



ARBEITSBERICHT NAB 23-01 BAND 1

Bautechnisches Dossier Standortvergleich
Band 1: Projektdefinition und Einführung

Oktober 2023

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



ARBEITSBERICHT NAB 23-01 BAND 1

Bautechnisches Dossier Standortvergleich
Band 1: Projektdefinition und Einführung

Oktober 2023

STICHWÖRTER

Bautechnisches Dossier, Projektdefinition, Standortvergleich,
Lagerprojekte, Rohbau Untertaganlagen, Referenzbericht,
Rahmenbewilligungsgesuch, RBG

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

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

Copyright © 2023 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.

Zusammenfassung

Mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager reicht die Nagra einen Bericht zur Begründung der Standortwahl ein. Die Nagra dokumentiert die Lagerprojekte der Untertaganlagen für den dafür durchzuführenden Standortvergleich im «Bautechnischen Dossier Standortvergleich», welches neun Bände umfasst.

Der vorliegende Band 1 des Bautechnischen Dossiers gibt zunächst die Projektdefinition für die geologische Tiefenlagerung wieder und führt anschliessend in das Bautechnische Dossier und seine Bände ein.

Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) ist verantwortlich für die Entwicklung und Realisierung des geologischen Tiefenlagers zur langfristig sicheren und nachhaltigen Entsorgung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz. Für die Festlegung des Standorts des geologischen Tiefenlagers wurde ein etappiertes Vorgehen gewählt. In der dritten Etappe wurden die in den vorherigen Etappen bestimmten drei Standorte – Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost – vertieft untersucht. An allen Standorten befindet sich die Lagerebene im Opalinuston, der Hauptunterschied liegt in der Tiefenlage der Lagerebene.

Der Standortvergleich erfolgt gemäss Konzeptteil des Sachplans geologische Tiefenlager unter anderem anhand von 13 Kriterien. Das Resultat des Vergleichs wird in einem Bericht zur Begründung der Standortwahl mit dem Rahmenbewilligungsgesuch eingereicht. Das vorliegende «Bautechnische Dossier Standortvergleich» bildet die Grundlage für die Beurteilung der bautechnischen Eignung in der Kriteriengruppe 4. Diese wird ausschliesslich anhand der Lagerprojekte der Untertaganlagen evaluiert.

Inhalt und Vorgehensweise bei der Erarbeitung des Dossiers folgen den Vorgaben des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI), welche eine Orientierung der Detaillierung der Projektierung der Lager auf Stufe «Vorprojekt» des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins vorschreiben.

Die Lagerprojekte werden mit dem Ziel einer sicheren, zuverlässigen und rechtzeitigen Realisierung des geologischen Tiefenlagers unter Einhaltung aller gesetzlichen und behördlichen Vorgaben entwickelt. Das Vorgehen bei der Projektierung erfolgt nach Vorgabe des ENSI in zwei Schritten. In einem ersten Schritt werden an den drei Standorten Lager für den hochaktiven Abfall (HAA) entwickelt und bewertet. Im zweiten Schritt werden, mit der Randbedingung des gewählten HAA-Lagers, für die Lagerung von schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA) wiederum drei Projekte entwickelt und verglichen. Für Nördlich Lägern, den gewählten Standort des HAA-Lagers, wird ein Kombilager betrachtet.

Die bautechnischen Gefährdungsbilder bei allen Lagerprojekten werden als vergleichbar beurteilt, wobei jedoch durch die verschiedenen Tiefenlagen insbesondere die Ausprägung der Druckhaftigkeit des Gebirges unterschiedlich ist. Die damit zusammenhängenden Gefährdungsbilder werden daher im Detail untersucht.

Mit dem Bautechnischen Dossier wird gezeigt, dass an allen drei zu vergleichenden Standorten Lagerprojekte entsprechend den Anforderungen realisiert und dass die Restrisiken mit geeigneten Massnahmen auf ein akzeptiertes Mass reduziert werden können. Alle drei Standorte sind aus bautechnischer Sicht für den Bau, Betrieb und Verschluss geologischer Tiefenlager geeignet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Figurenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Projektdefinition	2
2.1 Geologische Tiefenlager.....	2
2.2 Ziele	2
2.3 Finanzierung	3
2.4 Vorgaben und Randbedingungen	4
3 Einführung in das Bautechnische Dossier Standortvergleich	5
3.1 Verfahren zur Standortevaluation.....	5
3.2 Bände des Bautechnischen Dossiers Standortvergleich	6
3.3 Grundlegende Konzepte	7
3.4 Geltungsbereich und Abgrenzung	7
3.4.1 Lagerprojekte.....	8
3.4.2 Phasenabgrenzung	8
3.4.3 Detaillierungsgrad und Umfang	8
4 Zusammenfassungen der Bände des Bautechnischen Dossiers	10
4.1 Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen (Bände 2, 3 und 4)	10
4.2 Nutzungsvereinbarung (Band 5).....	10
4.3 Technischer Beschrieb und Pläne Lagerprojekte (Band 6).....	10
4.4 Projektbasis (Band 7).....	11
4.5 Tunnelstatik (Band 8)	11
4.6 Bautechnische Risikoanalyse (Band 9).....	11
5 Literaturverzeichnis	13

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1: Kriterien für die Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss SGT (BFE 2008).....	5
--	---

Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
BTD	Bautechnisches Dossier
BTRA	Bautechnische Risikoanalyse
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EUU	erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
Hb	Ingenieurgeologischer Homogenbereich
JO	Jura Ost
KEG	Kernenergiegesetz
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NL	Nördlich Lägern
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
ZNO	Zürich Nordost

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht ist Band 1 des neunbändigen Bautechnischen Dossiers für den Standortvergleich.

In Kapitel 2 ist die Projektdefinition für die geologische Tiefenlagerung zu finden. Die Projektdefinition legt gemäss SIA 101 (SIA 2020) die wichtigsten Zielgrössen, Funktionen und Rahmenbedingungen des Vorhabens fest. Die Projektdefinition bleibt in der Regel während des ganzen Planungs- und Bauprozesses unverändert.

In Kapitel 3 und 4 werden das Bautechnische Dossier und seine Bände eingeführt.

2 Projektdefinition

2.1 Geologische Tiefenlager

In der Schweiz entstehen radioaktive Abfälle¹ beim Betrieb und bei der Stilllegung von Kernanlagen sowie bei verschiedenen Anwendungen in Medizin, Industrie und Forschung (MIF). Das Kernenergiegesetz (KEG 2003) schreibt vor, dass alle in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle auf Kosten der Abfallverursacher² grundsätzlich in geologischen Tiefenlagern in der Schweiz sicher zu entsorgen sind (Art. 30 und 31 KEG 2003).

Ein geologisches Tiefenlager ist gemäss Art. 3 (KEG 2003) eine Anlage im geologischen Untergrund, die verschlossen werden kann, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch passive Barrieren sichergestellt wird. Vor dem Verschluss eines geologischen Tiefenlagers wird gefordert, dass dessen Entwicklung unter anderem anhand eines sogenannten Pilotlagers längere Zeit beobachtet wird. Während dieser Zeit sollen die Abfälle ohne grösseren Aufwand zurückgeholt werden können (Art. 37 Abs.1 Bst. b KEG 2003).

Als Einrichtung zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen ist ein geologisches Tiefenlager eine Kernanlage im Sinne des Art. 3 lit. d KEG 2003 und bedarf somit gemäss den Bestimmungen des KEG und der Kernenergieverordnung (KEV 2004) einer Rahmenbewilligung, einer Baubewilligung und einer Betriebsbewilligung.

In Art. 64, 65 und 66 der Kernenergieverordnung (KEV 2004) wird definiert, dass ein geologisches Tiefenlager aus dem Hauptlager zur Aufnahme der radioaktiven Abfälle, einem Pilotlager und Testbereichen besteht. Gemäss Richtlinie G03 (ENSI 2020) gehören zu einem geologischen Tiefenlager auch die Zugangsbauwerke von der Oberfläche zur Lagerebene und nach Art. 49 KEG 2003 für die Genehmigung auch die mit dem Bau und dem Betrieb zusammenhängenden Erschliessungsanlagen und Installationsplätze sowie die Standorte für die Verwertung und Ablagerung von Ausbruch-, Aushub- oder Abbruchmaterial, soweit diese in einem engen räumlichen und funktionalen Zusammenhang mit dem Tiefenlager stehen.

2.2 Ziele

Das Ziel bzw. der Zweck des Vorhabens besteht in der zuverlässigen, rechtzeitigen und sicheren Realisierung des geologischen Tiefenlagers³ für die langfristig sichere und nachhaltige Entsorgung der radioaktiven Abfälle unter Einhaltung aller gesetzlichen und behördlichen Vorgaben sowie zu vertretbaren Kosten.

Das Ziel des Vorhabens wird in zwei Phasen erreicht: Während der Bau- und Betriebsphase entsteht das Tiefenlager, die Abfälle werden eingelagert, beobachtet und das Tiefenlager verschlossen. In der Nachverschlussphase gewährleistet das Tiefenlager den passiven Schutz von Mensch und Umwelt (Langzeitsicherheit).

¹ Unter radioaktive Abfälle fallen gemäss Art. 3 KEG alle radioaktiven Stoffe oder radioaktiv kontaminierten Materialien, welche nicht weiterverwendet werden sollen. Dies betrifft auch abgebrannte Brennelemente aus dem Betrieb der fünf Schweizer Kernkraftwerke, für welche derzeit keine weitere Verwendung vorgesehen ist.

² Abfallverursacher sind die Elektrizitätsgesellschaften als Betreiber der Kernkraftwerke sowie die Schweizerische Eidgenossenschaft, die für die Entsorgung der aus Medizin, Industrie und Forschung stammenden radioaktiven Abfälle verantwortlich ist. Synonym für Abfallverursacher wird auch der Begriff Entsorgungspflichtige verwendet.

³ Inklusiv notwendiger Zusatzanlagen wie beispielsweise Verpackungsanlagen.

Das Ziel des Vorhabens wird in folgende thematische Ziele unterteilt (Nagra 2021a):

- Gewährleistung der Langzeitsicherheit: Entsorgung der in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle in einem geologischen Tiefenlager, welches den Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung mit beschränkten Lasten für zukünftige Generationen für alle Zeiten und an jedem Ort gewährleistet und die Abfälle nach Verschluss vor Entwendung, gewaltsamen Einwirkungen und Sabotage schützt.
- Gewährleistung der Sicherheit und Machbarkeit in Zusammenhang mit dem Bau und Betrieb des geologischen Tiefenlagers innerhalb eines angemessenen Zeitraums und zu verhältnismässigen Kosten: Das Themenfeld umfasst die Arbeitssicherheit und den Gesundheitsschutz (inkl. Strahlenschutz). Weitere Themen sind die Sicherung und die Sicherheit bei Störfällen bzgl. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Unter Machbarkeit wird u.a. die zuverlässige Durchführung aller notwendigen Arbeitsschritte unter Berücksichtigung des Grundsatzes der Verhältnismässigkeit verstanden. Die Planung und Realisierung (Erstellung, Betrieb und Verschluss) des geologischen Tiefenlagers erfolgt so, dass die Vorgaben der Langzeitsicherheit zur Qualität der Barrieren des verschlossenen geologischen Tiefenlagers eingehalten werden.
- Sicherstellung der Kompatibilität des Lagers mit Umwelt, Raumplanung und Gesellschaft; eine erfolgreiche Realisierung setzt eine adäquate Berücksichtigung von Aspekten von Umwelt und Raumplanung voraus. Die Nagra ist zudem bzgl. der Anliegen der Gesellschaft ein umsichtiger und verlässlicher Partner; sie hört zu, nimmt im Rahmen einer etablierten Zusammenarbeit mit Ansprechgruppen berechnete Anliegen auf und informiert die Behörden, Gremien, die Regionalkonferenz sowie die interessierte und breitere Öffentlichkeit regelmässig und transparent über den Fortschritt der Arbeiten und relevante Erkenntnisse rund um die Entsorgung radioaktiver Abfälle.
- Sicherstellung eines transparenten Verfahrens: Die für die verschiedenen Meilensteine (Bewilligungsverfahren, Beschaffung von Drittleistungen, etc.) erforderlichen Unterlagen werden zeitgerecht und vollständig erstellt und ihre Beurteilung und Umsetzung begleitet. Erforderliche Grundlagen werden rechtzeitig beschafft und gezielte Untersuchungen für das Erreichen der Meilensteine werden durchgeführt.

Das Ziel des Vorhabens ist erreicht, wenn alle thematischen Ziele erreicht sind.

2.3 Finanzierung

Zur Deckung der Kosten, die nach Ausserbetriebnahme von Kernanlagen für deren Stilllegung und für die Entsorgung ihrer radioaktiven Abfällen entstehen, leisten die Betreiber der Kernanlagen bzw. die Entsorgungspflichtigen gemäss Art. 77 KEG 2003 Beiträge an den Stilllegungsfonds und an den Entsorgungsfonds. Die beiden Fonds stellen sicher, dass nach Ausserbetriebnahme der Kernanlagen genügend finanzielle Mittel vorhanden sind, um sämtliche noch ausstehenden Stilllegungs- und Entsorgungsaufwendungen zu decken.

Die während des Betriebs anfallenden Stilllegungskosten und die Entsorgungskosten werden direkt von den Eigentümern der Kernanlagen bezahlt. Die diesbezügliche Rückstellungspflicht der Entsorgungspflichtigen ist in Art. 82 KEG 2003 beschrieben.

2.4 Vorgaben und Randbedingungen

Der Rahmen für die geologische Tiefenlagerung in der Schweiz wird durch externe Vorgaben sowie durch gesellschaftliche, technische und natürliche Randbedingungen gebildet. Als externe Vorgaben gelten:

- Gesetzliche und behördliche Vorgaben (Gesetze, Verordnungen, Richtlinien)
- Empfehlungen von einschlägigen internationalen Organisationen wie der Nuclear Energy Agency (OECD/NEA), der International Commission on Radiological Protection (ICRP) und der International Atomic Energy Agency (IAEA) sowie anerkannte in- und ausländische Normen (z.B. SIA)
- Empfehlungen, Forderungen und Auflagen der Behörden im Zuge der Lagerrealisierung
- Vorgaben und Bedürfnisse der Entsorgungspflichtigen
- Erwartungen und Ziele weiterer Stakeholder (z.B. Öffentlichkeit, Politik, Regionen)

Eine Auflistung der für die geologische Tiefenlagerung relevanten gesetzlichen und behördlichen Vorgaben ist im Anhang des Entsorgungsprogramms (Nagra 2021a) enthalten.

3 Einführung in das Bautechnische Dossier Standortvergleich

3.1 Verfahren zur Standortevaluation

Im Jahr 2008 wurde vom Bund der Sachplan geologische Tiefenlager (SGT; BFE 2008) in Kraft gesetzt. Mit dem Sachplan geologische Tiefenlager wurde die Voraussetzung dafür geschaffen, die aus der Schweiz stammenden radioaktiven Abfälle in der Schweiz entsorgen zu können. Er legt die Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit für die Auswahl von geologischen Standortgebieten, sowie das Verfahren zur Wahl von Standorten von geologischen Tiefenlagern fest. Das Sachplanverfahren gewährleistet, dass Standorte für geologische Tiefenlager in einem objektiven, transparenten und partizipativen Verfahren evaluiert und bezeichnet werden. Das Verfahren sieht drei Etappen zur Wahl der Standorte für geologische Tiefenlager vor und mündet in ein Rahmenbewilligungsverfahren, welches gemäss Art. 14 des Kernenergiegesetzes (KEG 2003) für jedes geologische Tiefenlager unter anderem den Bewilligungsinhaber, den Standort, den Zweck der Anlage, die Ausdehnung eines vorläufigen untertägigen Schutzbereichs sowie das Projekt in den Grundzügen festlegt.

In der laufenden und letzten Etappe 3 des SGT vergleicht die Nagra die drei verbleibenden Standortregionen Jura Ost (JO), Nördlich Lägern (NL) und Zürich Nordost (ZNO). Die Dokumentation des Standortvergleichs erfolgt im Bericht «Begründung der Standortwahl» (Nagra NTB 24-03 *geplant*) als Teil des Rahmenbewilligungsgesuchs (RBG). Dieser Bericht beschreibt den Vergleich und die Bewertung der drei Standortregionen für die Tiefenlagerung von hochaktiven Abfällen (HAA) und schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA). Es werden ausschliesslich Aspekte der Sicherheit und technischen Machbarkeit evaluiert. Für die qualitative Bewertung wurden im Sachplan vier Kriteriengruppen definiert, die sich in dreizehn einzelne Kriterien aufschlüsseln (siehe Fig. 3-1).

Kriteriengruppe	Kriterien
1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2 Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4 Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

Fig. 3-1: Kriterien für die Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss SGT (BFE 2008)

Als Grundlage für den Vergleich und die Bewertung sind nach Vorgaben des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI 2018) unter anderem standortspezifische Lagerprojekte der untertägigen Bauwerke auszuarbeiten. Diese Lagerprojekte werden im vorliegenden «Bautechnischen Dossier Standortvergleich» (BTD) beschrieben. Anhand des BTD sollen die bautechnischen Kriterien «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» (Kriterium 4.1.) und «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung» (Kriterium 4.2) bewertet werden. Gemäss den erwähnten Vorgaben des ENSI soll das Kriterium 4.2 auf der Basis einer bautechnischen Risikoanalyse (BTRA) bewertet werden. Die Planung der Lagerprojekte im BTD ist für die zu beurteilenden Kriterien auf Detaillierungsstufe Vorprojekt in Anlehnung an die Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins SIA 112 (SIA 2014) und SIA 197 (SIA 2004) durchzuführen.

Gemäss Vorgaben des ENSI (ENSI 2018) ist in einem ersten Schritt der beste Standort für die HAA gemäss den 13 Kriterien zu ermitteln. Dafür müssen HAA-Lagerprojekte an allen drei Standortregionen erarbeitet werden. Aufgrund von Überlegungen zu Sicherheit und technischer Machbarkeit wird je ein HAA-Lagerfeld in den jeweiligen Standortregionen exemplarisch angeordnet. Die zugehörige Lage der Oberflächeninfrastruktur wurde gemeinsam mit den Standortregionen auf der Basis von Vorschlägen der Nagra (Nagra 2019a und 2019b) definiert. Die Zugänge zur Lagerebene, der Logistikbereich und die Zugänge zu den Lagerfeldern werden anschliessend gemäss den sicherheitstechnischen, baulichen und betrieblichen Anforderungen platziert und ausgelegt.

Im zweiten Schritt wird für den nach Bewertung der 13 Kriterien besten Standort für ein HAA-Lager ein ergänzendes SMA-Lager geplant, was zu einem Kombilager führt. An den zwei anderen Standorten ist je ein SMA-Einzellagerprojekt zu planen. Erneut wird verglichen und bewertet und der beste Standort für das SMA-Lager gewählt. Das Rahmenbewilligungsgesuch wird für den gewählten oder die gewählten Standorte eingereicht.

3.2 Bände des Bautechnischen Dossiers Standortvergleich

Die Nagra dokumentiert die so notwendigen insgesamt sechs Lagerprojekte (drei HAA-Einzellager, ein Kombilager und zwei SMA-Einzellager) für den Standortvergleich im vorliegenden Bautechnischen Dossier. In der Dokumentation werden die Lagerprojekte einander direkt gegenübergestellt, was eine kompakte und verständliche Darstellung ohne Wiederholungen erlaubt.

Das Bautechnische Dossier (NAB 23-001) beinhaltet folgende neun Bände:

- Band 1: Projektdefinition und Einführung (vorliegendes Dokument)
- Band 2: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Jura Ost (Nagra 2023a)
- Band 3: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Nördlich Lägern (Nagra 2023b)
- Band 4: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Zürich Nordost (Nagra 2023c)
- Band 5: Nutzungsvereinbarung (Nagra 2023d)
- Band 6: Technischer Beschrieb und Pläne Lagerprojekte (Nagra 2023e)
- Band 7: Projektbasis (Nagra 2023f)
- Band 8: Tunnelstatik (Nagra 2023g)
- Band 9: Bautechnische Risikoanalyse (Nagra 2023h)

3.3 Grundlegende Konzepte

Im Hinblick auf den Standortvergleich in Etappe 3 des SGT hat die Nagra eine Reihe von Hintergrundberichten verfasst, die grundlegende standortunabhängig gültige Konzepte zur Umsetzung der Lagerprojekte dokumentieren. Die Nutzungsvereinbarung (Band 5 des BTD) fasst für die zu betrachtenden Untertaganlagen die daraus folgenden bautechnisch relevanten Anforderungen zusammen. Das Bautechnische Dossier kann daher ohne Kenntnis dieser Berichte gelesen und nachvollzogen werden. Die Herleitungen der Anforderungen sind z.T. jedoch nur in den Konzept-Berichten selbst zu finden.

Die massgebenden Berichte werden für die Nachvollziehbarkeit hier aufgelistet. Diese stehen auf der Website der Nagra⁴ zum Download zur Verfügung.

- Module der Lagerarchitektur (Nagra 2022c)

Im Bericht wird ein modulares Konzept der Lagerarchitektur für alle zu betrachtenden Lagerstypen, d.h. HAA- & SMA-Einzellager sowie Kombilager, entwickelt und dargestellt.

- Lüftungs- und Kühlungskonzept (Nagra 2022b)

Der Bericht zeigt, dass mit dem vorgesehenen Lüftungs- und Kühlungskonzept das Tiefenlager als Kombilager in allen für die Auslegung der Lüftung und Kühlung relevanten Bau- und Betriebsphasen normkonform bewettert und gekühlt werden kann.

- Verschlusskonzept (Nagra 2021c)

Der sichere etappenweise Verschluss des Tiefenlagers ist ein zentraler Bestandteil der Umsetzung des Mehrfachbarrierenkonzepts der geologischen Tiefenlagerung. Der Bericht beschreibt den etappenweisen Verschluss des geologischen Tiefenlagers.

- Konzept erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag (EUU) (Nagra 2021b)

Der Bericht legt in einem Konzept dar, welche Infrastruktur für die Umsetzung der EUU notwendig ist und erläutert in einem beispielhaften Arbeitsprogramm, wie die Ziele der EUU, im Wesentlichen der Eignungsnachweis, erreicht werden können.

- Betriebskonzept für die geologische Tiefenlagerung (Nagra 2022a)

Das Betriebskonzept fokussiert auf die Phase der Einlagerung der Abfälle. Es zeigt, wie in einem Kombilager gleichzeitig eingelagert und gebaut werden kann und wie die vorgesehenen Anlagen die Einlagerung gemäss Zeitplan gewährleisten.

- Rückholungskonzept (Nagra 2022d)

Das Rückholungskonzept zeigt, wie eine Rückholung der radioaktiven Abfälle aus dem geologischen Tiefenlager bis zu einem allfälligen Verschluss ohne grossen Aufwand mit heutiger Technik erfolgen könnte. Stufengerecht beschreibt es die dafür notwendigen planerischen, logistischen, baulichen und überwachungstechnischen Schritte in den Grundzügen.

3.4 Geltungsbereich und Abgrenzung

Das «Bautechnische Dossier Standortvergleich» dient ausschliesslich als Grundlage für den Standortvergleich gemäss Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT). Die im bautechnischen Dossier dokumentierten Lagerprojekte stellen in keiner Art und Weise eine Festlegung für das Rahmenbewilligungsgesuch dar.

⁴ www.nagra.ch

3.4.1 Lagerprojekte

Die Lagerprojekte lassen sich grossräumig in die Oberflächenanlagen und die Untertaganlagen unterteilen. Gemäss Konzeptteil des SGT sind für die bautechnische Beurteilung nur die Untertaganlagen, d.h. die Verbindung zwischen Oberfläche und Lagerebene (vgl. Kriterium 4.2) und die Bauwerke auf Lagerebene (vgl. Kriterium 4.1) zu berücksichtigen.

Die dokumentierten Lagerprojekte haben exemplarischen Charakter und dienen ausschliesslich dazu, die bautechnische Machbarkeit und Eignung an den Standorten mit heutiger Bautechnik aufzuzeigen. Die projektierten Tiefenlager beruhen zum Teil auf Planungsannahmen. Für den Standortvergleich wurde sichergestellt, dass solche Annahmen die Beurteilung nicht beeinflussen (z.B. wurden für alle Lager und Standorte die gleichen Anforderungen angenommen). Die zugrunde gelegte standortunabhängige Lagerarchitektur ist im erwähnten Bericht «Module der Lagerarchitektur» (Nagra 2022c) detailliert beschrieben.

3.4.2 Phasenabgrenzung

Gemäss Konzeptteil des SGT sind für die Bewertung der Kriterien 4.1 und 4.2 die Erstellung, der Betrieb, die Beobachtung und der Verschluss des Tiefenlagers zu berücksichtigen. Die Nutzungsdauer der Bauwerke wird bauwerksspezifisch aufgrund der Dauer dieser Phasen festgelegt. Die Anforderungen bezüglich der Nachverschlussphase (Langzeitsicherheit) fliessen in die Nutzungsvereinbarung ein, sofern diese von bautechnischer Relevanz sind.

Der Bau der Siegel ist im Bautechnischen Dossier nicht dokumentiert. Der Bau der Versiegelungsbauwerke wird jedoch in der bautechnischen Risikoanalyse (Nagra 2023h) bewertet. Für die Auslegung und den Bau der Siegel wird auf das Verschlusskonzept (Nagra 2021c) verwiesen.

Die Rückholung stellt keine planmässige Projektphase dar und ist damit nicht Teil des Standortvergleichs. Eine Rückholung «ohne grossen Aufwand» kann mit dem aktuellen Lagerkonzept in allen Lagerprojekten gewährleistet werden (Nagra 2022d).

3.4.3 Detaillierungsgrad und Umfang

Wie erwähnt, soll gemäss ENSI die Planung der Lagerprojekte für die zu beurteilenden Kriterien auf Stufe Vorprojekt in Anlehnung an die Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins erfolgen. Die Orientierung an einem Vorprojekt bezieht sich dabei auf den Detaillierungsgrad und nicht auf den Umfang. Themen wie z.B. Umweltaspekte (mit Ausnahme der Auswirkung von radioaktiven Abfällen auf Mensch und Umwelt), Materialbewirtschaftung oder Kosten fliessen nicht in die 13 Kriterien des Standortvergleichs ein und werden daher im Bautechnischen Dossier auch nicht betrachtet.

Das Bautechnische Dossier fokussiert auf die Kriterien 4.1 und 4.2 (siehe Fig. 3-1), welche die Aspekte im Zusammenhang mit dem Baugrund beurteilen. Dabei werden „bautechnisch einfach beherrschbare Verhältnisse“ bzw. Verhältnisse, bei denen „keine wesentlichen hydrogeologischen und geotechnischen Probleme“ zu erwarten sind, als günstig beurteilt (BFE 2008).

Aspekte, die bei allen Lagerprojekten vergleichbar sind, werden im ganzen Bautechnischen Dossier nur so weit wie für das Projektverständnis und den Nachweis der Machbarkeit erforderlich erläutert. Zum Beispiel wird der Bau der Schächte im Lockergestein an allen Standorten ähnlich anspruchsvoll eingeschätzt. Aus diesem Grund werden diese Bauwerke phasengerecht auf der Basis von Erfahrungswerten ausgelegt. Gleiches gilt für die Erdbebengefährdung von Untertaganlagen.

Hingegen wird die Wechselwirkung zwischen Ausbau und Gebirge (Systemverhalten) im Bereich sicherheitsrelevanter Untertagbauwerke und komplexer Abschnitte des Tiefenlagers vertieft untersucht und analysiert. Der Bau von Stollen, Tunneln und Kavernen in Opalinuston in grosser

Tiefe ist wegen den erwarteten druckhaften Verhältnissen anspruchsvoll. Die drei zu beurteilenden Standorte liegen in unterschiedlicher Tiefenlage (z.B. Hauptlager HAA JO: 530 m, NL: 920 m und ZNO: 760 m) und es werden damit unterschiedliche Ausprägungen der Druckhaftigkeit erwartet. Aus diesen Gründen wurde für den Nachweis der Eignung eine detaillierte Tunnelstatik für die Bauwerke im Opalinuston an allen Standorten durchgeführt (Band 8).

4 Zusammenfassungen der Bände des Bautechnischen Dossiers

4.1 Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen (Bände 2, 3 und 4)

Die Bände «Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen» stellen eine projektstufengerechte Beschreibung der Baugrundmodelle für die Zugangsbauwerke und Bauwerke auf Lagerebene in den Standortgebieten dar. Die Bände dienen als ingenieurgeologische Planungsgrundlage für die Projektierung der Lagerprojekte. Die Beschreibung und die Beurteilung des Baugrunds folgen den Empfehlungen der SIA 199 (SIA 2015).

An den Standorten NL und ZNO werden fünf ingenieurgeologische Homogenbereiche (Hb) abgegrenzt: Hb1 - Molasse, Hb2 - «Felsenkalk» und «Massenkalk», Hb3 - Schwarzbach- und Villigen-Formation, Hb4 - Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston und Hb5 - Opalinuston. Am Standort JO werden nur zwei ingenieurgeologische Homogenbereiche ange getroffen: Hb1 - Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston und Hb2 - Opalinuston.

Die Bauwerke auf Lagerebene liegen im Opalinuston. Die Schichtung verläuft gegenüber den Bauwerken horizontal bis subhorizontal. Störungszonen wurden auf der Lagerebene keine seismisch kartiert.

4.2 Nutzungsvereinbarung (Band 5)

Die Nutzungsvereinbarung fasst die Anforderungen an den Rohbau der Untertagbauwerke der verschiedenen Hintergrundberichte (siehe Kapitel 3.3) zusammen. Bei Bedarf werden Projektierungsannahmen ergänzt, dabei werden die Annahmen für alle Standorte identisch festgelegt.

Die Nutzungsvereinbarung stellt sicher, dass die Anforderungen an die Lagerprojekte überall identisch sind und somit ein unverzerrter, objektiver Standortvergleich gewährleistet ist.

4.3 Technischer Beschrieb und Pläne Lagerprojekte (Band 6)

Der Bericht beschreibt die bautechnische Umsetzung der Nutzungsanforderungen in Lagerprojekten unter Berücksichtigung der standortspezifischen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen und den exemplarischen Standorten der HAA- und SMA-Lagerfelder sowie den Standorten der Zugangsbauwerke. Die Dokumentation der Lagerprojekte erfolgt in Plänen von Tunnelachsen, Normalprofilen und repräsentativen Vortriebs- und Sicherungsplänen.

Die drei Standorte unterscheiden sich aus bautechnischer Sicht im Wesentlichen durch die Tiefenlage und Erschliessung. Die Lagerebene liegt bei JO auf ca. 530 m, bei NL auf 920 m und bei ZNO auf 760 m unter Terrain. Während bei NL und ZNO die Lagerebene jeweils nur durch vertikale Schächte erschlossen wird, erfolgt bei JO einer der Zugänge über einen Zugangstunnel.

Mit einer Gefährdungsbildanalyse werden die Gefährdungen während des Baus identifiziert und entsprechende Massnahmen definiert. Massgebend für die Machbarkeit ist die Abteufung des Schachts in wasserführendem Gebirge und der Bau im druckhaften Gebirge auf der Lagerebene.

In den Standortregionen NL und ZNO erfolgt der Bau der Schächte wegen der Gefährdung eines Wassereintruchs über Karsthohlräume im Schutz eines Gefrierkörpers. In der Standortregion Jura Ost sind beim Bau des einen Schachts keine Karsthohlräume zu erwarten und es sind nur bei Bedarf Abdichtungsinjektionen vorgesehen. Alle Schächte werden für den Betrieb von der Oberfläche bis in den Opalinuston druckwasserhaltend abgedichtet.

Die Bauwerke auf Lagerebene werden, mit Ausnahme der HAA-Lagerstollen, wegen den erwarteten hohen, echten Gebirgsdrücken mit einer nachgiebigen Ausbruchsicherung gesichert

und später mit einer Betoninnenschale ausgebaut. Der Vortrieb erfolgt konventionell. Die HAA-Lagerstollen werden mit einer Schild-Tunnelbohrmaschine aufgeföhren und mit Betonfertigelementen ausgebaut.

Alle für den Standortvergleich entworfenen Lagerprojekte sind damit aus bautechnischer Sicht für den Bau, Betrieb und Verschluss mit heute bekannten bautechnischen Verfahren realisierbar.

4.4 Projektbasis (Band 7)

In Anlehnung an SIA 260 (SIA 2013) fasst die Projektbasis die Grundlagen für die Tunnelstatik zusammen. Die Projektbasis legt die geotechnischen Kennwerte, das Tragwerkskonzept und die zu führenden Nachweise fest.

Es wird festgelegt, dass sich die in der Statik (Band 8) zu berücksichtigenden Geföhrdungsbilder auf die Hauptgeföhrdung durch den echten Gebirgsdruck beschränken. Die Massnahmen für die weiteren Homogenbereiche werden aufgrund von Erfahrungswerten oder einfachen Berechnungen im Technischen Beschrieb (Band 6) bestimmt.

Das Gebirgsverhalten des Opalinustons wird mit einem anisotropen, linear elastisch perfekt plastischen Stoffgesetz modelliert. Die Parameter des Stoffgesetzes wurden mit den Ergebnissen der felsmechanischen Laborversuche kalibriert. Es gilt das gleiche Parameterset für alle drei Standorte, wobei nur die Steifigkeit mit der Überlagerung zunimmt. Vereinfacht wird ein isotroper homogener Spannungszustand angenommen.

4.5 Tunnelstatik (Band 8)

Die Tunnelstatik dokumentiert die in der Projektbasis (Band 7) festgelegten statischen Nachweise. Für die Bauwerke im Opalinuston werden numerische 2D- und 3D-Berechnungen mit der Software Flac3D von Itasca-Consultants ausgeführt.

Für die Dimensionierung der Ausbauten werden transiente hydraulisch-mechanisch gekoppelte Berechnungen für die jeweilige Nutzungsdauer des Bauwerks durchgeführt. Iterativ werden für die verschiedenen Bauwerke die Schalenstärken bestimmt. Für die nachgiebigen Ausbauten wird standortspezifisch der Mehrausbruch ausgewiesen und für die HAA-Lagerstollen wird der jeweilige Überschnitt der TBM bestimmt, der ein Verklemmen des Schilds verhindert.

4.6 Bautechnische Risikoanalyse (Band 9)

Die bautechnische Risikoanalyse (BTRA) stellt zusammen mit den Lagerprojekten die Grundlage für die Bewertung der bautechnischen Eignung des Baugrunds im Rahmen des Standortvergleichs dar. In der BTRA werden die Risiken infolge abweichender Baugrundmodelle und -eigenschaften identifiziert und bewertet.

Da sich die Bauwerke des geologischen Tiefenlagers bezüglich der Geometrie, Geologie und dem Bauverfahren ähneln und die Bewertung der bautechnischen Eignung nicht quantitativ, sondern qualitativ durchgeführt wird, werden für die bautechnische Risikoanalyse repräsentative Bauwerke des geologischen Tiefenlagers ausgewählt.

Für diese Bauwerke werden Risiken infolge eines Antreffens einer ausgeprägten Störungszone und infolge von unerwarteten Baugrundeigenschaften identifiziert und bewertet. Neben der Eintrittswahrscheinlichkeit eines unerwünschten Ereignisses wird bei der Berechnung des Risikos auch die Auswirkung auf folgende Projektanforderungen bewertet: Arbeitssicherheit, Kosten, Termine und die Qualität. Wenn der Wert für das Initialrisiko nicht im akzeptierten Bereich liegt, wird eine Massnahmenplanung durchgeführt und im Anschluss das Restrisiko bestimmt.

Die Ergebnisse der bautechnischen Risikoanalyse zeigen, dass trotz unterschiedlichen initialen Risiken v.a. aufgrund der verschiedenen Tiefenlagen, die Restrisiken an allen Standorten vergleichbar sind. Die Restrisiken können mit geeigneten, heute bekannten bautechnischen Verfahren für alle Standorte sowohl für die HAA- wie auch die SMA-Lager bzw. das Kombilager auf einen akzeptierten Wert reduziert werden.

5 Literaturverzeichnis

- BFE (2008): Sachplan Geologische Tiefenlager: Konzeptteil. BFE 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011). Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- ENSI (2018): Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 3. ENSI 33/649. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2020): Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-G03/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV), vom 10. Dezember 2004, Stand am 01. Januar 2022. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Nagra (2019a): Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager. Teil 1: Einführung und Grundlagen. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-08 Teil 1.
- Nagra (2019b): Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager. Teil 2: Standortspezifische Vorschläge. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-08 Teil 2.
- Nagra (2021a): Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 21-01.
- Nagra (2021b): Konzept erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag (EUU). Nagra Arbeitsbericht NAB 21-14.
- Nagra (2021c): Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-12.
- Nagra (2022a): Betriebskonzept für die geologische Tiefenlagerung. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-06.
- Nagra (2022b): Lüftungs- und Kühlungskonzept geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-31.
- Nagra (2022c): Module der Lagerarchitektur. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-35.
- Nagra (2022d): Rückholungskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-13.
- Nagra (2023a): Bautechnisches Dossier - Band 2: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Jura Ost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 2.
- Nagra (2023b): Bautechnisches Dossier - Band 3: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 3.

- Nagra (2023c): Bautechnisches Dossier - Band 4: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 4.
- Nagra (2023d): Bautechnisches Dossier - Band 5: Nutzungsvereinbarung. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 5.
- Nagra (2023e): Bautechnisches Dossier - Band 6: Technischer Beschrieb und Pläne Lagerprojekte. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 6.
- Nagra (2023f): Bautechnisches Dossier - Band 7: Projektbasis. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 7.
- Nagra (2023g): Bautechnisches Dossier - Band 8: Tunnelstatik. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 8.
- Nagra (2023h): Bautechnisches Dossier - Band 9: Bautechnische Risikoanalyse. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 9.
- Nagra NTB 24-03 (*geplant*): Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager – Bericht zur Begründung der Standortwahl. Nagra Technischer Bericht NTB 24-03.
- SIA (2004): Projektierung Tunnel: Grundlagen. Schweizer Norm SIA 197, SN 505 197. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2013): Grundlagen der Projektierung von Tragwerken. Schweizer Norm SIA 260, SN 505 260. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2014): Modell Bauplanung : Verständigungsnorm. Schweizer Norm SIA 112:2014, SN 509 112. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2015): Erfassen des Gebirges im Untertagebau. Schweizer Norm SIA 199:2015, SN 531:199. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2020): Ordnung für Leistungen der Bauherren. Verständigungsnorm. SIA 101:2020, Schweizer Norm SN 508 101. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.