Bestimmung der jährlichen Absturzhäufigkeiten in Bezug auf die virtuelle Trefferfläche der geplanten OFA wird in den späteren Bewilligungsschritten durchgeführt, da im Zuge der Rahmenbewilligung weder die genaue Anordnung noch die konkreten Abmessungen der Bauwerke festgelegt werden (vgl. Kap. 2.3.1 und 2.3.2).

Auch wenn sich in ca. 2 km Entfernung des Standorts vor über 30 Jahren ein Flugzeugabsturz²⁷ ereignete, so zeigen die Ergebnisse der Analyse basierend auf den Anforderungen der ENSI-A05 insgesamt, dass das Gefährdungspotenzial für einen unfallbedingten Flugzeugabsturz für den Standort grundsätzlich als gering eingestuft wird. Darüber hinaus sind die ermittelten jährlichen Absturzhäufigkeiten von Flugzeugen am Standort vergleichbar mit denen an anderen Standorten von Kernanlagen in der Schweiz und bestätigen somit die Eignung des Standorts.

Im Hinblick auf den zukünftigen Flugverkehr aller drei Flugzeugkategorien ist zu erwarten, dass die resultierenden Ergebnisse aus der Analyse auch für die Zukunft repräsentativ sind. So ist mit einem relevanten Anstieg der Anzahl der Flugbewegungen am Flughafen Zürich derzeit nicht zu rechnen. Gleichzeitig hat die Sicherheit in der Luftfahrt stetig zugenommen und sich seit Jahren positiv entwickelt. Auch ein Kapazitätsaufbau ist aufgrund der bereits hohen Auslastung des Flugverkehrs am Flughafen Zürich nicht geplant, so dass auch in Zukunft vergleichbare Absturzhäufigkeiten auf einem konstant niedrigen Niveau zu erwarten sind.

Störfälle bei anderen Betrieben

Wie in Kap. 3.3.1 und Nagra (2024i) beschrieben, gibt es keine Betriebe in der Umgebung des Standorts, die eine Gefährdung oder ein Risiko darstellen, weshalb der Standort geeignet ist.

Militäranlagen

Nach Auskunft des eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) geht von militärischen Anlagen und Objekten sowie allfälligen militärischen Aktivitäten in der Umgebung des Standorts (bspw. Transporte) kein Gefährdungspotenzial aus, das die Eignung des Standorts in Frage stellen würde.

Störfälle bei Rohrleitungen

Untersuchungen bzgl. Unfällen bei unterirdisch verlegten Gasleitungen zeigen, dass fast 100 % der Unfälle aufgrund Beschädigungen durch Bauarbeiten zurückzuführen sind. Ein Totalversagen der in Kap. 3.3.1 beschriebenen Gasleitung ist aufgrund des nicht bebaubaren Agrarlandes, des z. T. bis zu 3 m unter der Erdoberfläche geführten Leitungsverlaufs und durch die an der Oberfläche markierte Erdgasleitungsschneise nicht zu unterstellen. Tiefergehende Erdumwälzungsarbeiten (mit Schädigungspotential der Leitung) im Bereich der markierten Erdgasleitungsschneise sind zudem bewilligungspflichtig.

Trotz der geringen Wahrscheinlichkeit eines Gasleitungsunfalls wird in Nagra (2024i) konservativerweise der massgebende Störfall mit vollständiger Gasleitungszerstörung unterstellt und dabei die sich daraus ergebenden Gefährdung für den Standort am konservativsten Punkt minimaler Distanz durch Explosion und Wärmestrahlung bewertet. Die Analysen stützen sich dabei auf die Grundlagen bzw. Rechenvorschriften der schweizerischen Erdgaswirtschaft ab. Aufgrund des generischen Charakters der Analysen (bspw. keine Berücksichtigung der Abschattung infolge standortspezifischer, topographischer Gegebenheiten oder vorgelagerter Hindernisse) sind die Ergebnisse als konservativ zu bewerten.

²⁷ Absturz einer DC-9 am 14. November 1990 auf den Haggenberg, einem nördlichen Ausläufer des Stadlerbergs.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich aus einem unterstellten Totalversagen, d. h. einer vollständigen doppelseitigen Trennung der Gasleitung am konservativsten Punkt minimaler Distanz zum Standort mit nachfolgend grösstmöglicher Störfallausprägung durch Feuerball, Gaswolkenexplosion und Fackelbrand keine nachteiligen Auswirkungen am Standort in Form unzulässig hoher Wärmestromdichten, Wärmestromdosen oder Überdruckimpulsen ergeben. Alle zu den Unfallabläufen ermittelten Druckspitzen und Wärmestromdichten liegen weit unterhalb kritischer Werte, die keinen nachteiligen Einfluss auf den sicheren Betrieb der Anlage haben. Da der Standort zudem topographisch ca. 30 m tiefer liegt und zudem zum Teil ein hügeliges Waldgebiet mit bis zu 30 m hohem Mischwald vorgelagert ist, dürften sowohl bei einem Feuerball als auch beim Fackelbrand zusätzliche Abschirmeffekte wirksam werden. Somit wäre bei solch einem Ereignis von jeweils noch niedrigeren Wärmestromdichten bzw. Wärmedosen und Überdrücken auszugehen, als es die unter den Bedingungen ebenen und freien Geländes für diese Analyse durchgeführten Modellrechnungen ausweisen.

Aus Störfällen im Zusammenhang mit Rohrleitungen (Gasleitungen) ergeben sich für den Bau und Betrieb des gTL keine Gefährdungen. Der Standort ist geeignet.

Waldbrandgefährdung

Die Nähe zum Waldrand ist keine ungewöhnliche Randbedingung für Kernanlagen. Eine systematische Einordnung und Bewertung der Waldbrandgefährdung erfolgt in Nagra (2024i), deren Ergebnisse nachfolgend zusammengefasst werden.

Die Waldbrandgefährdung im angrenzenden Wald ist historisch gesehen äusserst gering; seit mindestens den 1950er Jahren ist kein Brand aufgetreten. Zudem werden durch die Einhaltung eines ausreichend breiten brandlastfreien (auf dem Anlagenperimeter) und brandlastbegrenzten Streifens (Freihaltestreifen, vgl. Fig. 2-6) zwischen den Bauten der OFA und dem angrenzenden Wald die potenziellen Auswirkungen der Hitzestrahlung eines Waldbrands auf die Betonteile und andere wichtige Anlageteile reduziert und auch ein Übergreifen des Brands auf den Anlagenperimeter wird verhindert. Die nukleare Sicherheit wird durch die grosse thermische Robustheit der Endlagerbehälter garantiert. Die zahlreichen Feuerwehren der Umgebungsgemeinden sind ausserdem für die rasche Bekämpfung solcher anlagen nahen Waldbrände entsprechend ausgebildet und ausgerüstet.

Ein Waldbrand im angrenzenden Wald stellt keine Gefährdung für die nukleare Sicherheit dar. Der Standort ist geeignet.

Gefährdungspotential infolge gravitativer Gefahren

In Nagra (2024q) werden basierend auf den geologischen und hydrogeologischen Bedingungen am Standort die gravitativen Gefahren qualitativ beschrieben und bewertet. Nachfolgend werden die Ergebnisse wiedergegeben.

In der nahen Umgebung des Anlagenperimeters sind keine Felshänge/-böschungen vorhanden. Daher können Gefahren durch Steinschlag, Fels- oder gar Bergsturz im Anlagenperimeter ausgeschlossen werden.

In der nahen Umgebung des Anlagenperimeters steht zum Teil schlecht zementierter Molassefels an. Aktuell ist das umliegende Gelände bewaldet. Permanente und mittel- resp. tiefgründige Rutschungen können aufgrund der Geländemorphologie, der Lagerungsverhältnisse sowie der Materialzusammensetzung ausgeschlossen werden. Das Auftreten von flachgründigen, kleinräumigen, spontanen Rutschungen oder kleinräumigen Hangmuren kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, insbesondere im Zusammenhang mit extremen Niederschlagsereignissen. Diese Gefahren können jedoch mit einfachen baulichen und organisatorischen Massnahmen beherrscht werden.

Weitere gravitative Naturgefahren (Lawinen, Blitzfluten) werden aufgrund der Topographie und des geringen Gefälles in der Umgebung des Projektperimeters, des Bewuchses und der Niederschlagsmengen ebenfalls als nicht relevant beurteilt.

Die Bewertung der gravitativen Gefahren bestätigt die Eignung des Standorts.

3.3.3 Meteorologie und Klima

Zur Charakterisierung des Standorts in Bezug auf das Potenzial meteorologischer und klimatologischer Gefährdungen werden die Verhältnisse sowohl qualitativ als auch quantitativ über die statistische Auswertung von Messdaten spezifischer Parameter in Nagra (2024r) beschrieben und ausgewertet. Bei der Ermittlung der Gefährdung wird auf bestehende Datensätze und Auswertungen zurückgegriffen sowie neue extremwertstatistische Analysen mit erweiterten Datensätzen durchgeführt. Die Methode, Daten (inkl. Datenqualität) und Bewertung orientieren sich dabei am Vorgehen bestehender standortspezifischer Gefährdungsanalysen anderer Schweizer Kernanlagen. Dabei werden folgende Gefährdungen behandelt, deren Kernergebnisse nachfolgend zusammengefasst werden:

- Maximale und minimale Lufttemperatur
- Wind und Tornado
- Niederschlag (Starkregen, Schnee, Schneelasten, Hagel und vereisender Regen)
- Blitze

Allgemein lässt sich feststellen, dass das Klima am Standort den typischen mitteleuropäischen Verhältnissen für eine niedrige Höhenlage entspricht und darüber hinaus die Meteorologie am Standort typisch für die Region Nordschweiz bzw. das Schweizer Mittelland ist.

Die Ergebnisse der extremwertstatistischen Analyse zeigen zudem – zusammen mit den zahlreichen bereits bestehenden Studien – dass für den Standort keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnlichen Randbedingungen bzgl. extremer meteorologischer und klimatologischer Verhältnisse, bei denen auch erwartbare Einflüsse des Klimawandels entsprechend berücksichtigt wurden, vorliegen. Die standortspezifischen Parameter, die für ein 10'000-jährliches Ereignis in Tab. 3-5 zusammengefasst sind, liegen innerhalb der üblichen für die Auslegung von kerntechnischen Bauten und Strukturen festgelegten Grenzwerte.

Insgesamt ist der Standort somit durch stabile meteorologische und klimatologische Verhältnisse gekennzeichnet und ist für den Bau und Betrieb eines gTL geeignet.

Tab. 3-5: Gefährdungsannahmen (Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr) am Standort unter Berücksichtigung des Klimawandels (Nagra 2024r)

Gefährdungen	Gefährdungsannahmen
Hohe Lufttemperatur	+45 °C
Tiefe Lufttemperatur	-23 °C
Extremer Wind	Tornado: 50 m/s, Wind: 46 m/s
Starkregen (2h Maxima)	106 mm
Schneelast	2.0 kN/m ²
Hagel (Durchmesser, Geschwindigkeit)	15 cm, 53 m/s
Vereisender Regen (Flächenlast)	0.45 kN/m ²
Blitze (Stromstärke)	250 kA

3.3.4 Externe Überflutung

Die Charakterisierung des Standorts in Bezug auf das Potenzial einer externen Überflutung anhand der standortspezifischen Bedingungen ist sowohl quantitativ als auch qualitativ in Nagra (2024q) beschrieben, deren Kernergebnisse nachfolgend zusammengefasst werden.

Flusshochwasser

Gefährdungen im Zusammenhang mit grossen anliegenden Fliessgewässern haben für den Standort keine Bedeutung. Die Flüsse Glatt und Rhein liegen (vgl. Fig. 3-1) ausserhalb des topographischen Einflussbereichs; der Standort ist somit vor Flusshochwasser geschützt.

Oberflächenabfluss

Für Starkniederschlagsereignisse zeigen die Oberflächenabflussmodellierungen (z. T. mit konservativ gewählten Parametersets gerechnet), dass der Zufluss zum Anlagenperimeter aus Richtung Windlach dominant ist. Dieser wird durch drei diskrete Hauptfliesswege gebildet, welche alle im Bereich von Windlach in den Dorfbach bzw. die anliegenden Flächen gelangen:

- aus Westen (Raar, Schlatti) mit Umlenkung in Windlach in den Talboden des Dorfbachs
- von Süden (Stadel, Schüpheim) entlang des Dorfbachs
- aus Südosten (Kiesstrasse) mit Umlenkung in Windlach in den Talboden des Dorfbachs

Infolge der vergleichbaren Fliessweglänge und die damit verbundenen vergleichbaren Fliesszeiten wird eine Kumulation zu einer einzigen Hochwasserwelle begünstigt, welche sich ab Windlach talabwärts bewegt²⁸. Gemäss Nagra (2024q) sammelt sich das abfliessende Wasser in natürlichen Retentionsräumen, in denen es entweder über das Niederschlagsereignis hinaus ganz zurückgehalten wird (und in die Tiefe versickert) oder vorerst zurückgehalten und anschliessend dosiert abgegeben wird. Diese Retentionsräume ergeben sich durch die spezielle Oberflächen-topographie im Gebiet. Zudem werden anliegende Wiesen und Felder durch Ausuferungen

²⁸ Der Zufluss aus dem direkten Einzugsgebiet des Projektperimeters (Haberstal) ist wegen der kurzen Fliesszeiten zeitlich deutlich vorgelagert. Der Beitrag zur Hauptwelle ist vernachlässigbar.

infolge Kapazitätsengpässen in den Gerinnen (insbesondere bei den Siedlungseingängen) als Retentionsflächen aktiviert. Das Oberflächenabflussmodell zeigt bei allen Szenarien eine Seenbildung um Windlach, die auch bei Extremereignissen in der jüngeren Vergangenheit beobachtet wurde.

Im Bereich des Anlagenperimeters treten grössere Wassertiefen nach Starkniederschlagsereignissen nur an dessen Südende auf und sind durch lokale Geländevertiefungen bedingt (alter Bachlauf). Mit einfachen Geländeanpassungen lassen sich dort die Wassertiefen reduzieren bzw. ganz vermeiden. Generell können Überflutungen des Anlagenperimeters aus dem umliegenden Gelände mit vorbeugenden Massnahmen verhindert werden, sofern dies erforderlich ist. Je nach Art der Massnahme orientieren sich diese am Spitzenabfluss oder am maximalen Abflussvolumen. Für den Fall eines 10'000-jährlichen Niederschlagsereignisses liegt die Abflussspitze des Dorfbachs im Bereich von rund 50 bis 70 m³/s (Nagra 2024q). Die Abflussspitze wird hauptsächlich (knapp 90 %) durch von Windlach vorbei an der ARA und Bäumler in Richtung Zweidlergraben oberflächlich abfliessendes Wasser gebildet. Nach dem Perimeter, beim Übergang in den Zweidlergraben nehmen die Sohlenneigung des Dorfbachs und der verfügbare Durchflussquerschnitt des Gerinnes erheblich zu. Der Spitzenabfluss lässt sich darin ableiten und erreicht nach 1.6 bzw. 2.6 km grosse Vorfluter (Glatt und Rhein).

Zusammenfassend zeigt die Charakterisierung des Standorts, dass der Oberflächenabfluss aus der Umgebung teilweise in Geländemulden zurückgehalten wird oder topographisch bedingt durch die Talebene des Dorfbachs fliesst und mit geeigneten Massnahmen von der Anlage ferngehalten werden kann. Starkniederschlagsereignisse führen somit zu keiner Gefährdung der Anlage. Der Standort ist für den Bau und Betrieb eines gTL bzw. dessen OFA geeignet.

3.3.5 Baugrundverhältnisse

Die geologische Situation des Standorts ist in Nagra (2024p) und Nagra (2024o) beschrieben und in Kap. 4.3 zusammengefasst. Die bautechnisch relevanten geologischen Eigenschaften werden in Nagra (2023b) und Eisenlohr & Müller (2016) basierend auf vorhandenen geologischen und hydrogeologischen Grundlagen beschrieben sowie eine bautechnische Bewertung durchgeführt. Die Bewertung zeigt aufgrund der im Folgenden zusammengefassten Aussagen zu den Baugrundverhältnissen und der Grundwassersituation, dass der Standort hinsichtlich des Baugrunds für den Bau und den Betrieb eines gTL geeignet ist.

Der Baugrund für die OFA besteht aus quartären Lockergesteinen, die den «Molassefels» überdecken (Fig. 3-10). Die quartären Lockergesteine bestehen im Westen des Anlagenperimeters aus bis zu mehreren Metern mächtigen Gehängeschutt- und Bachschuttablagerungen. Entlang der Talflanken werden nur sehr geringe Mächtigkeiten erwartet. Im Osten des Anlageperimeter verzahnen sich die Gehängeschutt- und Bachschuttablagerungen mit bis zu mehreren Zehner Metern mächtigen Niederterrassenschotter. Die Gehängeschutt- resp. Bachschuttablagerungen sind generell als wenig tragfähig und setzungsempfindlich zu betrachten. Die darunterliegende Molasse ist gut tragfähig und nicht setzungsempfindlich. Der Niederterrassenschotter stellt auch einen gut tragfähigen Baugrund mit geringer Setzungsempfindlichkeit dar. Der Baugrund ist mit üblichen bautechnischen Methoden beherrschbar.

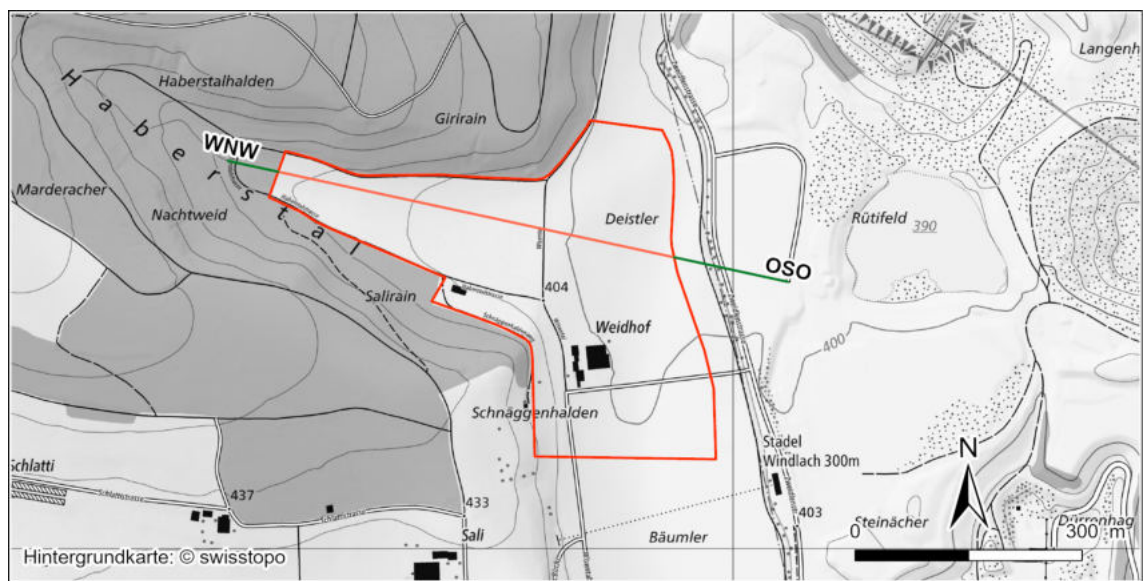
Der Baugrund für die OFA befindet sich oberhalb des Grundwassers (Fig. 3-10). Es ist mit geringen Mengen «Hangsickerwasser» entlang der Felsoberfläche zu rechnen.

Bei den Baugrundverhältnissen für die UTA wird zwischen Zugangsbauwerken und Bauwerken auf Lagerebene unterschieden. Zur Erschliessung der Lagerebene mit den Zugangsbauwerken wird eine Abfolge von ruhig gelagerten, unterschiedlichen Sedimentgesteinen durchörtert, die in den Tiefbohrungen charakterisiert wurden. Sie gehören zu den Gruppen Obere Meeresmolasse, Untere Süsswassermolasse, Malm und Dogger (vgl. Fig. 4-2), zu dem das ca. 105 m mächtige Wirtgestein Opalinuston gehört, in dem die Bauwerke auf Lagerebene zum Liegen kommen. Im

Bereich des Planungssperimeters für den Hauptschliessungsbereich liegt die Mittelebene des Opalinuston auf ca. 800 m unter Terrain. Die Eigenschaften des Wirtgesteins Opalinuston sind in Kap. 4.4 beschrieben. Für die UTA wurden folgende ingenieurgeologische Hauptgefährdungen identifiziert, die mit üblichen bautechnischen Methoden beherrschbar sind:

- In den Zugangsbauwerken stellen mögliche Bergwasserzutritte in der Molasse und den «Malmkalken»²⁹ die Hauptgefährdung dar. Wasserführende Zonen, können mit geeigneten Vorerkundungsmassnahmen weitgehend detektiert und bautechnisch charakterisiert werden. Darüber hinaus stehen bautechnische Massnahmen zur Verfügung, um allfällige Wasserzutritte auf ein akzeptables Mass zu reduzieren bzw. zu verhindern. Bergwasserzutritte sind deshalb vor allem für den Bau der Zugangsbauwerke relevant. Für die Betriebsphase wird der Ausbau so ausgelegt, dass keine bedeutenden Wasserzutritte erwartet werden. Massnahmen der Vorerkundung und der Bautechnik, die im Hinblick auf Bergwasserzutritte ergriffen werden können, sind in Nagra (2022) dokumentiert.
- Beim Bau der Bauwerke auf Lagerebene ist aufgrund der Überlagerung mit Gebirgsverformungen und grossen Gebirgsdrücken zu rechnen. Diese können für die Bau- und Betriebsphase mit bekannten bautechnischen Massnahmen beherrscht werden.

²⁹ «Felsenkalk» + «Massenkalk», Schwarzbach-Formation und Villigen-Formation



□ Anlagenperimeter

— Profilline innerhalb Perimeter

— Profilline ausserhalb Perimeter

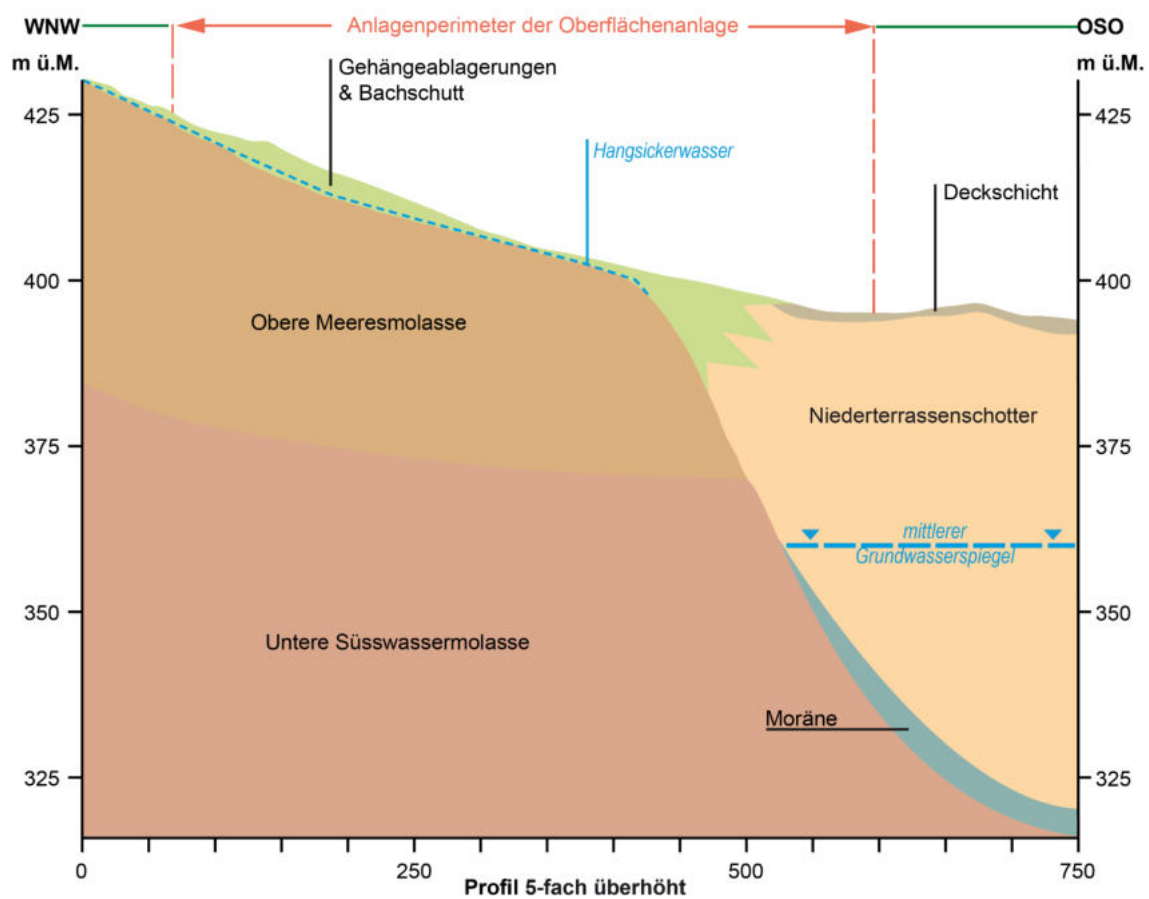


Fig. 3-10: Geologisches Profil durch den Anlagenperimeter basierend auf Eisenlohr & Müller (2016) und dem geologischen Schichtmodell mit Stand Februar 2022

3.3.6 Seismizität

Die Charakterisierung des Standorts in Bezug auf die Gefährdung von Erdbeben für die Betriebsphase des gTL ist detailliert in Nagra (2024j) gemäss den gesetzlichen und behördlichen Vorgaben dokumentiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammenfassend wiedergegeben und bezüglich der Standorteignung bewertet. Die Erdbebengefährdung wird dabei in drei Komponenten gegliedert, die separat betrachtet und bewertet werden:

- Verschiebungsgefährdung, für den Fall eines Bruches durch Teile der Anlage,
- Gefährdung durch die Bodenbewegung infolge der Erdbebenwellen,
- Gefährdung durch geologisch-induzierte Prozesse, die durch Erdbeben hervorgerufen werden können.

Die instrumentelle, wie historisch belegte Aufzeichnung von Erdbeben in der Schweiz ergeben ein umfassendes Bild der seismischen Aktivität. Demnach ist die Aktivität auf die Zentralschweiz und das Wallis sowie den Oberrheingraben bei Basel konzentriert. Der Standort befindet sich in der seismisch ruhigsten Region der Schweiz (Fig. 3-11).

Verschiebungsgefährdung

Die Basis für die Beurteilung der Verschiebungsgefährdung am Standort ist die Auswertung der 3D-Seismik (Nagra 2024a). Die Auswertung zeigt keine Störungen, die zu einem Bruch an der Oberfläche im Bereich des Anlagenperimeters oder durch die UTA führen könnten. Des Weiteren lassen sich aus Untersuchungen der Geomorphologie keine Anzeichen von diskreten Versätzen des Weiach-Glatfelden-Eglisau Lineament (vgl. Fig. 4-3) in der jüngsten geologischen Vergangenheit im Umkreis des Standorts nachweisen (Nagra 2024n). Somit besteht am Standort für die Betriebsphase keine Gefährdung durch einen Bruch an der Oberfläche oder durch Teile der UTA. Die in den Lagerkammern eingelagerten Endlagerbehälter sind zudem bereits während der Betriebsphase durch die zeitnahe Verfüllung und den Verschluss der Lagerkammern ausreichend passiv vor Störfalleinwirkungen geschützt.

Gefährdung durch Bodenbewegung

Die Bestimmung der Erdbebengefährdung durch Bodenbewegungen erfolgt nach dem Modell ENSI-2015 (Roth et al. 2015). Grundlage des ENSI-2015 Modells sind umfassende probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen für die Standorte der Kernkraftwerke in der Schweiz. Für den Standort werden die Resultate des ENSI-2015 Modells für die Quellen und Ausbreitungspfade verwendet. Für die lokale Verstärkung wurden Geschwindigkeitsprofile entwickelt, welche die Gegebenheiten bezüglich der oberflächennahen Schichten am Standort abdecken. Die Erdbebengefährdung durch Bodenerschütterungen wird durch ein Spektrum der Bodenbeschleunigung, die am Standort mit einer Überschreitungshäufigkeit von 10^{-3} und 10^{-4} pro Jahr zu charakterisieren ist, spezifiziert. Die Resultate für den Anlagenperimeter sind vergleichbar mit denen anderer Kernanlagen in der Schweiz. Ferner stellt die lokale Situation des flachen Untergrunds keine ungewöhnliche Begebenheit in Bezug auf die seismische Gefährdung dar. Die Gefährdung durch Bodenerschütterungen ist in der UTA geringer als an der Oberfläche, da u. a. die lokale Verstärkung durch weiche Lockersedimente entfällt. Aus den resultierenden Gefährdungsannahmen ergeben sich somit keine besonderen Herausforderungen für eine erdbebensichere Auslegung der Anlagen. In Bezug auf die seismische Gefährdung ist die Standorteignung daher nachgewiesen.

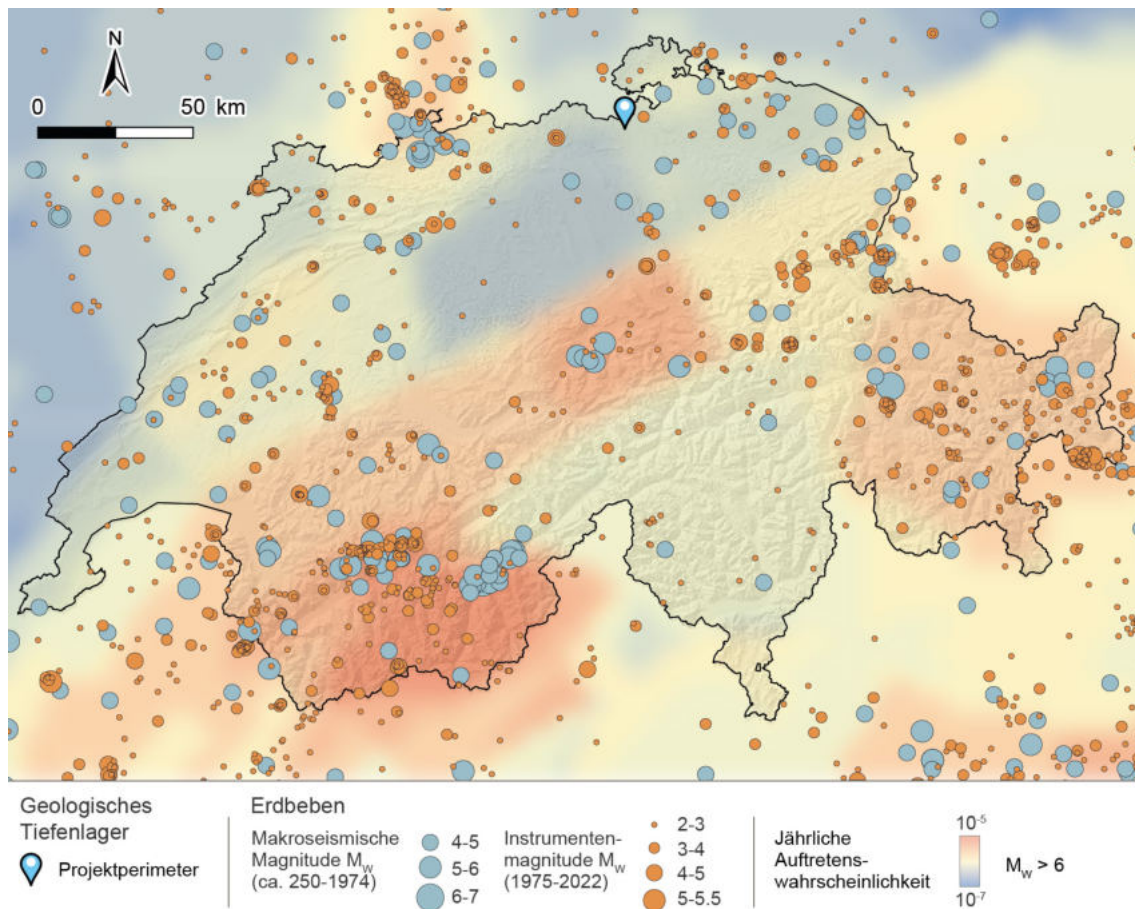


Fig. 3-11: Darstellung des Schweizer Erdbebenkatalogs (Fäh et al. 2011) inkl. einer Aktualisierung bis einschliesslich 30.09.2023 zusammen mit der modellierten Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden $M_w \geq 6$ in der Schweiz, basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen im Rahmen des PRP-Projekts (swissnuclear 2013-15)

In Farbe gezeigt ist die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Erdbebens mit $M_w \geq 6$ in einem Gebiet von 0.05° Länge $\times$ 0.05° Breite (entspricht ca. 21 km^2) für Herdtiefen $< 15 \text{ km}$. Zum Vergleich sind die effektiv erfassten Erdbeben mit $M \geq 2$ bzw. historisch dokumentierte Erdbeben mit $M \geq 4$ dargestellt.

Gefährdung durch geologisch-induzierte Prozesse

Die Bewertung der geologisch-induzierten Auswirkungen von Erdbeben auf das geologische Umfeld des Anlagenperimeters erfolgt anhand von bestehenden Baugrundinformationen (vgl. Kap. 3.3.5):

- Die Fundation der OFA erfolgt auf den tieferen, wenig setzungsanfälligen Schichten. Daher sind auch keine wesentlichen Setzungen im Zusammenhang mit Erdbeben zu erwarten.
- Bzgl. der Gefahr von gravitativen Massenbewegungen für den Anlagenperimeter in Zusammenhang mit Erdbeben gilt die Bewertung aus Kap. 3.3.2, die zeigt, dass flachgründige, kleinräumige Rutschungen oder Hangmuren nicht vollständig ausgeschlossen werden können, diese aber mit einfachen baulichen und organisatorischen Massnahmen beherrscht werden.
- Ein Potenzial für Bodenverflüssigung besteht nur in Lockersedimenten, die unterhalb des Grundwasserspiegels liegen und aus sauberen Sanden oder Silten mit schlechter Sortierung, geringer Lagerungsdichte und hoher Empfindlichkeit gegenüber einer Änderung des Wassergehalts bestehen. Im Anlagenperimeter treten nur Lockersedimente unterhalb des Grundwasserspiegels auf, die keine Tendenz zu Bodenverflüssigung aufweisen. Somit sind für den Anlagenperimeter keine relevanten geologisch-induzierten Gefährdungen, die mit Erdbeben in Zusammenhang stehen könnten, bekannt.

Gesamtbeurteilung

Die standortspezifische Erdbebengefährdungsanalyse für die Betriebsphase des gTL zeigt, dass der Standort für den Bau und Betrieb des gTL geeignet ist und der Standort gesamthaft keine Besonderheiten aufweist. Eine Verschiebungsgefährdung kann für die Betriebsphase ausgeschlossen werden. Aus dem geologischen Umfeld ergeben sich keine weiteren Gefährdungen für den Standort im Zusammenhang mit Erdbeben.

3.3.7 Zusammenfassende Bewertung und Standorteignung

Der Standort weist hinsichtlich der Eignung für die Betriebsphase günstige Eigenschaften auf.

Der Standort ist ausreichend gegen Naturgefahren geschützt, da

- der Baugrund mit üblichen bautechnischen Methoden beherrschbar ist
- die OFA oberhalb des Grundwassers gebaut wird
- Hochwasser keine Gefährdung für den Anlagenperimeter darstellt
- die Neigung des umgebenden Geländes und die Bodenbeschaffenheit unkritisch sind und deshalb Naturgefahren, die durch Hochwasser oder Erdbeben als externes Ereignis ausgelöst werden können, für die Anlage keine Gefährdung darstellen
- der Untergrund keine Besonderheiten bzgl. seismischer Gefährdung darstellt und eine Verschiebungsgefährdung ausgeschlossen werden kann
- der Standort durch stabile meteorologische und klimatologische Verhältnisse gekennzeichnet ist und extremwertstatistische Analysen, bei denen auch erwartbare Einflüsse des Klimawandels entsprechend berücksichtigt werden, zeigen, dass für den Standort keine für die Auslegung kerntechnischer Anlagen ungewöhnliche Randbedingungen vorliegen
- der Gefahr eines auf den Anlagenperimeter übergreifenden Waldbrandes mit ausreichender Distanz der OFA zum Waldrand bzw. mit einer Freihaltung der Reduzierung von Brandlasten begegnet wird.

Im näheren Umfeld sind keine zivilisatorischen Gefährdungsquellen für das gTL auszumachen, da

- Betriebe, die der Störfallverordnung unterliegen, sich in ausreichend grossem Abstand befinden
- von militärischen Anlagen und Objekten sowie allfälligen militärischen Aktivitäten in der Umgebung der Anlage (bspw. Transporte) kein Gefährdungspotenzial ausgeht
- für die Hochdruckgasleitung die entsprechenden Unbedenklichkeitsnachweise für Brand- und Explosionseinwirkung infolge eines Totalversagen der Gasleitung erbracht sind
- ein unterstellter maximaler Gefahrguttransportunfall (Explosion und Brand) keine Auswirkungen auf das gTL hat
- sich für alle Grössenklassen heutiger Flugzeuge und Militärmaschinen sehr niedrige Absturzhäufigkeiten ergeben und auch künftig nicht mit einer wesentlich grösseren Anzahl von regionalen Flugbewegungen zu rechnen ist.

Fazit

Die Charakterisierung der Standorteigenschaften und der Einwirkungen von aussen zeigen die sicherheitstechnische Eignung aus dem Blickwinkel natürlicher und zivilisatorischer Gefahren und damit die Eignung des Standorts für den Bau und den Betrieb eines gTL.

3.4 Nachweis für die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle

Gemäss Art. 13 Abs. 1 Bst. d KEG und Art. 23 Bst. e KEV sowie ENSI (2018a) ist aufzuzeigen, dass auch diejenigen radioaktiven Abfälle, die neu innerhalb des mit dem RBG beantragten Projekts anfallen, entsorgt werden können.

Es ist davon auszugehen, dass die Anlagen des gTL jederzeit, d. h. ausgehend von der Inbetriebnahme bis zum Verschluss, frei von Kontamination sind. Somit fallen während des Betriebs sowie bei der Stilllegung des strahlenschutzrechtlich geregelten Teils der OFA (Nagra 2025d) und dem Verschluss des gTL (Nagra 2021c) keine radioaktiven Abfälle an. Sämtliche beim Vorhaben geologisches Tiefenlager anfallenden Abfälle sind konventioneller Natur.

4 Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase

In diesem Kapitel wird entsprechend der Präzisierung der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des SGT (ENSI 2018a) der Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase gemäss den Vorgaben von KEG, KEV und ENSI-G03 (ENSI 2023a) für das gTL am gewählten Standort dokumentiert. Es werden die Eigenschaften und Funktionen des Mehrfachbarrierensystems sowie des Standorts dargestellt und aufgezeigt, wie sie zur Gewährleistung der Sicherheit der Nachverschlussphase beitragen (Kap. 4.2 bis 4.5). Mittels Sicherheitsanalysen werden das Langzeitverhalten des gTL und die daraus resultierenden radiologischen Auswirkungen untersucht (Kap. 4.6). Der Schutz von Mensch und Umwelt wird beim Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase anhand der Einhaltung der Schutzkriterien gemäss ENSI (2023a) dargelegt (Kap. 4.6.5). Der Sicherheitsnachweis führt Berechnungen und unterstützende Argumente zu einer Gesamtbewertung zusammen (Kap. 4.7), mit der der Nachweis der Standorteignung und der Langzeitsicherheit erfolgt. Des Weiteren wird gezeigt, dass die Auslegungsgrundsätze gemäss Art. 11 KEV sowie die Bestimmungen von Art. 67 und Art. 69 KEV erfüllt werden.

Der Nachweiszeitraum für die Langzeitsicherheit beträgt für HAA gemäss ENSI (2023a) eine Million Jahre und wird beim Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase auf das gesamte gTL angewandt (Nagra 2024v, Nagra 2024b).

4.1 Sicherheits- und Lagerkonzept für die Nachverschlussphase

Das Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase gibt vor, wie der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch das gestaffelte Mehrfachbarrierensystem bestehend aus technischen und geologischen Barrieren sichergestellt wird. Das aktuelle Lagerkonzept beschreibt die einzelnen Barrieren und ihre Eigenschaften, einschliesslich ihrer Wechselwirkungen. Das Sicherheitskonzept und das Lagerkonzept sind somit eng miteinander verknüpft und werden gemeinsam als Sicherheits- und Lagerkonzept bezeichnet (vgl. Fig. 2-3), welches in Nagra (2024v) und Nagra (2024ab) beschrieben ist. Das aktuelle Sicherheits- und Lagerkonzept ist national und auch international anerkannt.

Das Sicherheitskonzept definiert fünf Sicherheitsfunktionen³⁰, die das gTL für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit einhalten muss:

- Isolation der radioaktiven Abfälle von der Erdoberfläche
- Vollständiger Einschluss der Radionuklide für eine gewisse Zeit
- Immobilisierung, Rückhaltung und langsame Freisetzung der Radionuklide
- Kompatibilität der Elemente des Mehrfachbarrierensystems und der radioaktiven Abfälle untereinander und mit anderen Materialien
- Langzeitstabilität des Mehrfachbarrierensystems bezüglich geologischer und klimatischer Langzeitentwicklungen

Das Mehrfachbarrierensystem stellt zusammen mit der Tiefenlage des gTL in einer stabilen geologischen Situation sicher, dass das gTL unter Berücksichtigung seiner zeitlichen Entwicklung und der verbleibenden Ungewissheiten im Nachweiszeitraum die notwendigen Sicherheitsfunktionen erfüllt. Das Mehrfachbarrierensystem besteht aus gestaffelten, passiv und verschiedenartig wirkenden technischen und geologischen Barrieren zum Einschluss und zur Rückhaltung der im gTL eingelagerten radioaktiven Stoffe. Abfallmatrix, Endlagerbehälter, Verfüllung und

³⁰ Die Sicherheitsfunktionen für die Nachverschlussphase des gTL sind nicht zu verwechseln mit den Sicherheitsfunktionen für Kernkraftwerke gemäss Art. 10 KEV.

Verschlosssystem bilden die technischen Barrieren. Die geologischen Barrieren bilden das geologische Umfeld des gTL, das zur Rückhaltung der Radionuklide beiträgt. Dabei stellen das Wirtgestein und die Rahmengesteine den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (EG) dar. Das Mehrfachbarrierensystem ist redundant ausgelegt und sorgt für die passive Sicherheit, so dass das gTL nach Verschluss nicht gewartet und überwacht werden muss.

Den geologischen Barrieren wird vor allem aufgrund der sehr günstigen Eigenschaften und Langzeitstabilität des Wirtgesteins Opalinuston und seiner Rahmengesteine eine vorrangige Bedeutung beim Sicherheitskonzept zugeschrieben. Um die Barriereigenschaften der geologischen Barriere möglichst wenig durch den Bau und die Einlagerung der radioaktiven Abfälle zu stören, werden die Lagerteile und technischen Barrieren so ausgelegt, dass sie mit der geologischen Barriere sowie untereinander kompatibel und auf die jeweiligen Abfallkategorien abgestimmt sind.

Die Tiefe des gTL und seine Lage in einer stabilen geologischen Umgebung sorgen dafür, dass geologische Prozesse und Entwicklungen an der Oberfläche und beim Klima die Eigenschaften des Mehrfachbarrierensystem nicht gefährden. Ausserdem wurde bei der Standortsuche im Rahmen des SGT bestehenden Nutzungen des geologischen Untergrunds und nutzungswürdigen Ressourcen, die in einem für die Schweiz besonderen Mass vorkommen, ausgewichen³¹.

4.2 Funktionen der technischen Barrieren

In diesem Kapitel werden, wie in ENSI (2023a) gefordert, die Wirkungsweise, das Rückhaltevermögen und die Robustheit der technischen Barrieren, sowie die erwartete Entwicklung der technischen Barrieren dargelegt. Es werden die Funktionen der technischen Barrieren des Mehrfachbarrierensystems aufgezeigt und wie sie zur Gewährleistung der Sicherheit der Nachverschlussphase beitragen. Ausführliche Beschreibungen befinden sich in Kap. 6 von Nagra (2024v) und Kap. 3 von Nagra (2024ac).

4.2.1 HAA-Abfallmatrix

Hochaktiver Abfall (HAA) ist bei der Einlagerung in einer festen, stabilen Matrix eingebunden. Für abgebrannte Brennelemente (BE) ist dies der schwer lösliche Brennstoff selbst, bestehend aus den abgebrannten Brennelementen aus keramischem Brennstoff, als Pellet gestapelt in Hüllrohren. Hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA-HAA) liegen hingegen in Glas eingeschmolzen vor und sind in Edelstahl-Kokillen verfüllt. Der Grossteil des Radionuklidinventars bleibt in der chemisch stabilen und schwer löslichen Abfallmatrix fixiert, wodurch sie zur Immobilisierung und Rückhaltung der Radionuklide beiträgt. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften ist die HAA-Abfallmatrix ausserdem kompatibel mit den anderen Komponenten des Barriersystems. Ausführlichere Darstellungen zur Funktion der HAA-Abfallmatrix finden sich in Kap. 6.1.3 von Nagra (2024v) und Kap. 3.1 von Nagra (2024ac).

4.2.2 HAA-Endlagerbehälter

Die HAA sind in mechanisch und thermisch stabilen sowie sehr langsam korrodierenden Endlagerbehältern verpackt, die in den HAA-Lagerstollen eingelagert werden. Als Material für die Endlagerbehälter ist im aktuellen Konzept, das im Detail in Nagra (2024g) beschrieben ist, Stahl vorgesehen. Die definitive Auslegung der HAA-Endlagerbehälter erfolgt im Rahmen der weiteren Bewilligungsschritte nach KEG.

³¹ Das gTL wird dennoch so ausgelegt, dass die Auswirkungen von allfälligen unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen auf das Sicherheitskonzept begrenzt würden.

Entsprechend der behördlichen Vorgaben aus ENSI (2023a) schliessen die Endlagerbehälter die HAA für mindestens tausend Jahre vollständig ein (Kap. 4.3.3 und Kap. 5 in Nagra 2024g). Durch diesen Einschluss der radioaktiven Materialien wird sichergestellt, dass vor dem Behälterversagen kein Wasserzutritt zu der HAA-Abfallmatrix und keine Radionuklidfreisetzung erfolgt.

Des Weiteren ist die Kompatibilität der Endlagerbehälter zu den anderen Komponenten des Barrierensystems sichergestellt, z. B. durch geringe Gasproduktionsraten (Kap. 5.3 in Nagra 2024w) aufgrund der langsamen Korrosionsraten (Kap. 6.2.3 in Nagra 2024v).

4.2.3 Verfüllung der HAA-Lagerstollen

Die technische Barriere, die den HAA-Endlagerbehälter umgibt, ist die Verfüllung der HAA-Lagerstollen, die im aktuellen Sicherheits- und Lagerkonzept aus Bentonit besteht. Bentonit ist ein natürliches Material aus verschiedenen Tonmineralien mit dem Hauptbestandteil Smektit. Der bei der Einbringung noch trockene Bentonit sättigt in den HAA-Lagerstollen mit Porenwasser auf, das aus dem Opalinuston sehr langsam in die Lagerstollen zutritt. Bei der Aufsättigung entwickelt der Bentonit einen Quelldruck und eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit (Tab. 3-3 und Fig. 3-4 in Nagra 2024ac). Aufgrund des hohen Tonmineralgehalts besitzt er eine hohe Sorptionskapazität (Tab. 3-3 und Kap. 3.3.2 in Nagra 2024ac).

Die Verfüllung der HAA-Lagerstollen sorgt für einen nachhaltigen Schutz der Endlagerbehälter, indem ein geeignetes chemisches und mechanisches Umfeld gebildet wird (Tab. 3-3 und Kap. 3.3.2 in Nagra 2024ac). Sie leitet die Wärme der HAA ab und schützt dadurch sowohl die technischen als auch die geologischen Barrieren vor zu hohen Temperaturen, die nachteilige Effekte auf die Wirksamkeit ihrer Barrierefunktionen hätten (Kap. 3.3.2 und Tab. 3-3 in Nagra 2024ac).

Nach dem Versagen der HAA-Endlagerbehälter trägt die Verfüllung der HAA-Lagerstollen zu der Immobilisierung und Rückhaltung der Radionuklide bei. Dies wird durch einen diffusionsdominierten Radionuklidtransport und eine hohe Sorptionskapazität sichergestellt (Kap. 3.3.2 in Nagra 2024ac). Die Verfüllung der HAA-Lagerstollen wird so ausgeführt, dass die Bestimmungen von Art. 67 KEV eingehalten werden.

4.2.4 Nahfeld der SMA-Lagerkavernen

SMA und ATA werden in Abfallgebinden konditioniert und in SMA-Endlagerbehälter verpackt, die im aktuellen Sicherheits- und Lagerkonzept aus vorgefertigtem Beton und einer Verfüllung mit Mörtel bestehen. Die SMA-Endlagerbehälter werden in den SMA-Lagerkavernen eingelagert, welche in der konzeptuellen Auslegung mit einem zementbasierten Material verfüllt werden. Die Kavernenverfüllung und SMA-Endlagerbehälter bilden das Nahfeld der SMA-Lagerkavernen.

Das Nahfeld trägt zur Rückhaltung der Radionuklide bei. Die wenigen Radionuklide, die sich in Wasser lösen, werden grösstenteils durch Sorption im Nahfeld zurückgehalten (Tab. 3-4 und Kap. 3.4.2 in Nagra 2024ac).

Das Nahfeld wird so ausgelegt, dass seine Hauptkomponenten untereinander kompatibel sind und sie sowohl zur mechanischen Integrität der Abfallgebinde als auch der Lagerkaverne beitragen. Die Verfüllung der SMA-Lagerstollen wird so realisiert, dass die Bestimmungen von Art. 67 KEV eingehalten werden.

In den SMA-Lagerkavernen wird Gas produziert, das durch Korrosion von Metallen und den Abbau von organischen Stoffen entsteht (Kap. 3 in Nagra 2024w). Die Kavernenverfüllung wird deshalb so ausgelegt, dass sie ausreichend Gasspeichervolumen bereitstellt und eine erhöhte Gaspermeabilität aufweist. Dadurch ist gewährleistet, dass die Funktionen der technischen und geologischen Barrieren während der Gasproduktion erhalten bleiben (Kap. 5 und 6 in Nagra (2024w) sowie Tab. 3-4 und Kap. 3.4.4 in Nagra (2024ac)).

4.2.5 Verschlussystem

Das Verschlussystem umfasst im gegenwärtigen Verschlusskonzept (Nagra 2021c) zum einen die verschiedenen Versiegelungsbauwerke der Lagerkammern, der Lagerfeldzugänge und der Zugangsbauwerke und zum anderen die Verfüllungen aller untertägigen Resthohlräume im Wirtgestein. Die Festlegungen zur Auslegung, dem Aufbau und der Materialien der Elemente des Verschlussystems erfolgen im Rahmen der nächsten Bewilligungsschritte nach KEG. Das Verschlussystem wird so realisiert, dass die Bestimmungen zum Verschluss von Art. 69 KEV eingehalten werden.

Das Verschlussystem trägt zur Rückhaltung der Radionuklide bei. Dies wird bei den gelösten Radionukliden dadurch sichergestellt, dass es keinen advektiven Wasserfluss zulässt und Radionuklide durch Sorption zurückhält (Tab. 3-5 und Kap. 3.5.2 in Nagra 2024ac). Die Barrierewirkung wird bei den Versiegelungsbauwerken im gegenwärtigen Verschlusskonzept mittels Dichtelementen aus bentonitbasierten Materialien erzielt (Kap. 4.2 in Nagra 2021c). Für die Verfüllung der restlichen Bauwerke auf Lagerebene (Kap. 6 in Nagra 2021c) können unterschiedliche Materialien verwendet werden, die ein geeignetes Korngefüge und Porosität aufweisen sowie quellfähige tonbasierte und sorbierende Materialien enthalten (z. B. Bentonit-Granulat, Sand-Bentonit-Gemisch, aufbereiteter Opalinuston). Das Verschlussystem ist hinsichtlich der hydraulischen Barrierewirkung redundant ausgelegt, da die Versiegelungen und Verfüllungen die UTA hintereinander in einer Art «Reihenschaltung» von der Lagerkammer bis zu den Zugangsbauwerken verschliessen (Kap. 4.1 in Nagra 2021c).

Für das in den Lagerkammern, insbesondere im SMA-Lagerteil, entstehende Gas stellt das Verschlussystem sowohl ein Transport- als auch ein Speichersystem dar, das den Aufbau des Gasdrucks begrenzt und dadurch einen wichtigen Beitrag zur Kompatibilität des Mehrfachbarrierensystems leistet (Tab. 3-5 sowie Kap. 3.5.3 und 3.5.4 in Nagra 2024ac). Die Rückhaltung der gasförmigen Radionuklide wird durch die Versiegelungen der Zugangsbauwerke gewährleistet (Kap. 6.2.3 in Nagra (2024v), Tab. 3.5 in Nagra (2024ac), Kap. 5.4 und 6 in Nagra (2024w)). Diese werden so ausgelegt werden, dass sie eine geringe Durchlässigkeit für Gas aber auch für Wasser³² haben.

Des Weiteren stellen die Versiegelungen der Lagerkammern und Lagerfelder eine Kompartimentalisierung³³ sicher und tragen zur Isolation der Abfälle von Mensch und Umwelt bei (Kap. 6.1.7 in Nagra (2024v) und Tab. 3-5 in Nagra (2024ac)). Schon während des Einlagerungsbetriebs dienen die Versiegelungen der Lagerkammern der Sicherheit (u. a. dem Strahlenschutz) sowie der Sicherung, da sie die Zugänglichkeit zu bereits beschickten und verfüllten Lagerkammern verhindern und die passive Sicherheit zeitnah herstellen. Die Versiegelungen der Lagerkammern erfüllen daher schon während der Einlagerungsphase die Anforderungen aus ENSI-G03 (ENSI 2023a) an die Vorkehrungen für einen temporären Verschluss.

³² Dadurch wird sichergestellt, dass die Lagerbereiche nicht über die Zugangsbauwerke mit den oberhalb des EG liegenden Aquiferen hydraulisch verbunden werden.

³³ D. h. eine räumliche Trennung der radioaktiven Abfälle in den verschiedenen Lagerkammern.

4.2.6 Fazit

Die technischen Barrieren leisten einen wichtigen Beitrag zu den Sicherheitsfunktionen für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Sie tragen zum sicheren Einschluss sowie zur Immobilisierung und Rückhaltung von Radionukliden bei. Eine weitere wichtige Funktion der technischen Barrieren besteht darin, die Kompatibilität der Komponenten des Mehrfachbarrierensystems untereinander sicherzustellen. Die technischen Barrieren tragen durch ihre mechanischen, chemischen, hydraulischen und thermischen Eigenschaften wesentlich zur langfristigen Stabilität des Barrierensystems bei. Das Verständnis ihrer Wirkung, Funktionsweise und zu erwartenden Entwicklung beruht auf einer soliden wissenschaftlich-technischen Basis. Es liegt ein sorgfältig konzipiertes und dem gegenwärtig etablierten Stand von Wissenschaft und Technik entsprechendes Konzept für die technischen Barrieren vor. Die Auslegung der technischen Barrieren wird im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens nach KEG stufengerecht weiterentwickelt.

4.3 Charakterisierung der geologischen Situation für die Langzeitsicherheit

In diesem Kapitel wird die in ENSI (2023a) und ENSI (2018a) geforderte Beschreibung der geologischen Situation dokumentiert. Die Charakterisierung der geologischen Standorteigenschaften beruht auf ausführlichen Untersuchungen und einer umfangreichen, verifizierten Datengrundlage, mit der belastbare Aussagen zur Standorteignung und Langzeitsicherheit getroffen werden können. Detaillierte Beschreibungen sind in Nagra (2024p) und Nagra (2024o) dokumentiert.

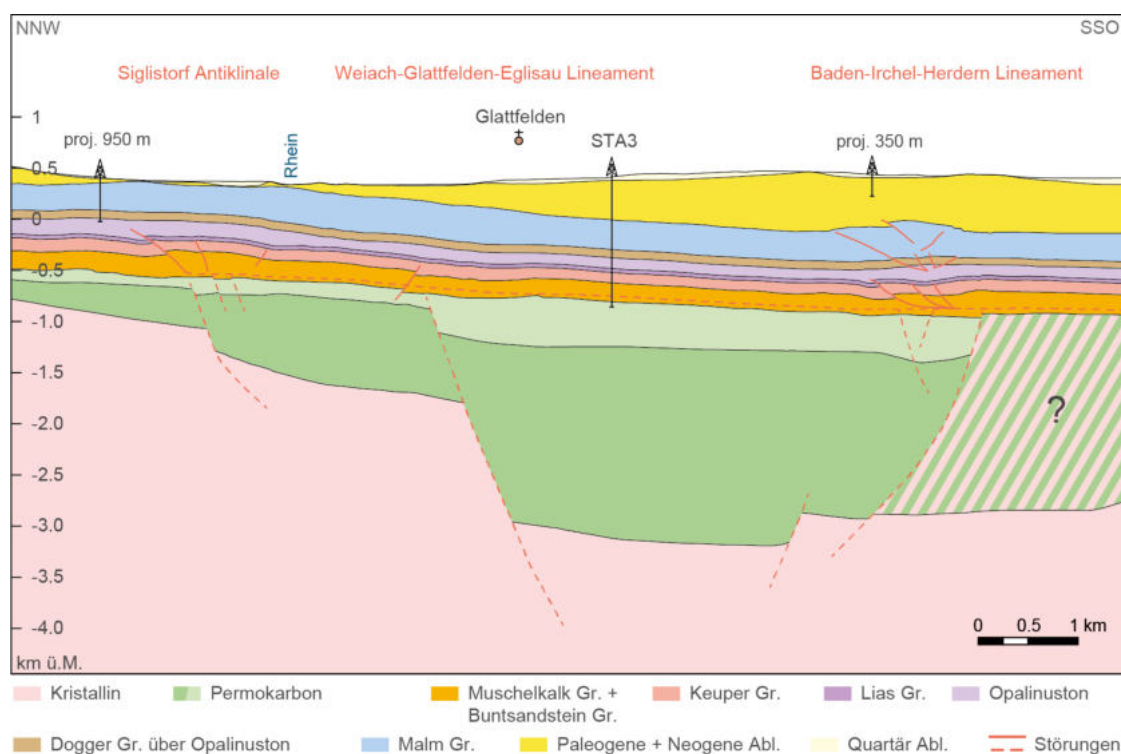


Fig. 4-1: Geologisches Profil durch das Standortgebiet NL; angepasst von Nagra (2024p)

STA3: Tiefbohrung Stadel-3-1. Die Lage des geologischen Profils ist in Fig. 4-54 von Nagra (2024p) dargestellt.

4.3.1 Geologischer und hydrogeologischer Aufbau

Der Standort befindet sich über dem Nordschweizer Permokarbondrog (Fig. 4-1). Die Sedimente des Permokarbondrogs werden vom mesozoischen Sedimentstapel überlagert. Die mesozoischen Sedimente fallen leicht geneigt nach Südosten ein und werden wiederum von tertiären Molassesedimenten überlagert, deren Mächtigkeit nach Südosten zunimmt. Über den Molassesedimenten sind grossflächig quartäre Ablagerungen erhalten. Einen Überblick über die lithostratigraphischen Profile der Tiefbohrungen aus der Standortregion NL zeigt Fig. 4-2.

Der Opalinuston bildet das Wirtgestein, d. h. die geologische Einheit in der das gTL gebaut wird und die besonders zur Rückhaltung der Radionuklide beiträgt. Der Opalinuston ist der unterste Teil der Dogger Gruppe und besteht aus einer monotonen Serie von Tonsteinen und siltig-sandigen Tonsteinen. Die Mächtigkeit des Opalinustons beträgt ca. 105 m (Kap. 4.2.6.2 in Nagra 2024p). In den Tiefbohrungen der Standortregion NL wurde er in ca. 800 – 1'000 m Tiefe unter Terrain angetroffen (Fig. 4-2).

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (EG) umfasst nicht nur das Wirtgestein Opalinuston, sondern auch seine Rahmengesteine (Fig. 4-2). Die hohe Qualität des EG (Opalinuston plus Rahmengesteine) am Standort wird durch seine Mächtigkeit von ca. 300 m deutlich (Fig. 4-140 in Nagra 2024p). Er besteht aus einer mächtigen Abfolge an Aquitarden mit sehr niedriger hydraulischer Durchlässigkeit. Die Definition des EG ist in Kap. 2 in Nagra (2024f) beschrieben. Oberhalb wird er durch den Malm-Aquifer begrenzt, der einen regionalen Felsaquifer bildet. Unterhalb wird der EG durch den lokalen Felsaquifer der Klettgau Formation (Keuper-Aquifer) begrenzt. Der Keuper-Aquifer ist im Standortgebiet NL an lokal auftretende, mit Sandstein gefüllte Rinnen gebunden (Kap. 4.5.3.10 in Nagra 2024p). Wo in NL keine sandigen Rinnenablagerungen vorhanden sind, fällt die Mächtigkeit des EG deutlich grösser aus, nämlich rund 400 m bis zum Muschelkalk-Aquifer, der einen regionalen Felsaquifer darstellt (Kap. 4.9 in Nagra 2024p).

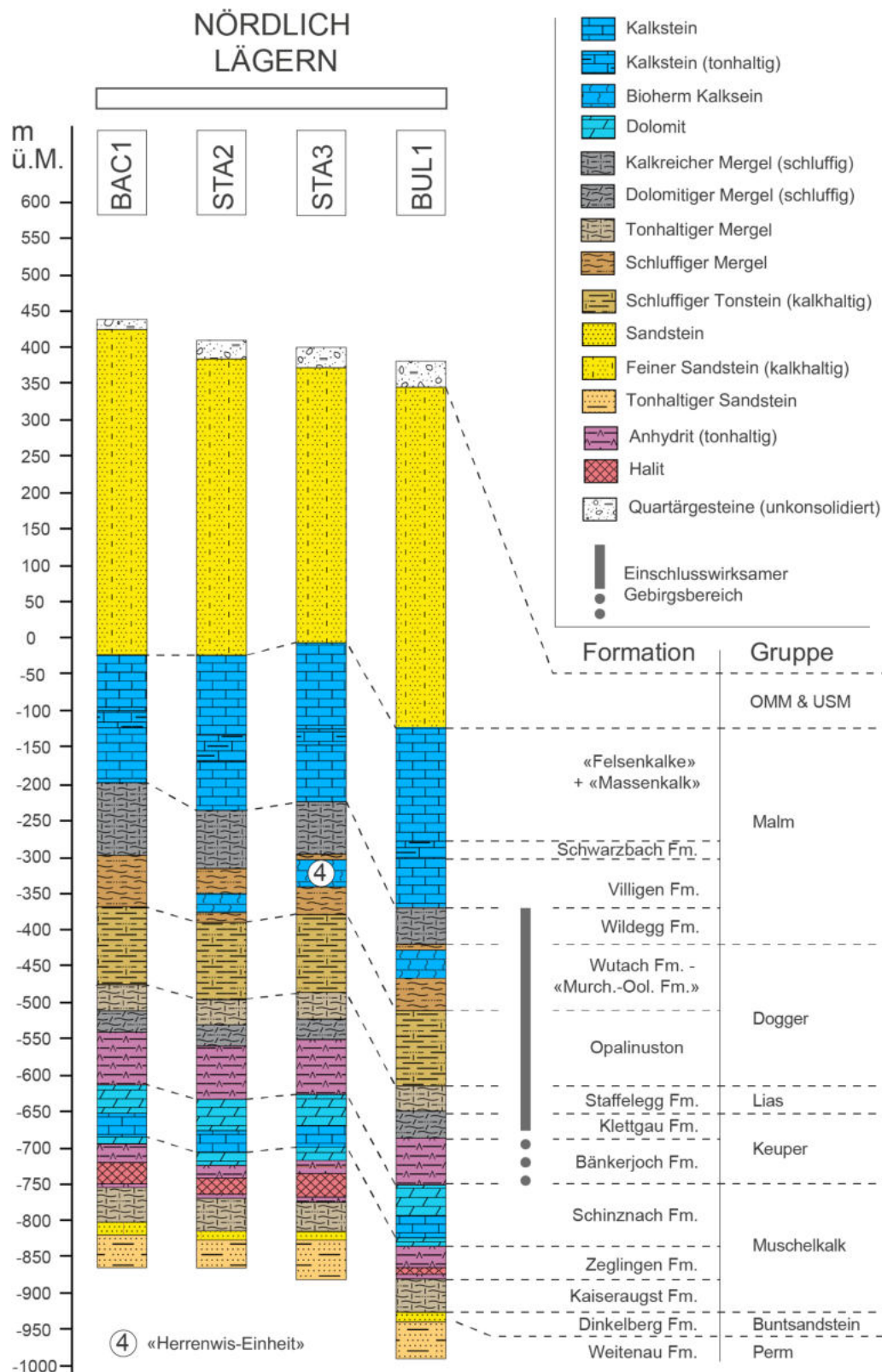


Fig. 4-2: Verlauf der lithostratigraphischen Einheiten in den Tiefbohrungen aus Etappe 3 SGT im Standortgebiet NL

BAC1 = Tiefbohrung Bachs-1-1; STA2 = Tiefbohrung Stadel-2-1, STA3 = Tiefbohrung Stadel-3-1, BUL1 = Tiefbohrung Bülach-1-1

4.3.2 Tektonische Situation

Im Standortgebiet NL befindet sich zwischen dem Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineament und dem Baden – Irchel – Herdern Lineament eine grosse, tektonisch ruhige Zone, die im Bereich des Opalinustons keine seismisch kartierbaren Störungen im Opalinuston aufweist (Fig. 4-3). Diese Zone bildet den am besten geeigneten Bereich für die grossräumige potenzielle Lagerzone³⁴ (vgl. Fig. 5-3), die in Kap. 4.2.1.1 in Nagra (2024f) bei der lateralen räumlichen Abgrenzung des EG für den HAA- und für den SMA-Lagerteil als erstes ermittelt wurde. In der potenziellen Lagerzone wurde dann u. a. unter Berücksichtigung der Rückhaltewirkung des Wirtgesteins und der exemplarischen Anordnung der Lagerteile sowie von Platzreserven der EG für den HAA- und für den SMA-Lagerteil lateral abgegrenzt. Da der mächtige EG in der gesamten potenziellen Lagerzone in lateral durchgehender Ausdehnung vorkommt, besteht für die Anordnung der Lagerteile innerhalb der potenziellen Lagerzone in den folgenden Bewilligungsphasen nach KEG eine grosse Flexibilität.

Spannung

Am Standort ist die vorherrschende horizontale Hauptspannungsrichtung (S_{Hmax}) NNW-SSO, ungefähr rechtwinklig zum Jura-Gürtel (Kap. 4.4.2 in Nagra 2024p). Die S_{Hmax} -Orientierung ist in der potenziellen Lagerzone lateral und über die Tiefe weitgehend konstant. Vertikal ist das Spannungsfeld durch die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Formationen kontrolliert. Die kompetenten, spröden Formationen (z. B. Kalkstein) weisen die grösste Belastung und Trennflächenhäufigkeiten im Vergleich zu den tonigen, duktilen Formationen (z. B. Tonstein) des EG auf (Fig. 4-65 und Fig. 4-138 in Nagra 2024p).

Erdbeben

Der Standort befindet sich in der seismisch ruhigsten Region der Schweiz (vgl. Kap. 3.3.6 und Fig. 3-11). Die Einordnung von Erdbeben für den Sicherheitsnachweis der Nachverschlussphase ist in Nagra (2024m) beschrieben. Das Sicherheits- und Lagerkonzept ist auf die möglichen Auswirkungen von Erdbeben während der Nachverschlussphase ausgelegt. Da alle untertägigen Strukturen in der Nachverschlussphase komplett verfüllt sind, besteht durch Erschütterungen keine Gefahr für das gTL in der Nachverschlussphase. Um Auswirkungen von Verschiebungen, die durch Erdbeben ausgelöst werden, im gTL oder in seinem Umfeld zu reduzieren, hält die potenzielle Lagerzone Abstand zu bekannten Störungen (vgl. Kap. 5.1.1). Im Nachweiszeitraum von einer Million Jahren können daher in der potenziellen Lagerzone, wenn überhaupt, nur sehr kleine Erdbeben und mit geringen Versätzen auftreten (Kap. 3.3 in Nagra 2024m). Kap. 5 von Nagra (2024m) entwickelt dazu Szenarien, die im Rahmen der Prüfung der Barrierewirksamkeit (Kap. 6.3.7 in Nagra 2024ac) geprüft und mittels Konsequenzenanalysen (Kap. 4.3.1.2, Kap. 7.1.3.2 und Kap. 7.2.3 in Nagra 2024y) analysiert werden.

³⁴ Die HAA- und SMA-Lagerteile werden im weiteren Bewilligungsverfahren nach KEG innerhalb der potenziellen Lagerzone platziert.

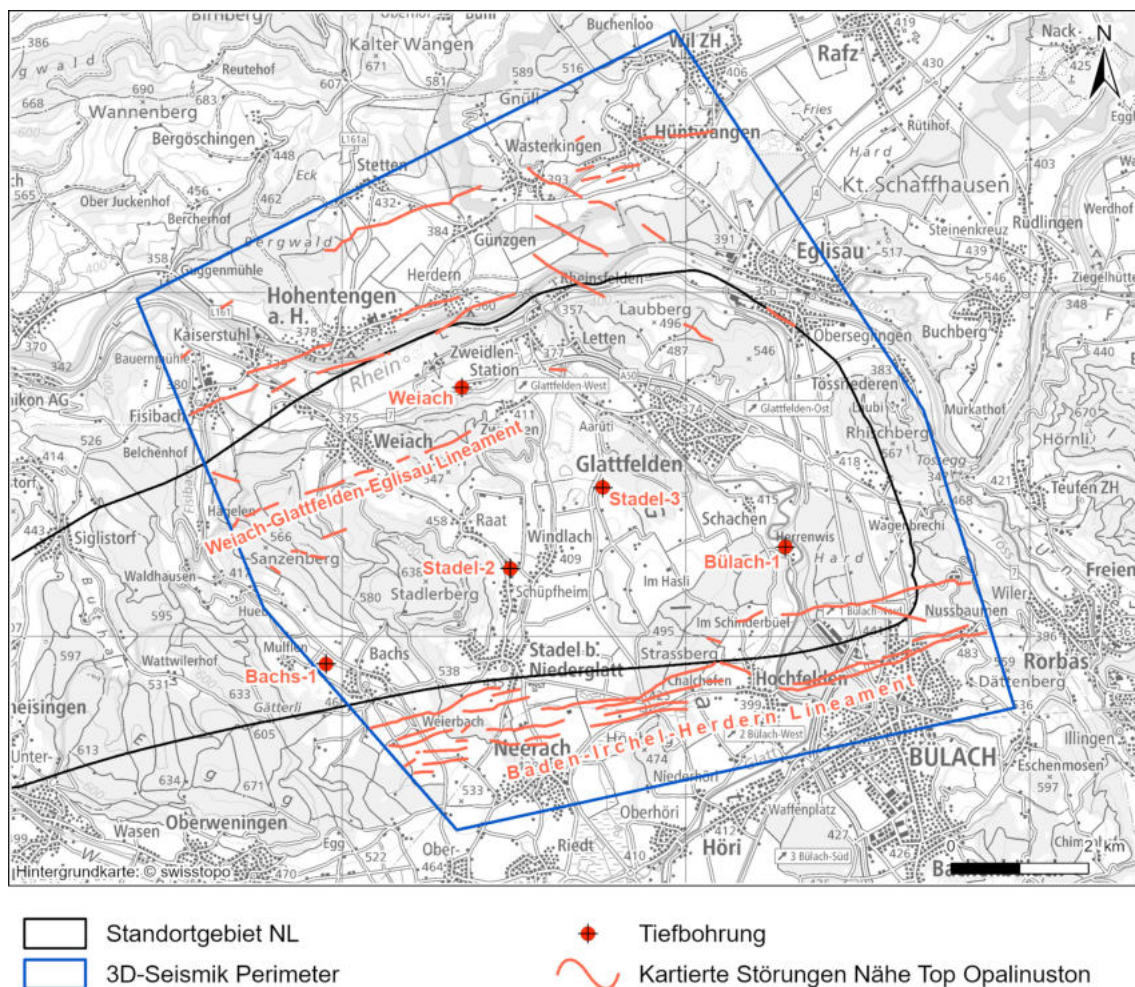


Fig. 4-3: Kartierte Störungen in der 3D-Seismik im Standortgebiet NL für Nähe Top Opalinuston

Als regionale tektonische Elemente sind das Weiach-Glattfelden-Eglisau Lineament und das Baden-Irchel-Herdern Lineament beschriftet.

4.4 Eigenschaften und Funktionen der geologischen Barrieren

In diesem Kapitel werden das in ENSI (2023a) geforderte sog. Aufzeigen der Wirkungsweise, des Rückhaltevermögens und der Robustheit der geologischen Barrieren dokumentiert. Es wird dargelegt, was die Eigenschaften und Funktionen der geologischen Barrieren sind und wie diese zu den Sicherheitsfunktionen beitragen, welche die Sicherheit des gTL in der Nachverschlussphase gewährleisten. Die ausführlichen Untersuchungen in Etappe 3 des SGT haben die exzellenten Barriereigenschaften des Wirtgesteins Opalinuston basierend auf einer umfangreichen, verifizierten Datengrundlage gemäss den hohen geologischen und sicherheitstechnischen Anforderungen an die geologische Barriere aus ENSI (2018a) und BFE (2008) bestätigt. In diesem Kapitel wird zudem gezeigt, dass am Standort die Anforderungen an die Eigenschaften der geologischen Barrieren zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit gemäss Art. 11 KEV erfüllt werden.

Für eine ausführlichere Beschreibung der Eigenschaften der geologischen Barrieren ist auf Nagra (2024p) und Nagra (2024o) verwiesen.

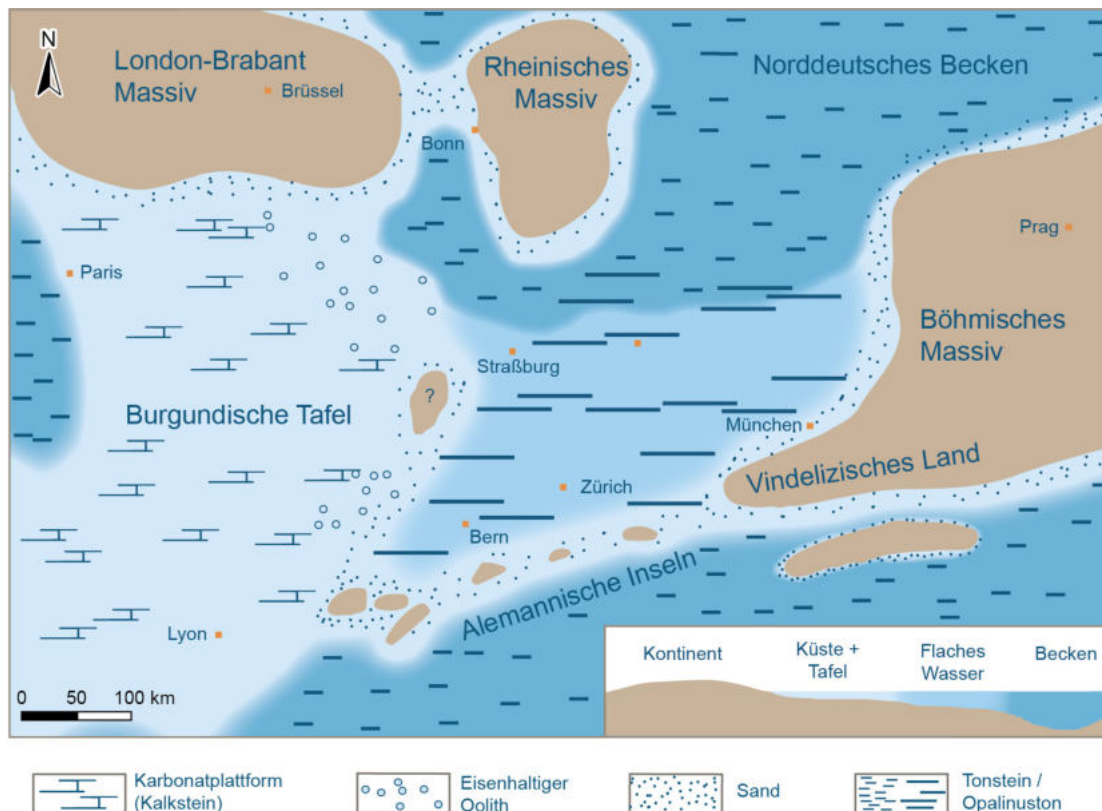


Fig. 4-4: Paläographische Karte von Zentraleuropa während des Ablagerungszeitraums des Opalinustons (angepasst von Nagra 2024p)

4.4.1 Mineralogie

Der durchschnittliche Tonmineralgehalt des Opalinustons liegt bei ca. 60 Gew.-% (Fig. 5-4 in Nagra 2024p). Die Tonminerale setzen sich aus dem quellfähigen Smektit und anderen Tonmineralen zusammen (Fig. 5-6 in Nagra 2024p). Der Tonmineralgehalt spielt eine Schlüsselrolle für die exzellenten Barriereigenschaften des Opalinustons, da der Tonmineralgehalt die hydraulische Durchlässigkeit, das Diffusions- und Sorptionsvermögen und das Selbstabdichtungsverhalten bestimmt (Kap. 5.10 in Nagra 2024p). Der Opalinuston zeichnet sich in der Nordschweiz durch eine geringe Variabilität seiner Mineralogie und den daraus resultierenden Eigenschaften aus. Dies sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung (Kap. 5.2.3 in Nagra 2024p). Durch diese geringe Variabilität ist eine hohe Zuverlässigkeit bei seinen Barriereigenschaften am Standort gewährleistet. Die geringe Variabilität beruht auf den Ablagerungsbedingungen³⁵ in der Nordschweiz in einem flachen, epikontinentalen Meer des Mittleren Juras (Fig. 4-4).

Die Rahmengesteine sind variabler zusammengesetzt als der Opalinuston. Ihre mineralogische Zusammensetzung ist zum grössten Teil von Tonmineralen dominiert, jedoch unterscheiden sie sich durch unterschiedliche Anteile an Kalk oder silikatischem Silt und Sand (Kap. 5.2.3 in Nagra 2024p). Dennoch liefern sie aufgrund ihres ebenfalls überwiegend hohen Tonmineralgehalts zusätzliche Beiträge zum Barriersystem und damit zur Rückhaltung von Radionukliden.

³⁵ Die Sedimentation des Opalinustons erfolgte mit hohen bis sehr hohen Sedimentationsraten von tonreichen Sedimenten in einem stabilen Ablagerungsmilieu.

4.4.2 **Hydraulische Durchlässigkeit**

Einer der wichtigsten Parameter, damit der EG die hydraulische Barrierewirkung gewährleistet, ist das Mass der hydraulischen Durchlässigkeit. Die hydraulische Durchlässigkeit kontrolliert die Wasserflüsse und ist für die Art des potenziellen Radionuklidtransports (Advektion, Diffusion) verantwortlich. Die hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons ist äusserst niedrig und wenig variabel (Kap. 5.6 in Nagra 2024p). Dies gilt auch für Bereiche, wo Trennflächen oder siltige bzw. kalkige Einschaltungen auftreten (Fig. 5-40 in Nagra 2024p). Neben der hydraulischen Durchlässigkeit weist der Opalinuston auch eine geringe Durchlässigkeit für Gas auf (Kap. 3.5.2.3 in Nagra 2024w).

Die hydraulische Durchlässigkeit der Rahmengesteine ist auch niedrig bis sehr niedrig (Fig. 4-85 und Fig. 4-138 in Nagra 2024p). Die wichtigste Einflussgrösse ist der Tonmineralgehalt (je höher, desto niedriger die hydraulische Durchlässigkeit (Kap. 5.10 in Nagra 2024p)).

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Opalinuston am Standort eine mehr als ausreichende Ausdehnung mit sehr niedriger hydraulischer Durchlässigkeit aufweist und der gesamte EG sich durch günstige hydrogeologische Verhältnisse auszeichnet. Die hydraulische Barrierewirkung und die Rückhaltung der Radionuklide ist aufgrund der äusserst niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit im Opalinuston sichergestellt und wird durch seine Rahmengesteine verstärkt. Beim Opalinuston und den anderen Gesteinen des EG wird das Wasser im Porenraum nicht wie bei den Aquiferen als Grundwasser sondern als Porenwasser bezeichnet, da diese Gesteine so dicht sind, dass das in den Poren vorkommende Wasser nicht frei fließen kann.

4.4.3 **Porenwasser- und Geochemie**

Die Porenwasserchemie ist ein weiterer wichtiger Datensatz für die Charakterisierung der Barriereigenschaften. Das Porenwasser des Opalinustons und seiner Rahmengesteine³⁶ ist als Na-Cl Typ mit moderater Ionenstärke charakterisiert (Kap. 5.4.3 in Nagra 2024p). Im Opalinuston liegt der pH-Wert im neutralen Bereich und die Redox-Bedingungen sind durch Pyrit- und Siderit-Gleichgewichte im reduzierenden Bereich gepuffert (Kap. 5.4 in Nagra 2024p).

Die Zusammensetzung des Porenwassers im Opalinuston und seinen Rahmengesteinen liegt in einem für die Langzeitsicherheit günstigen Bereich, der die Mobilität von Radionukliden verringert und zur Immobilisierung und Rückhaltung der Radionuklide beiträgt. Der Opalinuston weist eine hohe geochemische Pufferkapazität und Stabilität auf (Kap. 5.4.6 in Nagra 2024p). Dadurch trägt er zur Langzeitstabilität des Tiefenlagersystems bei. Des Weiteren ist die Porenwasserchemie kompatibel mit den Komponenten der technischen Barrieren und gewährleistet ihre Langzeitstabilität.

Die Daten zeigen, dass sich das gesamte EG bzgl. Porenwasser- und Geochemie durch günstige und stabile hydrogeologische Verhältnisse auszeichnet, die schon über lange geologische Zeiträume bestehen.

4.4.4 **Diffusion und Sorption**

Die hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons und der Rahmengesteine des EG ist so gering, dass Diffusion der dominante Transportmechanismus von Radionukliden ist (Kap. 5.9 in Nagra 2024p). Ferner wird eine Vielzahl von Radionukliden durch Sorption an den Gesteinsoberflächen chemisch gebunden (Kap. 5.4 in Marques Fernandes et al. 2024b). Dies bewirkt für diese Radionuklide eine zusätzliche Verzögerung und einen verlangsamten Transport. Die geologischen Barrieren leisten durch Diffusion und Sorption einen wichtigen Beitrag zur Sicherheitsfunktion der Rückhaltung der Radionuklide.

³⁶ Bezieht sich bei den unteren Rahmengesteinen nur auf den Lias.

Diffusion

Der wichtigste Parameter für die Diffusion ist der effektive Diffusionskoeffizient. Die Werte für den effektiven Diffusionskoeffizient des Opalinustons sind niedrig und variieren minimal (Kap. 5.8 in Nagra 2024p). Die Einheiten des Dogger oberhalb des Opalinustons und des Lias weisen eine grössere Variabilität bei den effektiven Diffusionskoeffizienten als der Opalinuston auf; diese sind aber immer noch niedrig (Kap. 5.8 in Nagra 2024p). Die Rahmengesteine leisten dadurch einen zusätzlichen Beitrag zur langsamen Freisetzung der Radionuklide.

Ein Nachweis für die extrem niedrigen Transportraten in der geologischen Barriere sind die Profile von natürlichen Tracern im Porenwasser auf Formationsmassstab (Kap. 4.6 in Nagra 2024p). Natürliche Tracer sind stabile Isotope, chemische Elemente, Gase, oder ähnliche Stoffe, die im Porenwasser vorkommen und sich über Zeit kaum verändern oder abgebaut werden. Diese Eigenschaften werden genutzt, um die Transportprozesse über lange geologische Zeiträume und Distanzen zu untersuchen. Die verschiedenen Tracerprofile des EG aus den Tiefbohrungen im Standortgebiet NL zeigen wenig Variation über die Tiefe und nur geringe Gradienten (z. B. Fig. 4-119 in Nagra 2024p), was die sehr stabilen hydrogeologischen Verhältnisse im Opalinuston und dem gesamten EG bestätigt. Mittels numerischen Transportmodellierungen wurden diese Tracerprofile nachgebildet (z. B. Fig. 4-123 in Nagra 2024p). Die Ergebnisse zeigen, dass Diffusion der dominante Transportprozess für den EG zwischen den Aquiferen während der letzten hunderttausenden bis einige Millionen Jahre war. Die Tracerprofile liefern somit unabhängige Evidenzen für die grossräumige hydraulische Barrierewirkung und den diffusionsbasierten Transport im EG über geologische Zeitskalen hinweg. Dadurch sind auch die zukünftigen, langfristigen Transportraten zuverlässig prognostizierbar.

Die Untersuchungsergebnisse zu den Diffusionseigenschaften zeigen, dass am Standort eine mehr als ausreichende Ausdehnung von geeignetem Wirtgestein vorliegt und das gesamte EG sich durch günstige und stabile hydrogeologische Verhältnisse auszeichnet. Am Standort werden die hohe Einschlusswirksamkeit respektive die günstigen hydrogeologischen Verhältnisse und hohe Qualität der geologischen Barriere auch durch eine besonders angereicherte Zusammensetzung der stabilen Isotope im Opalinuston deutlich, was auf eine besonders grosse Komponente an sehr altem Porenwasser hinweist.

Sorption

Gesteine mit hohem Tonmineralgehalt besitzen ein hohes Rückhaltevermögen für viele Radionuklide aufgrund ihrer hohen Sorptionskapazität und -affinität. Die Sorption von Radionukliden³⁷ findet vorwiegend an unterschiedlichen Bindungsstellen der negativ geladenen Tonmineraloberflächen statt. Der hohe Tonmineralgehalt, die vorteilhafte Porenwasserchemie und die Porenstruktur des Opalinustons stellen die Sorption der Radionuklide und die räumlich konstanten Sorptionseigenschaften sicher (Marques Fernandes et al. (2024a) und Kap. 5.3.4 in Nagra (2024p)). Die Immobilisierung und Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption findet am Standort über die gesamte Ausdehnung des Wirtgesteins Opalinuston statt (Kap. 5.4 in Marques Fernandes et al. 2024b), was zu den günstigen hydrogeologischen Verhältnissen beiträgt.

4.4.5 Selbstabdichtung von Trennflächen

Unter Selbstabdichtung (engl. self sealing) versteht man die Reduktion der hydraulischen Durchlässigkeit von Trennflächen. Selbstabdichtung ist im Opalinuston und den tonmineral-

³⁷ Radionuklide, welche in anionischer oder neutraler Form vorliegen, gehen solchen Wechselwirkungen nur unter speziellen Bedingungen unter tiefen pH-Werten ein.

reichen Rahmengesteinen des EG eine zentrale Eigenschaft für den langfristigen Erhalt der Barrierenintegrität. Durch Selbstabdichtung von Trennflächen ist der hydraulische Einschluss und die Rückhaltung der Radionuklide langfristig sichergestellt.

Selbstabdichtung wird vor allem durch den Tonmineralgehalt des Gesteins kontrolliert (Kap. 5.7 und Kap. 5.10 in Nagra 2024p). Im Zusammenhang mit dem Tonmineralgehalt stellt das Quellen von Smektit einen wichtigen Prozess zur Reduktion der hydraulischen Durchlässigkeit von Trennflächen dar. Bei Gesteinen mit einem Tonmineralgehalt von mehr als 40 Gew.-% ist die Tonmineralmatrix so dominant, dass für die Selbstabdichtung von Trennflächen immer ausreichend Tonminerale zur Verfügung stehen.

Der andere Parameter, der die Selbstabdichtung kontrolliert, ist das Spannungsfeld (Kap. 5.7.4 in Nagra 2024p). Nur bei sehr niedrigen effektiven Normalspannungen (z. B. nahe der Erdoberfläche) erhöht sich im Opalinuston die hydraulische Durchlässigkeit von Trennflächen. Deshalb ist für eine robuste Selbstabdichtung von Trennflächen eine ausreichende Überlagerung erforderlich. Das gegenwärtige Spannungsfeld am Standort wird als vorteilhaft für eine robuste Selbstabdichtung eingestuft (Kap. 5.7.7 in Nagra 2024p). Auch im Hinblick auf die langfristige Entwicklung des gTL (vgl. Kap. 4.5.3) ist eine ausreichende Restüberdeckung für die Selbstabdichtung im Opalinuston am Standort gewährleistet (Kap. 6.4.4 in Nagra 2024p).

Relevanz von mineralisierten Trennflächen

Mineralisierte Trennflächen wurden vereinzelt in allen Tiefbohrungen im Opalinuston und den tonmineralreichen Rahmengesteinen gefunden. Im Opalinuston sind sie meist sehr dünn, makroskopisch geschlossen (Kap. 5.7.6 in Nagra 2024p) und aufgrund des vorteilhaften Deformationsverhaltens (vgl. Kap. 4.4.6) ziemlich schlecht verbunden. Die Ausfällung von Mineralen reduziert den Raum zwischen den Trennflächen und ist ein aktiver Selbstabdichtungsmechanismus, der zu einer Reduktion der Trennflächendurchlässigkeit führt. Die mineralisierten Trennflächen zeigen weder Einfluss auf die Ergebnisse der hydraulischen Packertests (Fig. 5-40 in Nagra 2024p) noch auf die Profile von natürlichen Tracern (vgl. Kap. 4.4.4 in diesem Bericht und Kap. 4.6 in Nagra 2024p), weshalb sie keine Relevanz für die Langzeitsicherheit haben. Diese Einschätzung wird durch umfangreiche Erfahrungen aus der Öl- und Gasindustrie bestätigt, wo Tonsteine mit mineralisierten Trennflächen weltweit zum einen das undurchlässige Deckgebirge von Reservoiren bilden und zum anderen beim sogenannten «Fracking» in Tonsteinen die erzeugten Risse mit Stützmitteln offengehalten werden müssen, da sie sich sonst schnell wieder verschliessen würden (Kap. 5.7.2 und Kap. 5.7.6 in Nagra 2024p).

4.4.6 Deformationsverhalten

Die potenzielle Lagerzone ist so platziert, dass sie Abstand zu regionalen tektonischen Elementen hält (Kap. 5.1.1). Jedoch kann innerhalb der potenziellen Lagerzone die Existenz von Störungen im Opalinuston, die in der Auswertung der 3D-Seismik nicht kartierbar sind, nicht ausgeschlossen werden. Das Deformationsverhalten und die Geometrie von Störungen im Opalinuston sind deshalb wichtige Eigenschaften für den langfristigen Erhalt der Sicherheitsfunktionen der geologischen Barriere.

Die geomechanischen Eigenschaften des Opalinustons (Kap. 5.5 in Nagra 2024p) zeigen aufgrund seines konstant hohen Tonmineralgehalts und seiner Tiefe am Standort eine geringe Variabilität. Die geringe Steifigkeit und hohe Duktilität des Opalinustons im Vergleich zu tonmineralarmen Formationen führt zu einer unterschiedlichen tektonischen Überprägung im Opalinuston und in seinen tonmineralreichen Rahmengesteinen. Dadurch ergibt sich eine geringe Trennflächendichte und mögliche Bruchstrukturen sind stärker verteilt und segmentiert (Kap. 5.10 in Nagra 2024p). Aufgrund dieses Deformationsverhaltens und des hohen Selbstabdichtungsvermögens wird im Opalinuston und den tonmineralreichen Rahmengesteinen ein

Wasserfluss auf Trennflächen über relevante Zeiträume unterbunden (Kap. 7.2 in Nagra 2024p) und damit die langfristige Integrität der geologischen Barriere sichergestellt.

Das unterschiedliche Deformationsverhalten von tonmineralreichen und tonmineralarmen Sedimentgesteinen wird als mechanische Schichtung bezeichnet. Dieses Konzept wird in der 3D-Seismik und den Tiefbohrungen an den höheren Störungs- bzw. Trennflächenhäufigkeiten in den steifen Einheiten (z. B. Kalkstein) als auch bei Deformationstests an Bohrkernen deutlich (Kap. 4.3.6 und Kap. 4.3.7 sowie Fig. 4-138 in Nagra 2024p). In tonmineralreichen Gesteinen geschieht die Aufnahme von Deformation typischerweise durch verteilte Verformungen und nicht lokalisiert und diskret wie in den spröden Einheiten.

Die Betrachtung des Deformationsverhaltens zeigt, dass die geomechanischen Eigenschaften des Opalinustons und der Rahmengesteine des EG dazu beitragen, die Langzeitsicherheit in der Nachverschlussphase zu gewährleisten.

4.4.7 Fazit

Die geologischen Barrieren leisten aufgrund des hohen Tonmineralgehalts und den daraus resultierenden sehr langsamen Transportprozessen und Rückhaltemechanismen den wichtigsten Beitrag zu den Sicherheitsfunktionen für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins Opalinustons sind insbesondere die äusserst geringe hydraulische Durchlässigkeit, welche sicherstellt, dass der Radionuklidtransport hauptsächlich durch Diffusion stattfindet, sowie die hohe Sorptionskapazität, die zur Rückhaltung von Radionukliden an den Tonmineraloberflächen führt. Hervorzuheben sind die geringe räumliche Variabilität der monotonen Eigenschaften des Opalinustons und der langfristige Erhalt der Barrierenintegrität aufgrund der Selbstabdichtung von Trennflächen, die zusammen die Robustheit der geologischen Barriere kennzeichnen. Die Eigenschaften der geologischen Barriere weisen alle Merkmale auf, die gemäss Art. 11 KEV die Langzeitsicherheit am Standort gewährleisten.

4.5 Eigenschaften und Funktionen des Standorts

In diesem Kapitel werden die in ENSI (2023a) geforderte Beschreibung der erwarteten geologischen Langzeitentwicklung und die Beschreibung der erwarteten Entwicklung der geologischen Barrieren dokumentiert. Es werden die Eigenschaften und Funktionen des Standorts dargestellt und aufgezeigt, wie sie zur Gewährleistung der Sicherheit des gTL in der Nachverschlussphase beitragen. Des Weiteren wird gezeigt, dass der Standort die Anforderungen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit gemäss Art. 11 KEV erfüllt.

Für eine ausführliche Beschreibung der Eigenschaften des Standort ist auf Nagra (2024p) und Nagra (2024o) verwiesen.

4.5.1 Zuverlässigkeit der geologischen Gegebenheiten am Standort

Am Standort ist eine sehr gute Explorierbarkeit der Untergrundverhältnisse gegeben und die Charakterisierung der räumlichen Ausdehnung des EG und seiner Eigenschaften sind zuverlässig (Kap. 2 und Kap. 7 in Nagra 2024p). Einerseits liegt der Standort in einem Gebiet mit einfachen geologischen und tektonischen Verhältnissen (vgl. Fig. 4-1), in dem das Wirtgestein bzw. der EG einfache geometrische Verhältnisse aufweist. Andererseits sind die Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des EG von der Erdoberfläche aus gut charakterisierbar und aufgrund der monotonen, räumlich konstanten Barriereigenschaften auch räumlich äusserst gut extrapolierbar (Kap. 4.3.1 und 4.3.2 in Nagra 2024x).

4.5.2 Räumliche Ausdehnung des Opalinustons

Bei der räumlichen Ausdehnung sind die Mächtigkeit, die laterale Ausdehnung und die regionalen geologisch-tektonischen Verhältnisse berücksichtigt. Bei einer ausreichenden räumlichen Ausdehnung sind das Wirtgestein bzw. der EG räumlich so gross, dass die Radionuklide grösstenteils im Wirtgestein bzw. im EG zurückgehalten werden. Zusätzlich bietet eine ausreichende räumliche Ausdehnung Flexibilität bei der Anordnung der Elemente des gTL.

Die Mächtigkeiten des Opalinustons und des EG sind in Kap. 4.3.1 beschrieben und zeigen aufgrund der Konstanz und grossen vertikalen Ausdehnung günstige Verhältnisse für die Radionuklidrückhaltung. Auch die laterale Ausdehnung des Opalinustons und des EG (vgl. Kap. 4.3.2) stellen günstige Verhältnisse dar. In der gesamten potenziellen Lagerzone sind sie kontinuierlich ausgebildet und nicht unterbrochen (Kap. 5.2 und 5.3 in Nagra 2024a). Diese Durchgängigkeit wird durch die Berücksichtigung der tektonischen Verhältnisse sichergestellt, da die potenzielle Lagerzone ausreichend Abstand³⁸ zu regionalen tektonischen Elementen hat. Die räumlichen Verhältnisse am Standort weisen deshalb die in Art. 11 KEV geforderte Ausdehnung von geeignetem Wirtgestein auf und gewährleisten ausreichende Möglichkeiten und eine grosse Flexibilität, um die Elemente des gTL gemäss Art. 64 KEV anzuordnen. Beim Platzangebot ist zu beachten, dass es am Standort neben dem Mindestplatzbedarf grosse Platzreserven³⁹ gibt.

4.5.3 Geologische Langzeitentwicklung

Die Stabilität der geologischen Barrieren wird über einen Zeitraum von bis zu einer Million Jahren beurteilt. Dies erfordert eine Bewertung der geologischen Prozesse, die die Sicherheitsfunktionen des Mehrfachbarrierensystems in diesem Zeitraum beeinträchtigen könnten. Zukünftige tektonische Deformationen, vorübergehende klimatische Veränderungen und Erosion gelten als wichtige geologische Faktoren in diesem Zusammenhang (Kap. 6 in Nagra 2024p). Die Analysen und Betrachtungen zur geologischen Langzeitentwicklung zeigen, dass die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Mehrfachbarrierensystems für den Nachweiszeitraum der Nachverschlussphase erhalten bleiben (Kap. 6.6 in Nagra (2024p) und Kap. 6.1.1, 6.1.2 und 7.2.1 in Nagra (2024v)).

Zukünftige tektonische Entwicklung

Die tektonischen Deformationsraten am Standort sind sehr klein. Er liegt in einem Bereich der Schweiz mit den niedrigsten Deformationsraten (Fig. 4-5). Das räumliche Muster bei der Hebung wird in den nächsten Millionen Jahren weiterhin geprägt durch die Alpenorogenese aber auch durch isostatische Ausgleichsbewegungen aufgrund der Eislast der letzten und zukünftigen Eiszeiten (Kap. 6.6.2 in Nagra 2024p).

Zukünftige tektonische Deformationen werden auf die Reaktivierungen der existierenden Störungszonen, hauptsächlich entlang der regionalen Störungszonen, konzentriert sein, die ausserhalb der potenziellen Lagerzone liegen (Kap. 6.6.2 in Nagra 2024p). Die Entstehung neuer regionaler Störungszonen wird für den Nachweiszeitraum als sehr unwahrscheinlich beurteilt (Kap. 6.2.4 in Nagra (2024p) und Kap. 2.3 und 4.1 in Nagra (2024m)) und für die erwartete Entwicklung des gTL in der Nachverschlussphase nicht weiter berücksichtigt. Durch die

³⁸ Der Abstand zu den Zonen regionaler tektonischer Elemente ist in Kap. 5.1.1 zum vorläufigen Schutzbereich beschrieben.

³⁹ Die Flächen der potenziellen Lagerzone und der exemplarischen Umsetzung sind in Kap. 5.1.1 zum vorläufigen Schutzbereich beschrieben.

Vermeidung der regionalen Störungzonen trägt die Anordnung der potenziellen Lagerzone zur Langzeitstabilität des gTL bzgl. der geologischen Langzeitentwicklung und damit zur Langzeitsicherheit bei.

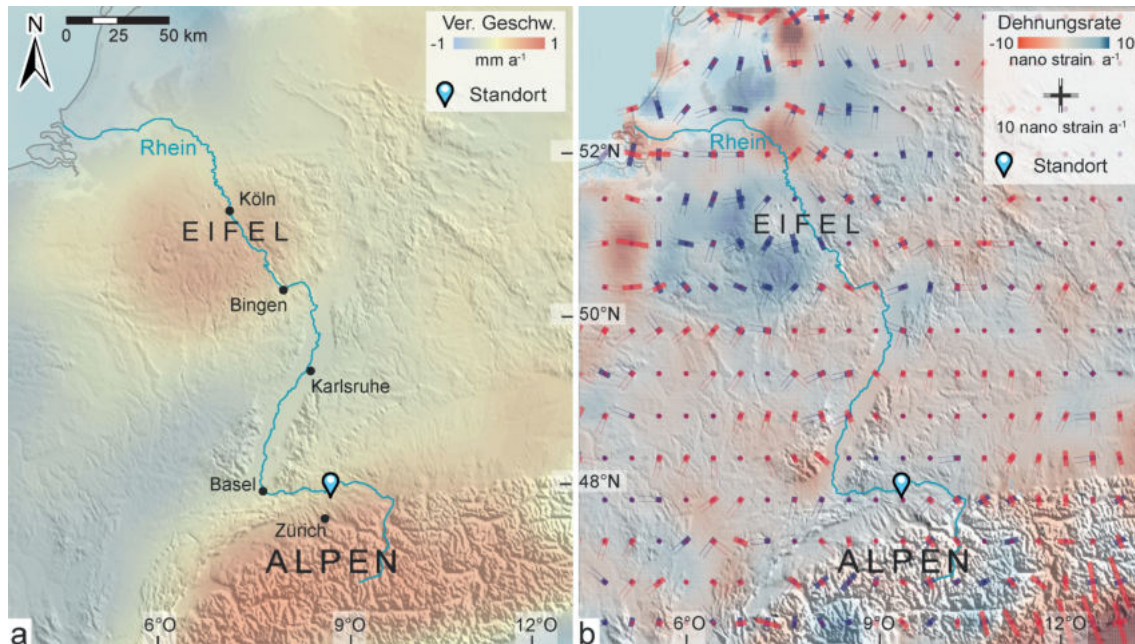


Fig. 4-5: Räumliche Verteilung der vertikalen, geodätischen Geschwindigkeiten (a) und Deformationsraten (b); angepasst von Nagra (2024p)

Erosion

Geologische Prozesse können den Abstand zwischen dem EG und der Erdoberfläche verringern. Wenn das Wirtgestein zu nah an die Oberfläche gelangen würde, könnten seine Rückhalteigenschaften durch Auflockerung und Verwitterung beeinträchtigt werden. Deshalb muss das gTL bzw. die Lagerkammern tief genug unter der Erdoberfläche liegen, so dass die Überdeckung trotz Erosion genügend Schutz bildet.

Die Erosionsgeschichte der Nordschweiz und damit auch des Standorts ist gut rekonstruiert und die relevanten Prozesse sind bekannt und quantifiziert (Kap. 6.4.2 in Nagra 2024p). Zukünftige Erosionsprozesse (glazial und fluviatil) werden voraussichtlich mit denen des Quartärs vergleichbar sein (Kap. 6.4.3 in Nagra 2024p). Es werden jedoch tendenziell geringere Erosionsraten erwartet. Unter anderem steht unterhalb der Molassesedimente mit den Malmkalken schwerer zu erodierendes Gestein an (Kap. 6.4.1.4 und Kap. 6.4.2.1 in Nagra 2024p). Die Ungewissheiten hinsichtlich der zukünftigen Erosion wurden bei den durchgeführten Analysen systematisch einbezogen, d. h. es wurde eine grosse Bandbreite von möglichen Entwicklungen untersucht (Kap. 6.4.2.3 in Nagra 2024p).

Aufgrund seiner Tiefenlage am Standort ist für das gTL bei Betrachtung aller wesentlichen Erosionsprozesse und Entwicklungen eine Restüberdeckung gewährleistet, bei der die Sicherheitsfunktionen des Wirtgesteins nicht beeinträchtigt werden (Kap. 6.4.4 in Nagra 2024p). Eine erosive Freilegung des gTL innerhalb der nächsten eine Million Jahre kann als äusserst unwahrscheinlich angesehen werden. Daher ist die geologische Langzeitstabilität durch die Tiefenlage des gTL gewährleistet.

Zukünftige Klimaentwicklung

Für den Standort werden für den Nachweiszeitraum nur wenige Vergletscherungen erwartet, welche die Grösse des letzten glazialen Maximums aufweisen oder übertreffen werden (Kap. 6.6.2 in Nagra 2024p). Aufgrund der heutigen CO₂-Emissionen kann sich der Beginn der nächsten Vergletscherung des Standorts erheblich verzögern (Kap. 6.3.3.1 in Nagra 2024p). Zwischen den zukünftigen Vereisungen werden sich Temperatur- und Niederschlagsmuster von einem eiszeitlichen Klima zu einem gemässigten Klima ändern.

Die zukünftige Klimaentwicklung wird an der Erdoberfläche die Erosionsprozesse und die hydrogeologische Situation in den Aquiferen beeinflussen. Jedoch bleiben die Sicherheitsfunktionen des Mehrfachbarrierensystems aufgrund seiner Tiefenlage und Robustheit bei einer umfassenden Betrachtung der zukünftigen Klimaentwicklung gewährleistet.

Langzeitentwicklung der Hydrogeologie und Hydrochemie

Im Opalinuston wird aufgrund der äusserst geringen hydraulischen Durchlässigkeit und des hohen Selbstabdichtungsvermögens über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren weiterhin ein diffusionsdominierter Transport vorherrschen (Kap. 6.5.2 und Kap. 6.5.3 in Nagra 2024p). Infolge des diffusionsdominierten Transports werden auch Änderungen der Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons in den nächsten eine Million Jahren gering sein (Kap. 6.5.4 in Nagra 2024p). Die Prognosen zur tektonischen Langzeitentwicklung und Erosion zeigen, dass eine relevante Erhöhung der Porosität oder eine relevante Reduktion des Selbstabdichtungsvermögens, die die hydraulische Durchlässigkeit und Diffusionsprozesse beeinflussen könnten, als äusserst unwahrscheinlich angesehen werden (Kap. 6.5.2 und Kap. 6.5.3 in Nagra 2024p).

Eine Verkarstung ist im Wirtgestein mangels löslicher Gesteine ausgeschlossen (Kap. 6.5.2.3 in Nagra 2024p). Auch für verkarstungsfähige Formationen in den oberen Rahmengesteinen (z. B. «Herrenwis-Einheit») oder unterhalb des Opalinustons sind für den Bereich der potenziellen Lagerzone innerhalb des Nachweiszeitraums keine sicherheitsrelevanten Lösungsprozesse zu erwarten (Kap. 6.5.2.3 und 6.5.5 in Nagra (2024p) sowie Kap. 4.2.1.3 in Nagra (2024x)).

Im Laufe der geologischen Langzeitentwicklung werden sich die Fließsdynamiken in den Aquiferen ändern (Kap. 6.5.1 in Nagra 2024p). Dies wird die Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete und -raten sowie die hydraulischen Gradienten und daraus resultierenden Fließspfade betreffen. Am wahrscheinlichsten werden diese Veränderungen im Zusammenhang mit zukünftigen Eiszeiten und den resultierenden Vergletscherungen und Permafrost entstehen, da z. B. Exfiltrationspfade unterbrochen werden können. Änderungen der Fließsdynamiken in den regionalen Felsaquiferen sind jedoch für die Beurteilung der Langzeitsicherheit nicht relevant.

Die Langzeitstabilität des Mehrfachbarrierensystems ist auch bei Berücksichtigung der Langzeitentwicklung der Hydrogeologie und Hydrochemie aufgrund der oben gemachten Ausführungen gewährleistet.

4.5.4 Nutzungskonflikte

Der Untergrund in der Nordschweiz gehört zu den geologisch besterkundeten Gebieten der Schweiz. Im Rahmen der geologischen Untersuchungen des SGT wurden keine Hinweise auf aus heutiger Sicht nutzungswürdige Ressourcen in einem für die Schweiz sog. besonderem Mass (BFE 2008) gefunden (Kap. 4.2.4 in Nagra 2024x), weshalb eine Beeinflussung des Mehrfachbarrierensystems durch Nutzungskonflikte nicht zu erwarten ist.

4.5.5 Fazit

Die Eigenschaften und Funktionen des Standorts leisten einen wichtigen Beitrag zum langfristigen Erhalt der Sicherheitsfunktionen für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit. Sie tragen zur Isolation der radioaktiven Abfälle und zur Langzeitstabilität des Mehrfachbarrierensystems bezüglich geologischer und klimatischer Langzeitentwicklungen bei. Die geometrischen Verhältnisse und Eigenschaften des Opalinustons bzw. des EG sind am Standort von der Oberfläche aus sehr gut charakterisiert und räumlich äusserst gut extrapolierbar. Am Standort gewährleisten die mehr als ausreichende räumliche Ausdehnung des Opalinustons und des EG die Rückhaltung der Radionuklide. Die Eigenschaften und Funktionen des Standorts weisen alle Merkmale auf, die gemäss Art. 11 KEG die Langzeitsicherheit am Standort gewährleisten.

4.6 Systemanalysen

Für die Erteilung der Rahmenbewilligung ist plausibel nachzuweisen, dass der Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet werden kann (Art. 13 KEG). Dieses Schutzziel wird in ENSI (2023a) für die Nachverschlussphase mit quantitativen Schutzkriterien in Form von maximalen Dosis- und Risikogrenzwerten präzisiert, deren Einhaltung für die Nachverschlussphase mit einem Sicherheitsnachweis nachgewiesen werden muss.

Ein absoluter Einschluss aller radioaktiven Stoffe in der Nachverschlussphase des gTL ist über sehr lange Zeiträume nicht möglich, aber auch nicht nötig. Das gTL darf eine sehr geringe zusätzliche Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung zur Folge haben⁴⁰. Das Mehrfachbarrierensystem muss so ausgelegt sein, dass die Dosis aufgrund der Freisetzung von Radionukliden durch die technischen und geologischen Barrieren so gering bleibt, dass der Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist und die strengen quantitativen Schutzkriterien des ENSI eingehalten sind.

Der Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase ist mit einer Gesamtbewertung der Langzeitsicherheit anhand umfassender Sicherheitsanalysen und qualitativen Sicherheitsbetrachtungen erbracht und in Nagra (2024v) beschrieben. Die maximal resultierenden radiologischen Auswirkungen der Sicherheitsanalysen sind mit den oben genannten Schutzkriterien abgeglichen und bewertet. Der Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase (Nagra 2024v) ist in englischer Sprache verfasst, da er auch von einer internationalen Expertengruppe der Nuclear Energy Agency (NEA) begutachtet wird. In diesem Kapitel des vorliegenden Berichts werden das Vorgehen und die Ergebnisse der Nachweisführung in deutscher Sprache zusammengefasst.

Die Vorgaben von ENSI (2023a) und ENSI (2018a) verlangen, dass bei Ungewissheiten in der Sicherheitsanalyse die maximalen radiologischen Konsequenzen durch Berechnung konservativer Szenarien oder durch die Annahme umhüllender Varianten abgeschätzt werden müssen. Dies stellt sicher, dass die Sicherheitsanalyse stets konservativ ist und die tatsächliche Wirkung des Mehrfachbarrierensystems in der Realität voraussichtlich besser sein wird als das modellierte Verhalten. Dadurch werden die radiologischen Auswirkungen für Mensch und Umwelt mit hoher Wahrscheinlichkeit überschätzt (Rahn et al. 2024). Beispielsweise ist der HAA-Endlagerbehälter in der Sicherheitsbetrachtung in einer vollständig wassergesättigten Verfüllung der Lagerstollen abgebildet (Kap. 4.2.1.4 in Nagra 2024g), um die Effekte der Korrosion zu maximieren.

⁴⁰ Die aktuelle durchschnittliche Strahlendosis der Schweizer Bevölkerung beträgt etwa 6 mSv pro Jahr (BAG 2021). Die vom ENSI festgelegte maximal zulässige Strahlendosis pro Person von 0.1 mSv pro Jahr, die durch radioaktive Stoffe aus dem gTL verursacht werden darf, ist im Vergleich dazu ein sehr kleiner Wert. Zur Veranschaulichung: Ein Flug von Frankfurt nach New York und zurück führt zu einer Strahlenbelastung von 0.1 mSv (Quelle: https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/luft-boden/flug/flug_node.html).

4.6.1 Entwicklung des geologischen Tiefenlagers in der Nachverschlussphase

In diesem Kapitel ist die in ENSI (2023a) geforderte sog. Beschreibung der zu erwartenden Entwicklung des gTL in der Nachverschlussphase unter Berücksichtigung der möglichen gegenseitigen Wechselwirkungen der unterschiedlichen Materialien und anderer im gTL ablaufender Prozesse zusammengefasst, die in Kap. 5.3 von Nagra (2024v) und in Nagra (2024u) beschrieben sind.

Die Entwicklung der Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren nach dem Verschluss des gTL bildet die Grundlage für die Sicherheitsanalysen. Die Eigenschaften und das Langzeitverhalten des Abfallinventars Nagra (2023c), der technischen (z. B. Nagra 2024g, Nagra 2021c) und geologischen Barrieren (Nagra 2024p) sind aufgrund langjähriger Forschungsarbeiten bekannt (vgl. Kap. 4.2 bis 4.5) und anhand von Beobachtungen, Experimenten in Felslaboren und Systemanalysen (vgl. Kap. 4.6.3) gut verstanden und dadurch prognostizierbar (Nagra 2024u). Die Entwicklung ist geprägt durch Wechselwirkungen zwischen den technischen und geologischen Barrieren sowie durch geologische Prozesse.

Alle radioaktiven Abfälle, die eingelagert werden, müssen den Annahmebedingungen entsprechen. Für die Sicherheitsanalysen werden das Radionuklidinventar, die Abfallarten, Massen und Volumen aus Nagra (2023c) berücksichtigt.

Im gTL kommt es vor der Einlagerung durch den Bau und die Belüftung der untertägigen Anlage zu einer Entsättigung und Absenkung des Porenwasserdrucks im unmittelbar an die untertägigen Bauten angrenzenden Gebirge (Kap. 5.3.3 in Nagra 2024v). Des Weiteren führen Spannungsumlagerungen zur Bildung einer Auflockerungszone im Gebirge, das direkt an die untertägigen Bauten angrenzt (Kap. 3.2.2 in Nagra 2024u). In der Nachverschlussphase sättigt dieser Bereich wieder auf und der ursprüngliche Porenwasserdruck stellt sich wieder ein, wodurch sich auch die Auflockerungszone durch Selbstabdichtung schliesst (Kap. 5.3.3 in Nagra (2024v) sowie Kap. 6.1 und Kap. 6.2 in Nagra (2024u)).

In den HAA-Lagerstollen sättigt sich die anfangs trockene Bentonitverfüllung mit Porenwasser aus dem Opalinuston auf (Kap. 5.3.6 in Nagra 2024v). Der limitierende Faktor dabei ist die äusserst geringe hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons, weshalb eine vollständige Sättigung der Bentonitverfüllung nach einigen hundert Jahren erwartet wird. Die Aufsättigung führt beim Bentonit zu der Entwicklung eines Quelldrucks, einer Verschiebung der Porengrössenverteilung und dadurch zu einer sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeit (Kap. 6.1 in Nagra 2024u).

In den ersten paar tausend Jahren der Nachverschlussphase führt die Zerfallswärme der HAA zu einem vorübergehenden Anstieg der Temperatur und des Porenwasserdrucks im Gebirge um die HAA-Lagerstollen (Kap. 5.3.6 in Nagra (2024v) sowie Kap. 6.1 und 6.2 in Nagra (2024u)). Die Höhe des Temperatur- und Druckanstieges nimmt mit zunehmender Entfernung von den HAA-Endlagerbehältern ab. Während mindestens tausend Jahren ist der vollständige Einschluss der HAA in den Endlagerbehältern sichergestellt. Danach werden die Behälter infolge Korrosion zunehmend undicht.

Auch das Nahfeld der SMA-Lagerkavernen sättigt mit Porenwasser aus dem Opalinuston auf. Aufgrund der Kavernengrösse des aktuellen Lagerkonzepts dauert dieser Vorgang aber länger als bei den HAA-Lagerstollen und es können infolge der langsamen Aufsättigung oder durch Gas, das in den SMA-Lagerkavernen entsteht, luft- oder gasgefüllte Poren bestehen bleiben (Kap. 5.3.5 in Nagra (2024v) sowie Kap. 6.2 und 7.2 in Nagra (2024u)). Das Gas wird durch Kontakt von Wasser mit korrosions- und degradationsfähigen Materialien gebildet. Der Grossteil der Gasbildung im gesamten gTL findet im SMA-Lagerteil während der ersten tausend bis zehntausend Jahren statt. Das produzierte Gas sammelt sich zunächst im First der Lagerkavernen an, während

sich im unteren Teil der Lagerkavernen Porenwasser sammelt. Bei steigendem Gasdruck erfolgt dann die Gasmigration aus den Lagerkavernen in die Lagerfeldzugänge und den Haupterschliessungsbereich sowie in das umgebende Wirtgestein.

Sowohl bei den HAA-Lagerstollen und SMA-Lagerkavernen degradiert der Tunnelausbau im Verlaufe der Zeit und verliert seine mechanische Festigkeit (Kap 5.3.5 und 5.3.6 in Nagra 2024v). Die daraus resultierende Spannungsumverteilung hat jedoch keinen Einfluss auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Barrieren, da das Verfüllmaterial die Lagerkammern mechanisch stabilisiert und die Konvergenz der Lagerkammern begrenzt.

Verbleib und Verhalten der Radionuklide im gTL

Das Verhalten der Radionuklide im gTL lässt sich nach dem Verschluss grob in unterschiedliche Phasen einteilen (Kap. 5.4 in Nagra 2024v), die sich zu einem gewissen Grad überschneiden:

- Bei den HAA sind die Radionuklide zu Beginn vollständig in den Endlagerbehältern eingeschlossen. Dieser Einschluss muss für mindestens tausend Jahre sichergestellt sein.
- Nach dem Versagen der HAA-Endlagerbehälter werden die noch nicht zerfallenen Radionuklide zum grössten Teil sehr langsam aus der Brennstoffmatrix und dem Glas gelöst.
- Die SMA-Endlagerbehälter bieten zunächst einen Widerstand gegen das Eindringen von Porenwasser. Doch mit der Zeit zersetzen sie sich und das Wasser gelangt in Kontakt mit den Abfallbinden.
- Die Radionuklide, die aus den Endlagerbehältern in die Verfüllung der HAA-Lagerstollen oder das Nahfeld der SMA-Lagerkavernen gelangen, werden dort zurückgehalten und zerfallen oder bewegen sich sehr langsam durch die Verfüllungen oder das Nahfeld in das Wirtgestein und/oder das Verschlusssystem.
- Nur ein sehr geringer Teil der Radionuklide erreicht das Wirtgestein. In gelöster Form können nur sehr langlebige und nicht sorbierende Radionuklide in geringsten Konzentrationen den EG verlassen und in die tiefen Felsaquifere gelangen. Dieser Prozess erfolgt sehr langsam, da Diffusion den Transport im EG bestimmt.
- Bei der Dosiskalkulation wird davon ausgegangen, dass diese wenigen Radionuklide über die tiefen Felsaquifere direkt zur Biosphäre vordringen und dort geringfügig zu der Gesamtdosis beitragen können. Dabei handelt es sich um konservative Annahmen, da zusätzliche Abschwächungen, Verdünnungen und Verzögerungen von mehreren tausend bis hunderttausend Jahre vernachlässigt sind, welche sich durch den Zerfall und die Dispersion während des Transports aus den tiefen Felsaquiferen, die sich mehrere hundert bis tausend Meter unterhalb der Erdoberfläche befinden, ergeben.

Der Grossteil der Radionuklide wird das gTL nicht verlassen, sondern dort aufgrund der Rückhaltung in den Barrieren zerfallen.

4.6.2 FEPs

Beim Sicherheitsnachweis für die Nachverschluss sind gemäss ENSI (2023a) sicherheitsrelevante FEPs (features, events and processes) durch Rechenfälle abzudecken. FEPs ist eine international gebräuchliche Bezeichnung für Eigenschaften, Ereignisse und Vorgänge, die mögliche Entwicklungen des gTL bestimmen.

In den Sicherheitsanalysen ist eine phänomenologische Vollständigkeit der FEPs und ein angemessenes FEP-Management sichergestellt, da

- eine umfassende FEP-Datenbank entwickelt wurde, die alle FEPs enthält, die für die Sicherheitsbewertung relevant sein können,
- eine sorgfältige Prüfung der Phänomene, die in dem Sicherheitsnachweis berücksichtigt sind, anhand der FEP-Datenbank durchgeführt wurde.

Die FEP-Datenbank der Nagra wurde über viele Jahre hinweg entwickelt, von internen und externen Experten überprüft und mit anderen relevanten FEP-Datenbanken abgeglichen, die von nationalen Organisationen in anderen Ländern und von internationalen Gremien zusammengestellt wurden. Die Prüfung der FEPs ist in Nagra (2024t) dokumentiert.

4.6.3 Funktionsfähigkeit des geologischen Tiefenlagers und Prüfung der Barrierewirksamkeit

In diesem Kapitel sind das in ENSI (2023a) geforderte sog. Aufzeigen der Wirkungsweise, des Rückhaltevermögens und der Robustheit der technischen und geologischen Barrieren dokumentiert. Ausserdem sind die Auswirkungen gekoppelter Prozesse und der Gasbildung auf die technischen und geologischen Barrieren sowie auf den Radionuklidtransport dargelegt und bewertet. Aufgrund der detaillierten Kenntnisse über die geologischen und technischen Barrieren sowie über die langfristigen Prozesse sind die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems und der einzelnen Barrieren mittels modellunterstützter Analysen analysiert und die langfristige Wirksamkeit des Mehrfachbarrierensystems bestätigt. Ein Vergleich und eine Überprüfung der Ergebnisse mit den aktuellen Anforderungen an das gTL (Nagra 2024ab) zeigt, dass der Standort mit der exemplarischen Auslegung des gTL die Anforderungen zum langfristigen Erhalt der Barriereeigenschaften mit grossen Reserven erfüllt.

Die Prüfung der Barrierewirksamkeit ist der erste Schritt des Sicherheitsnachweises. Mit den numerischen Modellen für den Standort sind neben dem Referenzfall auch die Bandbreite der Ungewissheiten systematisch analysiert. Mit den Modellierungen sind mögliche Abweichungen bei der Funktionsfähigkeit, die als Input für die Entwicklung der Sicherheitsszenarien dienen, sowie Phasen maximaler Beanspruchung des gTL-Systems identifiziert, die die Integrität der Barrieren beeinträchtigen könnten. Diese Prüfzenarien sind mit zusätzlichen Robustheits- und Konsequenzenanalysen gezielter untersucht, um die Sicherheitsmargen zu überprüfen.

Im Folgenden sind ausgewählte Beispiele erläutert. Der Nachweis der Barrierewirksamkeit für das gTL am Standort findet sich in Nagra (2024ac). Die bei der Prüfung der Barrierewirksamkeit verwendeten Modelle sind in Nagra (2024s) ausführlich beschrieben.

Wechselwirkungen zwischen SMA- und HAA-Lager

Bei der Anordnung der HAA- und SMA-Lagerteile ist gemäss ENSI (2018a) darauf zu achten, dass mögliche thermische, mechanische, hydraulische und gasbedingte sowie chemische Wechselwirkungen zwischen den beiden Lagerteilen keine sicherheitsrelevante Beeinträchtigung des Mehrfachbarrierensystems darstellen. Dazu wurden die Wechselwirkungen zwischen den beiden Lagerteilen untersucht. Sowohl die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse mit unterschiedlichen Abständen (Nagra 2021b) als auch die Ergebnisse für die exemplarische Lagerauslegung am Standort (Kap. 4.2 in Nagra (2024ac)) zeigen, dass die Lagerteile für HAA und für SMA so angelegt werden können, dass sie sich nicht gegenseitig negativ beeinflussen.

Die definitive Anordnung der HAA- und SMA-Lagerteile erfolgt im Rahmen der weiteren Bewilligungsschritte nach KEG.

Mindestabstand von tektonischen Störungen

Der Fokus der Systemanalysen beim Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase liegt auf potenziellen Freisetzungspfaden von Radionukliden aus dem gTL. Dazu werden mit Transportmodellierungen Freisetzungen für verschiedene Situationen berechnet. Als konservative Massnahme werden die Analysen mit nicht sorbierenden Stoffen durchgeführt. Dadurch wird ermittelt, welche Anteile des Stoffes über die verschiedenen Transportpfade freigesetzt werden könnten. Bei den Stofftransportrechnungen werden zur Berücksichtigung aller Ungewissheiten unterschiedliche Annahmen und Parameter berücksichtigt.

Ein Untersuchungsaspekt bei den Transportmodellierungen betrifft den Einfluss von tektonischen Störungen auf den Transport von Radionukliden. Obwohl die Resultate der Tiefbohrungen zeigen, dass gestörter Opalinuston keine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit aufweist, wird der Einfluss von Störungen konservativ mit erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten untersucht. Für die Modellanalysen zur Prüfung der Barrierewirksamkeit wird angenommen, dass sich in 200 m Abstand des HAA-Lagerfeldes bzw. des äussersten Lagerstollens eine steilstehende Störung mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit befindet (Kap. 6.3.6 in Nagra (2024ac) und Kap. 4.2 in Nagra (2024ad)). Die Ergebnisse zeigen, dass die Freisetzung dabei hauptsächlich über das intakte Gestein erfolgt und eine solche fiktive Störung, selbst unter der Annahme von unrealistisch hohen Transportbedingungen, keinen relevanten Freisetzungspfad darstellt.

Beim Vorschlag für die räumliche Ausdehnung des vorläufigen Schutzbereichs (Kap. 5.1.1) wird deshalb ein Abstandsbereich von 200 m zwischen der potenziellen Lagerzone und regionalen tektonischen Elementen benutzt. Dadurch wird gewährleistet, dass bei der zukünftigen Platzierung der Lagerteile ausreichend Abstand zu regionalen tektonischen Elementen eingehalten werden kann. Somit ist die Langzeitsicherheit auch bei ungünstigen geologischen Entwicklungen gewährleistet.

Erhalt der Gebirgsintegrität

Bei den Modellierungen der wärmeinduzierten Prozesse wird für alle HAA-Endlagerbehälter modellhaft angenommen, dass sie eine maximale Wärmeleistung aufweisen, wobei dies eine konservative Annahme ist, da der Grossteil der HAA-Endlagerbehälter tiefere Wärmeleistungen aufweisen wird. Aufgrund der bekannten und mit Laborexperimenten oder grossmassstäblichen Experimenten in Felslabors bestimmten Wärmeleitfähigkeit der Systemkomponenten und verifizierten Modellierungswerkzeugen lassen sich die Temperatureffekte und die damit gekoppelte Veränderung der Porenwasserdruck- und Gebirgsverhältnisse berechnen. Die Ergebnisse in Kap. 4.3 und 6.2.4 von Nagra (2024ac) zeigen, dass mit der exemplarischen Auslegung des gTL die vorübergehend erhöhten Temperaturen und Porenwasserdrücke keine langfristigen Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktionen des Mehrfachbarrierensystems haben.

Neben den wärmeinduzierten Prozessen werden auch gasinduzierte Effekte untersucht, die zu Veränderungen des Porenwasserdrucks und der Gebirgsspannungen im umgebenden Wirtgestein führen könnten. Die Ergebnisse der Prüfung der Barrierenwirksamkeit zeigen, dass die Gasproduktion weder die Sicherheitsfunktionen des Wirtgesteins noch der technischen Barrieren in der Nachverschlussphase beeinträchtigt (Kap. 4.4 in Nagra 2024ac). In allen untersuchten Fällen besteht eine Sicherheitsmarge, z. B. in Bezug auf die Gebirgsspannungen, weshalb keine Reaktivierung existierender Störungen oder Bildung neuer Störungen stattfindet. Selbst unter pessimistischsten Annahmen werden die Sicherheitsfunktionen für die Nachverschlussphase

nicht beeinträchtigt. Des Weiteren demonstrieren die Analysen, dass die gasbedingten Überdrücke in den HAA-Lagerstollen und in den SMA-Lagerkavernen durch verschiedene Prozesse begrenzt bleiben:

- Durch Gasspeicherung in den technischen Barrieren und in der Auflockerungszone.
- Aufgrund der Gasmigration durch die Versiegelungen der Lagerteile in die verfüllten Lagerfeldzugänge und die verfüllten Bauwerke im zentralen Bereich, welche ein erhebliches Gasspeichervermögen aufweisen.

Ferner zeigt sich, dass die Versiegelungen der Zugangsbauwerke aufsättigen und abdichten bevor das von den Abfällen generierte Gas diese Versiegelungen erreicht (Kap. 4.4.5 in Nagra 2024ac).

Barrierewirksamkeit des EG

Für die Barrierenwirksamkeit des EG ist ein modellgestützter Nachweis erbracht, der auf Labor- und Felslaborexperimenten, Daten aus Tiefbohrungen und verifizierten Modellen basiert. Dieser bestätigt, dass der Radionuklidtransport im Opalinuston diffusionsdominiert ist und der Opalinuston die primäre Transportbarriere des geologischen Barrierensystems darstellt. Des Weiteren zeigen die Resultate, dass auch die oberen und unteren Rahmengesteine eine zusätzliche Transportbarriere darstellen (Kap. 6.1.2 in Nagra (2024v) und (Kap. 6.3.6 in Nagra 2024ac)).

Auch der Einfluss der Auflockerungszone auf die Barrierenwirksamkeit des Opalinustons ist untersucht (Tab. 3.3, Tab. 3.6 und Anhang B.2 in Nagra 2024ac). Es gibt zahlreiche Belege dafür, dass die Form, die Ausdehnung und die Eigenschaften der Auflockerungszone im Opalinuston um die Lagerkammern die Barrierenwirksamkeit des EG und der technischen Barrieren nicht beeinträchtigen. Die folgenden Punkte fassen die Hauptargumente aus Kap. 6.1.2 in Nagra (2024v) und Kap. 6.3.6 in Nagra (2024ac) zusammen:

- Die Wahl des Bauverfahrens und des Ausbaus begrenzen die Ausdehnung der Auflockerungszone.
- Aufgrund von Selbstabdichtung und sehr beschränktem Wasserzutritt stellt die Auflockerungszone keinen signifikanten axialen Transportweg für gelöste Radionuklide dar.

Obwohl es im Rahmen der Untersuchungen in den Tiefbohrungen selbst bei geringem Tonmineralgehalt keine Hinweise auf eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit der Rahmengesteine gibt (z. B. Fig. 4-138 Nagra 2024p), ist der Stofftransport bei der Prüfung der Barrierewirksamkeit der Rahmengesteine mit abdeckenden Parameterbandbreiten und ungünstige Annahmen untersucht. So sind z. B. hypothetische hochdurchlässige dünne Schichten in den Rahmengesteinen simuliert oder die «Herrenwis-Einheit»⁴¹ mit einer hypothetischen hohen Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit abgebildet. Die Modellrechnungen in Kap. 6.3.6 von Nagra (2024ac) zeigen, dass die Rahmengesteine selbst unter solchen hypothetischen und ungünstigen Annahmen keine advektiven Freisetzungspfade darstellen, sondern eine Transportbarriere bilden und damit zusätzlich zur Gewährleistung der Rückhaltung beitragen.

⁴¹ Die «Herrenwis-Einheit» besteht vor allem aus Korallenkalken mit mergeligen Zwischenlagen und ist im östlichen Bereich des Standortgebiets NL als eine Art grosse Linse zwischen den tonigen, geringdurchlässigen oberen Rahmengesteinen eingebettet.

4.6.4 Auswirkungen von Bau und Betrieb auf die Langzeitsicherheit

In diesem Kapitel wird die Berücksichtigung von den in ENSI (2023a) geforderten sog. Auswirkungen von Bau und Betrieb auf die Langzeitsicherheit zusammengefasst. Der Bau aller unterirdischen Bauwerke und die Integration aller technischen Komponenten werden nach etablierterem Stand der Technik und mit geeigneten Verfahren durchgeführt, um allen einschlägigen Anforderungen und Spezifikationen zu entsprechen. Es werden Massnahmen ergriffen, um sicherzustellen, dass Störfälle in der Zeit vor dem Verschluss keine Auswirkungen auf die langfristige Sicherheit haben. Die Analyse der Auswirkungen von Störfällen auf die Langzeitsicherheit ist in Nagra (2024c) beschrieben.

4.6.5 Sicherheitsszenarien und radiologische Konsequenzenanalysen

Dieses Kapitel dokumentiert die in ENSI (2023a) geforderte sog. Beschreibung der Robustheit der technischen und geologischen Barrieren, die Szenarienanalyse, mit welcher umhüllende Varianten und Szenarien von möglichen Entwicklungen betrachtet und identifiziert sind, und die Berechnung der radiologischen Auswirkungen zukünftiger Entwicklungen. Die Bewertung der Resultate zeigt, dass am Standort die Schutzkriterien für die Nachverschlussphase für alle Szenarien mit deutlichen Sicherheitsmargen eingehalten werden.

Sicherheitsszenarien beschreiben die verschiedenen Möglichkeiten für den Ausgangszustand und die anschliessende Entwicklung des gTL und stellen die Verbindung zwischen der Prüfung der Barrierewirksamkeit (vgl. Kap. 4.6.3) und den Dosisberechnungen her. Ihre Herleitung ist in Nagra (2024h) beschrieben. Die Sicherheitsszenarien sind abdeckend definiert, da sie alle Ungewissheiten und Entwicklungen mit potenziellen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit berücksichtigen, die sich aus der Prüfung der Barrierewirksamkeit, der geologischen Langzeitentwicklung und allfälligen Störfällen während der Bau- und Betriebsphase ergeben können. Dabei ist berücksichtigt, dass die technischen Barrieren, der EG, die geologische Langzeitentwicklung des Standorts, die Biosphäre und die Lebensgewohnheiten der Menschen jeweils eine unterschiedliche zeitliche Prognostizierbarkeit haben. In Übereinstimmung mit internationalen und nationalen Richtlinien sind Sicherheitsszenarien definiert, die sowohl die erwartete Entwicklung des gTL über den Nachweiszeitraum als auch weniger wahrscheinliche und sogar hypothetische Entwicklungen und Abweichungen beschreiben, sowie Szenarien, die auf zukünftige menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind.

Die radiologischen Konsequenzen aller Sicherheitsszenarien sind in Nagra (2024y) beschrieben und die Einhaltung der Schutzkriterien sowie die vorhandenen Sicherheitsmargen bewertet. Mit den radiologischen Konsequenzenanalysen sind sowohl die Freisetzungsraten gelöster Radionuklide als auch der gasförmigen Radionuklide berechnet. Die Berechnungen der radiologischen Auswirkungen für die Nachverschlussphase stellen nicht die effektiv prognostizierte Strahlenexpositionen dar. Sie ergeben ein Dosismaximum für ein durchschnittliches Individuum innerhalb der von den potenziellen Auswirkungen aus dem gTL am meisten betroffenen Bevölkerungsgruppe. Ausserdem zeigen sie die Sensitivitäten und die Auswirkungen von Ungewissheiten auf die Rückhaltung und den Transport von Radionukliden, was die Sicherheitsmargen veranschaulicht.

Zusätzlich zu den Analysen in Nagra (2024y) sind die radiologischen Konsequenzen von hypothetischen Freilegungsszenarien bspw. durch flächenhafte Erosion oder glaziale Tiefenerosion in Nagra (2024z) und die radiologischen Konsequenzen von zukünftigen menschlichen Aktivitäten in Nagra (2024aa) analysiert und die Einhaltung der Schutzkriterien beurteilt.

Referenzsicherheitsszenario

Als Referenzsicherheitsszenario wird die erwartete Ausgangssituation und erwartete zeitliche Entwicklung des gTL in der Nachverschlussphase am Standort in einer nachgewiesenermassen stabilen geologischen Situation bezeichnet (Kap. 7.2 in Nagra (2024v) und Kap. 4.1 in Nagra (2024y)). Diese garantiert aufgrund der tektonisch ruhigen Lagerung, der geringen Hebungs- und Erosionsraten die Langzeitstabilität der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des EG (vgl. Kap. 4.3 bis 4.5). Für diese geologische Referenzsituation sind ein probabilistischer und verschiedene deterministische Rechenfälle untersucht (Kap. 4.1.3 in Nagra 2024y). Die Ungewissheiten an der Erdoberfläche bezüglich der Klima- und Landschaftsentwicklung und des Verhaltens der Menschen sind mit Bandbreiten und ungünstigen Annahmen berücksichtigt. Die unterschiedlichen Bedingungen an der Erdoberfläche sind sowohl als heutiges, als feucht-kaltes und auch als konstant warm-trockenes Klima mit Rechenfällen abgedeckt. Gleichzeitig geht das Referenzsicherheitsszenario von einer landwirtschaftlichen Nutzung mit einem grossen Selbstversorgungsanteil aus. Obwohl der Keuper-Aquifer, der den EG nach unten begrenzt, am Standort nur lokal im Bereich der Tiefbohrungen Bachs-1-1 und Stadel-2-2 angetroffen wurde, ist er im Referenzsicherheitsszenario konservativ behandelt, da er unrealistischerweise als grossräumig aktiver Aquifer betrachtet wird. Ein zusätzlicher Rechenfall betrachtet auch einen hydraulisch inaktiven Keuper-Aquifer.

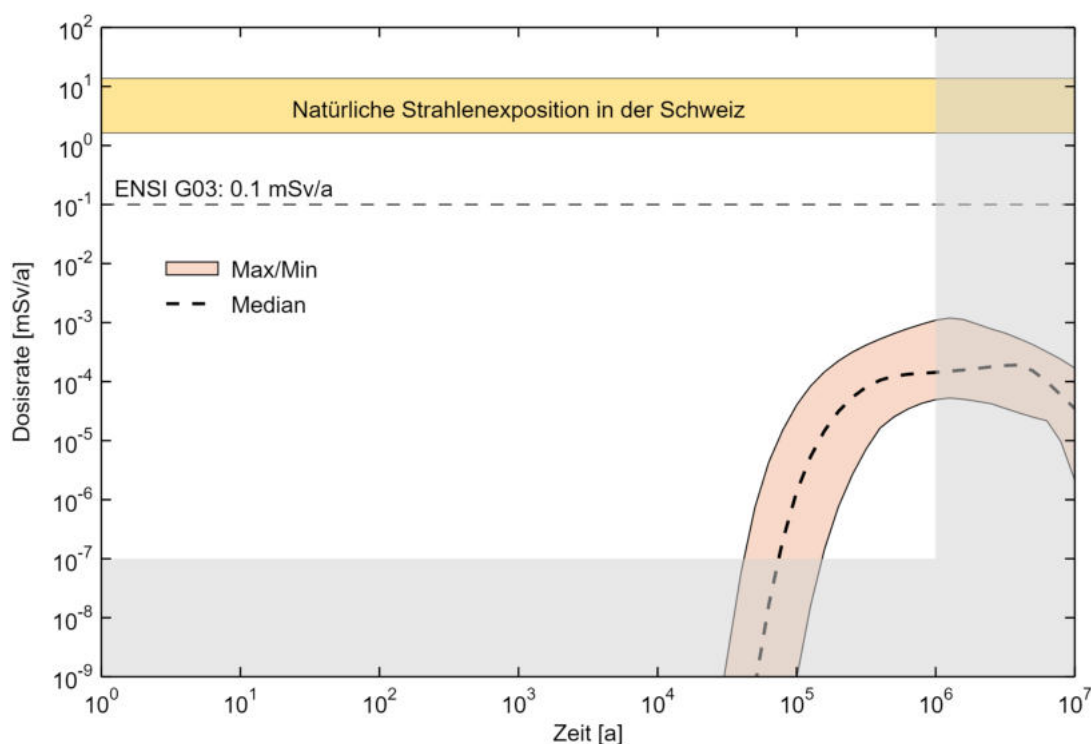


Fig. 4-6: Dosisraten aus der probabilistischen Konsequenzenanalyse für die Freisetzung von in Wasser gelösten Radionukliden aus dem HAA- und SMA-Lagerteil des gTL für das Referenzszenario

Dargestellt ist die statistische Auswertung der Analyseergebnisse mit Median, Minimum und Maximum. Der graue Bereich zeigt zum einen die Zeit nach dem Ende des Nachweiszeitraums von 10^6 Jahren und zum anderen den Bereich unterhalb von 10^{-7} mSv pro Jahr, entsprechend einer internationalen Konvention über strahlenbedingte Risiken. Das Schutzkriterium von 0.1 mSv pro Jahr gemäss ENSI (2023a) ist mit einer gestrichelten horizontalen Linie dargestellt.

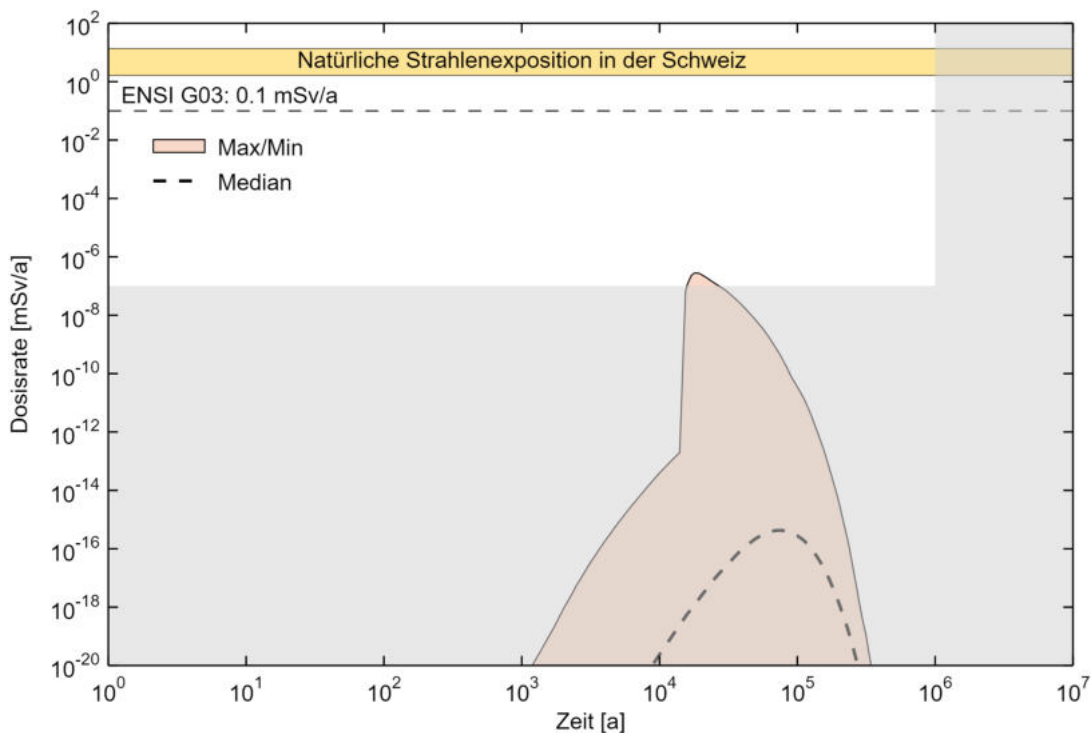


Fig. 4-7: Dosisraten aus der probabilistischen Konsequenzenanalyse für die Freisetzung des gasförmigen Radionuklids C-14 aus dem HAA- und SMA-Lagerteil des gTL für das Referenzszenario

Dargestellt ist die statistische Auswertung der Analyseergebnisse mit Median, Minimum und Maximum. Der graue Bereich zeigt zum einen die Zeit nach dem Ende des Nachweiszeitraums von 10^6 Jahren und zum anderen den Bereich unterhalb von 10^{-7} mSv pro Jahr, entsprechend einer internationalen Konvention über strahlenbedingte Risiken. Aufgrund der sehr niedrigen Dosisraten ist die Skala der y-Achse bis 10^{-20} mSv pro Jahr erweitert. Das Schutzkriterium von 0.1 mSv pro Jahr gemäss ENSI (2023a) ist mit einer gestrichelten horizontalen Linie dargestellt.

Die Ergebnisse der probabilistischen Analysen für wasserlösliche Radionuklide sind in Fig. 4-6 dargestellt und illustrieren die zeitliche Entwicklung und die Bandbreite der Ungewissheiten in den berechneten Dosisraten, die zusammen aus den HAA- und SMA-Lagerteilen freigesetzt werden. Der Medianwert liegt deutlich mit drei Grössenordnungen und das Maximum der Bandbreite mit zwei Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv pro Jahr. Die probabilistischen Resultate zeigen die grossen Sicherheitsmargen bzgl. Parameterungewissheiten. Auch nach Ende des Nachweiszeitraums von einer Million Jahre bleibt die Dosisrate mit vier Grössenordnungen weit unterhalb der typischen natürlichen heutigen Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung. Die Dosisraten der deterministischen Rechenfälle (Kap. 8.2 in Nagra (2024v) und Kap. 7.1.1 in Nagra (2024y)), welche unterschiedliche Bedingungen an der Erdoberfläche und des Keuper-Aquifers abdecken, liegen entweder im gleichen Bereich wie die probabilistischen Berechnungen während des Nachweiszeitraums oder deutlich darunter.

Bei den gasförmigen Radionukliden ist ^{14}C in Form von Methan das einzige Radionuklid, das durch Migration in der Gasphase signifikant zu den Dosisraten beitragen könnte. Fig. 4-7 zeigt die Ergebnisse der probabilistischen Analysen für die Freisetzung von volatilem ^{14}C . Die maximalen Dosisraten sind mehrere Grössenordnungen kleiner als die Dosisraten der wasserlöslichen Radionuklide und liegen deshalb auch sehr weit unterhalb des Schutzkriterium von 0.1 mSv pro Jahr. Weitere Ergebnisse sind in Kap. 8.2 von Nagra (2024v) zusammengefasst und in Kap. 7.2.1 von Nagra (2024y) detailliert beschrieben.

Die Ergebnisse verdeutlichen die grossen Sicherheitsmargen bzgl. der Einhaltung des Schutzkriteriums für das gTL am Standort. Der Radionuklidtransport wird bereits in den technischen Barrieren abgeschwächt. Die geologischen Barrieren sorgen zusätzlich für eine erhebliche Abschwächung, so dass bereits nach einigen Metern Transport im Opalinuston die maximale Dosisrate unter dem gesetzlichen Dosisgrenzwert von 0.1 mSv pro Jahr liegt (z. B. Fig. 8-4 in Nagra 2024v). Diese kurze Transportlänge in der geologischen Barriere zur Einhaltung des Schutzziels ist unabhängig von den Entwicklungen in den technischen Barrieren, wie sie in den «What if» Szenarien behandelt werden.

Zusammenfassend zeigen die radiologischen Konsequenzenanalysen für ein gTL am Standort, bei denen die exemplarische Lagerauslegung und die erwartete Entwicklung verwendet ist, dass die Schutzkriterien mit grossen Sicherheitsmargen eingehalten werden und der Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet werden kann.

Alternative Sicherheitsszenarien

Mit den alternativen Sicherheitsszenarien sind wenig wahrscheinliche, d. h. grundsätzlich wissenschaftlich nicht auszuschliessende Szenarien, bei den Standorteigenschaften und den Eigenschaften des EG analysiert. Aufgrund der sehr guten Explorierbarkeit, mehr als ausreichenden Ausdehnung des EG, den sehr günstigen hydrogeologischen Eigenschaften und der geologischen Langzeitstabilität des Standorts ergeben sich nur wenige alternative Sicherheitsszenarien. Diese beziehen sich gemäss Kap. 7.3 in Nagra (2024v) und Kap. 4.2 in Nagra (2024y) auf:

- Bestehen einer nicht erkannten Störung mit einem konservativ hohen Wert für die Durchlässigkeit innerhalb der HAA- oder SMA-Lagerfelder.
- Bestehen eines horizontalen advektiven Transportpfads in den Rahmengesteinen oberhalb oder unterhalb des Opalinustons.

In allen betrachteten Fällen bleibt die resultierende maximale Dosisrate für die wasserlöslichen und gasförmigen Radionuklide um mehrere Grössenordnungen unter dem Schutzkriterium (Kap. 8.3 in Nagra (2024v) sowie Kap. 7.1.2 und 7.2.2 in Nagra (2024y)). Die Ergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein einer nicht erkannten Störung oder hydraulisch aktiver Einheiten in den Rahmengesteinen im Vergleich zum Referenzsicherheitsszenario nur einen begrenzten Einfluss auf die maximalen Dosisraten hat, wobei diese früher auftreten könnten.

«What-if» Szenarien

Mit «What-if» Szenarien (Kap. 7.4 in Nagra (2024v) und Kap. 4.3 in Nagra (2024y)) werden hypothetische Situationen und Entwicklungen ausserhalb des Bereichs wissenschaftlich möglicher Effekte oder erwarteter Prozesse analysiert. Sie sind unrealistisch ausgelegt und werden verwendet, um die Robustheit des gTL-Systems zu demonstrieren.

Die «What-if» Szenarien decken zum einen die hypothetischen radiologischen Konsequenzen einer sehr grossen, unrealistisch durchlässigen, nicht erkannten Störung innerhalb oder neben den HAA- oder SMA-Lagerfeldern sowie einer Störung, die aufgrund eines unwahrscheinlichen Erdbebens grosser Magnitude oder tiefenlagerinduzierter Prozesse neugebildet oder reaktiviert

wird, ab. Zum anderen sind «What-if» Szenarien analysiert, bei den unrealistischerweise die Barrieren des Mehrfachbarrierensystems entweder komplett vernachlässigt oder stark beeinträchtigt sind. Im Folgenden sind ausgewählte Beispiele aufgelistet:

- Leicht wasserlösliche HAA
- Keine Sorption im Bentonit oder im EG
- Hypothetisch hohe Diffusionsraten im Bentonit oder im EG
- Frühes Versagen der HAA-Endlagerbehälter
- Hypothetisch hohe Permeabilität des Verschlussystems

Die Ergebnisse zeigen (Kap. 8.4 in Nagra (2024v) sowie Kap. 7.1.3, 7.1.4, 7.2.3 und 7.2.4 in Nagra (2024y)), dass die Langzeitsicherheit auch für ein breites Spektrum hypothetischer Szenarien gewährleistet werden kann, da auch hier die Schutzkriterien eingehalten werden, zum Teil mit grossen Sicherheitsmargen. Der Nachweis der Langzeitsicherheit für diese hypothetischen Szenarien ist ein weiterer Beleg für die Robustheit des Lagerkonzeptes und die Eignung des Standorts.

Zudem werden «What-if» Szenarien analysiert, welche erst nach dem Ende des Nachweiszeitraums möglich sind, aber trotzdem gemäss ENSI (2018a) für den Nachweiszeitraum analysiert werden müssen. Dazu zählen die radiologischen Konsequenzen von Freilegungsszenarien bspw. durch flächenhafte Erosion oder glaziale Tiefenerosion (Nagra (2024z) und Kap. 8.4.1 in Nagra (2024v)), die zeigen, dass für diese Fälle das Schutzkriterium bzgl. des Risikorichtwerts eingehalten wird.

Zukünftige menschliche Aktivitäten

Gemäss den Vorgaben aus ENSI (2023a) sind auch die radiologischen Konsequenzen zukünftiger menschlicher Aktivitäten analysiert (Nagra (2024aa) und Kap. 8.5 in Nagra (2024v)).

Das Fehlen von wirtschaftlich nutzbaren Rohstoffen in besonderem Ausmass macht das unbeabsichtigte menschliche Eindringen unwahrscheinlich. Zusätzlich wird das gTL durch die Festlegung eines Schutzbereichs (vgl. Kap. 5.1) vor menschlichen Eingriffen geschützt. Da dieses Wissen in Zukunft möglicherweise nicht erhalten bleibt, wird ein Sicherheitsszenario betrachtet, bei dem eine Tiefbohrung die HAA- oder SMA-Endlagerbehälter oder die sie direkt umgebende Verfüllung der Lagerkammern zu verschiedenen Zeiten nach dem Verschluss des gTL trifft. Die maximalen Dosisraten liegen für alle betrachteten Varianten (z. B. unterschiedliche Fliessraten im Bohrloch, wasserlösliche und gasförmige Radionuklide) um einigen Grössenordnungen unterhalb des entsprechenden Schutzkriteriums gemäss ENSI (2023a).

Das unkontrollierte Verlassen des gTL vor dem Gesamtverschluss ist als weiteres Sicherheitsszenario im Rahmen der zukünftigen menschlichen Aktivitäten betrachtet. Obwohl während des Betriebs ein sukzessiver und fortschreitender Verschluss der untertägigen Bauten auf Lagerebene stattfindet, ist für die Analysen konservativ angenommen, dass das Verschlussystem unvollständig installiert ist. Trotz dieser konservativen Annahmen liegen die radiologischen Auswirkungen von wassergelösten und gasförmigen Radionukliden für dieses Sicherheitsszenario mehrere Grössenordnungen unterhalb des Schutzkriteriums für unbeabsichtigtes menschliches Eindringen.

4.6.6 Fazit

Mit den umfassenden Systemanalysen wird gezeigt, dass die Grundsätze für die Auslegung von gTL (Art. 11 KEV) eingehalten werden und die Sicherheitsanalyse die Vorgaben von ENSI (2023a) und ENSI (2018a) berücksichtigt.

Die Systemanalysen zeigen, dass die Langzeitsicherheit auf allen Ebenen nachgewiesen werden kann und, dass das passive Mehrfachbarriersystem die Sicherheit gewährleistet. Selbst unter pessimistischsten Annahmen belegen die Ergebnisse, dass die Sicherheit des gTL in der Nachverschlussphase gewährleistet ist. Die maximalen Dosisraten liegen mit grossen Sicherheitsmargen unter den Schutzkriterien und damit auch deutlich unter der durchschnittlichen natürlichen Strahlung in der Schweiz.

4.7 Ganzheitlicher Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase

Mit den Eigenschaften und Funktionen des Mehrfachbarriersystems und des Standorts sowie ihrer Analyse und Bewertung mittels Systemanalysen kann der Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase einer sicheren, dauernden geologischen Tiefenlagerung aller radioaktiven Abfälle am Standort im Rahmen einer Gesamtbewertung auch unter Berücksichtigung aller bestehenden Ungewissheiten erbracht werden. In diesem Kapitel sind die wichtigsten Sicherheitsargumente in eine ganzheitliche Darstellung der Langzeitsicherheit für das gTL am Standort integriert. Eine ausführliche Erläuterung findet sich in Kap. 10 von Nagra (2024v).

Das Verständnis der Wirkung, Funktionsweise und zu erwartenden Entwicklung des Mehrfachbarriersystems am Standort beruht auf einer soliden wissenschaftlich-technischen Basis. Der Standort und die exemplarische Umsetzung des gTL sind basierend auf einem langjährigen, transparenten, sicherheitsgerichteten Verfahren bestimmt. Das Mehrfachbarriersystem stellt zusammen mit der Tiefenlage des gTL in einer stabilen geologischen Situation sicher, dass das gTL unter Berücksichtigung seiner zeitlichen Entwicklung und der verbleibenden Ungewissheiten im Nachweiszeitraum die notwendigen Sicherheitsfunktionen erfüllt. Das gTL bildet am Standort ein langzeitsicheres und sehr robustes System, das aus miteinander kompatiblen und sich gegenseitig ergänzenden Barrieren besteht. Der Standort bietet grosse Flexibilität, um das gTL in den weiteren Bewilligungsschritten nach KEG zu platzieren.

Die Sicherheitsanalysen, die auf einer soliden Bewertungsgrundlage und einer geeigneten Methodik beruhen, zeigen, dass das Wirtgestein Opalinuston die primäre Barriere bildet und aufgrund seiner Eigenschaften und Funktionen die hydraulische Barrierewirkung und Radionuklidrückhaltung gewährleistet. Der Umgang mit Ungewissheiten ist in den Systemanalysen systematisch angewendet und die Vollständigkeit potenziell sicherheitsrelevanter Phänomene in den Sicherheitsanalysen ist gewährleistet. Die Analyse der radiologischen Konsequenzen zeigt, dass bei allen Sicherheitsszenarien grosse Sicherheitsmargen bis zur Erreichung der Schutzkriterien vorhanden sind. Hypothetische und unrealistische «What-if» Szenarien bestätigen die Robustheit des gTL am Standort.

Am Standort kann der *Schutz von Mensch und Umwelt* gewährleistet werden. Damit ist die Voraussetzung für die Erteilung der Rahmenbewilligung erfüllt.

4.8 Weiterentwicklung seit dem Entsorgungsnachweis

Seit dem Entsorgungsnachweis (Nagra 2002a, Nagra 2002b, Nagra 2002c) wurden vertiefte Erkenntnisse zu den Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren sowie zur geologischen Langzeitentwicklung gewonnen. Diese Erkenntnisse haben zusammen mit Weiter-

entwicklungen insgesamt zu einem robusteren Sicherheitsnachweis geführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Weiterentwicklungen zusammengefasst:

- HAA-Abfallmatrix: Der Kenntnisstand zum Abfallinventar ist weiterentwickelt und Ungewissheiten bzgl. der Prozesse der Radionuklidfreisetzung sind geringer.
- HAA-Endlagerbehälter: Die Machbarkeit der Einbringung der HAA-Endlagerbehälter wurde mit Felslaborexperimenten demonstriert. Ungewissheiten bzgl. Korrosionsraten und Gasproduktion wurden reduziert.
- Verfüllung der HAA-Lagerstollen: Die Machbarkeit der Einbringung von Bentonit als Verfüllmaterial wurde mit Felslaborexperimenten demonstriert. Umfangreiche Experimente und Modellierungen haben Ungewissheiten u. a. bei der Temperaturentwicklung, beim Gastransport und bei den Sorptionseigenschaften reduziert.
- Nahfeld der SMA-Lagerkavernen: In Bezug auf die Sorptionseigenschaften, die zeitliche Entwicklung des pH-Werts, die Zusammensetzung der Zementporenwässer sowie die chemische Beständigkeit und Dauerhaftigkeit des Nahfeldes wurde der Kenntnisstand verbessert und Ungewissheiten reduziert.
- Verschlussystem: Mit Hilfe von Experimenten wurde die technische Machbarkeit der Erstellung von verschiedenen Siegelementen auf 1:1 Massstab aufgezeigt. Das Verständnis zum Gastransport in den SMA-Versiegelungsbauwerken wurde mittels Experimenten und Modellierungen verbessert und Ungewissheiten wurden reduziert. Die Nagra hat verschiedene Untersuchungen zur Materialverträglichkeit, zum Langzeitverhalten der Abdichtungsmaterialien und zu Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten des Verschlussystems durchgeführt, um die langfristige Barrierenwirksamkeit des Verschlussystems zu gewährleisten.
- Geologische Barrieren: Die Ungewissheiten bzgl. der Eigenschaften des Opalinustons und insbesondere der Eigenschaften der Rahmengesteine sind deutlich reduziert. Dies betrifft u. a. die Datenlage bei den Rückhalteprozessen (Diffusion, Sorption).
- Geologische Langzeitentwicklung: Die Datenlage und das Prozessverständnis zur geologischen Langzeitentwicklung sind deutlich verbessert und Ungewissheiten wurden reduziert und systematisch berücksichtigt.

Seit dem Entsorgungsnachweis wurde das Verständnis von den Eigenschaften und Prozessen der technischen und geologischen Barrieren durch die im Rahmen des SGT durchgeführten erdwissenschaftlichen Untersuchungen sowie neuer Experimente in Felslabors erweitert und erhärtet. Trotz der umfangreicheren Daten sowie der weiterentwickelten Methoden und Analysen sind die Resultate des Entsorgungsnachweises und des vorliegenden Sicherheitsnachweises konsistent.

Bevor die wesentlichen Elemente des Bauprojekts im Rahmen der weiteren Bewilligungsschritte festgelegt werden, wird das Lagerprojekt unter Berücksichtigung des technologischen und wissenschaftlichen Fortschritts weiterentwickelt. Dabei werden beispielsweise Verbesserungen bei der Auslegung der Endlagerbehälter, der Dimensionen der Lagerstollen und -kavernen, aber auch der Lagerfeldplatzierung und der Linienführung der Lagerfeldzugänge sowie der Versiegelungsbauwerke auf Lagerebene angestrebt. Zudem wird geprüft, das exemplarische Lagerprojekt des RBG kompakter in Bezug auf eine haushälterische Nutzung des Untergrundes zu gestalten, so dass auch die Auswirkungen an der Erdoberfläche (z. B. Verkehr, Bedarf an Deponievolumen etc.) reduziert werden. Das weiterentwickelte Lagerprojekt wird die Grundlage für die Erhärtung des Sicherheitsnachweises bei der Baubewilligung darstellen (Art. 16 KEG).

5 Vorschläge für den vorläufigen Schutzbereich und die Eignungskriterien

5.1 Vorschlag für den vorläufigen Schutzbereich

Die Nagra hat gemäss den Vorgaben der Aufsichtsbehörde (ENSI 2018a) im Sicherheitsbericht des RBG für den gewählten Standort einen vorläufigen Schutzbereich vorzuschlagen (vgl. Fig. 2-1). Der Schutzbereich ist ein dreidimensionaler Raum im Untergrund, mit dem das gTL vor menschlichen Eingriffen geschützt wird (Art. 40 KEG). Um die Sicherheit des gTL und damit den Einschluss und die Rückhaltung der Radionuklide zu gewährleisten, müssen Vorhaben im Untergrund, durch die der Schutzbereich berührt wird, vorgängig durch den Bund bewilligt werden. Mit der Rahmenbewilligung wird der vorläufige Schutzbereich festgelegt (Art. 14 Abs. 1 Bst. f Ziff. 2 KEG). Im Untergrund stellt der vorläufige Schutzbereich bei der Rahmenbewilligung den raumplanerisch festzulegenden bzw. zu schützenden Bereich für das gTL inklusive der Zugangsbauwerke dar. Der Vorschlag für den vorläufigen Schutzbereich berücksichtigt den aktuellen Projektstand. Deshalb enthält er Platzreserven für die Platzierungen aller Elemente des gTL inklusive der Zugangsbauwerke, die im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens gemäss KEG festgelegt werden. Mit der Betriebsbewilligung wird dann der definitive Schutzbereich festgelegt (Art. 37 Abs. 2 KEG).

5.1.1 Begründung der räumlichen Ausdehnung des vorläufigen Schutzbereichs

Der Schutzbereich umfasst gemäss Art. 70 Abs. 1 KEV alle Teile des gTL, die Gesteinsbereiche, die den hydraulischen Einschluss des gTL bewirken, die Gesteinsbereiche, die einen wesentlichen Beitrag zur Rückhaltung der Radionuklide liefern, sowie die Zugänge. Deshalb werden zwei Teilräume, der «Teilraum Tiefenlager» und der «Teilraum Zugänge», betrachtet, wobei der vorläufige Schutzbereich den umhüllenden Rahmen um die beiden Teilräume bildet.

Teilraum Tiefenlager

Der Schutzbereich ist auf der Grundlage des Sicherheitsnachweises für die Nachverschlussphase festzulegen (Art. 70 Abs. 1 KEV). Diese Anforderung bezieht sich auf den «Teilraum Tiefenlager», der dem Schutz des EG und der potenziellen Lagerzone dient.

Vertikal entspricht der «Teilraum Tiefenlager» der vertikalen Ausdehnung des EG (Fig. 5-1). Der Sicherheitszuschlag für Eingriffe in den Untergrund, die sich oberhalb des «Teilraum Tiefenlager» befinden, ist in Kap. 5.1.2 beschrieben.

Lateral umfasst der «Teilraum Tiefenlager» die potenzielle Lagerzone und zusätzliche Bereiche, die als Sicherheitszuschläge die potenzielle Lagerzone umgeben, um sie vor den Auswirkungen von Eingriffen in den Untergrund zu schützen. Im Norden und Süden entsprechen diese Bereiche dem 200 m breiten Abstand der potenziellen Lagerzone zu den Zonen regionaler tektonischer Elemente aus Nagra (2024f). In Kap. 4.6.3 des vorliegenden Berichts und Kap. 4.2 in Nagra (2024ad) ist gezeigt, dass bei entsprechenden lateralen Transportdistanzen im Opalinuston die Freisetzung von Radionukliden über Störungen, die 200 m entfernt sind, selbst bei unrealistisch hohen Transportbedingungen vernachlässigbar ist. Zusätzlich wurde bei der Abgrenzung der Zonen regionaler tektonischer Elemente ein Saum von 50 m um die kartierten Störungen in der 3D-Seismik gelegt, der die Ungewissheiten bei der Lage der kartierten Störungen abdeckt. Da es

im Westen⁴² und Osten⁴³ im Gegensatz zum Norden und Süden keine Zonen regionaler tektonischer Elemente als Begrenzung gibt, wird für die östlichen und westlichen Ränder des «Teilraums Tiefenlager» ein 50 m breiter Bereich als Sicherheitszuschlag um die potenzielle Lagerzone gelegt. Dieser 50 m Abstand ist ausreichend, um die Langzeitsicherheit des gTL zu gewährleisten. Er wurde bereits für die Sondiergesuche der Tiefbohrungen verwendet sowie in Kap. 4.3 von Nagra (2024d) auch für andere Bohrlocheigenschaften bzw. -nutzungen bestätigt.

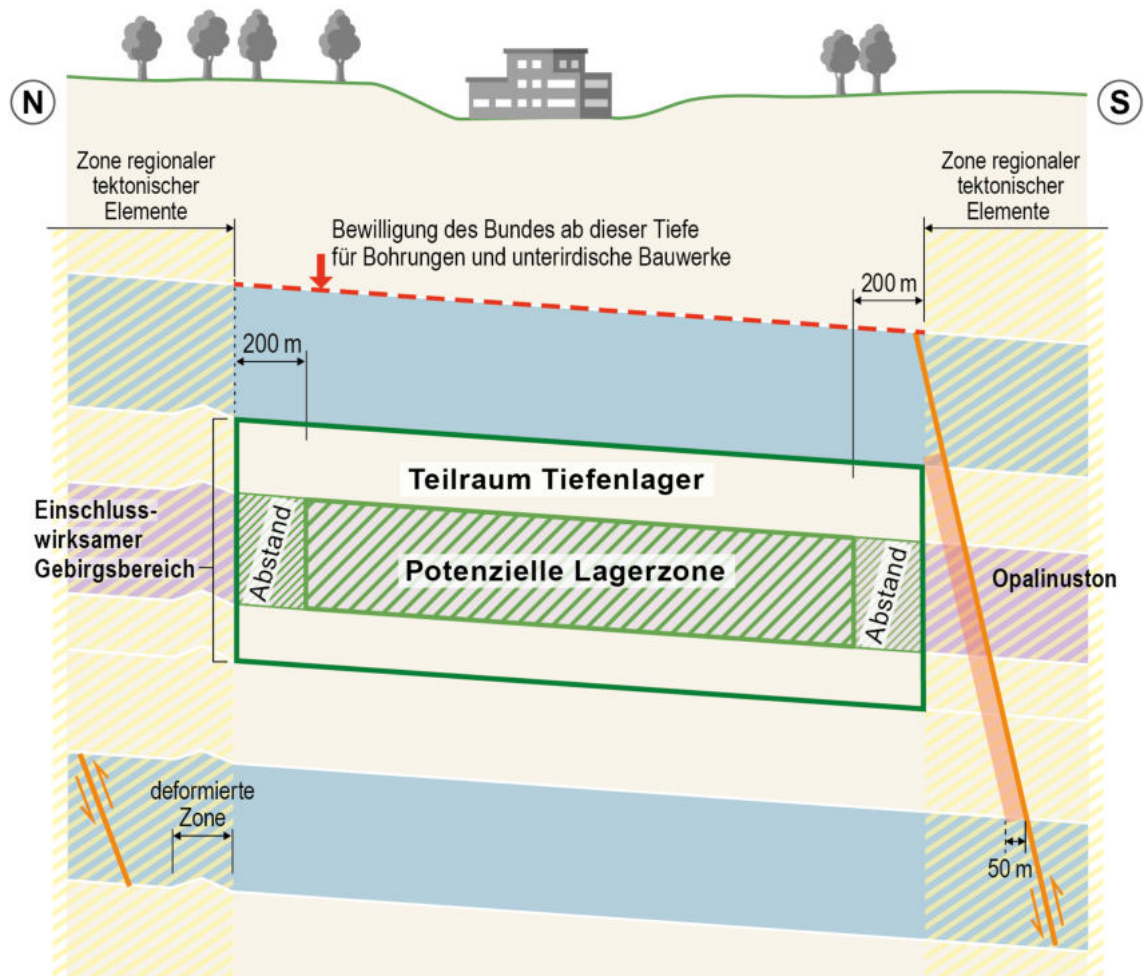


Fig. 5-1: «Teilraum Tiefenlager» (dunkelgrün umrahmter Bereich) im schematischen Querschnitt

Der Vorschlag für den «Teilraum Tiefenlager» umfasst die nach Art. 70 Abs. 1 KEV geforderten Gesteinsbereiche, die den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt gewährleisten (vgl. Kap. 4). Mit den Abstandsbereichen, die die potenzielle Lagerzone umgeben, wird der langfristige Erhalt der Sicherheitsfunktionen der geologischen Barrieren sichergestellt.

⁴² Die Westgrenze der potenziellen Lagerzone entspricht dem westlichen Rand des 3D-Seismikperimeters im Standortgebiet NL (Nagra 2016).

⁴³ Die Ostgrenze der potenziellen Lagerzone entspricht der in Etappe 1 SGT geologisch begründeten Grenze des Standortgebiets NL (Nagra 2008c).

Im «Teilraum Tiefenlager» bestehen gegenwärtig keine Nutzungen oder Eingriffe im Untergrund. Zu den bestehenden Tiefbohrungen der Nagra werden, wie oben beschrieben, mindestens 50 m Abstand gehalten.

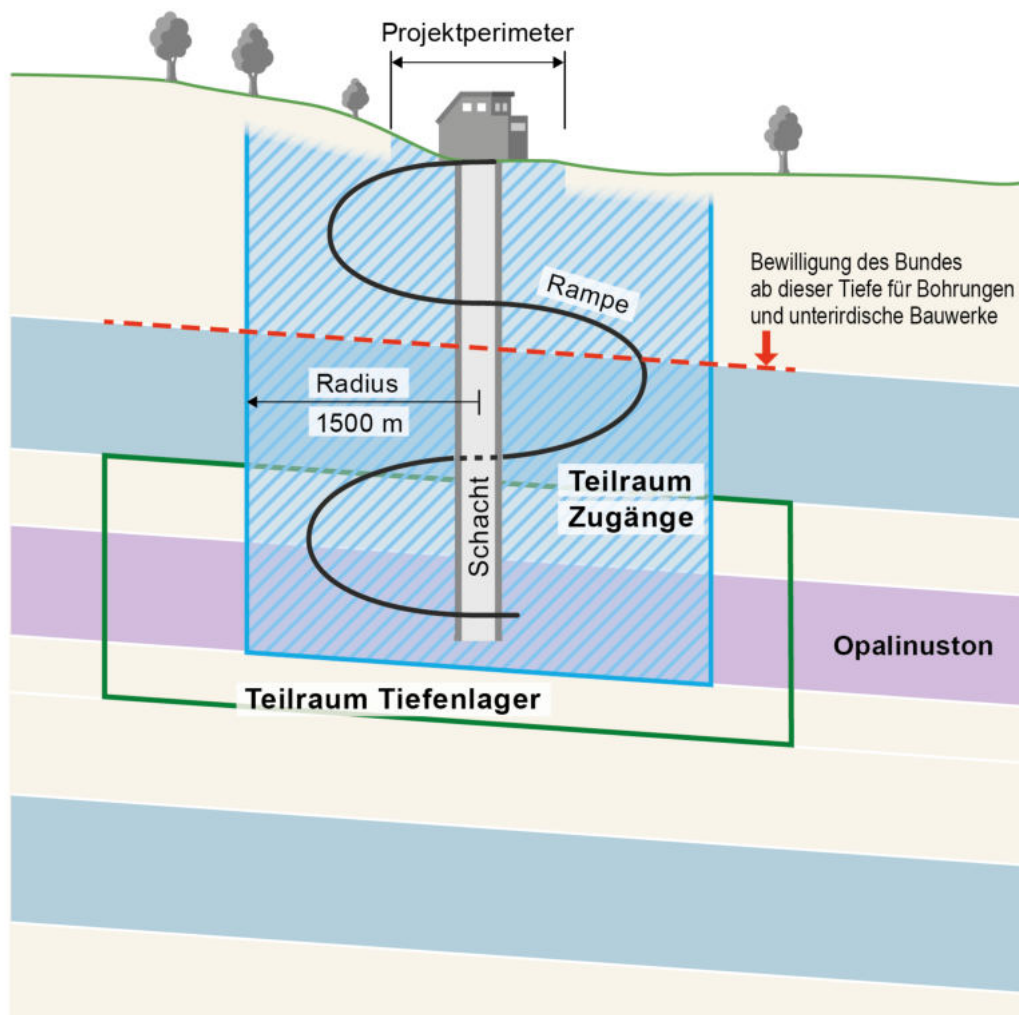


Fig. 5-2: «Teilraum Zugänge» (blau schraffierter Bereich) im schematischen Querschnitt

Teilraum Zugänge

Der «Teilraum Zugänge» (Fig. 5-2) dient dem Schutz des Gesteinskörpers, in dem die Zugangsbauwerke erstellt werden. Wo er nicht mit dem «Teilraum Tiefenlager» überlappt, ist der «Teilraum Zugänge» für die Langzeitsicherheit und damit für den Einschluss und die Rückhaltung der Radionuklide nicht relevant.

Lateral geht dieser Teilraum vom Planungsperimeter des Haupteinschlussbereichs im Untergrund aus (Nagra 2019). Der Haupteinschlussbereich ist ein abdeckender Planungsperimeter mit einem Radius von 500 m für untertägige Bauwerke und Verbindungen, an welche die Zugangsbauwerke nach untertag und die Lagerfeldzugänge anschliessen. Zur optimalen Erschliessung wird für die laterale Ausdehnung des «Teilraums Zugänge» ein vergrösserter Bereich mit einem Radius von 1'500 m verwendet. Dadurch bestehen Platzreserven, um verschiedene Varianten und Arten von Zugangsbauwerken (Schächte oder falls notwendig mit Rampe) im Rahmen der weiteren Bewilligungsschritte nach KEG realisieren zu können.

In vertikaler Richtung erstreckt sich der «Teilraum Zugänge» von der Basis des Opalinustons bis in eine Tiefe von 50 m unter der Geländeoberfläche. Im Bereich des Projektperimeters ist der «Teilraum Zugänge» weiter ausgedehnt und reicht direkt bis an die Geländeoberfläche. Damit ist der Schutz der Gesteinsbereiche für die zukünftigen Zugangsbauwerke gewährleistet, da die Zugangsbauwerke im Anlagenperimeter zu liegen kommen.

Der Grossteil des «Teilraums Zugänge» befindet sich ausserhalb der Bauzone oder in einem Bereich, in dem gemäss des Wärmenutzungsatlas des Kantons Zürich (AWEL Kanton ZH 2015) keine Erdwärmesonden zulässig sind. Die aktuell vorhandenen Erdwärmesonden beschränken sich auf die Ortschaften Zweidlen, Raat und Windlach. Sie stellen keine Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit des gTL dar. Obwohl sie im «Teilraum Zugänge» liegen, dringt keine vorhandene Erdwärmesonde in den «Teilraum Tiefenlager» ein. Weitere bestehende Nutzungen oder Eingriffe im Untergrund des «Teilraums Zugänge», die für die Erstellung der Zugangsbauwerke relevant wären, liegen nicht vor.

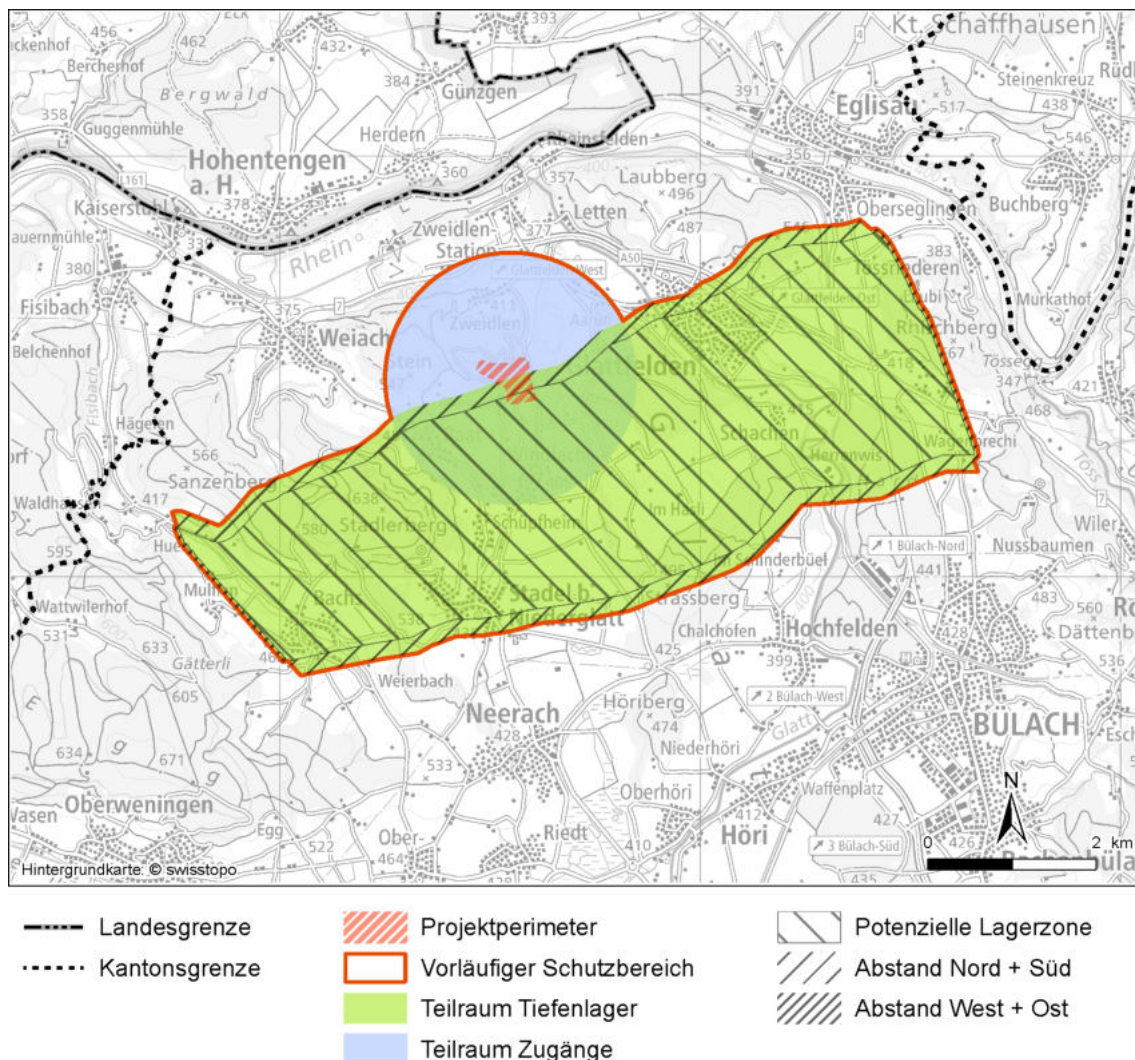


Fig. 5-3: Kartendarstellung des vorläufigen Schutzbereichs mit den beiden Teilräumen und Abstandsbereichen

Grösse des vorläufigen Schutzbereichs

Gemäss den Vorgaben aus ENSI (2018a) sind Platzreserven, die über den mindestens erforderlichen Platzbedarf hinausgehen, für die Optimierung der Lagerteilplatzierungen ein Vorteil. Deshalb wird unabhängig von der effektiven, zukünftigen Ausdehnung des gTL der gesamte Bereich, der in Nagra (2024f) als potenzielle Lagerzone ausgewiesen ist, in den vorläufigen Schutzbereich integriert. Dadurch besteht für die Platzierung der Lagerteile ein möglichst grosser Bereich, der erheblich grösser ist als der für das gTL erforderliche Platzbedarf⁴⁴. Dies ist auch dann noch gewährleistet, wenn ein grösseres Abfallvolumen eingelagert werden müsste oder das gTL unterschiedlich ausgelegt würde. Fig. 5-3 zeigt die räumliche Ausdehnung der beiden Teilräume und den daraus resultierenden Vorschlag der Nagra für den vorläufigen Schutzbereich, der den umhüllenden Rahmen um die beiden Teilräume bildet und eine Grösse von ca. 29 km² aufweist.

5.1.2 Bewilligungen für Vorhaben im Untergrund im Bereich des vorläufigen Schutzbereiches

Für Vorhaben im Untergrund, wie Tiefbohrungen, Tunnel, Kiesgruben oder Steinbrüche, ist im Kanton Zürich eine Bewilligung erforderlich. Mit der Rahmenbewilligung benötigen Vorhaben im Untergrund, die den vorläufigen Schutzbereich berühren würden, zusätzlich eine Bewilligung des Bundes (Art. 40 Abs. 2 KEG). Das bedeutet, dass zuerst abgeklärt werden muss, ob das Vorhaben die langfristige Sicherheit des gTL beeinträchtigen könnte (Art. 70 Abs. 4 KEV) und ob es ganz, teilweise, mit Auflagen oder gar nicht bewilligt wird. Im Folgenden werden die Vorschläge der Nagra für die Bewilligungen des Bundes für verschiedene Nutzungen des Untergrundes innerhalb des vorläufigen Schutzbereiches erläutert.

Für die Langzeitsicherheit des gTL ist nur der Schutz des «Teilraums Tiefenlager» zu gewährleisten. Deshalb wird für Bohrungen und unterirdische Bauwerke die obere Schichtgrenze der Gesteinsschichten des Malms als Tiefe vorgeschlagen, ab der eine Bewilligung des Bundes erforderlich sein muss (vgl. Fig. 5-1 und Fig. 5-2). Diese entspricht im Bereich des vorläufigen Schutzbereiches der bereits existierenden kantonalen Tiefenbeschränkung für Erdwärmesonden zum Schutz der Felsaquifere (AWEL Kanton ZH 2015), weshalb die Nutzung des Untergrundes für Erdwärmesonden durch den vorläufigen Schutzbereich nicht zusätzlich eingeschränkt wird. Wie bei den existierenden Erdwärmesonden, werden auch zukünftige Erdwärmesonden keine Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit des gTL darstellen, wenn sie erst ab der vorgeschlagenen Tiefe unter die Bewilligungspflicht des Bundes fallen. Des Weiteren werden durch diesen Vorschlag auch normale Strassen- und Eisenbahntunnel nicht zusätzlich eingeschränkt, da diese im Schweizer Mittelland nicht in solchen Tiefen gebaut werden. Die obere Schichtgrenze des Malms liegt mehr als 200 m über dem EG und stellt einen Sicherheitszuschlag aufgrund des grossen vertikalen Abstands zum «Teilraum Tiefenlager» dar. So ist sichergestellt, dass Bohrungen oder unterirdische Bauwerke die Sicherheitsfunktionen des EG nicht beeinträchtigen.

Da die Vorschläge für die Bewilligungen des Bundes für den gesamten vorläufigen Schutzbereich gelten sollen, betreffen sie auch den «Teilraum Zugänge». Für Schächte als Zugangsbauwerke ergeben sich bzgl. Erdwärmesonden keine Konflikte, da die Schächte vertikal vom Anlagenperimeter ausgehend gebaut werden. Falls eine Rampe als Zugangsbauwerk verwendet wird, ist es unwahrscheinlich, dass die Erstellung einer Rampe bis zur Schichtobergrenze des Malms durch Erdwärmesonden beeinträchtigt wird. Für den Fall, dass eine Rampe realisiert wird und Erdwärmesonden wider Erwarten doch im Konflikt mit dem Linienverlauf stehen, kann die Linienführung der Rampe angepasst oder für Ersatz der Erdwärmesonden gesorgt werden.

⁴⁴ Die potenzielle Lagerzone weist eine Fläche von ca. 22 km² auf. Die exemplarische Umsetzung (vgl. Fig. 2-7) benötigt für die gesamte UTA eine Fläche von ca. 2 km².

Die Bewilligungspflicht ab der oberen Schichtgrenze des Malms muss für alle Bohrungstypen (z. B. vertikal, abgelenkt, schräg), alle Nutzungsarten einer Bohrung (z. B. Exploration, Förderung, Injektion) und auch für Bohrungen gelten, die ausserhalb des vorläufigen Schutzbereiches starten und dann schräg oder abgelenkt im Bereich des vorläufigen Schutzbereiches verlaufen. Das gleiche muss für alle Arten (z. B. Stollen, Schächte) und alle Nutzungsarten von unterirdischen Bauwerken gelten.

Für den Abbau von Festgestein (mineralische Rohstoffe sowie Energierohstoffe) wird generell die Bewilligungspflicht ab der Felsoberfläche vorgeschlagen. Damit soll ein langfristiger Schutz vor Erosion gewährleistet bleiben.

Für den Abbau von Lockergestein ist keine Bewilligung durch den Bund nötig, da von den oberflächennahen Lockergesteinsablagerungen des Quartärs keine sicherheitstechnische Beeinflussung des vorläufigen Schutzbereichs ausgeht.

Mit den vorgeschlagenen Tiefen für die Bewilligung durch den Bund bleiben das Bauen und die Nutzung von oberflächennahen untertägigen Ressourcen über dem vorläufigen Schutzbereich grundsätzlich möglich. Die Auswirkungen von allfälligen heute noch unbekannten, zukünftigen Nutzungsarten im Untergrund können nicht antizipiert werden. Deshalb sollten neuartige Eingriffe in den Untergrund nur bewilligt werden, wenn nachgewiesen werden kann, dass der vorläufige Schutzbereich durch das Vorhaben sicherheitstechnisch nicht beeinträchtigt wird.

5.2 Vorschlag für die Eignungskriterien

Mit der Rahmenbewilligung werden Kriterien festgelegt, bei deren Nichterfüllung ein vorgesehener Lagerbereich wegen fehlender Eignung ausgeschlossen wird (Art. 14 Abs. 1 Bst. f Ziff. 1 KEG). Dabei handelt es sich um die sog. Eignungskriterien. Die Eignungskriterien beziehen sich gemäss Art. 63 KEV auf die Ausdehnung geeigneter Wirtgesteinsbereiche, die hydrogeologischen Verhältnisse am Standort und die Verweilzeit des Tiefengrundwassers. Die Nagra hat gemäss den Vorgaben der Aufsichtsbehörde (ENSI 2018a) im Sicherheitsbericht des RBG für den gewählten Standort Anforderungen sowie Methoden zur Überprüfung der Eignungskriterien vorzuschlagen.

Die Notwendigkeit der Überprüfung von Eignungskriterien nach Erteilung der Rahmenbewilligung wurde in der Kernenergiegesetzgebung verankert, bevor der SGT ausgearbeitet und gestartet wurde. Die Standortwahl für das gTL wurde gemäss den im SGT definierten sicherheitstechnischen Kriterien (BFE 2008) und den Vorgaben aus ENSI (2018a) durchgeführt. Diese Kriterien und Anforderungen führten dazu, dass die Eignung des Standorts und damit auch die Eignungskriterien beim RBG umfassend betrachtet sind. Daher beruhen die Vorschläge für die Anforderungen und für die Methoden zur Überprüfung der Eignungskriterien auf einem breiten, soliden Kenntnisstand. Die hier vorgeschlagenen Anforderungen stellen Minimalanforderungen hinsichtlich der massgebenden sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins dar, die sich aus dem Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase (vgl. Kap. 4) ableiten. Die genaue Vorgehensweise bei der Überprüfung der Eignungskriterien wird im Zuge der weiteren Bewilligungsschritte festgelegt.

5.2.1 Ausdehnung geeigneter Wirtgesteinsbereiche

Die geologische Situation ist im Standortgebiet NL von der Oberfläche einfach zu erkunden, so dass eine robuste Datengrundlage aus Tiefbohrungen und 3D-Seismik vorliegt. Bei der Erkundung wurde die gesamte potenzielle Lagerzone grossflächig abgedeckt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Opalinuston und seine Rahmengesteine in der potenziellen Lagerzone ruhig gelagert sind und einfache geometrische Verhältnisse sowie eine kontinuierliche Ausdehnung aufweisen (vgl. Kap. 4.3.2 und 4.5.2). Die räumlichen Verhältnisse im Bereich der

potenziellen Lagerzone sind deshalb sehr gut bekannt und es werden keine anordnungs- oder einlagerungsbestimmenden Störungen erwartet. Des Weiteren legen die Ausführungen zur geologischen Langzeitentwicklung (vgl. Kap. 4.5.3) dar, dass die Barrierewirkung des EG und damit die «Ausdehnung geeigneter Wirtgesteinsbereiche» durch Erosion nicht beeinträchtigt wird.

Die Datenbasis bzw. das geologische Modell wird nach dem RBG durch neue Daten ergänzt, die sich z. B. aus den Baugrunduntersuchungen für die Zugangsbauwerke und aus den baubegleitenden geologischen Aufnahmen während des Baus der UTA ergeben. Um die passive Langzeitsicherheit und die Barriereigenschaften des EG zu gewährleisten, können im Lagerbereich keine invasiven Untersuchungen (z. B. lange Bohrungen) durchgeführt werden. Daher muss die «Ausdehnung geeigneter Wirtgesteinsbereiche» schon vor dem Bau der Lagerbereiche ausreichend bekannt sein.

Für das Eignungskriterium «Ausdehnung geeigneter Wirtgesteinsbereiche» schlägt die Nagra zwei Anforderungen vor, bei deren Erfüllung ein vorgesehener Lagerbereich als langfristig sicher und geeignet eingestuft werden kann:

- Die Ergebnisse in Fig. 8-4 von Nagra (2024v) zeigen, dass das Schutzkriterium verlässlich eingehalten wird, wenn eine minimale Transportpfadlänge im Opalinuston von 20 m gegeben ist. Diese Resultate bestätigen die Erkenntnisse aus Etappe 1 des SGT (z. B. Nagra 2008b) hinsichtlich der relativ kurzen Transportpfadlänge im Opalinuston zur Einhaltung des Schutzkriteriums, weil die Radionuklide mit wenigen Ausnahmen innerhalb weniger Dekameter im Opalinuston praktisch vollständig zerfallen. Deshalb müssen ober- und unterhalb des Einlagerungsbereichs mindestens 20 m EG vorhanden sein. Bei dem HAA-Lagerteil entsprechen die 20 m EG immer dem Opalinuston, da die HAA-Lagerstollen leicht geneigt, d. h. ungefähr schichtparallel, geplant sind. Der Vorschlag deckt sich mit den Anforderungen an den Mindestabstand der Lagerebene zu den Rändern des Wirtgesteins aus Etappe 1 des SGT (Nagra 2008b). Da die SMA-Lagerkavernen gemäss dem aktuellen Lagerkonzept horizontal geplant sind und die oberen und unteren Rahmengesteine auch einen Beitrag zur Rückhaltung der Radionuklide und damit zur Einhaltung des Schutzkriteriums leisten, bezieht sich die Anforderung von 20 m bei einem SMA-Lagerbereich auf den EG.
- Die Ergebnisse der Systemanalysen in Kap. 4.6 des vorliegenden Berichts und in Kap. 8 von Nagra (2024v) zeigen, dass die Langzeitsicherheit sowohl für den erwarteten Ausgangszustand und die erwartete Entwicklung als auch für unwahrscheinliche oder sogar hypothetische Szenarien sichergestellt ist, wenn die Lagerbereiche in einem geologischen Umfeld liegen, welches den Bedingungen der potenziellen Lagerzone entspricht. Deshalb müssen die Lagerbereiche innerhalb der potenziellen Lagerzone angelegt werden.

Als Methode zur Überprüfung des Eignungskriteriums schlägt die Nagra vor, den Bau der Lagerbereiche mittels Vermessungen kontinuierlich zu steuern und deren Lage mit dem geologischen Modell abzugleichen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Lage des Lagerbereichs den oben formulierten Anforderungen entspricht und der Lagerbereich stets von genügend Gestein des EG umgeben ist, um das Schutzkriterium einzuhalten.

5.2.2 Hydrogeologische Verhältnisse am Standort und Verweilzeit des Tiefengrundwassers

Die hydrogeologischen Eigenschaften des Opalinustons sind sehr gut untersucht (Kap. 5.6 in Nagra 2024p). Die hydrogeologischen Bedingungen im ungestörten und gestörten Opalinuston werden durch seine äusserst geringe hydraulische Durchlässigkeit bestimmt (vgl. Kap. 4.4.2). Aufgrund der hydrogeologischen Eigenschaften wird beim Opalinuston und seinen Rahmengesteinen das Wasser im Porenraum nicht als Grundwasser, sondern als Porenwasser bezeichnet,

da diese Gesteine so dicht sind, dass das in Poren vorkommende Wasser nicht frei fließen kann. Gelöste Stoffe bewegen sich deshalb nur sehr langsam durch Diffusion im Porenwasser. Die Eignungskriterien «hydrogeologische Verhältnisse am Standort» und «Verweilzeit des Tiefengrundwassers» werden daher im Folgenden zusammen betrachtet.

Die Ergebnisse der Standortuntersuchungen zeigen für den Standort sehr günstige hydrogeologische Verhältnisse (vgl. Kap. 4.4). Die Bewertung der hydrogeologischen Situation betrachtet das gesamte hydrogeologische System am Standort. Sie ergibt sich nicht aus einem einzelnen Wert, sondern aus umfassenden Analysen, die z. B. auf Daten zur hydraulischen Durchlässigkeit, zur Porenwasserchemie und zu natürlichen Tracern sowie auf Modellierungen beruhen. Da eine hohe Zuverlässigkeit bezüglich der Übertragbarkeit der monotonen, räumlich konstanten hydrogeologischen Eigenschaften besteht, sind die hydrogeologischen Verhältnisse innerhalb der potenziellen Lagerzone sehr gut bekannt. Des Weiteren zeigen die Betrachtung zur Langzeitentwicklung der Hydrogeologie und Hydrochemie (vgl. Kap. 4.5.3), dass die Langzeitstabilität der günstigen hydrogeologischen Verhältnisse am Standort gewährleistet ist.

Für die zusammen betrachteten Eignungskriterien «hydrogeologische Verhältnisse am Standort» und «Verweilzeit des Tiefengrundwassers» schlägt die Nagra zwei Anforderungen vor, bei deren Erfüllung ein Lagerbereich als langfristig sicher und hydrogeologisch geeignet eingestuft werden kann, ohne weitere Parameter zu untersuchen:

- Der Tonmineralgehalt ist der Schlüsselparameter für die hydraulische Barrierewirkung und das hohe Radionuklidrückhaltevermögen des Opalinustons (Nagra 2024v). Er beeinflusst die hydraulische Durchlässigkeit, das Diffusions- und Sorptionsvermögen und das Selbstabdichtungsverhalten. Fig. 5-42 in Nagra (2024p) zeigt, dass bei Tonmineralgehalten von mindestens 20 % eine sehr niedrige hydraulische Durchlässigkeit gewährleistet und damit die verlangte Barrierewirkung sichergestellt ist. Als Anforderung wird dieser Wert um 5 % erhöht, um im Einklang mit der quantitativen Mindestanforderung aus Etappe 1 des SGT (Nagra 2008a) zu stehen. Deshalb muss der mittlere Tonmineralgehalt des Opalinustons im Lagerbereich mindestens 25 % betragen. Dieser Wert ist eine zweckmässige Minimalanforderung, da Untersuchungen mittels Bohrlöchern (z. B. hydraulische Tests) vermieden werden müssen. Kleine sandige oder kalkige Linsen gehören zum normalen Erscheinungsbild des Opalinustons, weshalb als Minimalanforderung ein mittlerer Tongehalt für einen Lagerbereich vorgeschlagen wird.
- Die Porenwassersignatur stellt eine anerkannte unabhängige Evidenz der Langzeitisolation bzw. der hydraulischen Barrierewirkung des Opalinustons dar (Nagra 2008b, Kap. 9.1.1 in Nagra 2024v). Daher muss die Porenwassersignatur des Opalinustons insgesamt anzeigen, dass für einen vorgesehenen Lagerbereich die Barrierewirkung gewährleistet ist.

Beide Anforderungen lassen sich mittels Probenahmen während des Baus der UTA und anschliessenden Laboranalysen der Proben überprüfen, weshalb sie den Vorschlag für die Methode zur Überprüfung der beiden zusammengefassten Eignungskriterien darstellen. Für die Probenahme und Probenanalyse können Verfahren, welche sich im Rahmen des SGT bewährt haben, eingesetzt werden. Für die Überprüfung der Porenwassersignatur des Opalinustons wird ein schrittweises Vorgehen vorgeschlagen, bei dem zunächst nur eine oder wenige, aber aussagekräftige Komponenten der Porenwassersignatur betrachtet werden und bei Auffälligkeiten dann die Porenwassersignatur des Opalinustons insgesamt betrachtet wird.

Für die Überprüfung der Eignungskriterien ist eine belastbare, qualitätsgesicherte und repräsentative Datengrundlage eine Grundvoraussetzung. Weitere Abklärungen von zusätzlichen Parametern im Rahmen einer Multikriterienanalyse können für die Eignungsüberprüfung herangezogen werden, wenn bei einer oder beiden der oben formulierten Anforderungen Abweichungen festgestellt werden.

6 Wichtigste personelle und organisatorische Angaben

In diesem Kapitel werden gemäss Art. 23 Bst. a Ziff. 4 KEV die wichtigen personellen und organisatorischen Angaben zum Projekt dokumentiert. Diese Angaben beinhalten im Hinblick auf die späteren Bewilligungsschritte und in Anlehnung an Anhang 4 der KEV ein Grobkonzept zur Entwicklung der zukünftigen Betriebsorganisation mit einem geeigneten Personalstamm sowie Aspekte der Aus- und Weiterbildung. Wichtig ist der Nagra insb. die Absichtserklärung zur expliziten Berücksichtigung menschlicher und organisatorischer Faktoren. In den folgenden Kapiteln werden die beabsichtigten prinzipiellen Merkmale hinsichtlich einer systematischen Personal- und Organisationsentwicklung unter Einbezug der menschlichen und organisatorischen Faktoren (HOF) exemplarisch skizziert.

6.1 Grundsätze der Organisation

Für die Projektabwicklung wird eine Organisation aufgebaut, die es erlaubt, die Projekt- und Bewilligungsabläufe so auszuführen, dass für die künftige Anlage und ihren Betrieb relevante Anforderungen nachweislich adressiert und erfüllt werden bzw. eine ganzheitliche Bewertung ermöglicht wird. Der sukzessive Aufbau der Projektorganisation ist dabei flexibel und wird sich entsprechend den jeweiligen Projektphasen mit ihren unterschiedlichen Schwerpunkten anpassen, so dass hieraus letztlich eine geeignete Betriebsorganisation hervorgeht.

Dafür ist vorgesehen, eine angemessene personelle Begleitung der Projektphasen schrittweise mit den notwendigen Fach- und Methodenkompetenzen sowie die erforderlichen Ressourcen sicherzustellen, so dass zum Zeitpunkt der Erteilung der Betriebsbewilligung eine adäquate Organisation mit dem vollständigen Personalbestand bei erforderlicher Fach- und Sachkunde zur Inbetriebnahme der Anlage etabliert ist. Dies schliesst im Vorfeld wie auch beim Betrieb externe Auftragnehmer bzw. Lieferanten mit ein, die ebenfalls entsprechend ihrer Aufgaben eine geeignete, qualitätsgesicherte Organisation mit adäquaten Kompetenzen und Ressourcen bereitzustellen haben. Interne Fachkräfte folgen dabei dem bereits bewährten, zertifizierten Managementsystem (der Nagra), bis die gTL-Bau- und Betriebsorganisation ihr eigenes Managementsystem implementiert hat. Der sukzessive Aufbau und die Ausgestaltung der zum jeweiligen Projektstand angemessenen Organisation wird auf der Grundlage des schweizerischen Regelwerks unter Berücksichtigung der Erfahrungen in den bestehenden Anlagen – insb. dem Zwilag – erfolgen.

Die Umsetzung der Prinzipien einer zeitgemässen Sicherheitskultur innerhalb des gesamten Organisationsgefüges einschliesslich der Führung ist der Nagra von Beginn an ein zentrales Anliegen. So soll die Sicherheitskultur als Summe aller Merkmale und Ausrichtungen einer Organisation und deren Individuen sicherstellen, dass sicherheitsrelevante Themen die entsprechende Aufmerksamkeit und Priorität bereits in der Projektierungsphase erhalten. Dazu zählen u. a. Prinzipien wie eine hinterfragende Haltung, die explizite Berücksichtigung der Schnittstelle Mensch, Maschine und Organisation, eine professionelle Umgangskultur im Team, aber auch der offene und schuldzuweisungsfreie Umgang mit menschlichen, organisationalen und technischen Fehlern. Die Prinzipien sind aufgrund des Erfahrungsrückflusses und des Projektfortschrittes während Bau und Betrieb zu vervollständigen.

6.2 Entwicklung der Organisation

Die Organisationseinheiten für Projektierung, Bau, Betrieb und Verschluss sowie deren Aufgaben und Kompetenzen werden sukzessive gebildet und einen abgestimmten Übergang aufweisen. Der Zeitraum zwischen Rahmen- und Baubewilligung bietet ausreichend Zeit für die Zusammen-

stellung und den Aufbau einer adäquaten jeweils zeitgemässen Organisation im Zuge der Projektierungsphase unter Berücksichtigung von Massnahmen zum Wissenserhalt und -transfer.

Auf Stufe RBG ist eine exakte und vollständige Festlegung der zukünftigen Betriebsorganisation weder sinnvoll noch nötig. Im RBG werden jedoch allgemeine Angaben bezüglich der Vorgehensweise zur Entwicklung der Organisation skizziert.

6.2.1 Projektierung

Eine Projektorganisation mit geeigneten Kernkompetenzen wird aufgebaut⁴⁵, welche der Projektentwicklung und der Abstimmung mit weiteren Stakeholdern vor Ort (und deren Anforderungen) dient. Sie besteht u. a. aus Fachgebieten zum nukleartechnischen Engineering und zur Projektierung von Oberflächen- und Untertaganlagen. Dabei stehen Aspekte der Sicherheit, Sicherung, Anlagenbaus, Daten- und Anforderungsmanagements, Umweltverträglichkeit bzw. Umweltüberwachung und Raumplanung im Vordergrund. Die Anforderungen aus ENSI G07 (ENSI 2023b) werden zugrunde gelegt.

Die während der Vorstudie aufgebaute Projektorganisation wird zu einem vollständigen Projektunternehmen erweitert, in dem alle relevanten Disziplinen vertreten sind. Diese Organisation ist für die Ausarbeitung der detaillierten Analysen, Nachweise und den folgenden Gesuchsunterlagen verantwortlich, die für das Einreichen des Baubewilligungsgesuch erforderlich sein werden.

Damit die benötigten Kernkompetenzen innerhalb der Organisation vorhanden sind, wird der Personalbestand gemäss dem spezifischen Bedarf angepasst. Verbunden damit ist auch die rechtzeitige Vorbereitung geeigneter Aus- und Weiterbildungsmassnahmen (über alle Phasen). Die Unterstützung des Projekts durch externe, anerkannte Fachexperten sowie der Einbezug der Branchenerfahrung und -expertise wird dabei fortgeführt. Zu gegebener Zeit wird ein projekt-spezifisches Qualitätsmanagementprogramm gemäss Art. 25 KEV entwickelt.

6.2.2 Bau

Die in der Projektierungsphase aufgebaute Organisation wird gemäss derzeitiger Planung weitgehend beibehalten und um die organisatorischen Einheiten ergänzt, die für die Bauphase benötigt werden. Diese erweiterte Projektorganisation wird bau- und montagerelevante Disziplinen abdecken. Darin eingeschlossen sind insb. die Überwachung der Bautätigkeit sowie von Herstellung und Montage der Systeme und Komponenten auf Grundlage der Auslegungsspezifikationen und einzuhaltender gesetzlicher und behördlicher Vorschriften. Entsprechend den Bedürfnissen der Bauphase wird der Personalbestand weiter angepasst und aufgestockt. Zusätzlich wird externe Unterstützung durch anerkannte Fachexperten beigezogen. Es soll sichergestellt werden, dass die Gesamtorganisation den Herausforderungen und Risiken (auf der Baustelle) gewachsen ist und allfällige Ereignisse und Nonkonformitäten erkennen, analysieren, bewerten und korrigieren kann. Eine tragende Rolle spielt in dieser Phase auch das Qualitätsmanagement (nach Art. 25 KEV), dem dabei die besondere Bedeutung zukommt, in Kooperation mit dem technischen Personal mittels Vorort-Prüfungen, aber auch Audits und Reviews, für die sorgfältige Umsetzung aller spezifizierter Arbeiten besorgt zu sein. Insbesondere ist das Management der vielfältigen Schnittstellen zwischen den verschiedenen Stakeholdern (Hersteller/Lieferanten, Projekt-/Bauorganisation, Behörden) sicherzustellen.

⁴⁵ Bzw. ausgehend vom Kernteam aus der Projektphase Rahmenbewilligung (vgl. Kap. 1.3) aufgebaut und erweitert.

Neben dem eigentlichen Bau und der Montage der Anlage werden organisatorische Massnahmen auch hinsichtlich der Inbetriebnahme bzw. des späteren Betriebs vorangetrieben, indem der Aufbau der Betriebsorganisation und die Rekrutierung sowie Ausbildung des dafür notwendigen Personals in Angriff genommen werden soll, so dass rechtzeitig eine entsprechend geschulte und mit der Anlage vertraute Betriebsorganisation bereitsteht. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit ein gezielter Wissenstransfer im zeitlichen Vorfeld durch die bereits bestehenden Kernanlagen (beispielsweise ZwiLag / PSI) zur Vorbereitung und Ausbildung des Personals für den gTL-Betrieb sowie zur Gewährleistung der Kontinuität in der Sicherheitskultur dienen können.

Des Weiteren wird die Projektarbeit auch hinsichtlich der Inbetriebnahme bzw. des späteren Betriebs vorangetrieben. Dazu soll während der Bauphase der Aufbau der Betriebsorganisation und die Rekrutierung sowie Ausbildung des dafür notwendigen Personals in Angriff genommen werden, mit dem Ziel, dass die Betriebsorganisation bereits vor der Inbetriebnahme hinsichtlich Anlagentechnik und der wichtigen Prozesse entsprechend geschult ist, um rechtzeitig eine operationelle Bereitschaft zu erreichen.

6.2.3 Betrieb

Die Betriebsorganisation entspricht den für ein gTL relevanten Anforderungen aus Art. 30 KEV, wobei die behördlichen Anforderungen aus ENSI G07 (ENSI 2023b) berücksichtigt und umgesetzt werden. Da die Bauorganisation bereits wichtige Fachbereiche, die auch für die Betriebsorganisation essenziell sind, enthält, wird die Betriebsorganisation auf der Bauorganisation aufbauen bzw. aus dieser hervorgehen. Ausgebaut werden muss die Organisation und das Personal um betriebspezifische Elemente wie bspw. Qualitäts- und Betriebsvorgaben, Instandhaltung sowie Strahlenschutz und -überwachung⁴⁶.

Da sich die Betriebsorganisation bereits während der Bauphase konstituiert, kann sich das Betriebspersonal frühzeitig mit der Auslegung und Technik der Systeme und Komponenten vertraut machen und wird vor Inbetriebnahme für die künftigen Tätigkeiten ausgebildet.

6.2.4 Rückbau und Verschluss

Die für den Rückbau und den Verschluss erforderliche Organisation wird rechtzeitig vorbereitet und eingerichtet, so dass das mit der Anlage und der Anlagenhistorie vertraute und kompetente Betriebspersonal bei den diversen Rückbau- bzw. Verschlussarbeiten eine bedeutende Rolle einnehmen wird.

⁴⁶ Die Anforderungen an die Organisation hängen dabei stark von der Auslegung, dem Grad der Automation sowie dem Einsatz von künstlicher Intelligenz ab sowie der Entwicklung der Technik in diesen Bereichen. Aus heutiger Sicht können somit keine belastbaren Aussagen über die Betriebsorganisation gemacht werden.

6.3 Menschliche und organisatorische Faktoren (HOF)

Für den sicheren Betrieb ist es von Bedeutung, dass Mensch, Organisation und Technik gemeinsam eine Einheit bilden, um die Aufgaben und Funktionen sicherheitsgerichtet erfüllen zu können. Der Betreiber räumt den menschlichen und organisatorischen Faktoren in allen Phasen des Projekts den erforderlichen Stellenwert ein. Dies beinhaltet in der Projektierungsphase die Berücksichtigung der menschlichen und organisatorischen Faktoren in Form eines für das gTL angemessenen *Human and Organisational Factors Engineerings* (HOF-Engineering)⁴⁷. Die Nagra nimmt somit von Beginn an eine dem Projekt angemessene, soziotechnische HOF-Sichtweise ein und übernimmt die Verantwortung zur langfristigen Etablierung einer stabilen Sicherheitskultur in ihrer Unternehmung. Eine solche vorausschauende Projektierung hinsichtlich der relevanten Einrichtungen und Arbeitsvorgänge lässt sich in Anlehnung an die bewährte Projekt-/Betriebserfahrung von vergleichbaren Anlagen (bspw. Zwilag oder gTL-Projekte im Ausland) gezielt ableiten.

Eine besondere Aufmerksamkeit wird der Rolle des künftigen Betriebs- und Instandhaltungspersonals zu widmen sein, im Hinblick auf die in der weiteren Zukunft noch zu wählenden Technologien der Anlage. Die beim Betrieb zur Verfügung stehenden (etablierten) Technologien und die dabei stets fortschreitende IT und Automatisierung (eventuell auch das Potenzial der künstlichen Intelligenz) sind heute weder abschliessend bekannt noch hinsichtlich ihrer Konsequenzen auf die Organisation und das Personal sowie HOF bewertbar. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese einen bedeutenden und neuen Einfluss auf das Arbeitsverhalten und auf HOF des künftigen Personals für Betrieb und Instandhaltung ausüben.

6.4 Fazit

Innerhalb des RBG geht es der Nagra primär darum aufzuzeigen, dass der Bau und sichere Betrieb eines gTL mit einer entsprechenden Organisation und dem erforderlichen Personalstamm realisiert werden kann. Der Aufbau einer adäquaten Projektierungsorganisation stellt dabei einen ersten Schritt dar, an dem spätere Bau- und Betriebsorganisationen anknüpfen und darauf aufbauen können. Die für ein gTL erforderlichen Organisationstruktur und -einheiten, deren Zusammenarbeit und einer über alle Ebenen gelebten Sicherheitskultur sind bereits heute in vergleichbaren Anlagen (Kernanlagen sowie Untertaganlagen wie z. B. Tunnel und Bergwerke) seit Jahrzehnten etabliert und können in Anlehnung an diese auch für ein gTL umgesetzt werden. HOF-Aspekte werden dabei frühzeitig im Projekt adressiert und adäquat berücksichtigt. Das Ziel ist dabei die frühzeitige Sicherstellung der Qualität sowie der Optimierung und Fehlervermeidung bei der Durchführung der multidisziplinären Projektarbeiten.

⁴⁷ Der Begriff Human and Organisational Factors (HOF) steht mit menschlichen und organisatorischen Aspekten in Zusammenhang und bezieht sich auf alle Gesichtspunkte von Arbeitssituationen, auf die eingewirkt werden kann, um die Schnittstellen zwischen Mensch und den zu erstellenden Systemen bzw. Maschinen optimal zu gestalten. Als Beispiel sei (i) die Arbeitsplatzgestaltung, d. h. die Schaffung eines ergonomischen Arbeitsumfelds, dass die Effizienz und Sicherheit von Betrieb, Prüfung, Tests sowie der Instandhaltung fördert, sowie (ii) ein Feedback-System, d. h. die Einführung von Feedback-Mechanismen, die es den Mitarbeitenden ermöglicht, ihre Erfahrungen und Beobachtungen zu teilen, um Verbesserungen und Optimierungen vorzunehmen, genannt.

7 Literaturverzeichnis

- Agneb (2019): Entsorgung der MIF-Abfälle nach dem «Ende des Einlagerungsbetriebs» der geplanten geologischen Tiefenlager. Bericht der Untergruppe. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- AWEL Kanton ZH (2015): Tiefenbeschränkung von Erdwärmesonden zum Schutz der Fels-aquifere Obere Meeresmolasse und Malm (Mineralwasservorkommen). Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL Kanton ZH, Zürich.
- BAG (2021): Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz: Ergebnisse 2020. Bundesamt für Gesundheit (BAG), Abteilung Strahlenschutz, Bern.
- Bevölkerungsschutzverordnung, BevSV (2020): Verordnung über den Bevölkerungsschutz (Bevölkerungsschutzverordnung, BevSV) vom 11. November 2020, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 520.12, Schweiz.
- BFE (2008): Sachplan Geologische Tiefenlager: Konzeptteil. BFE 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011). Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- Botschaft KEG (2001): Botschaft vom 28. Februar 2001 zu den Volksinitiativen «MoratoriumPlus – Für die Verlängerung des Atomkraftwerk-Baustopps und die Begrenzung des Atomrisikos (MoratoriumPlus)» und «Strom ohne Atom – Für eine Energiewende und die schrittweise Stilllegung der Atomkraftwerke (Strom ohne Atom)» sowie zu einem Kernenergiegesetz. Bundesblatt BBl 2001 2665, Schweiz.
- Eisenlohr, T. & Müller, P. (2016): Standortareal NL-6-SMA-HAA-Kombi Geologisch-geotechnischer Bericht: Baugrundbeschreibung und geotechnische Beschreibung der oberflächennahen Abschnitte der Zugangsbauwerke (Rampe, Schächte). Nagra Arbeitsbericht NAB 16-65.
- ENSI (2018a): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2018b): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-A05/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2021): Anlageninterner Strahlenschutz. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G12. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2023a): Geologische Tiefenlager. Ausgabe Dezember 2020 (Änderung vom 1. November 2023). Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2023b): Organisation von Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G07/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.

- Fäh, D., Giardini, D., Kästli, P., Deichmann, N., Gisler, M., Schwarz-Zanetti, G., Alvarez-Rubio, S., Sellami, S., Edwards, B., Allmann, B., Bethmann, F., Wössner, J., Gassner-Stamm, G., Fritsche, S. & Eberhard, D. (2011): ECOS-09 Earthquake Catalogue of Switzerland Release 2011. Report and Database. Public catalogue, 17.4.2011. Report SED/RISK/R/001/20110417. Swiss Seismological Service ETH Zürich.
- 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. Juli 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Marques Fernandes, M., Marinich, O., Miron, G.D. & Baeyens, B. (2024a): Sorption of Cs, Ni, Eu, Th and U on Drill Core Samples of Opalinus Clay and Confining Geological Units from Deep Boreholes in the Potential Siting Regions Nördlich Lägern, Zürich Nordost and Jura Ost: Measurements and Predictive Sorption Modelling. Nagra Technischer Bericht NTB 23-01.
- Marques Fernandes, M., Marinich, O., Miron, G.D., Kulik, D.A., Baeyens, B., Wüst, R., Becker, J. & Li, X. (2024b): Sorption Databases for Opalinus Clay, Confining Geological Units, and Bentonite: Methods, Concepts, and Upscaling of Data. Nagra Technical Report NTB 23-06.
- Nagra (2002a): 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 (2002b): Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-02.
- Nagra (2002c): Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-03.
- Nagra (2008a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. Nagra Technischer Bericht NTB 08-03.
- Nagra (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie (Bericht zur Sicherheit und Machbarkeit). Nagra Technischer Bericht NTB 08-05.
- Nagra (2008c): Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager: Geologische Grundlagen (Bericht zur Geologie). Text. Nagra Technischer Bericht NTB 08-04.
- Nagra (2016): Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3 - Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 16-28.
- Nagra (2019): Platzierung der Hauptschliessungsbereiche (HEB) in den Standortgebieten Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-19.

- Nagra (2021a): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.
- Nagra (2021b): Methodik zur Definition des Mindestabstands zwischen den HAA- und SMA-Lagerteilen im Kombilager. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-31.
- Nagra (2021c): Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-12 Rev. 1.
- Nagra (2022): Beherrschung möglicher karstbedingter Wasserzutritte während des Baus und Betriebs eines geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-41.
- Nagra (2023a): Bautechnisches Dossier. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 1-9.
- Nagra (2023b): Bautechnisches Dossier Standortvergleich – Band 3: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 3.
- Nagra (2023c): Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien MIRAM-RBG. Nagra Technischer Bericht NTB 22-05.
- Nagra (2024a): 3D Seismic Interpretation of Stratigraphic Horizons and Structures in Time Domain Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-18.
- Nagra (2024b): Abfallzuteilung und Betrachtungszeitraum für den Standortvergleich und Nachweiszeitraum für den Sicherheitsnachweis für das geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-05.
- Nagra (2024c): Analyse der Auswirkungen von Störfällen auf die Langzeitsicherheit. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-29.
- Nagra (2024d): Anlagen- und Betriebskonzept für das geologische Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NTB 24-11.
- Nagra (2024e): Bestimmung der unfallbedingten Flugzeugabsturzhäufigkeiten am Standort der Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-33.
- Nagra (2024f): Definition der Bewertungsobjekte für den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-01 Rev. 1.
- Nagra (2024g): Design and Performance Assessment of HLW Disposal Canisters. Nagra Technical Report NTB 24-20.
- Nagra (2024h): Development of Safety Scenarios. Nagra Technical Report NTB 24-21.
- Nagra (2024i): Einwirkungen auf den Standort der Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers bei Störfällen in der Nachbarschaft. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-32.
- Nagra (2024j): Erdbebengefährdungsanalyse für den Standort der Oberflächenanlage und die Betriebsphase des geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-21.
- Nagra (2024k): Erläuterungsbericht zu den Rahmenbewilligungsgesuchen. Nagra Technischer Bericht NTB 24-12 Rev. 1.

- Nagra (2024l): Generische Sicherheitsbetrachtung der Einwirkungen von innen für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-02.
- Nagra (2024m): Geologic Scenarios for the Evaluation of Earthquake Impact on the Deep Geological Repository. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-28.
- Nagra (2024n): Geological long-term evolution: Neotectonics. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-13.
- Nagra (2024o): Geological Properties of the Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost Siting Regions for Safety Assessment. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-10 Rev. 1.
- Nagra (2024p): Geosynthesis of Northern Switzerland. Nagra Technischer Bericht NTB 24-17.
- Nagra (2024q): Hydrologische Verhältnisse am Standort der Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-31.
- Nagra (2024r): Meteorologische und klimatologische Verhältnisse am Standort der Oberflächenanlage des geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-30.
- Nagra (2024s): Model Based Performance Assessment in Support of the Safety Assessment for a Geological Repository. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-25.
- Nagra (2024t): Phenomenological Description of the Evolution of a Geological Repository for Radioactive Waste in Opalinus Clay: Handling of FEPs in the Safety Assessment. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-20 Suppl. Vol. Rev. 1.
- Nagra (2024u): Phenomenological Description of the Evolution of a Geological Repository for Radioactive Waste in Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-20 Rev. 1.
- Nagra (2024v): Post-closure safety report. Nagra Technical Report NTB 24-10 Rev. 1.
- Nagra (2024w): Production and Fate of Gases in the Geological Repository. Nagra Technical Report NTB 24-23.
- Nagra (2024x): Qualitative Bewertung für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-23 Rev. 1.
- Nagra (2024y): Radiological Consequence Analysis for a Deep Geological Repository in Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-18.
- Nagra (2024z): Radiological Consequences of Deep Geological Repository Excavation by Erosive Processes. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-08.
- Nagra (2024aa): Radiological Consequences of Future Human Actions. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-09.
- Nagra (2024ab): Safety and Repository Concept and Provisional Design. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-18 Rev. 1.
- Nagra (2024ac): Synthesis of the Performance Assessment for a Deep Geological Repository for Radioactive Waste. Nagra Technical Report NTB 24-22 Rev. 1.

- Nagra (2024ad): Model Supported Assessment of the Containment-Providing Rock Zone in Support of the Site Selection. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-26.
- Nagra (2025a): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager - Begründung der Standortwahl. Nagra Technischer Bericht NTB 24-03.
- Nagra (2025b): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager - Bericht über die Abstimmung mit der Raumplanung. Nagra Technischer Bericht NTB 24-06.
- Nagra (2025c): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Integrales Überwachungskonzept. Nagra Technischer Bericht NTB 24-07.
- Nagra (2025d): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologisches Tiefenlager – Konzept für die Stilllegung der Oberflächenanlage. Nagra Technischer Bericht NTB 24-09.
- Nagra (2025e): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager - Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-04.
- Rahn, M., Leuz, A.-K. & Altorfer, F. (2024): Systematischer Umgang mit Ungewissheiten bei der Standortwahl für geologische Tiefenlager in der Schweiz. *In*: Eckhardt, A., Becker, F., Mintzlaff, V., Scheer, D. & Seidl, R. (Hrsg.): Entscheidungen in die weite Zukunft. (Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection). Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 187-206.
- Roth, P., Steiner, B. & Hölker, A. (2015): Calculation of the Seismic Hazard at the Four NPP Sites Based on the Hybrid SED-PRP Model. Report for ENSI (PS-TA-1587). Proseis AG, Zürich.
- StFV (1991): Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV) vom 27. Februar 1991, Stand am 8. März 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.012, Schweiz.
- StSG (1991): Strahlenschutzgesetz (StSG) vom 22. März 1991, Stand am 1. Juli 2023. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.50, Schweiz.
- StSV (2017): Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 26. April 2017, Stand am 1. Januar 2022. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.501, Schweiz.
- swissnuclear (2013-15): PEGASOS Refinement Project Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites. swissnuclear, Olten.
- 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 SYS: SR 732.112.2, Schweiz.
- Weingartner, S. (2023): Regionalisierte Bevölkerungsprognose für den Kanton Zürich. Szenario «Trend ZH 2023». (Statistik.info, 2023/06). Statistisches Amt Kanton Zürich.
- Zwilag (1999): Absturz einer Last in der Heissen Zelle. Ergänzungsbericht zum FSAR Band II Dok.-Nr.: ZWI 3124/D022, Rev. 00. Herausgegeben von Zwischenlager Würenlingen AG.

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Ungefähre Grösse der wichtigsten Bauten der OFA.....	6
Tab. 3-1:	Barrieren- und Schutzkonzept für die Betriebsphase des gTL	18
Tab. 3-2:	Boden- bzw. Landnutzung in den Gemeinden um den Standort	26
Tab. 3-3:	Leistungskennzahlen der Erdgashochdruckleitung	34
Tab. 3-4:	Zusammenstellung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten der verschiedenen Flugzeugkategorien, bezogen auf eine normierte Trefferfläche	35
Tab. 3-5:	Gefährdungsannahmen (Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr) am Standort unter Berücksichtigung des Klimawandels (Nagra 2024r)	39
Tab. A-1:	Abfallvolumen (realistisches Inventar (MIRAM) und Planungsreserven) für die Abfallkategorien HAA, SMA und ATA als Grundlage für die Herleitung der maximalen Lagerkapazität.....	A-6

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Übersichtskarte mit dem Projektperimeter und dem Vorschlag für den vorläufigen Schutzbereich	5
Fig. 2-2:	Projektperimeter mit Anlagenperimeter und Eingliederungssaum.....	8
Fig. 2-3:	Das aktuelle Sicherheits- und Lagerkonzept für die Nachverschlussphase	10
Fig. 2-4:	Abfolge der fünf wesentlichen Tätigkeiten zur Realisierung des Vorhabens gTL	11
Fig. 2-5:	Funktionsbereiche der Gesamtanlage des gTL	11
Fig. 2-6:	Exemplarische Umsetzung der OFA mit wichtigsten Bauten (vgl. Tab. 2-1), Sicherungsareal und ausgewählter weiterer Bauten, Anlagen und Areale	13
Fig. 2-7:	Exemplarische Umsetzung der Gesamtanlage.....	14
Fig. 3-1:	Übersichtskarte zur Lage des Projektperimeters	24
Fig. 3-2:	Topographie des Gebiets Haberstal	25
Fig. 3-3:	Übersicht über die Boden- und Landnutzung im Umkreis des Standorts.....	27
Fig. 3-4:	Ständige Wohnbevölkerung in der Nähe des Projektperimeters	28
Fig. 3-5:	Bevölkerungszahl und -dichte in der Nähe des geologischen Tiefenlagers.....	29
Fig. 3-6:	Verkehrs- und Transportwege im Umkreis des Projektperimeters.....	30
Fig. 3-7:	Übersichtskarte zur Infrastruktur der Luftfahrt	31
Fig. 3-8:	Standorte der StFV-Betriebe um den Projektperimeter	32
Fig. 3-9:	Verlauf der Erdgasleitung.....	33

Fig. 3-10:	Geologisches Profil durch den Anlagenperimeter basierend auf Eisenlohr & Müller (2016) und dem geologischen Schichtmodell mit Stand Februar 2022.....	42
Fig. 3-11:	Darstellung des Schweizer Erdbebenkatalogs (Fäh et al. 2011) inkl. einer Aktualisierung bis einschliesslich 30.09.2023 zusammen mit der modellierten Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit Magnituden $M_w \geq 6$ in der Schweiz, basierend auf Einschätzungen von vier Expertengruppen im Rahmen des PRP-Projekts (swissnuclear 2013-15).....	44
Fig. 4-1:	Geologisches Profil durch das Standortgebiet NL; angepasst von Nagra (2024p)	51
Fig. 4-2:	Verlauf der lithostratigraphischen Einheiten in den Tiefbohrungen aus Etappe 3 SGT im Standortgebiet NL.....	53
Fig. 4-3:	Kartierte Störungen in der 3D-Seismik im Standortgebiet NL für Nähe Top Opalinuston.....	55
Fig. 4-4:	Paläographische Karte von Zentraleuropa während des Ablagerungszeitraums des Opalinustons (angepasst von Nagra 2024p).....	56
Fig. 4-5:	Räumliche Verteilung der vertikalen, geodätischen Geschwindigkeiten (a) und Deformationsraten (b); angepasst von Nagra (2024p).....	62
Fig. 4-6:	Dosisraten aus der probabilistischen Konsequenzenanalyse für die Freisetzung von in Wasser gelösten Radionukliden aus dem HAA- und SMA-Lagerteil des gTL für das Referenzszenario	71
Fig. 4-7:	Dosisraten aus der probabilistischen Konsequenzenanalyse für die Freisetzung des gasförmigen Radionuklids C-14 aus dem HAA- und SMA-Lagerteil des gTL für das Referenzszenario	72
Fig. 5-1:	«Teilraum Tiefenlager» (dunkelgrün umrahmter Bereich) im schematischen Querschnitt.....	78
Fig. 5-2:	«Teilraum Zugänge» (blau schraffierter Bereich) im schematischen Querschnitt.....	79
Fig. 5-3:	Kartendarstellung des vorläufigen Schutzbereichs mit den beiden Teilräumen und Abstandsbereichen.....	80

Abkürzungsverzeichnis

ATA	alphatoxische Abfälle
BE	Abgebrannte Brennelemente
BFE	Bundesamt für Energie
BZL	Bundesz Zwischenlager für Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung
EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EVA	Einwirkungen von aussen
EVI	Einwirkungen von innen
FEPs	features, events, and processes
gTL	Geologisches Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
HOF	Human and Organisational Factors
ISO	Internationale Organisation für Normung
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
KKW	Kernkraftwerke
MIF	Radioaktive Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung
mSv	Millisievert
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NL	Nördlich Lägern
NTB	Nagra Technischer Bericht
OFA	Oberflächenanlage
PSI	Paul Scherrer Institut
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
StFV	Störfallverordnung
StSG	Strahlenschutzgesetz
StSV	Strahlenschutzverordnung
UTA	Untertaganlage
WA-HAA	Hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung
Zwibez	Zwischenlager Beznau
Zwilag	Zwischenlager Würenlingen AG

Anhang A Herleitung der maximalen Lagerkapazität für die Abfallkategorien HAA, ATA und SMA

Gesetzliche Vorgaben

Zu den mit der Rahmenbewilligung festzulegenden Grundzügen des Projektes gehören die Kategorien des Lagerguts (HAA, ATA, SMA; Art. 51 KEG) sowie damit verknüpft die maximale Lagerkapazität (Art. 14 Abs. 2 Bst. b KEG). In der Botschaft zum KEG wird die maximale Lagerkapazität mit «Höchstvolumen» bzw. der «Höchstanzahl Gebinde» umschrieben (vgl. Botschaft KEG, 2766 f.).

Der Gesetzgeber sieht vor, dass in der Rahmenbewilligung die Grössenordnung der Lagerkapazität erkennbar ist. Eine Präzisierung erfolgt anschliessend im Rahmen des mehrstufigen Bewilligungsverfahren nach KEG. So wird mit der Baubewilligung die Kapazität der Anlage festgelegt (Art. 17 Abs. 1 Bst. c KEG) und mit der Betriebsbewilligung werden Grenzwerte für die Aktivität der einzulagernden Abfälle definiert (Art. 37 Abs. 3 KEG).

Herleitung der maximalen Lagerkapazität

Der Sicherheitsnachweis für das RBG ist auf Basis des derzeit erwartenden Inventars zu erbringen (ENSI 2018a). Dies entspricht dem Inventar, so wie es im MIRAM für das RBG (Nagra 2023c) wiedergegeben ist. Das erwartende Inventar, welches periodisch aktualisiert und überprüft wird, ist auch den jeweiligen Sicherheitsnachweisen für die Bau- und Betriebsbewilligung zugrunde zu legen.

Für die Herleitung bzw. Begründung der maximalen Lagerkapazität im RBG wird das derzeit erwartende Inventar eindeutig von demjenigen abgegrenzt, welches nur bei Eintritt bestimmter Ereignisse anfällt. Für die Ermittlung des letzteren werden sog. Planungsreserven ausgewiesen. Diese basieren auf Annahmen und werden so quantifiziert, dass Änderungen, die zu grösseren Abfallvolumen führen (u. a. Verlängerung der Betriebszeiten der KKW, verlängerte Einlagerung von MIF ins geologische Tiefenlager, betriebsbedingte Abweichungen bei der Abfallbehandlung) Rechnung getragen werden kann. In Anbetracht des hundertjährigen Zeithorizonts des Vorhabens geologisches Tiefenlager sind zusätzliche Planungsreserven vorzusehen. Diese zusätzlichen Planungsreserven bezwecken, dass mit der Rahmenbewilligung auch die Konsequenzen von schwer voraussehbaren Ereignissen bzw. von Veränderungen der äusseren Umstände so weit wie möglich abgedeckt sind.

Entsprechend dem Gebot zur Optimierung (ENSI 2023a) muss es möglich sein,

- dass heutige Konzepte mit Auswirkungen auf die anfallende Menge radioaktiven Abfalls bei Bedarf an neue Gegebenheiten angepasst werden können
- dass Erfahrungen aus fortgeschrittenen Entsorgungsprogrammen im Ausland im schweizerischen Programm berücksichtigt werden können
- der kerntechnischen Forderung zur Berücksichtigung des Stands der Technik gerecht zu werden
- allfälligen Änderungen der Gesetzgebung Rechnung zu tragen (z. B. Änderung der Befreiungsgrenzen, bei welcher ein Material als radioaktiver Abfall einzustufen ist)
- auf Entwicklungen einzutreten, die nur schwer voraussehbar sind

Die im Folgenden dargelegten Vorschläge für die maximale Lagerkapazität für die Abfallkategorien HAA, ATA und SMA beziehen sich auf das unverpackte Volumen. Diese Volumenangabe ist leichter nachvollziehbar, da Planungsreserven dargelegt werden können, ohne auf Aspekte der Verpackung einzugehen. Wird zudem die maximale Lagerkapazität als unverpackte Volumen festgelegt, bleibt die erforderliche Flexibilität erhalten, im Hinblick auf spätere Bewilligungsschritte nach KEG die effektiv verwendeten Endlagerbehälter unter Berücksichtigung unterschiedlicher Aspekte (z. B. Transport, Bau, Betrieb, Betriebs- und Langzeitsicherheit) zu optimieren.

Zur Erörterung von Aspekten mit potenziellem Bezug zur Sicherheit und Lagerauslegung sind in Tab. A-1 auch verpackte Volumen angegeben. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass die Verpackung unter Fortsetzung der bestehenden Verpackungskonzepte erfolgen würde.

Maximale Lagerkapazität für die Abfallkategorie HAA

Für die Abfallkategorie HAA wird eine maximale Lagerkapazität von 2'500 m³ unverpacktes Abfallvolumen vorgeschlagen. Gemäss MIRAM für das RBG (Nagra 2023c) fallen ca. 1'550 m³ HAA als unverpacktes Abfallvolumen an. Die Planungsreserven betragen 650 m³ (Tab. A-1). Da die vorgeschlagene maximale Lagerkapazität eine abdeckende Richtgrösse darstellt, wurde für HAA die resultierende Summe von 2'200 m³ für den Vorschlag auf 2'500 m³ entsprechend aufgerundet. Würde die HAA-Planungsreserve vollumfänglich in Anspruch genommen, erhöht sich das einzulagernde HAA-Abfallvolumen um ca. den Faktor 1.6.

Der Hauptbestandteil der Planungsreserven umfasst HAA, die sich ergeben, falls die KKW länger betrieben werden. Da die Anzahl der BE in erster Näherung proportional zur Laufzeit ist, führt jede Verlängerung der Laufzeiten der sich in Betrieb befindenden schweizerischen KKW um 5 Jahre zu einer Zunahme um etwas über 1'000 BE. Geht man anstatt von einem 60-jährigen von einem 80-jährigen Betrieb aus, führt dies zu zusätzlichen 4'300 BE. Dies entspricht einem unverpackten Abfallvolumen von 550 m³.

Die Anzahl der BE ist auch abhängig von der Anreicherung und dem Abbrand. Auch wenn derzeit keine Verminderung als wahrscheinlich erachtet wird, ist für Unvorhergesehenes eine Reserve einzuplanen. Reduziert man beispielhaft den maximalen Abbrand auf 40 GWd/tHM⁴⁸ führt dies zu 800 zusätzlichen BE. Dies entspricht einem unverpackten Abfallvolumen von 100 m³.

⁴⁸ Die Abschätzung geht von einer gleichbleibenden Energieproduktion ab 2025 aus. Dazu müsste der Brennstoff häufiger gewechselt werden; dies führt zu zusätzlichen BE. GWd/tHM = Gigawatt x Tag / Tonne Brennstoff.

Maximale Lagerkapazität für die Abfallkategorie SMA

Für die Abfallkategorie SMA wird eine maximale Lagerkapazität von 100'000 m³ unverpacktes Abfallvolumen vorgeschlagen. Gemäss MIRAM für das RBG (Nagra 2023c) fallen ca. 43'000 m³ SMA als unverpacktes Abfallvolumen an. Die Planungsreserven betragen 55'000 m³ (Tab. A-1). Da die vorgeschlagene maximale Lagerkapazität eine abdeckende Richtgrösse darstellt, wurde für SMA die resultierende Summe⁴⁹ von 98'000 m³ für den Vorschlag auf 100'000 m³ entsprechend aufgerundet.

Die Planungsreserven für SMA basieren auf folgenden Überlegungen:

- Am meisten ins Gewicht fallen Ungewissheiten im Zusammenhang mit der Stilllegung von Kernanlagen. Für diese werden 30'000 m³ Reserven antizipiert. Können Materialien bei der Stilllegung nicht gemäss den Vorgaben der StSV freigemessen werden, führt dies zu einem Mehrvolumen an SMA-Abfällen. Ebenso verhält es sich, falls Befreiungsgrenzen⁵⁰ verschärft würden. Kommt es zudem bei der Zuweisung von Stilllegungsabfällen für die Abklinglagerung zu Abweichungen von den modellhaften Annahmen, so fallen signifikant höhere Volumen an sehr schwachaktiven Abfällen an. Bei den hier beschriebenen Abfällen weicht das verpackte Volumen (32'000 m³) nur unwesentlich vom unverpackten Volumen ab.
- Durch eine allfällige Verlängerung der Laufzeiten der KKW fallen zusätzliche Betriebs- und Reaktorabfälle an (5'000 m³ unverpackt).
- Die Planungsreserven umfassen ein Reservevolumen für MIF. So fallen auch nach dem planmässigen Verschluss des SMA-Lagerteils MIF-Abfälle in der Schweiz an. Ebenso würde ein längerer Betrieb der Kernanlagen beim PSI und CERN zu zusätzlichen MIF führen. Der Bund ist bestrebt, sich die Flexibilität über die Rahmenbewilligung hinaus zu wahren, damit bis zum Verschluss des Gesamtlagers MIF im gTL eingelagert werden könnten. In einer Studie geht der Bund von bis zu 4'000 m³ aus (Agneb 2019). Als abdeckende Annahme wird 5'000 m³ unverpacktes Volumen unterstellt.
- Die Planungsreserven umfassen auch einen Zuschlag von 5 % für das allfällige Mehrvolumen, welches aufgrund von betriebsbedingten Abweichungen von optimierten Abläufen beim Abfallverursacher anfallen könnte. Gründe sind u. a. unerwartete betriebsbedingte Abweichungen vom Grundsatz der Abfallminimierung, sowie Mehrvolumen, welches resultiert, wenn eine volumenoptimierte Beladung von Endlagerbehälter aufgrund z. B. von geometrischen Gründen nicht erfolgen kann. Es wird angenommen, dass bei diesen Abfällen das verpackte Volumen (6'000 m³) nur wenig vom unverpackten Volumen (5'000 m³) abweichen würde.
- Schliesslich umfassen die Planungsreserven auch einen generellen Zuschlag von 10 % bezüglich des Gesamtvolumens. Gründe sind Ungewissheiten bei der Quantifizierung von zukünftig zu erwartenden Abfallströmen, sowie Unvorhergesehenes und Unwägbarkeiten bis zum Einlagerungsbeginn SMA bzw. dem Verschluss des Lagers. Es wird wiederum angenommen, dass bei diesen Abfällen das verpackte Volumen (12'000 m³) nur wenig vom unverpackten Volumen (10'000 m³) abweichen würde.

⁴⁹ Zur Vereinfachung beinhalten die Angaben zur Abfallkategorie SMA auch ATA (< 1% des unverpackten Volumens). Diese Vereinfachung ist angezeigt, da die ATA-Volumen im Vergleich zu den getätigten Rundungen um einiges kleiner sind. ATA werden in der Tabelle (Tab. A-1) nur deshalb separat ausgewiesen, um der Vorgabe Rechnung zu tragen, dass mit der Rahmenbewilligung für jede Abfallkategorie (HAA, ATA, SMA) eine maximale Lagerkapazität festzulegen ist.

⁵⁰ Die Befreiungsgrenze (LL) entspricht derjenigen massenspezifischen Aktivität, unterhalb welcher der Umgang mit einem Material nicht mehr der Bewilligungspflicht und demnach auch nicht mehr der Aufsicht unterstellt ist.

Maximale Lagerkapazität für die Abfallkategorie ATA

Für die Abfallkategorie ATA⁵¹ wird eine maximale Lagerkapazität von 600 m³ unverpacktes Abfallvolumen vorgeschlagen. Gemäss Nagra (2023c) ist von ca. 300 m³ unverpacktem Volumen für ATA aus der Wiederaufarbeitung, der Stilllegung und dem MIF-Bereich auszugehen. Die Planungsreserven umfassen nochmals 300 m³ unverpacktes Volumen und basieren auf folgenden Überlegungen:

- Durch allfällige längere Laufzeiten fallen 30 m³ unverpackte zusätzliche ATA aus dem Betrieb der KKW an.
- In Analogie zu SMA führen eine Verlängerung der MIF-Sammelperiode sowie ein allfälliger längeren Betrieb von Anlagen beim PSI und CERN zu 20 m³ unverpackten zusätzlichen ATA.
- Am meisten ins Gewicht fällt bei ATA ein Szenario, bei welchem die derzeitige Gesetzeslage geändert würde und die Wiederaufarbeitung wieder aufgenommen würde. Falls alle existierenden BE wiederaufgearbeitet würden, würden diese zu 250 m³ unverpacktem Abfallvolumen führen.

Auswirkungen einer Ausnutzung der maximalen Lagerkapazität auf die Langzeitsicherheit und den Platzbedarf des geologischen Tiefenlagers

Das im Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase (Nagra 2024v) betrachtete Lagerkonzept basiert auf einem Sicherheitskonzept mit einem gestaffelten System passiver, geologischer und technischer Barrieren. Dem gTL als Ganzes und den einzelnen Barrieren werden dabei Sicherheitsfunktionen (vgl. Kap. 3.2.2 in Nagra 2024v) zugeordnet, welche weitgehend unabhängig sind von der absoluten Grösse des Radionuklidinventars. Entsprechend der Vorgaben in der Präzisierung der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des SGT (ENSI 2018a) ist der Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase für das RBG in Nagra (2024v) mit dem Inventar des MIRAM für das RBG (Nagra 2023c) erbracht.

Die Auswirkungen zur Ausnutzung der maximalen Lagerkapazität auf die Langzeitsicherheit sind mit einem Inventar erläutert, welches die maximale Lagerkapazität ausschöpft und im Folgenden als skaliertes Inventar bezeichnet wird. Im Vergleich zum MIRAM-RBG ergeben sich Skalierungsfaktoren von ca. 1.6 für das HAA-Lager und ca. 2.3 für das SMA-Lager⁵², jeweils bezogen auf das unverpackte Volumen (Tab. A-1).

Die Ausnutzung der maximalen Lagerkapazität würde die Nachweisführung zur Langzeitsicherheit des gTL nicht wesentlich beeinflussen. Denn sowohl die zu bewertenden lagerinduzierten Effekte (Nagra 2024ac) als auch die radiologischen Konsequenzen (Nagra 2024y), die durch ein skaliertes Abfallinventar entstehen, unterscheiden sich nicht wesentlich von den relevanten Prozessen und Phänomenen gemäss Sicherheitsnachweis (Nagra 2024v).

⁵¹ Der Anfall an ATA ist im Vergleich zu SMA sehr klein (< 1% des unverpackten Volumens).

⁵² Gemäss Entsorgungskonzept (Kap. 1.1) befinden sich SMA und ATA im SMA-Lager.

Aufgrund des skalierten Inventars und entsprechender Lagergrösse, sind folgende lagerinduzierte Effekte relevant:

- **Temperaturentwicklung:** Die Temperaturverteilung im Nah- und Fernfeld bleibt vergleichbar mit den in Nagra (2024ac) berechneten thermischen Entwicklungen, wenn das Lagerfeld bei einem skalierten Inventar entsprechend ausgeweitet werden würde. Die Wärmeleistung pro m² Lagerfläche und die daraus resultierende Wärmestromdichte in [W/m²] würde somit bei Ausnutzung der maximalen Lagerkapazität unverändert bleiben.
- **Die Gasdruckentwicklung** wird massgeblich durch das Verhältnis von Gasproduktion zu Speichervolumen bestimmt (Nagra 2024w). Das Speichervolumen für Gas hängt im Wesentlichen vom Ausbruchvolumen der Untertagebauwerke ab, das sich proportional zum Abfallvolumen vergrössern würde. Es wurde nachgewiesen, dass ausreichend Speichervolumen in den Zugangsbauwerken die Gasdruckentwicklung günstig beeinflusst (z.B. base case in Nagra (2024w) mit gasdurchlässigen V1- und V2-SMA Siegeln).

Da der zentrale Bereich des gTL zwar für die Gasspeicherung zur Verfügung steht, jedoch unabhängig vom Abfallvolumen ist, führt ein skaliertes Abfallinventar zu einem leicht grösseren Verhältnis von Abfall- zu Tunnelvolumen. Falls erforderlich, kann jedoch durch geeignete bauliche Massnahmen – beispielsweise eine Verlängerung der Bau- und Betriebstunnel – das notwendige Speichervolumen für Gas sichergestellt werden. Im Rahmen von Sensitivitätsstudien wurde gezeigt, wie sich der Einfluss des Gasspeichervolumens in den Zugangsbauwerken auf den Gasdruck in den Lagerkavernen auswirkt (z.B. Case 7: Low-permeability seal V1-L/ILW in Nagra (2024w)).

In der Analyse der radiologischen Konsequenzen (Nagra 2024y) werden die Quellterme zur Radionuklidfreisetzung auf einen einzelnen Endlagerbehälter bezogen. Die konzeptualisierte Freisetzung erfolgt vom Endlagerbehälter vertikal nach oben und unten durch den EG in die regionalen Aquifersysteme (Kap. 7 in Nagra 2024y). Die Gesamtdosis der freigesetzten Radionuklide ergibt sich aus der Summe der Beiträge aller eingelagerten Endlagerbehälter. Bei Ausnutzung der maximalen Lagerkapazität erhöht sich die berechnete Dosis des gesamten Radionuklidinventars proportional zur Anzahl der eingelagerten Behälter und liegt immer noch mehrere Grössenordnungen unter dem Schutzkriterium.

Aufgrund dieser Erläuterungen bleibt der Sicherheitsnachweis der Nachverschlussphase (Nagra 2024v) auch für eine maximale Lagerkapazität gültig.

Bei der Ausnutzung der maximalen Lagerkapazität würde sich der Platzbedarf des gTL erhöhen⁵³. Unter Annahme des RBG-Inventars und der exemplarischen Auslegung des gTL umfassen die einschlusswirksamen Gebirgsbereiche rund 2 km² für das HAA-Lager und rund 1.2 km² für das SMA-Lager (Kap. 3.1.6 in Nagra 2024f). Da die potenzielle Lagerzone von 22 km² komplett in den vorgeschlagenen vorläufigen Schutzbereich integriert ist (vgl. Kap. 5.1.1), reicht das Platzangebot aus, selbst wenn der Platzbedarf gemäss maximaler Lagerkapazität um den Faktor 1.6 für das HAA-Lager und 2.3 für das SMA-Lager erhöht würde.

⁵³ Der Platzbedarf für die OFA (Projektperimeter, vgl. Kap. 2.3.1 und 2.3.2) würde sich nicht verändern.

Tab. A-1: Abfallvolumen (realistisches Inventar (MIRAM) und Planungsreserven) für die Abfallkategorien HAA, SMA und ATA als Grundlage für die Herleitung der maximalen Lagerkapazität

Zur Erörterung von Aspekten der Sicherheit umfasst die Tabelle auch Angaben zu verpackten Volumenen.

	HAA			SMA ⁵⁴		ATA (separat ausgewiesen)	
	Anzahl BE	m ³ unverpackt	m ³ verpackt	m ³ unverpackt	m ³ verpackt	m ³ unverpackt	m ³ verpackt
MIRAM (Nagra 2023c) aufgerundet	12'500	1'550⁵⁵	9'300	43'000	84'000	300	1'100
Planungsreserven:		650	5'550	55'000	74'000	300	1'300
- Längerer Betrieb KKW	4'300	550	4'900	5'000	16'000	30	130
- Reserve Anreicherung / Abbrand BE	800	100	650				
- Wiederaufarbeitung (Gesetzesänderung wäre erforderlich) ⁵⁶						250	1'100
- Reserve für allfällige Abweichung durch Veränderungen der Freimessgrenzen				30'000	32'000		

⁵⁴ Zur Vereinfachung beinhalten die Angaben zur Abfallkategorie SMA auch ATA (< 1% des unverpackten Volumens). Diese Vereinfachung ist angezeigt, da die ATA-Volumen im Vergleich zu den getätigten Rundungen um einiges kleiner sind. ATA werden in der Tabelle nur deshalb separat ausgewiesen, um der Vorgabe Rechnung zu tragen, dass mit der Rahmenbewilligung für jede Abfallkategorie (HAA, ATA, SMA) eine maximale Lagerkapazität festzulegen ist.

⁵⁵ Zusätzlich zu 1'430 m³ BE existieren 120 m³ Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und dem MIF-Bereich (Nagra 2023c).

⁵⁶ Im Falle einer erneuten Wiederaufarbeitung würden zwar sog. WA-HAA entstehen (Nagra 2023c). Da dadurch das Volumen an HAA insgesamt reduziert wird, werden diese nicht aufgeführt.

Tab. A-1: Fortsetzung

	HAA			SMA ⁵²		ATA (separat ausgewiesen)	
	Anzahl BE	m ³ unverpackt	m ³ verpackt	m ³ unverpackt	m ³ verpackt	m ³ unverpackt	m ³ verpackt
- Reserve infolge einer Verlängerung der MIF-Sammelperiode				5'000	8'000	20	70
- Reserve für betriebsbedingte Abweichungen von optimierten Abläufen				5'000	6'000		
- Genereller Zuschlag für Unvorhergesehenes bei SMA (ca. 10% auf Gesamtsumme unverpackt)				10'000	12'000		
Summe berechnet (MIRAM plus Planungsreserven)		2'200	14'850	98'000	158'000	600	2'400
Beantragte maximale Lagerkapazität (aufgerundet auf abdeckende Richtgrösse)		2'500		100'000		600	