



TECHNISCHER BERICHT 24-07

Rahmenbewilligungsgesuch für das
geologische Tiefenlager –
Integrales Überwachungskonzept

Mai 2025



TECHNISCHER BERICHT 24-07

Rahmenbewilligungsgesuch für das
geologische Tiefenlager –
Integrales Überwachungskonzept

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 am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel, Kanton Zürich). Im vorliegenden Bericht wird das erforderliche Konzept für die Beobachtungsphase gemäss Art. 13 KEG, beziehungsweise ein integrales Überwachungskonzept gemäss den Vorgaben in ENSI 33/649 (ENSI 2018) beschrieben. Es deckt neben der Beobachtungsphase auch die Überwachung während den Bau- und Betriebsphasen des geologischen Tiefenlagers ab.

Zusammenfassung

Alle Realisierungsphasen des geologischen Tiefenlagers am Standort Haberstal werden messtechnisch überwacht. Das vorliegende integrale Überwachungskonzept zeigt, dass das geologische Tiefenlager gemäss der Kernenergiegesetzgebung sowie gemäss den entsprechenden behördlichen Vorgaben überwacht werden kann.

Erste Nullmessungen zur Aufnahme des Ausgangszustands laufen bereits oder werden rechtzeitig vor den Bautätigkeiten aufgenommen. Während der Bau- und Betriebsphasen werden die Umwelteinflüsse und die Betriebssicherheit, jeweils konventionell und radiologisch, überwacht. Sobald die radioaktiven Abfälle im geologischen Tiefenlager eingelagert sind, beginnt die Beobachtungsphase. In dieser werden die Einwirkungen der Abfälle auf das Mehrfachbarrierensystem während einer begrenzten Zeitdauer überwacht. Damit wird evaluiert, ob sich das Lagersystem im Einklang mit den entsprechenden Vorhersagen verhält. Die Ergebnisse dieser Überwachung fliessen in den Nachweis der Langzeitsicherheit für den Verschluss des geologischen Tiefenlagers ein. Dieser Nachweis ist eine Voraussetzung dafür, dass der Bundesrat später den Verschluss anordnen und das geologische Tiefenlager aus der Kernenergiegesetzgebung entlassen kann.

Die Anforderungen an die Überwachung des geologischen Tiefenlagers lassen sich am Standort Haberstal mit heute verfügbarer Technologie erfüllen. Es werden Parameter und Prozesse zur Überwachung ausgewählt, so dass die Einwirkungen des geologischen Tiefenlagers auf die Umwelt, das geologische Umfeld sowie das Mehrfachbarrierensystem bestimmt werden können. Die dafür notwendige Technologie entspricht dem Stand der Technik in der Überwachung von Umwelt, Bauwerken und Kernanlagen. Zudem wird die umfangreiche Erfahrung mit Experimenten im geologischen Untergrund berücksichtigt. Künftige technologische Fortschritte werden in die spätere Umsetzung des integralen Überwachungskonzepts einbezogen.

Die Entwicklung des Überwachungsprogramms erfolgt schrittweise. Zukünftige Projektänderungen können somit adäquat abgebildet werden. Die konkreten Massnahmen zur Überwachung der Umgebung einer Kernanlage werden spätestens mit der Betriebsbewilligung festgelegt (Art. 21 KEG) und danach periodisch überprüft. Die Überwachung des geologischen Tiefenlagers erfolgt so, dass die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigt wird.

Summary

The deep geological repository at the Haberstal site will be instrumentally monitored during all realisation phases. The integrated monitoring programme presented here, demonstrates the feasibility of monitoring the deep geological repository according to nuclear energy legislation and regulatory guidelines.

Initial baseline measurements are already underway or will be taken in good time prior to construction activities. During the construction and operational phases, the environmental impact and operational safety will be monitored conventionally and radiologically. Once the radioactive wastes have been emplaced in the deep geological repository, the monitoring period begins. During this period, the impact of the wastes on the multi-barrier system is monitored for a limited period to evaluate whether the repository system is behaving in line with predictions. The results of this monitoring period are incorporated into the demonstration of post-closure safety for the closure of the deep geological repository. This demonstration is a prerequisite for the subsequent ordering of the closure and release of the deep geological repository from nuclear energy legislation by the Federal Council.

The requirements for monitoring the deep geological repository can be met at the Haberstal site with technology available today. Parameters and processes for monitoring will be selected such that the impacts of the deep geological repository on the environment, the geological surroundings and the multi-barrier system can be determined. The technologies required for this are in line with the state of the art in the field of environmental and structural monitoring, as well as in the field of monitoring nuclear facilities. In addition, the extensive experience with experiments in the geological underground is taken into consideration. Future technological advances will be incorporated into the implementation of the integral monitoring concept.

The integral monitoring programme is being developed in a stepwise manner. Future project changes can thus be adequately mapped. The specific measures for monitoring the surroundings of a nuclear facility are defined at the latest with the operating licence (Art. 21 KEG) and reviewed periodically thereafter. Monitoring of the deep geological repository is carried out such that post-closure safety is not compromised.

Résumé

Toutes les phases de réalisation du dépôt en couches géologiques profondes sur le site de Haberstal feront l'objet d'une surveillance au moyen de mesures. Le présent concept de surveillance intégrale montre que le dépôt en couches géologiques profondes pourra être surveillé conformément à la législation sur l'énergie nucléaire et aux dispositions correspondantes des autorités.

Les premières mesures destinées à documenter l'état initial sont déjà en cours ou seront réalisées assez tôt avant le début des travaux de construction. Pendant les phases de construction et d'exploitation, les effets sur l'environnement ainsi que la sûreté en cours d'exploitation feront l'objet d'une surveillance conventionnelle et radiologique. La phase d'observation commencera dès que des déchets radioactifs seront évacués dans le dépôt en couches géologiques profondes. Durant celle-ci, les effets des déchets sur le système multibarrières seront surveillés pendant un temps limité. Cela permettra d'évaluer si le système de stockage se comporte conformément aux prévisions. Les résultats de cette surveillance seront intégrés dans la démonstration de sûreté à long terme pour la fermeture du dépôt en couches géologiques profondes. Cette démonstration est une condition préalable pour que le Conseil fédéral puisse ordonner, ultérieurement, la fermeture de ce dépôt et le sortir de la législation sur l'énergie nucléaire.

Les technologies actuellement disponibles permettent de répondre aux exigences relatives à la surveillance du dépôt en couches géologiques profondes sur le site du Haberstal. Les paramètres et les processus de surveillance seront choisis de manière à pouvoir déterminer les effets du dépôt en couches géologiques profondes sur l'environnement, le milieu géologique ainsi que sur le système multibarrières. La technologie nécessaire à cela correspond à l'état de la technique en matière de surveillance de l'environnement, des constructions et d'installations nucléaires. La vaste expérience acquise en matière d'expérimentation dans le sous-sol géologique sera également mise à profit. Les futurs progrès technologiques seront pris en compte dans la mise en œuvre ultérieure du concept de surveillance intégrale.

L'élaboration du programme de surveillance se fait par étapes. Les futures modifications du projet pourront ainsi être prises en compte de manière adéquate. Les mesures concrètes pour la surveillance des alentours d'une installation nucléaire seront définies au plus tard avec l'autorisation d'exploitation (art. 21 LENu), puis réévaluées régulièrement. La surveillance du dépôt en couches géologiques profondes se fera de manière à ne pas compromettre la sûreté à long terme.

Inhaltsverzeichnis

Zweck des Berichts	I
Zusammenfassung	III
Summary	IV
Résumé	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Vorgehen	2
2 Definitionen	3
3 Übergeordnete Zielsetzung der Überwachung.....	4
4 Grundsätze für die Überwachung	5
4.1 Grundprinzipien der Überwachung	5
4.2 Entwicklung der integralen Überwachung	6
4.3 Implementierung der Überwachung	6
5 Grundzüge des integralen Überwachungskonzepts.....	8
5.1 Gliederung in Überwachungsprogramme	9
5.2 Abgrenzungen.....	12
5.3 Konkretisierung im Projektfortschritt.....	13
5.4 Schnittstellen und Prozesse.....	13
5.5 Beweissicherung.....	14
5.6 Rückstellproben.....	14
5.7 Nullmessungen	15
5.8 Zusammenhang mit dem Sicherheitsnachweis	15
5.9 Integration mit Daten der Standortcharakterisierung.....	16
5.10 Auswirkungen auf Langzeitsicherheit	16
6 Exemplarische Umsetzung der Überwachung des geologischen Tiefenlagers.....	18
6.1 Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld.....	19
6.2 Überwachung während Bau und Betrieb	20
6.3 Radiologische Überwachung	21
6.4 Überwachung des Pilotlagers	21
7 Ausblick	23
8 Literaturverzeichnis	24
Anhang A Vorgaben und Umsetzung im integralen Überwachungskonzept.....	A-1

Abkürzungsverzeichnis und Glossar.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XII
Figurenverzeichnis	XII

1 Einleitung

Für den Bau bzw. Betrieb einer Kernanlage ist eine Rahmenbewilligung des Bundesrates erforderlich (Art. 12 KEG, 2003). Gemäss Art. 23 KEV (2004) ist als Teil der Gesuchsunterlagen für ein geologisches Tiefenlager (gTL) ein Konzept für die Beobachtungsphase einzureichen. Dieses Konzept wird durch Vorgaben in der Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2023a) sowie in ENSI (2018) auf alle Realisierungsphasen des geologischen Tiefenlagers zu einem integralen Überwachungskonzept erweitert. Die Überwachung soll zudem spätestens mit Erteilung der Rahmenbewilligung aufgenommen werden.

Die spezifischen gesetzlichen wie behördlichen Vorgaben an das integrale Überwachungskonzept und deren Umsetzung im vorliegenden Konzept sind in Anhang A gegenübergestellt. Das vorliegende integrale Überwachungskonzept kann dabei als Machbarkeitsstudie bezüglich der Umsetzung dieser Vorgaben verstanden werden. Es soll plausibilisiert werden, dass sich Anforderungen an die Überwachung des geologischen Tiefenlagers am Standort Haberstal erfüllen lassen. Konkretisierungen des integralen Überwachungskonzeptes zu einem integralen Überwachungsprogramm sind erst zuhanden der entsprechenden Bau- bzw. Betriebsbewilligungsgesuche vorgesehen.

1.1 Hintergrund

Die Lagerung radioaktiver Abfälle wird in einem geologischen Tiefenlager erfolgen (Nagra 2025a) und auf einem passiven Sicherheitskonzept basieren, das den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet. Die Standortsuche bestimmte den nach geologischen Gesichtspunkten besten Standort für die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers zur sicheren Entsorgung von hochaktiven Abfällen (HAA) sowie schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA). Dabei wurde mit dem Opalinuston ein geeignetes Wirtgestein identifiziert, das sich durch seine besonderen Eigenschaften und seine Ausdehnung, Mächtigkeit und Tiefenlage für die geologische Tiefenlagerung eignet (Nagra 2024b). Basierend auf dem Sicherheits- und Lagerkonzept und daraus abgeleiteten Anforderungen (Nagra 2024g) wurde ein exemplarisches Lagerprojekt entwickelt (Nagra 2024a). Die zu entsorgenden Abfälle sind umfassend charakterisiert (Nagra 2023). Die Einflüsse der Abfälle auf das Wirtgestein und das Mehrfachbarrierensystem wurde umfassend untersucht. Mit Analysen werden die Barrierenwirksamkeit (Nagra 2024h) und die radiologischen Konsequenzen (Nagra 2024f) berechnet, welche dem Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase zugrunde liegen (Nagra 2024e). Darüber hinaus wird in Nagra (2025a) dargestellt, dass sich die Gesamtanlage sicher betreiben lässt.

Durch die Überwachung des geologischen Tiefenlagers gemäss Kap. 6.1 ENSI-G03 soll zum einen die Betriebssicherheit durch relevante Überwachungsmassnahmen belegt werden und dargestellt werden, dass sich die Auswirkungen des gTL und der Oberflächenanlage auf die Umwelt im Rahmen der Erwartungen bleiben. Zum anderen soll durch geeignete Überwachungsmassnahmen bestätigt werden, dass die Sicherheit in der Nachverschlussphase gewährleistet ist. Letzteres ist durch die Überwachung des Pilotlagers in einer Beobachtungsphase nach erfolgter Einlagerung gesetzlich verankert (Art. 66 KEV).

Durch einen Vergleich der dem Sicherheitsnachweis zugrundeliegenden Modelle mit den Daten der Überwachung wird zur Vertrauensbildung beigetragen, dass die passive Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung und damit auch der Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. Dies ist eine Voraussetzung für den Verschluss des gTL nach Ablauf der Beobachtungsphase nach Art. 69 KEV. Nach der Feststellung des ordnungsgemässen Verschlusses durch den Bundesrat wird das gTL aus der Kernenergiegesetzgebung entlassen, sofern nicht eine befristete Überwachung nach Art. 39 Abs. 3 KEG angeordnet wird.

1.2 Vorgehen

Ausgehend von einer übergeordneten Zielsetzung für die Überwachung des geologischen Tiefenlagers (Kapitel 3) und den gesetzlichen wie behördlichen Anforderungen (Anhang A) werden Grundsätze definiert (Kapitel 4) nach denen die Überwachung des gTL erfolgen soll.

Basierend auf den Grundsätzen werden die Grundzüge des integralen Überwachungskonzepts beschrieben. Die Themen der Überwachung sind breit und werden in verschiedene Überwachungsprogramme gegliedert (Kapitel 5.1). Eine Abgrenzung des integralen Überwachungskonzepts gegenüber anderen Massnahmen, die Aspekte einer Überwachung haben, jedoch nicht Teil des integralen Überwachungskonzepts sind, wird in Kapitel 5.2 vorgenommen.

Das Rahmenbewilligungsgesuch basiert auf einem exemplarischen Lagerprojekt am Standort Haberstal. Bis zur Realisierung des Vorhabens ist dabei von Änderungen am Projekt auszugehen. Es ist unabdingbar, dass Projektänderungen am geologischen Tiefenlager adäquat im integralen Überwachungskonzept abgebildet werden können. Es ist daher wichtig, dass die Entwicklung des integralen Überwachungskonzepts schrittweise erfolgt (Kapitel 5.3).

Den Überwachungsprogrammen werden Strukturen und Prozesse übergeordnet, welche die Einhaltung der Grundsätze unterstützen und die einzelnen Komponenten des integralen Überwachungskonzepts steuern. Diese betreffen u.a. die Qualitätssicherung (Kapitel 5.4.1), das Datenmanagement und die Berichterstattung (Kapitel 5.4.2), sowie damit eng verknüpft, das Wissensmanagement (Kapitel 5.4.3). Darüber hinaus ist die Beweissicherung (Kapitel 5.5) und die Gewinnung von Rückstellproben (Kapitel 5.6) eine wichtige Aufgabe des integralen Überwachungskonzepts. Damit verknüpft finden auch Nullmessungen statt, die den Zustand des Gesamtsystems vor Bau- und Einlagerungsbeginn dokumentieren (Kapitel 5.7).

Ein zentrales Ziel der Überwachung des gTL ist die Bestätigung des Sicherheitsnachweises (Kapitel 5.8) nach Ablauf der Beobachtungsphase und bevor das gTL verschlossen werden kann. Dieser Sicherheitsnachweis soll die Erkenntnisse der Beobachtungsphase berücksichtigen.

Während der Standortsuche wurden bereits verschiedene Messnetze (z.B. Seismizität und geodätische Überwachung) aufgebaut und regional verdichtet. Diese werden als Teil der Überwachung angesehen und werden daher in der weiteren Entwicklung des integralen Überwachungskonzepts berücksichtigt (Kapitel 5.9).

Insbesondere bei der Überwachung des Mehrfachbarrierensystems müssen auch mögliche Auswirkungen von Messeinrichtungen auf die Langzeitsicherheit berücksichtigt werden. Dazu werden in Kapitel 5.10 mögliche Auswirkungen aufgezeigt.

Mit der Rahmenbewilligung werden u.a. die Grundzüge des Vorhabens festgelegt (Art. 14 KEG). Nach der Rahmenbewilligung werden im Zuge des weiteren Bewilligungsverfahrens gemäss KEG weitergehende Festlegungen getroffen. In Kapitel 6 wird in einer exemplarischen Umsetzung im Sinne einer Machbarkeitsstudie dargestellt, wie die Überwachung in den einzelnen Überwachungsprogrammen umgesetzt werden könnte. Damit wird aufgezeigt, dass sich die Anforderungen an die Überwachung des geologischen Tiefenlagers am Standort Haberstal zuverlässig erfüllen lassen.

2 Definitionen

In diesem Bericht bedeuten:

Integrales Überwachungskonzept – Konzeptionelle Beschreibung der Überwachungsmaßnahmen gemäss Kap. 6 ENSI-G03 und für alle Realisierungsphasen des gTL. Das integrale Überwachungskonzept führt mehrere Überwachungskonzepte zusammen und skizziert ihren Zusammenhang und deren Schnittstellen.

Integrales Überwachungsprogramm – Beschreibung der Überwachungsmaßnahmen gemäss Kap. 6 ENSI-G03 und für alle Realisierungsphasen des gTL. Das integrale Überwachungsprogramm führt mehrere Überwachungskonzepte und Überwachungsprogramme zusammen und beschreibt detailliert deren Schnittstellen. Das integrale Überwachungsprogramm wird erstmalig mit dem Baugesuch erstellt und während der Realisierung des Vorhabens weiterentwickelt, periodisch überprüft und aktualisiert.

Monitoring – In diesem Bericht werden die Begriffe Monitoring und Überwachung synonym verwendet.

Überwachung – Die über längere Zeit kontinuierliche oder periodische Beobachtung einer Eigenschaft, die Messung einer Kenngrösse oder die Summe aller solcher Beobachtungen und Messungen.

Überwachungskonzept – Konzeptionelle Beschreibung eines Überwachungsprogramms.

Überwachungsprogramm – Eine Gruppe von Überwachungsprojekten, die zusammen einen Themenbereich der Überwachung abdecken. Teil des integralen Überwachungsprogramms.

Überwachungsprojekt – Einzelnes Projekt eines Überwachungsprogramms.

Für weitere Begriffserklärungen wird auf das Glossar verwiesen.

3 Übergeordnete Zielsetzung der Überwachung

Im Rahmen von verschiedenen internationalen Projekten wurden die Randbedingungen des Monitorings von geologischen Tiefenlagern hinsichtlich der Langzeitsicherheit entwickelt (European Commission 2004, White 2014, White & Scourfield 2019, White et al. 2024). Die Ergebnisse dieses Diskurses flossen in Zieldefinitionen der Überwachung eines geologischen Tiefenlagers der International Atomic Energy Agency (IAEA 2011) ein. Auf Basis dieser Empfehlungen und der in der Richtlinie ENSI-G03 (ENSI 2023a) definierten Anforderungen werden die übergeordneten Ziele des integralen Überwachungskonzepts wie folgt definiert:

1. Bestätigung, dass die Auswirkungen des geologischen Tiefenlagers auf Umwelt und geologischem Umfeld während Bau und Betrieb im Rahmen der Erwartungen bleiben.
2. Radiologische Überwachung inkl. einer radiologischen Umweltüberwachung zum Nachweis des Einhaltens der Schutzkriterien und Abgabenlimite.
3. Messtechnische Überwachung während Bau und Betrieb zur Beurteilung der Bau- und Betriebssicherheit.
4. Beweissicherung in Bezug auf den Zustand des Tiefenlagersystems während aller Realisierungsphasen bis zum Verschluss.
5. Überwachung des Verhaltens des Mehrfachbarrierensystems zur Bestätigung der dem Sicherheitsnachweis zugrundeliegenden Bewertungsbasis.

4 Grundsätze für die Überwachung

Durch den von KEG, KEV sowie den behördlichen Vorgaben gesetzten Rahmen für die Überwachung des gTL lassen sich Grundsätze für die Entwicklung des integralen Überwachungskonzepts ableiten. Im Folgenden werden die Grundsätze für die Überwachung des gTL vorgestellt, die dem integralen Überwachungskonzept zugrunde liegen (Fig. 4-1). Die Umsetzung im vorliegenden Überwachungskonzept ist im Folgenden knapp beschrieben und es wird jeweils ein Verweis auf den entsprechenden Abschnitt im vorliegenden Konzept gegeben, in dem näher auf den entsprechenden Grundsatz und seiner Umsetzung eingegangen wird.

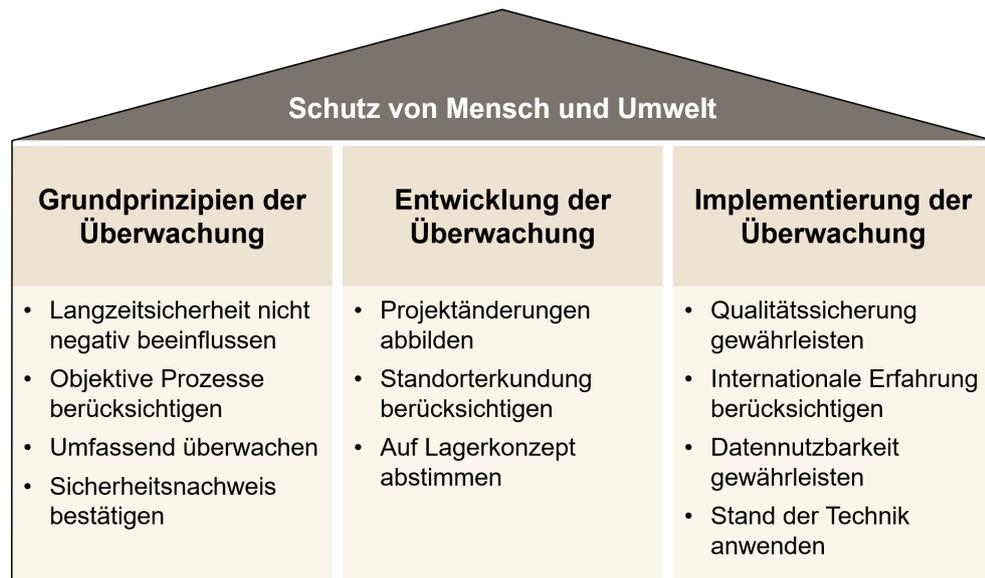


Fig. 4-1: Übersicht der Grundsätze für die Überwachung des geologischen Tiefenlagers

4.1 Grundprinzipien der Überwachung

Langzeitsicherheit nicht negativ beeinflussen – Der Schutz von Mensch und Umwelt ist das oberste Schutzziel bei der Implementierung des geologischen Tiefenlagers.

- Überwachungsmaßnahmen oder auch Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung dürfen die passiven Barrieren nicht negativ in Bezug auf die Langzeitsicherheit beeinflussen (Art. 11 KEV). Ein möglicher Einfluss von Überwachungsmaßnahmen auf die Langzeitsicherheit wird in Kapitel 5.10 aufgezeigt.

Objektive Prozesse berücksichtigen – Die Überwachung erfolgt zur Erreichung konkreter Ziele. Diese erlauben es Art und Umfang der Überwachung abzuleiten. Eine Massnahme zur Überwachung soll nur dann durchgeführt werden, wenn es eine klare Indikation gibt, dass diese von Nutzen ist.

- Die Auswahl von Massnahmen zur Überwachung erfolgt entsprechend objektiven Prozessen (z.B. Auswahl der Parameter für das Pilotlager, Kapitel 6.4.2).

Umfassend überwachen – Das integrale Überwachungsprogramm (resp. das integrale Überwachungskonzept) hat mindestens die Überwachung des geologischen Umfelds, die radiologische Umweltüberwachung, die radiologische Überwachung während der Betriebsphase, die Überwachung im Pilotlager sowie die messtechnische Überwachung während Bau und Betrieb zu umfassen (Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03).

- Das integrale Überwachungskonzept besteht aus vier einzelnen Überwachungskonzepten, welche zusammen diese Themen der Überwachung abdecken (Kapitel 5.1.1). Eine Abgrenzung gegenüber weiteren Überwachungsthemen erfolgt in Kapitel 5.2.

Sicherheitsnachweis bestätigen – Es werden Beobachtungen zur Bestätigung des Sicherheitsnachweises in Hinblick auf den Verschluss erhoben. Während der Beobachtungsphase wird das Verhalten des Mehrfachbarrierensystem überwacht.

- Die Auswahl der zu überwachenden Prozesse bzw. Zustandsgrößen (in Bezug zur Langzeitsicherheit) orientiert sich am Sicherheitsnachweis und den dabei gemachten Annahmen bzw. gestellten Anforderungen an das Mehrfachbarrierensystem (Kapitel 5.8).

4.2 Entwicklung der integralen Überwachung

Projektänderungen abbilden – Die Realisierung des Vorhabens dauert viele Jahrzehnte, in deren Zuge für die Überwachung verschiedene Veränderungen zu erwarten sind. Dabei kann es beispielsweise zu Änderungen bei der Lagerauslegung kommen. Die Möglichkeit, die Überwachung an veränderte Umstände anzupassen, muss daher erhalten bleiben.

- Die weitere Konkretisierung und Präzisierung des integralen Überwachungsprogramms erfolgt stufenweise entsprechend den Erfordernissen der Realisierung. Bei Änderungen am integralen Überwachungsprogramm ist eine Kontinuität bzw. Vergleichbarkeit bereits gewonnener Daten, soweit dies sinnvoll ist, zu gewährleisten (Kapitel 5.3).

Standortcharakterisierung berücksichtigen – Die während der Standortcharakterisierung gewonnenen Resultate und Daten werden im integralen Überwachungskonzept berücksichtigt.

- Alle bisherigen und zukünftigen Daten, die zur Charakterisierung des Standorts beitragen, werden zusammengeführt. Während der Standortwahl durchgeführte Nullmessungen werden, soweit sie für das Projekt weiterhin relevant sind, im Rahmen der Überwachungsprogramme angepasst fortgeführt (Kapitel 5.9).

Auf Lagerkonzept abstimmen – Bei der Planung und Umsetzung der jeweiligen Überwachungsprogramme muss das Lagerkonzept berücksichtigt werden.

- Die Wahl der Parameter für die Überwachung erfolgt entsprechend der Bedürfnisse des Sicherheitsnachweises für die Nachverschlussphase und wird an die jeweils verschiedenen Lagerkonzepte für SMA und HAA ausgerichtet (Kapitel 6.4).

4.3 Implementierung der Überwachung

Qualitätssicherung gewährleisten – Die Ausführung des integralen Überwachungsprogramms hat entsprechend den Qualitätsanforderungen gemäss Kap. 6.2 ENSI-G07 (ENSI 2023b) zu erfolgen.

- Die Implementierung des integralen Überwachungsprogramms wird durch ein Qualitätsmanagementsystem gesteuert (Kapitel 5.4.1).

Internationale Erfahrung berücksichtigen – Die Umsetzung der Überwachungsprogramme orientiert sich an internationaler Erfahrung bzw. wissenschaftlichen Konsens bezüglich der Überwachung geologischer Tiefenlager.

- Bei der Planung und Umsetzung orientiert sich die Nagra an den Resultaten internationaler Forschungsprojekte. Darüber hinaus beteiligt sich die Nagra an internationalen Forschungsprojekten zum Thema der Überwachung geologischer Tiefenlager (Kapitel 5.4.3).

Datennutzbarkeit gewährleisten – Die gewonnenen Daten und gewisse Rückstellproben müssen während aller Realisierungsphasen und ggf. darüber hinaus nutzbar und darauf basierende Entscheidungen müssen durch spätere Generationen nachvollziehbar sein.

- Die Datenhaltung, sowie die Archivierung von Rückstellproben wird gemäss eines Datenmanagementplans und dem etablierten Stand der Technik sichergestellt (Kapitel 5.4.2).

Stand der Technik anwenden – Die Überwachung erfolgt gemäss dem etablierten Stand der Technik (Art. 36 KEV).

- Bei periodischen Überprüfungen des integralen Überwachungsprogramms wird geprüft, ob es technologische Fortschritte gibt, die bei der Überwachung zu berücksichtigen sind (Kapitel 5.3).

5 Grundzüge des integralen Überwachungskonzepts

Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Überwachungsaspekten ist im integralen Überwachungsprogramm, resp. im Überwachungskonzept aufzuzeigen (Kap. 6.1 Bst. c ENSI-G03). Das integrale Überwachungskonzept vereint verschiedene Überwachungsmaßnahmen, die im Zuge der Realisierung des Tiefenlagers mit der Zielsetzung gemäss Kapitel 3 durchgeführt werden. Es ist in verschiedene Überwachungsprogramme gegliedert (Kapitel 5.1) und wird durch administrative Massnahmen bzw. Prozesse begleitet und gelenkt. Die verschiedenen Komponenten des integralen Überwachungskonzepts sowie die zeitliche Einordnung in den Realisierungsplan, wie sie in Fig. 5-1 dargestellt sind, werden im folgenden Kapitel eingeführt und erläutert.

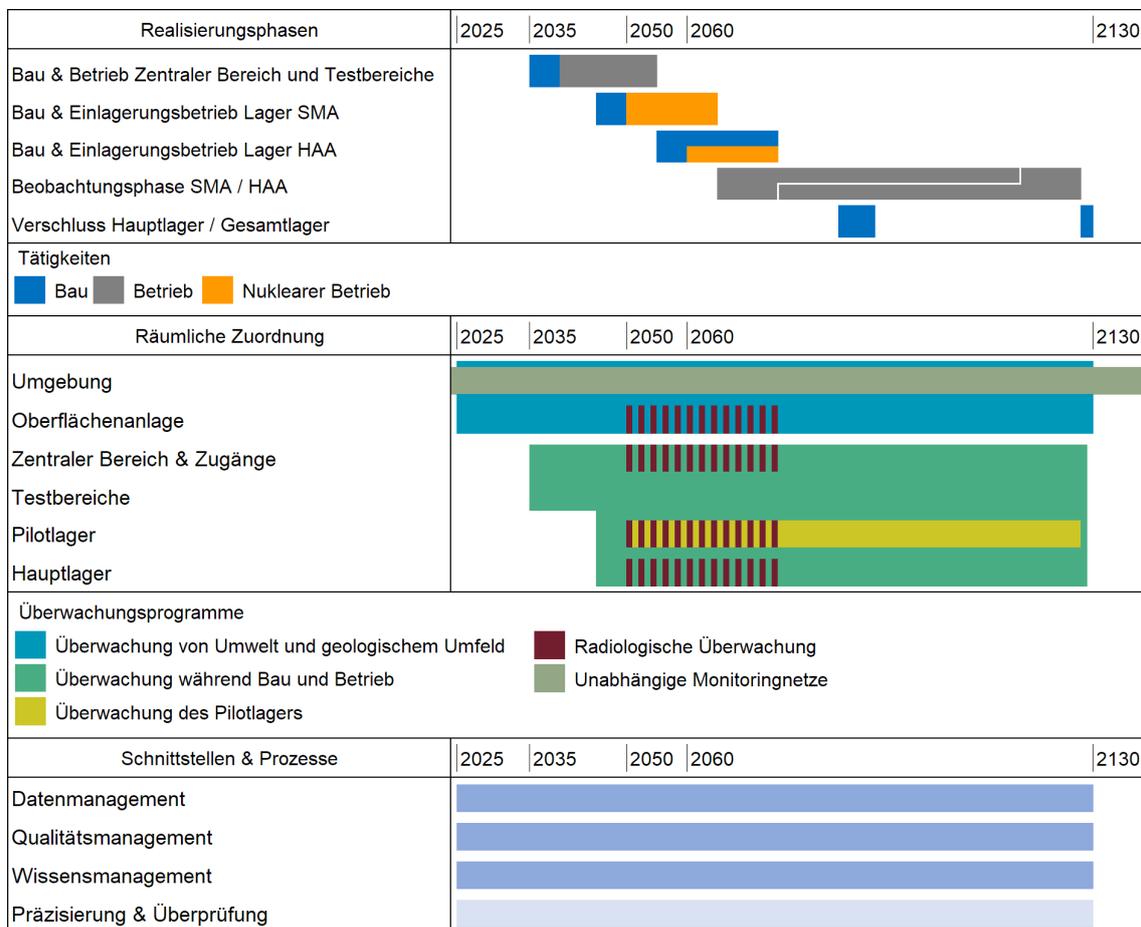


Fig. 5-1: Realisierungsphasen des geologischen Tiefenlagers in Anlehnung an Nagra (2021a) mit einer räumlich-zeitlichen Zuordnung der Aktivitäten der einzelnen Überwachungsprogramme, sowie die zeitliche Zuordnung administrativer Prozesse, welche das integrale Überwachungsprogramm begleiten und lenken

5.1 Gliederung in Überwachungsprogramme

5.1.1 Thematische Gliederung

Das integrale Überwachungsprogramm hat mindestens die Überwachung des geologischen Umfelds, die radiologische Umweltüberwachung, die radiologische Überwachung während der Betriebsphase, die Überwachung im Pilotlager sowie die messtechnische Überwachung während Bau und Betrieb zu umfassen (Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03).

Im integralen Überwachungskonzept wird die Überwachung in vier Überwachungsprogramme gegliedert. Diese Gliederung entspricht grob sowohl den Themen der Überwachung gemäss Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03 als auch der räumlichen Zuordnung der Überwachungsmassnahmen, die in den jeweiligen Überwachungsprogrammen primär verfolgt werden (Tab. 5-1). Eine beispielhafte Umsetzung der einzelnen Überwachungsprogramme wird in Kapitel 6 beschrieben.

Darüber hinaus unterhalten auch verschiedene lokale, kantonale und nationale Institutionen unabhängige Messnetze, die einen gewissen Beitrag zur Überwachung des gTL leisten. Diese werden unter «Unabhängige Monitoringnetze» zusammengefasst und in Kapitel 5.1.3 beschrieben.

Tab. 5-1: Gliederung der Überwachungsprogramme nach primären Zielen und der räumlichen Zuordnung der Überwachungsmassnahmen

Überwachungsprogramm	Primäres Ziel	Räumliche Zuordnung
Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld Kapitel 6.1	Überwachung der Einflüsse des gTL auf die Umwelt gemäss Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03	Die Überwachung erfolgt von Übertage
Überwachung während Bau und Betrieb Kapitel 6.2	Überwachung der Bau- und Betriebssicherheit gemäss Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03	Die Überwachung erfolgt in den jeweiligen untertägigen Bauwerken
Radiologische Überwachung Kapitel 6.3	Radiologische Überwachung während der Betriebsphase gemäss Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03	Die Überwachung erfolgt in den Anlagenteilen mit nuklearem Betrieb
Überwachung des Pilotlagers Kapitel 6.4	Überwachung des Mehrfachbarrierensystem im Pilotlager gemäss Art. 66 KEV	Die Überwachung erfolgt im Pilotlager bzw. in damit assoziierten Strukturen

Es ist offensichtlich, dass verschiedene Messungen, die einem Überwachungsprogramm zugeordnet sind, auch zur Erreichung der Ziele anderer Überwachungsprogramme herangezogen werden können. So sind z.B. Multipackersysteme in Bohrungen zur Langzeitbeobachtung der Formationsdrücke und Formationstemperaturen der Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld zugeordnet, da der Zugang zur Messeinrichtung von der Oberfläche erfolgt. Die Daten dieser Systeme dienen aber auch zur ergänzenden Charakterisierung der hydrogeologischen Bedingungen und die Systeme könnten für die Bestätigung des Sicherheitsnachweises eingesetzt werden. Sie können also zur Erreichung der Ziele mehrerer Überwachungsprogramme verwendet werden. Es ist daher notwendig, die einzelnen Überwachungsprogramme aufeinander abzustimmen und pragmatische Schnittstellen und Standards zu definieren, die eine flexible Nutzung der Daten erlauben; siehe dazu Kap. 5.4.

5.1.2 Zeitliche Gliederung

Die Überwachung des geologischen Tiefenlagers muss spätestens mit der Rahmenbewilligung aufgenommen und solange fortgeführt werden, bis das geologische Tiefenlager nicht mehr der Kernenergiegesetzgebung untersteht (Kap. 6.1 Bst. e ENSI-G03). Im Folgenden werden die wesentlichen Aktivitäten im Rahmen des integralen Überwachungskonzepts in den einzelnen Realisierungsphasen (vgl. Fig. 5-1) beschrieben.

Aktivitäten bis zur Rahmenbewilligung und Baubewilligung geologisches Tiefenlager

Verschiedene Aktivitäten im Rahmen der Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld laufen bereits (Kap. 6.1). Eine Intensivierung der Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld erfolgt vor Beginn der baulichen Aktivitäten zur weiteren Erfassung von Nullmessungen. Die Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld wird bis zur Entlassung aus der Kernenergiegesetzgebung fortgeführt. Der Umfang kann dabei nach Bedarf der jeweiligen Realisierungsphase angepasst werden.

Aktivitäten für Bau & Betrieb Zentraler Bereich und Testbereiche

Mit Beginn baulicher Aktivitäten, bzw. unmittelbar vorher, erfolgt die Aufnahme der Überwachung während Bau und Betrieb zur Erfassung von Nullmessungen. Die Überwachung von Bau und Betrieb wird dabei entsprechend dem Baufortschritt und dem Übergang vom Bau in den Betrieb der jeweiligen Strukturen und damit verbundener abweichender Anforderungen angepasst.

Aktivitäten für Bau & Betrieb SMA- und HAA-Hauptlager

Mit Erhalt der Betriebsbewilligung für die Einlagerung beginnt die Überwachung des Pilotlagers. Ab der ersten Annahme der Abfälle bis zum Ende des nuklearen Betriebs ist nun auch die radiologische Überwachung aktiv. Die Überwachung während Bau und Betrieb wird fortgeführt.

Aktivitäten für Beobachtungsphase SMA und HAA

In der sogenannten Beobachtungsphase wird das geologische Tiefenlager vor dem Verschluss überwacht (Art. 3 Bst. a KEG). Dies geschieht durch die Überwachung des Pilotlagers. Während dieser Phase bleibt die Überwachung während Bau und Betrieb aktiv, um die Betriebssicherheit zu überwachen. Die Dauer der Beobachtungsphase wird mit dem aktualisierten Projekt für die Beobachtungsphase vorgeschlagen und vom UVEK angeordnet (Art. 68 KEV). Nach Beendigung der Beobachtungsphase wird der Verschluss angeordnet und die Überwachung des Pilotlagers endet.

Aktivitäten für Verschluss Hauptlager / Gesamtlager

Während der Verschlussarbeiten werden die Überwachungseinrichtungen der verbleibenden Überwachung während Bau und Betrieb entsprechend des Fortschritts bei den Verschlussarbeiten rückgebaut. Die Überwachung während Bau und Betrieb sowie die Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld enden mit der Feststellung des ordnungsgemässen Verschlusses des gTL oder (für die Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld) nach einer allfällig vom Bundesrat angeordneten befristeten Überwachung nach Art. 39 KEG.

Nach der Entlassung des gTL aus der Kernenergiegesetzgebung geht es an den Bund über. Es finden dann durch die Nagra keine weiteren Aktivitäten zur Überwachung statt.

5.1.3 Unabhängige Monitoringnetze

Unabhängig von den Betreibern der Kernanlagen werden von verschiedenen kantonalen und nationalen Institutionen Mess- und Warnsysteme zur radiologischen Überwachung und zur Erfassung verschiedener Umweltparameter betrieben. Die Überwachung ist dabei zum Teil auf Standorte von Kernanlagen fokussiert oder findet zur allgemeinen radiologischen oder konventionellen Überwachung der Umwelt und des geologischen Umfelds statt.

Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) ist mit der radiologischen Überwachung der Umwelt beauftragt (Art. 191 StSV). Das von der Nationalen Alarmzentrale betriebene Netz für automatische Dosisleistungsalarmierung und -messung (NADAM) umfasst 76 über die ganze Schweiz verteilte Stationen, die in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz Ortsdosisleistung und Meteodaten übermitteln. Das ENSI betreibt das Messnetz für die automatische Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK). Gegenwärtig umfasst das MADUK 57 Stationen im Umkreis von jeweils fünf Kilometer um die Kernkraftwerke. Das BAG betreibt das URAnet zur automatischen radiologischen Überwachung der Luft sowie der Flusswässer in Aare und Rhein. Mit der URAnet aero Station in Bülach besteht bereits eine Nullmessung der Radioaktivität in der Luft in geringer Distanz zum gTL.

Das BAFU und die Kantone betreiben seit 2000 im Rahmen des Programms NAQUA ein flächendeckendes Netz von Quell- und Grundwassermessstellen in der Schweiz. Zusätzlich finden weitere Überwachungen des Grundwassers auf lokaler Ebene statt. So wird im Umfeld des gTL die Grundwasserqualität verschiedener Quelfassungen durch Messungen von Grundwasserspiegel, Temperatur, Mineralgehalt, Schadstoffen und Bakterien überwacht.

Die unabhängigen Monitoringnetze stellen eine wichtige Komponente der Überwachung von Kernanlagen und so auch des gTL bzw. der Oberflächenanlage dar. Sie ergänzen die Massnahmen, die im Rahmen der Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld vorgenommen werden und können diese unabhängig bestätigen. Dies kann einen wichtigen Beitrag zur Vertrauensbildung in den verschiedenen Anspruchsgruppen leisten.

Im Bereich der geodätischen und seismischen Überwachung arbeitet die Nagra mit den Betreibern der nationalen Messnetze (Bundesamt für Landestopografie swisstopo und Schweizerischer Erdbebendienst SED) zusammen und hat deren Netze regional mit eigenen Stationen verdichtet. Siehe dazu auch Kap. 5.9 sowie Kap. 6.1. Für diese Überwachungsthemen ist die Eingliederung in die grösseren nationalen Netze wichtig, da die Stationen der Nagra allein keine ausreichende regionale Abdeckung erreichen, um aussagekräftige Daten zu liefern. Die unter Beteiligung der Nagra betriebenen Messnetze werden nicht den unabhängigen Monitoringnetzen, sondern der Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld zugeordnet.

5.2 Abgrenzungen

Im vorliegenden integralen Überwachungskonzept werden Überwachungsmassnahmen zusammengefasst, die im Zusammenhang mit der Betriebs- und Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers stehen und unter der Zielstellung gemäss Kapitel 3 erfolgen. Dies entspricht auch den Anforderungen gemäss Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03. Während Bau und Betrieb des gTL erfolgen weitere Überwachungsmassnahmen ausserhalb der Zielstellungen wie in Kapitel 3 beschrieben. Zur Abgrenzung des integralen Überwachungskonzepts von diesen, werden im Folgenden Themen eingeordnet, die nicht als Teil des integralen Überwachungskonzepts betrachtet werden. Die folgende Auflistung ist dabei nicht als vollständig zu betrachten.

Sicherung

Massnahmen, die zur Sicherung der Anlage gemäss Art. 9 KEV erforderlich sind, werden in Nagra (2025b) beschrieben.

Prozesssteuerung

Zur Steuerung verschiedener Prozesse respektive Anlagen (z.B. Lüftung) werden gewisse Überwachungsmassnahmen bzw. der Einsatz von verschiedener Messtechnik erforderlich sein. Diese werden der Prozesssteuerung zugeschrieben und sind nicht Teil des integralen Überwachungskonzepts.

Arbeitsschutz & Gesundheitsschutz

Spezifische Massnahmen zum Arbeits- und Gesundheitsschutz werden mit dem Baugesuch spezifiziert (Nagra 2024a) und sind nicht Teil des integralen Überwachungskonzepts.

Personeller Strahlenschutz

Ein personeller Strahlenschutz ist ab der ersten Annahme von Abfällen nötig und entsprechende Massnahmen werden rechtzeitig zur Erlangung der Betriebsbewilligung spezifiziert. Siehe dazu auch Nagra (2025a).

Nicht-radiologische Emissionen

Die Überwachung von nicht-radiologischen Emissionen (z.B. Lärm, Erschütterungen, Luftreinhal tung) wird in Einklang mit den nächsten Stufen der Umweltverträglichkeitsprüfung erfolgen. Die Überwachung von nicht-radiologischen Emissionen ist nicht Teil des integralen Überwachungskonzepts.

Überwachung der Bauausführung

Die Überwachung der Bauausführung zur Qualitätssicherung wird mit dem Baugesuch beschrieben und ist nicht Teil des integralen Überwachungskonzepts.

Safeguards

Mittels Safeguards-Massnahmen ist sicherzustellen, dass kein deklariertes Kernmaterial entwendet wird. Die vorgesehenen Massnahmen sind im Sicherheitsbericht dargestellt (Nagra 2025b) und fallen nicht unter das hier beschriebene integrale Überwachungskonzept.

5.3 Konkretisierung im Projektfortschritt

Gemäss den Grundsätzen (Kapitel 4) und den Erfordernissen des Bewilligungsverfahrens nach KEG ist eine schrittweise Konkretisierung und später eine periodische Überprüfung des integralen Überwachungsprogramms notwendig um:

- mögliche Änderungen am Projekt abbilden zu können,
- technologische Fortschritte gemäss Art. 36 KEV zu berücksichtigen,
- auf neue Erkenntnisse zur Tiefenlagerung zu reagieren, sowie
- auf veränderte Randbedingungen von behördlicher, politischer oder auch gesellschaftlicher Seite zu reagieren.

Erst im Rahmen des Baubewilligungsverfahrens und den damit verbundenen Festlegungen von Bauverfahren, Ausbau, etc. können relevante Messparameter und Messlokationen für die Überwachungsprogramme identifiziert werden. Aufbauend auf dem vorliegenden integralen Überwachungskonzept werden somit Konkretisierungen und Festlegungen zu Messparametern und Messlokationen später für die Bau-, Betriebs- und Beobachtungsphasen im Rahmen der Entwicklung der Überwachungsprogramme erfolgen. Zusammen ergeben diese dann das integrale Überwachungsprogramm gemäss Kap. 6.1 ENSI-G03. Durch eine schrittweise Weiterentwicklung des integralen Überwachungskonzepts entsprechend den Erfordernissen des Bewilligungsverfahrens nach KEG können Projektänderungen adäquat abgebildet werden.

Während des Betriebs und für spezifische Meilensteine der Realisierung wird das spätere integrale Überwachungsprogramm entsprechend Art. 42 KEV sowie Kap. 6.1 Bst. d ENSI-G03 periodischen Überprüfungen unterworfen und dabei allenfalls an geänderte Randbedingungen, technischen Fortschritt oder veränderte Bedingungen der Projektrealisierung angepasst.

5.4 Schnittstellen und Prozesse

Den einzelnen Überwachungsprogrammen werden verschiedene administrative Massnahmen zugeordnet, um nahtlose Schnittstellen zwischen den Überwachungsprogrammen und das Einhalten der Grundsätze zu gewährleisten.

5.4.1 Qualitätssicherung

Die Nagra verfügt über ein ISO 9001:2015 zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem und führt alle Arbeiten gemäss den darin vorgegebenen hohen Qualitätsstandards durch. Die Qualitätssicherung, auch für das integrale Überwachungsprogramm, wird entsprechend der Richtlinie ENSI-G07 (ENSI 2023b) umgesetzt. Die relevanten Prozesse des Monitorings werden im Betriebshandbuch detailliert festgelegt und beschrieben.

Die Anforderungen an die Messtechnik, besonders untertage, sind hoch. Dies zeigt die umfangreiche Erfahrung, die in verschiedenen Untertagelaboren gesammelt wurde. Die Qualifizierung der Messsysteme und Sensorik für den Einsatz untertage sowie deren Kalibrierung muss entsprechend festgelegter Qualitätskriterien erfolgen.

5.4.2 Datenmanagement und Berichterstattung

Das Datenmanagement erfolgt durch die Nagra entsprechend dem etablierten Stand der Technik und wird mindestens bis zur Entlassung aus der Kernenergiegesetzgebung fortgeführt. Dabei wird sichergestellt, dass die gesammelten Daten für eine spätere Entscheidungsfindung zur Verfügung stehen und nutzbar bleiben.

Die Ergebnisse der Überwachung sind mit der periodischen Berichterstattung zu dokumentieren und dem ENSI einzureichen (Kap. 6.1 Bst. h ENSI-G03). Die Berichterstattung zu den erhobenen Überwachungsdaten orientiert sich an den Vorgaben in Art. 37 KEV und in Anhang 5 KEV. Für derzeit laufende Messungen der hydraulischen Langzeitbeobachtungssysteme in den Tiefbohrungen erfolgt die Berichterstattung durch die Nagra derzeit z.B. jahresweise (z.B. Hayer et al. 2022, Longridge et al. 2024).

5.4.3 Wissensmanagement, Forschung und Entwicklung

Die Grundlagen für die Überwachung von geologischen Tiefenlagern wurden im Rahmen von internationalen Forschungsprojekten, u.a. auch mit Beteiligung der Nagra, gelegt. Darüber hinaus hat das intensive Forschungsprogramm der Nagra, welches in den Untertagelaboren Mont Terri und Grimsel sowie an anderen Standorten durchgeführt wurde, einen erheblichen Beitrag zum Systemverständnis geleistet. Für das Wissensmanagement ist die Fortführung eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms ein wichtiges Werkzeug.

5.5 Beweissicherung

Die Beweissicherung ist eine freiwillige Massnahme der Bauherrin und dient der Aufnahme von Bestand und Zustand fremder Sachen (wie z.B. Grundstücke, Bauten, Verkehrswege, Leitungen, Grundwasservorkommen, Quellen), die im möglichen Einflussbereich der Arbeiten liegen.

Mittels einer umfassenden Beweissicherung soll vor Baubeginn der Ausgangszustand in der Umgebung des Tiefenlagersystems aufgenommen werden. Nullmessungen (Kapitel 5.7) sind in diesem Sinne als Teil der Beweissicherung zu betrachten. Während des Baus sollen durch geeignete Überwachungsmassnahmen mögliche Einflüsse und Veränderungen wie Lage- und Zustandsänderungen oder Veränderungen der Grundwasser- und Quellverhältnisse festgehalten werden.

Die konkreten Massnahmen zur Beweissicherung werden im Zuge des Baubewilligungsgesuchs erarbeitet. Bezüglich der Beweissicherung im Rahmen der Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld wurde ein vorläufiger Massnahmenkatalog in Fanger et al. (2021) beschrieben.

5.6 Rückstellproben

Rückstellproben sind aufzubewahren und den Behörden bei Bedarf zur Verfügung zu stellen (Kap. 6.1 Bst. i ENSI-G03). Rückstellproben sollen es erlauben zu einem späteren Zeitpunkt nach Bedarf Messungen zu wiederholen oder auch neuartige Messmethodik auf ältere Proben anzuwenden. Je nach Art der Rückstellprobe kann es nötig sein, gewisse Laboruntersuchungen an frischen Proben redundant durchzuführen, da aufgrund der Alterung eine spätere gleichwertige Untersuchung nicht gewährleistet werden kann. Grundsätze, Normen und Richtlinien, die bei der Gewinnung, Analyse und Archivierung von Proben bzw. Rückstellproben zu beachten sind, wurden in Fanger et al. (2021) zusammengefasst.

5.7 Nullmessungen

In ENSI (2018) werden Vorgaben zum integralen Überwachungskonzept bezüglich durchzuführender Nullmessungen vor Inangriffnahme der Untertaganlage gemacht. Mit Nullmessungen wird der ungestörte Ausgangszustand eines Systems vor spezifischen Aktivitäten, die eine Änderung am System hervorrufen könnten, erfasst. Die bei Nullmessungen erfassten Variationen sind auf natürliche, aber auch externe anthropogene Einflüsse zurückzuführen und ergeben zeitabhängige bzw. zyklische Variationen einer Messgrösse. Für die nachfolgende Beschreibung bezeichnen wir sinngemäss alle Änderungen im System, die vor spezifischen Aktivitäten auftreten, als «natürlich».

Das Ziel von Nullmessungen ist es, diese natürlichen Variationen zu erfassen, um sie später von möglichen Änderungen, die durch spezifische Aktivitäten hervorgerufen werden, zu separieren. Dazu ist es erforderlich, gewünschte Parameter über eine repräsentative Zeitdauer vor den Aktivitäten zu erfassen. Die erforderliche Länge der Nullmessungen ist abhängig von der Grösse der zu erwartenden Störung durch die Aktivitäten im Vergleich zu den natürlichen Variationen und der Dauer von charakteristischen Veränderungen des nominal ungestörten Systems. Je nach Messgrösse können Nullmessungen auch verwendet werden, um die Sensitivität des Messsystems empirisch zu bestimmen.

Für atmosphärisch beeinflusste Systeme ist es in der Regel sinnvoll, Nullmessungen während mindestens eines Jahres durchzuführen. So können saisonale Schwankungen erfasst werden. Die gleichzeitige Aufzeichnung von meteorologischen Daten kann eine Analyse der Nullmessungen erleichtern, z.B. durch Korrelation von möglichen Änderungen der Messgrösse mit meteorologischen Daten.

Dagegen sind zu erwartende natürliche Änderungen im tiefen Untergrund gering. Je nach Art der Messgrösse kann es aber auch hier zu saisonalen Schwankungen kommen. Häufig sind jedoch Änderungen am System, die durch Aktivitäten hervorgerufen werden, deutlich grösser als deren natürliche Schwankung. Unter diesen Bedingungen sind Nullmessungen von deutlich kürzerer Dauer ausreichend.

Nullmessungen stellen auch eine wesentliche Komponente der Beweissicherung dar. Darüber hinaus können sie auch als Grundlage für die Festlegung von Interventionswerten herangezogen werden. Nicht alle Nullmessungen müssen über die initiale Phase der Ermittlung des Ausgangszustands hinaus fortgeführt werden. Eine konzeptionelle Diskussion der in den Überwachungsprogrammen geplanten Nullmessungen erfolgt zusammen mit den Überwachungsprogrammen in Kapitel 6.

5.8 Zusammenhang mit dem Sicherheitsnachweis

Die eingelagerten Abfälle führen zu bestimmten Wechselwirkungen mit dem System der technischen Barrieren und dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich; diese Wechselwirkungen werden als lagerbedingte Einflüsse bezeichnet. Die erwarteten Einflüsse werden in Nagra (2024d) detailliert beschrieben. Innerhalb der Beobachtungsphase können vor allem Prozesse im Zusammenhang mit dem Bau sowie mit der frühen Entwicklung nach der Einlagerung der Abfälle beobachtet werden. Die sicherheitsrelevanten Parameter (z.B. Druck und Temperatur) erreichen ihre Maximalwerte erst nach mehreren Hundert bis mehreren Tausend Jahren. Die Überprüfung der Einhaltung der Designgrenzen durch eine Überwachung ist daher nicht direkt möglich. Eine Überwachung kann die Langzeitsicherheit somit nicht beweisen.

Die Überwachung des gTL übernimmt zudem keine Sicherheitsfunktionen und trägt damit nicht zur Langzeitsicherheit bei. Dennoch kann die Überwachung helfen, die Bewertungsbasis für den Sicherheitsnachweis und das bestehende Prozessverständnis zu bestätigen. Durch einen Vergleich von Beobachtungen mit Prognosen über die Entwicklung des Lagers leistet die Überwachung einen Beitrag zur Vertrauensbildung bei verschiedenen Anspruchsgruppen, dass die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers gewährleistet ist.

Nach Abschluss der Beobachtungsphase wird von der Nagra der Verschluss des gTL beantragt. Das Gesuch zum Verschluss hat einen aktualisierten Sicherheitsnachweis zu enthalten, welcher die Erkenntnisse der Beobachtungsphase berücksichtigt (Kap. 7.6 Bst. d ENSI-G03). Die im Rahmen der integralen Überwachung durchgeführten Massnahmen werden daher auf das Lagerkonzept und die spezifischen Bedürfnisse zur Bestätigung des Sicherheitsnachweises abgestimmt.

5.9 Integration mit Daten der Standortcharakterisierung

Die Überwachung soll Messungen aus der Standortcharakterisierung berücksichtigen (Kap. 6.1 Bst. f ENSI-G03). Im Rahmen der Standorterkundung wurden umfangreiche Datensätze erhoben (Nagra 2024b) die zusammen als geologischer Datensatz bezeichnet werden. Im Rahmen der Standortsuche für das gTL wurde der geologische Datensatz etappenweise ergänzt. Dieses Vorgehen wird beibehalten und die im Rahmen der Überwachungsprogramme gewonnenen Daten werden weiterhin in den geologischen Datensatz einfließen.

Ferner sind aus der Standortcharakterisierung bereits Messsysteme in Betrieb, die regionale tektonische Prozesse überwachen. Die Nagra hat Permanentstationen errichtet, um Deformationen in der Nordschweiz zu messen (Studer & Zanini 2013). Der Schweizerische Erdbebendienst (SED) betreibt seismologische Netzwerke mit nationalem und regionalem Fokus. Das seismologische Messnetz wurde durch Beiträge der Nagra wiederholt ergänzt und die Instrumente auf den aktuellen Stand der Technik gebracht (Plenkens 2014, Spillmann et al. 2022). Eine aktuelle Darstellung des Netzes und der resultierenden Daten geben Diehl et al. (2023). Das seismologische Netz wird weiterhin durch den Schweizerischen Erdbebendienst betrieben, und die Nagra stellt eine geeignete Abdeckung für die Überwachung des gTL sicher. So wurde in der Bohrung Bülach-1-1 ein Seismometer im Tiefenbereich des Wirtgesteins installiert (Spillmann et al. 2022). Diese laufenden Aktivitäten stellen Nullmessungen dar und werden im Rahmen der Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld fortgesetzt.

5.10 Auswirkungen auf Langzeitsicherheit

Vorkehrungen zur Überwachung dürfen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit bzw. die Barrierenwirksamkeit haben (Art. 11 Abs. 2 KEV). Weiterhin soll der Einfluss der für die Überwachung vorgesehenen Installationen auf die Langzeitsicherheit aufgezeigt und minimiert werden (Kap 6.1 Bst. g ENSI-G03).

Die Erfahrung aus Experimenten in Untertagelaboren zeigt, dass es durch Kabelkanäle oder auch einzelne Kabel und Leitungen zu Leckagen kommen kann. Solche Fluidwegsamkeiten sind der Barrierenwirksamkeit abträglich und entsprechend auszuschliessen. Die Verwendung von Bohrungen im Bereich des Hauptlagers und des Pilotlagers ist auf das Nötigste zu beschränken und Abstände, im Einklang mit den Anforderungen des Sicherheitsnachweises (Nagra 2024g), müssen eingehalten werden, um die Funktionstüchtigkeit des Mehrfachbarrierensystems nicht unzulässig einzuschränken.

Eine erste systematische Betrachtung möglicher Auswirkungen von Monitoring-Equipment auf die Langzeitsicherheit wurde im Rahmen des MODATS Projekts durchgeführt (Bertrand et al. 2024). Basierend auf der Methodik der Betrachtung von Features, Events & Processes (Nagra 2024c) wurden mögliche Einflüsse auf Prozesse in einem geologischen Tiefenlager aufgezeigt. Dabei wurde neben der möglichen unbeabsichtigten Schaffung von Wegsamkeiten durch Leitungen auch der zusätzliche Eintrag von Material, das Korrosion und anderen chemischen Alterungsprozessen ausgesetzt ist, betrachtet.

Die Überwachungsprogramme werden unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse so umgesetzt, dass Vorkehrungen zur Erleichterung der Überwachung die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss des Lagers nicht beeinflussen.

6 Exemplarische Umsetzung der Überwachung des geologischen Tiefenlagers

Gemäss Kap. 2.6 in ENSI 33/649 (ENSI 2018) soll für die Überwachung in den verschiedenen Phasen begründet dargelegt werden, welche Prozesse und Parameter wichtig sind und wie diese zu erfassen sind.

Im Folgenden wird eine exemplarische Umsetzung des Überwachungskonzepts dargestellt. Ausgehend von den übergeordneten Zielen (Kapitel 3) und den Grundsätzen (Kapitel 4) werden spezifische Anforderungen definiert, welche an die jeweiligen Überwachungsprogramme gestellt werden. Anschliessend werden die zu überwachenden Prozesse bzw. Parameter eingeordnet.

Während für die Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld bereits Messungen laufen und detaillierte Konzepte vorliegen, sind Konzepte für die anderen Überwachungsprogramme weniger weit fortgeschritten. Der Detaillierungsgrad des Überwachungskonzepts wird sich in Einklang mit der Konkretisierung des Vorhabens und dem Bewilligungsverfahren gemäss gesetzlichen und behördlichen Vorgaben weiterentwickeln (vgl. Kapitel 5.3).

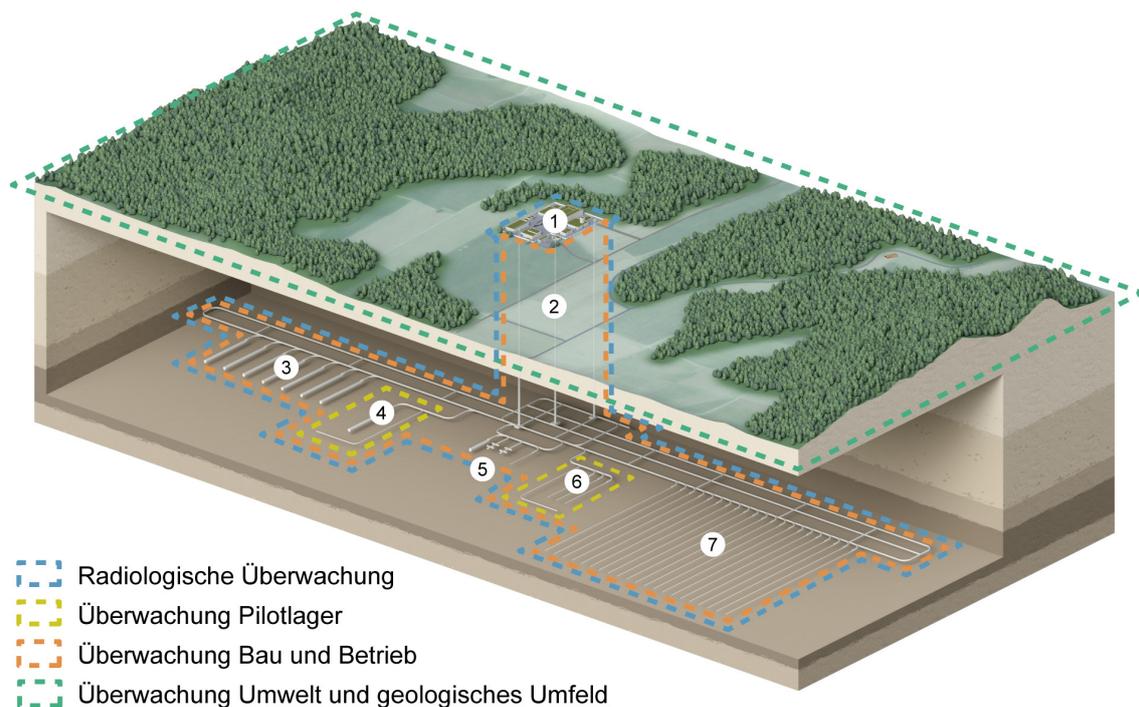


Fig. 6-1: Schematische Anordnung der Strukturen des Kombilagers und räumliche Zuordnung der Überwachungsprogramme

Die umrandeten Bereiche skizzieren die räumliche Zuordnung der Überwachungsprogramme zu den Strukturen der Gesamtanlage.

Legende: 1) Oberflächenanlage; 2) Zugänge; 3) Hauptlager SMA; 4) Pilotlager SMA; 5) Testbereiche; 6) Pilotlager HAA; 7) Hauptlager HAA.

6.1 Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld

Mit dem Überwachungsprogramm «Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld» (ÜUG) werden die Anforderungen einer messtechnischen Überwachung des geologischen Umfelds sowie der radiologischen Umweltüberwachung gemäss Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03 umgesetzt.

Ein Konzept für die Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld, inkl. der radiologischen Umweltüberwachung, ist in Fanger et al. (2021) zu finden. Hier werden nur die für das integrale Überwachungskonzept wesentlichen Punkte dargestellt.

6.1.1 Anforderungen

Das Programm zur Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld umfasst Überwachungsprojekte, die von der Oberfläche aus oder auch satellitengestützt durchgeführt werden. Die Anforderungen an die ÜUG können wie folgt zusammengefasst werden:

- Erheben von Beobachtungen zur Beweissicherung bezüglich des Ausgangszustands von Umwelt und geologischem Umfeld.
- Überwachung der möglichen Einflüsse auf das Grundwasser und die Umwelt durch bauliche Aktivitäten oder den Betrieb des gTL.
- Radiologische Umweltüberwachung gemäss Kap 6.1 Bst. b ENSI-G03
- Fortführung von Messreihen, die als Nullmessungen zur Standortcharakterisierung begonnen wurden.

6.1.2 Prozesse und Parameter

Im Betrieb des gTL wird von keiner Freisetzung von Radioaktivität ausgegangen, da alle radioaktiven Materialien konditioniert und verpackt gehandhabt werden. Für die ÜUG werden verschiedene Messstellen installiert, um geogene Emissionen zu erfassen und zu bestätigen, dass keine Freisetzung erfolgt.

Im Rahmen von ÜUG werden Informationen zu den lokalen, natürlichen atmosphärischen Prozessen (Wetter, Klima) aufgezeichnet. Diese Daten dienen der Interpretation weiterer Überwachungsdaten. Fanger et al. (2021) schlagen wiederholte, radiologische Messungen der Bodenluft vor. Ergänzt werden kann dies durch die Analyse von Bodenproben.

Um das Betriebsgelände sind hydrogeologische Messreihen in flachen Grundwassermessstellen und Oberflächengewässern vorgesehen. Daten aus untiefen Grundwassermessstellen dienen dem Nachweis, dass Bestimmungen zum Grundwasserschutz eingehalten werden.

Ein möglicher Einfluss des gTL auf tieferliegende Grundwasserstockwerke wird in Tiefbohrungen beobachtet. Die Nagra betreibt gegenwärtig ein Langzeitbeobachtungssystem in der Tiefbohrung Stadel-3-1, etwa 1 km östlich des Anlagenperimeters (Schoenball et al. 2023). Die aktuell gewonnenen Daten in Stadel-3-1 stellen eine Nullmessung der Porendrücke sowie der Temperatur im Wirtgestein, in Rahmengesteinen und in den relevanten tiefen Aquiferen dar.

Die Überwachung neotektonischer Prozesse dient zur Ergänzung der Informationen zur Neotektonik von aktiven Störungszonen. Ein Permanentnetz zur regionalen geodätischen Überwachungen sowie seismologische Überwachungssysteme sind bereits aktiv (z.B. Studer & Zanini 2013, Plenkers 2014). Diese Systeme bleiben in Betrieb und werden an die künftigen Bedürfnisse angepasst.

6.1.3 Umsetzung

Für die Überwachung von Umwelt und geologischen Umfeld existieren umfangreiche Technologien und diese entsprechen dem Stand der Technik. Die Implementierung erfolgt mit auf dem Markt verfügbaren Technologien, die sich auch im Langzeitbetrieb bei der Nagra oder bei vergleichbaren Projekten und Infrastrukturen bewährt haben.

Die konkrete Planung der ÜUG ist derzeit im Gange und ein entsprechendes Überwachungsprogramm, mit einer detaillierten, standortbezogenen Beschreibung der Umsetzung, wird rechtzeitig vor dem nötigen Beginn der Nullmessungen erstellt (vgl. Kapitel 5.1.2).

Der Standort weist keine Eigenschaften auf, die ein Hindernis für die Realisierung der ÜUG darstellen.

6.1.4 Nullmessungen

Verschiedene Nullmessungen (Klima, Geodäsie, Seismizität, flaches und tiefes Grundwasser) laufen bereits. Eine mögliche Umsetzung (inkl. Parameter und Dauer) von weiteren Nullmessungen für die ÜUG ist in Fanger et al. (2021) beschrieben. Falls weitere Nullmessungen notwendig sein sollten, werden diese im entsprechenden Überwachungsprogramm beschrieben und rechtzeitig initiiert.

6.2 Überwachung während Bau und Betrieb

Mit dem Überwachungsprogramm «Überwachung während Bau und Betrieb» (ÜBB) werden die Anforderungen einer messtechnischen Überwachung während Bau und Betrieb gemäss Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03 umgesetzt.

6.2.1 Anforderungen

ÜBB umfasst Überwachungsprojekte, die in den untertägigen Bauten als Massnahmen der Bau- und Betriebssicherheit durchgeführt werden. Die Anforderungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Überwachung zur Beurteilung der Bau- und Betriebssicherheit der untertägigen Bauwerke und der technischen Barrieren.
- Kontinuierliche Ergänzung der geologischen und hydrogeologischen Datenbasis für die Beurteilung der langfristigen Entwicklung des geologischen Tiefenlagers.

6.2.2 Prozesse und Parameter

Die Ziele des ÜBB können unter anderem mittels Überwachung der hydrogeologischen und geotechnischen Bedingungen, sowie des Systemverhaltens zwischen Gebirge und Ausbau erfüllt werden. Dies wird gemäss der gängigen Überwachungspraxis von Untertagbaustellen bzw. Untertagbauwerken sowie den relevanten Grundsätzen und Bestimmungen, z. B. des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA), erfolgen.

6.2.3 Umsetzung

Die Überwachung von Bau und Betrieb von Untertaganlagen ist gängige Praxis in der Schweiz und international. Die Umsetzung am Standort erfolgt daher mit auf dem Markt verfügbaren Technologien und Methoden. Eine Präzisierung des Überwachungsprogramms erfolgt mit den Bau- bzw. Betriebsbewilligungsgesuchen.

6.2.4 Nullmessungen

Für manche Parameter der ÜBB kann eine Nullmessung sinnvoll sein. Da der Einfluss des Baus auf zu überwachende Parameter gegenüber den natürlichen Schwankungen der entsprechenden Messparameter im Allgemeinen gross ist, kann von kurzen Messreihen für die Nullmessung abgegangen werden.

6.3 Radiologische Überwachung

Mit der radiologischen Überwachung werden die Anforderungen einer radiologischen Überwachung während des nuklearen Betriebs (Nagra 2024a) gemäss Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03 umgesetzt.

6.3.1 Anforderungen

Die radiologische Überwachung umfasst Überwachungsprojekte, die in den untertägigen und übertägigen Bauten während des nuklearen Betriebs zur Gewährleistung des Strahlenschutzes gemäss StSV durchgeführt werden.

6.3.2 Prozesse und Parameter

Vor Annahme der ersten Abfälle werden Massnahmen der radiologischen Überwachung gemäss den geltenden Vorgaben in der StSV sowie den Richtlinien ENSI-G12 (ENSI 2021) und ENSI-G13 (ENSI 2015) umgesetzt. Für Details wird dazu auf Nagra (2025a) verwiesen.

6.3.3 Umsetzung

Die radiologische Überwachung von Kernanlagen ist gängige Praxis in der Schweiz und international. Die Umsetzung am Standort erfolgt daher mit auf dem Markt verfügbaren Technologien und Methoden. Eine Präzisierung des Überwachungsprogramms erfolgt im Zuge des weiteren Bewilligungsverfahrens nach KEG.

6.3.4 Nullmessungen

Im Rahmen der radiologischen Überwachung sind keine Nullmessungen erforderlich.

6.4 Überwachung des Pilotlagers

Das Pilotlager ist ein Teil des gTL nach Art. 64 KEV. Darin soll das Verhalten des Mehrfachbarrierensystems bis zum Ablauf der Beobachtungsphase überwacht und somit ein Beitrag zur Bestätigung des Sicherheitsnachweises geleistet werden (Art. 66 Abs. 1 KEV). Die Überwachung des Pilotlagers ist Teil des integralen Überwachungsprogramms (Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03). Ein Konzept zur Überwachung des Pilotlagers wurde in Nagra (2021b) dargestellt.

6.4.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die Überwachung des Pilotlagers können wie folgt zusammengefasst werden:

- Keine Beeinträchtigung der Barrierenwirksamkeit der natürlichen und technischen Barrieren gemäss Art. 11 KEV Abs. 2 Bst. c;
- Gewährleistung der Übertragbarkeit der gewonnenen Daten des Pilotlagers auf das Hauptlager;
- Aufnahme der Verhältnisse vor Einlagerungsbeginn und Bestimmung des Ausgangszustands im Wirtgestein in-situ zur Ergänzung des geologischen Datensatzes;
- Erfassen der Einflüsse der Lagerkammern mit den Abfällen und dem Verfüllmaterial auf die umgebende Geologie;
- Frühzeitiges Erkennen von unerwarteten oder ungewünschten Entwicklungen der sicherheitsrelevanten Parameter, sofern eine Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit gemäss Art. 11 KEV Abs. 2 Bst. c ausgeschlossen werden kann.

6.4.2 Prozesse und Parameter

Für die Umsetzung der Überwachung des Pilotlagers wird auf die Resultate internationaler Projekte zu Strategien und Methoden zur Überwachung zurückgegriffen. Insbesondere sind hier die Projekte MoDeRn, Modern2020 sowie MODATS (White 2014, White & Scourfield 2019, White et al. 2024) zu nennen.

Die Auswahl von zu überwachenden Prozessen und Parameter wird gemäss einem objektiven, strukturierten Ansatz erfolgen. So wurde z.B. von der Nagra eine Methodik zur Identifizierung potenzieller Parameter für die Überwachung von HAA bzw. SMA-Lagern entwickelt. Diese basiert auf dem im Rahmen des Modern2020 Projektes entwickeltem Auswahlverfahren für Messparameter (Farrow et al. 2019). Die Methodik wurde auf das HAA-Lagerkonzept angepasst und ist in Nagra (2021b) dargestellt.

Die Umsetzung der Überwachung des Pilotlagers wird im Zuge des weiteren Projektfortschritts konkretisiert.

6.4.3 Umsetzung

Am Markt sind umfangreiche Lösungen verfügbar, die sich für die Überwachung des Pilotlagers am Standort anwenden lassen. Dennoch begleitet die Nagra weiterhin Experimente in Untertagelaboren, um den möglichen Einsatz neuer Technologien unter gTL-Bedingungen zu evaluieren. Dadurch soll dem Fortschritt der Monitoring-Technologie und Datenübertragungstechnik bis zur Implementierung genügend Rechnung getragen werden.

6.4.4 Nullmessungen

Eine detailliertere Planung der Nullmessung im Pilotlager erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.

7 **Ausblick**

Für die nächsten Realisierungsphasen bzw. die zugehörigen Bewilligungsschritte gemäss KEG wird das integrale Überwachungskonzept themenspezifisch weiter präzisiert. Dabei wird zunächst das Überwachungskonzept für die Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld weiter konkretisiert, so dass die erforderlichen Nullmessungen rechtzeitig vor Beginn der Bautätigkeiten aufgenommen werden können. Im Hinblick auf die Baubewilligung erfolgt dann auch die Entwicklung der Überwachung während Bau und Betrieb. Die weiteren Überwachungsprogramme werden schrittweise in Hinblick auf die Betriebsbewilligung weiterentwickelt.

8 Literaturverzeichnis

- Bertrand, J., Manukyan, E., Dick, P., Giese, R., Pirttialo, T., Hansen, J., Perrot, J., Doizi, D., Vogt, T., Sapon, M. & Parsons, S. (2024): Synthesis report on Innovative and Enhanced Equipment for Repository Monitoring. Deliverable D17.7 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.
- Diehl, T., Madritsch, H., Schnellmann, M., Spillmann, T., Brockmann, E. & Wiemer, S. (2023): Seismotectonic evidence for present-day transtensional reactivation of the slowly deforming Hegau-Bodensee Graben in the northern foreland of the Central Alps. *Tectonophysics* 846, 229659. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229659.
- ENSI (2015): Messmittel für ionisierende Strahlung. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G13/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (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.
- European Commission (2004): Thematic network on the role of monitoring in a phased approach to geological disposal of radioactive waste. Nuclear Science and Technology. Final Report EUR 21025. European Commission, Brussels.
- Fanger, L., Müller, H. & Vogt, T. (2021): Konzeptbericht Überwachung Umwelt und geologisches Umfeld. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-28 Rev. 1.
- Farrow, J., White, M., Scourfield, S., Chabiron, A., Jobmann, M., Gazul, R., Frieg, B., Hart, J., Rosca-Bocancea, E., Schröder, T., Wildenborg, A., Karvonen, T., Pere, T.H.J., Reijonen, H., Morosini, M., Luterkort, D. & Vokal, A. (2019): Modern2020: Deliverable D2.2: Monitoring Parameter Screening: Test Cases. European Commission, Horizon2020.
- Hayer, J., Fanger, L., Firat Lüthi, B. & Vogt, T. (2022): Sondierbohrung Benken Langzeitbeobachtung 2021: Dokumentation der Messdaten. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-15.
- IAEA (2011): Disposal of radioactive waste. Specific Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.

- Longridge, D., Vogt, T. & Pechstein, A. (2024): Datenbericht Langzeitbeobachtung Benken, Marthalen-1-1, Bözberg-1-1, Stadel-3-1, Dokumentation der Messdaten 2022. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-35.
- Nagra (2021a): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.
- Nagra (2021b): Pilot Repository Monitoring: First Concept Report. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-11.
- Nagra (2023): Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM-RBG. Nagra Technischer Bericht NTB 22-05.
- Nagra (2024a): Anlagen- und Betriebskonzept für das geologische Tiefenlager. Nagra Technischer Bericht NTB 24-11.
- Nagra (2024b): Geosynthesis of Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-17.
- Nagra (2024c): 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 (2024d): Phenomenological Description of the Evolution of a Geological Repository for Radioactive Waste in Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-20 Rev. 1.
- Nagra (2024e): Post-Closure Safety Report. Nagra Technical Report NTB 24-10 Rev. 1.
- Nagra (2024f): Radiological Consequence Analysis for a Deep Geological Repository in Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 24-18.
- Nagra (2024g): Safety and Repository Concept and Provisional Design. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-18 Rev. 1.
- Nagra (2024h): Synthesis of the Performance Assessment for a Deep Geological Repository for Radioactive Waste. Nagra Technical Report NTB 24-22 Rev. 1.
- Nagra (2025a): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-01.
- Nagra (2025b): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-04.
- Plenkens, K. (2014): Das neue Schwachbebennetz in der Nordschweiz: Standortsuche, Standortauswahl, realisierte Stationen. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-56.
- Schoenball, M., Vogt, T., Kech, M. & Rösli, U. (2023): Long-term Monitoring System of the Stadel-3 Borehole: Installation Report. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-50.
- Spillmann, T., Schoenball, M., Tanner, R. & Diehl, T. (2022): Ergänzung Schwachbebennetz in der Nordschweiz: Installation Bohrlochseismometer Bülach-1. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-26.

- Studer, M. & Zanini, M. (2013): Aufbau und Betrieb eines eigenständigen CORS-GNSS Netzes. Kurzbericht (für interessierte Dritte). Nagra Arbeitsbericht NAB 10-14.
- White, M. (2014): Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis. MoDeRn Deliverable D-6.1. European Commission, Brussels.
- White, M., Haines, T. & Bertrand, J. (2024): MODATS WP Synthesis: Confidence in Monitoring Data. Deliverable D17.9 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593.
- White, M. & Scourfield, S. (2019): Deliverable D6.5: Modern2020 Project Synthesis Repository Monitoring: Strategies, Technologies and Implementation. European Commission, Horizon2020.

Anhang A Vorgaben und Umsetzung im integralen Überwachungskonzept

Tab. A-1: Vorgaben und Verweise auf deren Umsetzung im integralen Überwachungskonzept

Quelle	Vorgabe	Umsetzung
Art. 13 Abs. 1 Bst. c KEG	Die Rahmenbewilligung kann erteilt werden, wenn: ein Konzept für die Stilllegung oder für die Beobachtungsphase und den Verschluss der Anlage vorliegt;	Dieser Bericht
Art. 22 KEG	¹ Der Bewilligungsinhaber ist für die Sicherheit der Anlage und des Betriebs verantwortlich. ² Dazu muss er insbesondere: [...] k. den Plan für die Stilllegung oder das Projekt für die Beobachtungsphase und den Plan für den Verschluss der Anlage nachführen. [...]	Kapitel 5.3
Art. 39 Abs. 1 KEG	¹ Der Eigentümer des geologischen Tiefenlagers muss ein aktualisiertes Projekt für die Beobachtungsphase und ein Projekt für den allfälligen Verschluss vorlegen, wenn: a. die Einlagerung der radioaktiven Abfälle abgeschlossen ist; [...]	Kapitel 5.3
Art. 11 Abs. 2 KEV	Ein geologisches Tiefenlager ist so auszulegen, dass: [...] c. Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Lagers oder zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss des Lagers nicht beeinträchtigen; [...]	Kapitel 4.1, 6.4.1
Art. 23 KEV	Der Gesuchsteller für eine Rahmenbewilligung hat folgende Gesuchsunterlagen einzureichen: [...] d. das Konzept für die Stilllegung oder für die Beobachtungsphase und den Verschluss; [...]	Dieser Bericht
Art. 36 Abs. 1 KEV	Der Bewilligungsinhaber hat die Entwicklung der fachbezogenen Wissenschaft, insbesondere Erkenntnisse aus der Forschung, zu verfolgen und zu prüfen, inwieweit, daraus Erkenntnisse für die Sicherheit seiner Anlage abgeleitet werden können.	Kapitel 5.3, 5.4.3

Quelle	Vorgabe	Umsetzung
Art. 36 Abs. 2 KEV	<p>Er hat die Entwicklung der Technik, einschliesslich Organisation und Personal, zu verfolgen und zu prüfen, inwieweit daraus Erkenntnisse für die Sicherheit und die Sicherung der eigenen Anlage abgeleitet werden können. Massgebend sind dafür insbesondere:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. die anerkannten technischen in- und ausländischen Normen; b. die kerntechnischen Regelwerke des Lieferlandes der Kernanlage und anderer Länder; c. die Empfehlungen internationaler Gremien; d. der Stand der Technik in vergleichbaren Kernanlagen und in anderen relevanten technischen Anlagen. 	Kapitel 5.3, 5.4.3
Art. 37 Abs. 1 KEV	Der Bewilligungsinhaber hat dem ENSI die Berichte zur Beurteilung des Zustandes und des Betriebs der Anlage nach Anhang 5 einzureichen.	Kapitel 5.4.2
Art. 42 Abs. 1 KEV	Der Inhaber einer Betriebsbewilligung hat den Plan für die Stilllegung der Kernanlage oder bei einem geologischen Tiefenlager das Projekt für die Beobachtungsphase und den Plan für den Verschluss alle zehn Jahre zu überprüfen und nachzuführen.	Kapitel 5.3
Art. 42 Abs. 2 KEV	<p>Eine Nachführung ist zudem erforderlich, wenn:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. wesentliche Änderungen an der Anlage vorgenommen wurden; b. wesentliche Anforderungen an die Stilllegung oder an die Beobachtungsphase und den Verschluss geändert wurden; c. dies wesentliche Entwicklungen der Technik verlangen. 	Kapitel 5.3

Quelle	Vorgabe	Umsetzung
Art. 66 KEV	<p>¹ Im Pilotlager ist das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase zu überwachen. Bei der Überwachung sind im Hinblick auf den Verschluss Daten zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises zu ermitteln.</p> <p>² Die Ergebnisse der Überwachung müssen auf die Vorgänge im Hauptlager übertragbar sein. Sie bilden eine Grundlage für den Entscheid über den Verschluss des Tiefenlagers.</p> <p>³ Bei der Auslegung des Pilotlagers sind folgende Grundsätze zu beachten:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse müssen mit denjenigen des Hauptlagers vergleichbar sein. b. Das Pilotlager muss vom Hauptlager räumlich und hydraulisch getrennt sein. c. Die Bauweise des Pilotlagers und die Art der Einlagerung der Abfälle und der Verfüllung müssen dem Hauptlager entsprechen. d. Das Pilotlager muss eine repräsentative kleine Menge von Abfällen enthalten. 	Kapitel 6.4
Art. 68 Abs. 1 KEV	Der Eigentümer eines geologischen Tiefenlagers hat im aktualisierten Projekt für die Beobachtungsphase die nach Abschluss der Einlagerungen vorgesehenen Massnahmen zur Überwachung des Tiefenlagers zu umschreiben. Dabei hat er auch die Dauer der Beobachtungsphase vorzuschlagen.	Kapitel 5.3
Art. 72 Abs. 1 KEV	Die aus erdwissenschaftlichen Untersuchungen oder während des Baus eines geologischen Tiefenlagers gewonnenen erdwissenschaftlichen Daten sind der geologischen Informationsstelle des Bundes zu übermitteln.	Kapitel 5.4.2
Art. 72 Abs. 2 KEV	Die geologische Informationsstelle des Bundes und derjenige, der nach Absatz 1 erdwissenschaftliche Daten abgeben muss, regeln vertraglich den Zugang zu diesen Daten und deren Verwendung.	Kapitel 5.4.2
Kap. 6.1 Bst. a ENSI-G03	Für die Bau-, Betriebs- und gegebenenfalls Nachverschlussphase eines geologischen Tiefenlagers ist ein integrales Überwachungsprogramm zu erstellen.	Dieser Bericht
Kap. 6.1 Bst. b ENSI-G03	Das integrale Überwachungsprogramm hat mindestens die Überwachung des geologischen Umfelds, die radiologische Umweltüberwachung, die radiologische Überwachung während der Betriebsphase, die Überwachung im Pilotlager sowie die messtechnische Überwachung während Bau und Betrieb zu umfassen.	Kapitel 5.1
Kap. 6.1 Bst. c ENSI-G03	Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Überwachungsaspekten ist im Überwachungsprogramm aufzuzeigen.	Kapitel 5

Quelle	Vorgabe	Umsetzung
Kap. 6.1 Bst. d ENSI-G03	Das Überwachungsprogramm muss von den Entsorgungspflichtigen periodisch sowie zu den Bewilligungsgesuchen des geologischen Tiefenlagers auf seine Eignung hin geprüft, nach Bedarf aktualisiert und dem ENSI eingereicht werden.	Kapitel 5.3
Kap. 6.1 Bst. e ENSI-G03	Die Überwachung eines geologischen Tiefenlagers muss rechtzeitig und spätestens mit der Rahmenbewilligung aufgenommen und solange fortgeführt werden, bis das geologische Tiefenlager nicht mehr der Kernenergiegesetzgebung untersteht.	Kapitel 5.1.2
Kap. 6.1 Bst. f ENSI-G03	Die Überwachung hat die Messungen aus der Standortcharakterisierung zu berücksichtigen.	Kapitel 5.9
Kap. 6.1 Bst. g ENSI-G03	Der Einfluss der für die Überwachung vorgesehenen Installationen auf die Langzeitsicherheit ist aufzuzeigen und zu minimieren.	Kapitel 5.10
Kap. 6.1 Bst. h ENSI-G03	Die Ergebnisse der Überwachung sind mit der periodischen Berichterstattung zu dokumentieren und dem ENSI einzureichen.	Kapitel 5.4.2
Kap. 6.1 Bst. i ENSI-G03	Rückstellproben sind aufzubewahren und den Behörden bei Bedarf zur Verfügung zu stellen.	Kapitel 5.6 sowie Fanger et al. (2021)
ENSI 33/649, Kap. 2.6	Der Gesuchsteller hat mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für den gewählten Standort ein integrales Konzept für die Überwachung einzureichen.	Dieser Bericht
ENSI 33/649, Kap. 2.6	Dieses erstreckt sich über alle Phasen der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers (inkl. Beobachtungsphase) und umfasst die relevanten Aspekte der Überwachung.	Kapitel 5.1
ENSI 33/649, Kap. 2.6	Das integrale Überwachungskonzept hat die Vorgaben in der Richtlinie ENSI-G03 zu berücksichtigen.	Siehe Verweise in dieser Tabelle
ENSI 33/649, Kap. 2.6	Für die Überwachung in den verschiedenen Phasen ist begründet darzulegen, welche Prozesse und Parameter wichtig sind und wie diese zu erfassen sind.	Kapitel 6 und Verweise darin
ENSI 33/649, Kap. 2.6	Im Konzept ist die geplante Archivierung der genommenen Proben und gesammelten Daten darzustellen.	Kapitel 5.4.2, 5.6 sowie Fanger et al. (2021)

Quelle	Vorgabe	Umsetzung
ENSI 33/649, Kap. 2.6	Die Nullmessung für ein geologisches Tiefenlager muss rechtzeitig vor Inangriffnahme der Untertagebauwerke aufgenommen werden, damit für die Beweissicherung genügend aussagekräftige Daten zur Verfügung stehen. Daher ist für jeden Parameter die geeignete Messmethodik, die notwendige räumliche und zeitliche Dichte an Daten, der benötigte Zeitbedarf bis zum Erreichen einer geeigneten Zeitreihe sowie der daraus abgeleitete Beginn der Messungen zu diskutieren.	Kapitel 5.7 sowie Fanger et al. (2021)
ENSI 33/649, Kap. 2.6	Darüber hinaus hat der Gesuchsteller darzulegen, ob und wie bisherige Untersuchungen zur detaillierten Standortcharakterisierung in der Phase nach der Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs z. B. für Langzeit- oder Nullmessungen genutzt werden.	Kapitel 5.9

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

Begriff	Erläuterung	Referenz
Arbeitsprogramm	Spezifische Beschreibung der Umsetzung z.B. eines Überwachungsprogramms oder Überwachungsprojekts	
BAG	Bundesamt für Gesundheit	
Beobachtungsphase	Längerer Zeitraum, während dessen ein geologisches Tiefenlager vor dem Verschluss überwacht wird und die radioaktiven Abfälle ohne grossen Aufwand zurückgeholt werden können.	Art. 3 Bst. a KEG
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat	
gTL	Geologisches Tiefenlager	
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)	
IAEA	International Atomic Energy Agency	
Integrales Überwachungskonzept	Konzeptionelle Beschreibung der Überwachungsmaßnahmen gemäss Kap. 6 ENSI-G03 und für alle Realisierungsphasen des gTL. Das integrale Überwachungskonzept führt mehrere Überwachungskonzepte zusammen und skizziert ihren Zusammenhang und deren Schnittstellen.	
Integrales Überwachungsprogramm	Beschreibung der Überwachungsmaßnahmen gemäss Kap. 6 ENSI-G03 und für alle Realisierungsphasen des gTL. Das integrale Überwachungsprogramm führt mehrere Überwachungskonzepte und Überwachungsprogramme zusammen und beschreibt detailliert deren Schnittstellen. Das integrale Überwachungsprogramm wird erstmalig mit dem Baugesuch erstellt und während der Realisierung des Vorhabens weiterentwickelt, periodisch überprüft und aktualisiert.	
KEG	Kernenergiegesetz	
KEV	Kernenergieverordnung	
Langzeitsicherheit	Langzeitsicherheit bezeichnet die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers für Mensch und Umwelt nach dessen Verschluss.	ENSI-G03
Monitoring	In diesem Bericht werden die Begriffe Monitoring und Überwachung synonym verwendet.	
NAB	Nagra Arbeitsbericht	
Nachverschlussphase	Zeitraum nach ordnungsgemässen Verschluss des geologischen Tiefenlagers	ENSI-G03
Natürliche Barriere	Eine natürliche Barriere ist ein geologisches Umfeld eines Tiefenlagers, das gemäss Sicherheitskonzept passiv zur Rückhaltung der Radionuklide beiträgt.	ENSI-G03

Begriff	Erläuterung	Referenz
Nullmessung	Referenzmessung zur Bestimmung des ungestörten Ausgangszustandes, bzw. seiner natürlichen Variationen.	
NTB	Nagra Technischer Bericht	
Oberflächenanlage	Die Oberflächenanlage umfasst die Gesamtheit der Anlagen (Bauwerke, Installationen und Geräte) an der Oberfläche (oder in Oberflächennähe) zur Annahme radioaktiver Abfälle, zur Bereitstellung für die Einlagerung inklusive Anlieferung und Rückschub aller dazu erforderlichen Behälter und Materialien, zum Verlad für den Transport der Tiefenlagerbehälter, Verfüll- und Versiegelungsmaterialien sowie für alle erforderlichen Nebenprozesse (z. B. Versorgungs- und Entsorgungseinrichtungen).	Nagra (2024a)
Pilotlager	Das Pilotlager ist ein eigenständiger, vom Hauptlager abgetrennter Teil des geologischen Tiefenlagers, in dem das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase überwacht wird.	ENSI-G03
Safeguards	Sicherungsmaßnahmen im Rahmen des Vertrages über die Nichtverbreitung von Kernwaffen.	
SED	Schweizerischer Erdbebendienst	
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein	
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle	
StSV	Strahlenschutzverordnung	
Technische Barriere	Eine Technische Barriere ist eine technische Komponente, die über den Verschluss hinaus in einem geologischen Tiefenlager verbleibt und gemäss Sicherheitskonzept passiv zur Rückhaltung der Radionuklide beiträgt.	ENSI-G03
Testbereiche	Testbereiche sind eigenständige Teile des geologischen Tiefenlagers, um die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins oder der technischen Barrieren zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises vertieft abzuklären beziehungsweise um sicherheitsrelevante Techniken zu erproben und deren Funktionstüchtigkeit nachzuweisen.	ENSI-G03
ÜBB	Überwachung während Bau und Betrieb	
Überwachung	Überwachung ist die über längere Zeit kontinuierliche oder periodische Beobachtung einer Eigenschaft, die Messung einer Kenngrösse oder die Summe aller solcher Beobachtungen und Messungen.	ENSI-G03

Begriff	Erläuterung	Referenz
Überwachungskonzept	Konzeptionelle Beschreibung eines Überwachungsprogramms.	
Überwachungskonzept, Integrales	Siehe Integrales Überwachungskonzept.	
Überwachungsprogramm	Eine Gruppe von Überwachungsprojekten, die zusammen einen Themenbereich der Überwachung abdecken. Teil des integralen Überwachungsprogramms.	
Überwachungsprogramm, Integrales	Siehe Integrales Überwachungsprogramm.	
Überwachungsprojekt	Einzelnes Projekt eines Überwachungsprogramms.	
ÜUG	Überwachung von Umwelt und geologischem Umfeld	
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation	
Verschluss	Verfüllen und Versiegeln aller untertägigen Teile und des Zugangsstollens des geologischen Tiefenlagers nach Abschluss der Beobachtungsphase.	Art. 3 Bst. 1 KEG
Zentraler Bereich	Gesamtheit aller zentral angeordneten untertägigen Bauwerke, welche die Betriebs-Infrastrukturanlagen (Ver- und Entsorgung, Transportlogistik, Betriebs-einrichtungen) für die Bauwerke auf Lagerebene enthalten.	
Zugangsbauwerke	Zugangsbauwerke sind Bauwerke wie Rampen oder Schächte, welche ausgehend von den Anlagen an der Erdoberfläche die Anlagen im geologischen Untergrund erschliessen.	ENSI-G03

Tabellenverzeichnis

Tab. 5-1:	Gliederung der Überwachungsprogramme nach primären Zielen und der räumlichen Zuordnung der Überwachungsmaßnahmen	9
Tab. A-1:	Vorgaben und Verweise auf deren Umsetzung im integralen Überwachungskonzept.....	A-1

Figurenverzeichnis

Fig. 4-1:	Übersicht der Grundsätze für die Überwachung des geologischen Tiefenlagers	5
Fig. 5-1:	Realisierungsphasen des geologischen Tiefenlagers in Anlehnung an Nagra (2021a) mit einer räumlich-zeitlichen Zuordnung der Aktivitäten der einzelnen Überwachungsprogramme, sowie die zeitliche Zuordnung administrativer Prozesse, welche das integrale Überwachungsprogramm begleiten und lenken	8
Fig. 6-1:	Schematische Anordnung der Strukturen des Kombilager und räumliche Zuordnung der Überwachungsprogramme	18