

»Gutachten zur Erkundung im Standortauswahlverfahren«

Impressum

Gutachten zur Erkundung im Standortauswahlverfahren

Projektleitung

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien IEG

Aureliusstr. 2, 52064 Aachen

Dr. Peter Achtziger-Zupančič, [REDACTED]

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Dr. Claudia Finger, [REDACTED]; Dirk Boernecke, [REDACTED]; Erik Richter, [REDACTED]; Prof. Dr. Florian Amann, [REDACTED]; Dr. Michael Kettermann, [REDACTED]; Dr. Peter Achtziger-Zupančič, [REDACTED]

Verfasst im Auftrag von

Nationales Begleitgremium NBG durch das Umweltbundesamt

Postfach 1406, 06813 Dessau-Roßlau

Zitierempfehlung

Achtziger-Zupančič, P.; Boernecke, D.; Finger, C.; Kettermann, M.; Richter, E.; Amann, F. (2026): Gutachten zur Erkundung im Standortauswahlverfahren. Aachen: Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien IEG.

Veröffentlicht

05.2026

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Ort: Aachen

Status: Final

Datum: 20.04.2026

Inhaltsverzeichnis

0.1	Kurzzusammenfassung	7
0.2	Executive Summary	7
1	Ausgangssituation	9
1.1	Ausgangssituation	9
1.2	Grundlegende Fragestellungen	10
1.3	Relevante Eigenschaften	11
2	Internationale Fallstudien	13
2.1	Frankreich	13
2.1.1	Felslabor Bure	13
2.1.2	Felslabor Tournemire.....	14
2.2	Belgien	14
2.2.1	Felslabor HADES.....	15
2.3	Schweiz	15
2.3.1	Felslabor Mont Terri	16
2.3.2	Vom Kristallin der Nordschweiz zum Standortvorschlag Nördlich Lägern	16
2.3.3	Felslabor Grimsel.....	17
2.4	Finnland	17
2.4.1	Olkiluoto und Onkalo.....	17
2.5	Schweden	18
2.5.1	Felslabor Äspö und Standortregion Oskarshamn	19
2.5.2	Forsmark.....	20
2.6	Japan	21
2.6.1	Felslabor Mizunami	21
2.7	Deutschland	22
2.7.1	Gorleben	23
3	Beschreibung der eingesetzten Erkundungsmethoden	24
3.1	Richtbohrtechnik	24
3.2	Geophysikalische Erkundung	24
3.2.1	Reflexions- und Refraktionsseismik 2D/3D	24
3.2.2	Vertical Seismic Profiling – VSP	25
3.2.3	Gravimetrie.....	26
3.2.4	(Geo-)Magnetik.....	26
3.2.5	Elektrische und elektromagnetische Verfahren.....	26
3.2.6	Ground Penetrating Radar (GPR)	27
3.2.7	Magnetotellurik	27
3.2.8	Passive seismische Verfahren	27
3.3	Tunnelaufnahmen	28

3.4	Bohrlochlogs	28
3.5	Bohrlochversuche	28
3.6	Erwartbare Entwicklungen	29
4	Vergleich der Erkundungsmethoden	31
4.1	Räumliche, geometrische und sicherheitstechnische Erwägungen	31
4.2	Ausschließlich über- oder untertägig messbare Daten	32
4.3	Datenübertragbarkeit von Untertagebauwerken auf andere Standorte	32
4.4	Zeitliche und wirtschaftliche Erwägungen	33
5	Schlussfolgerungen	34
5.1	Wirtsgesteinsspezifische Ableitungen	34
5.2	Allgemeine Schlussfolgerung	34
6	Abbildungsverzeichnis	36
7	Tabellenverzeichnis	37
8	Literaturverzeichnis	38

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Endlagerung
ANDRA	französische Agentur für radioaktive Abfälle (frz. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs)
ANSALT	
BASE	Bundesamt für Sicherheit in der Endlagerung
BdZ	Auflockerungszone um eine Bohrung (engl. Borehole Damaged Zone)
BGE mbH	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Cigéo	Französisches Endlager bei Bure (frz. Centre Industriel de Stockage Géologique)
DFN	Diskretes Klufnetzwerk
EDZ	Auflockerungszone um Auffahrungen (engl. Excavation Damaged Zone)
EM	Elektromagnetische Verfahren
ERT	elektrische Widerstandstomographie
ewG	Enschlusswirksamer Gebirgsbereich
FMI	hochauflösendes geophysikalisches Messinstrument zur Abbildung der Bohrlochwand mittels optischer Bildgebung (engl. fullbore formation microimager)
GPR	Bodenradar (engl. ground penetrating radar)
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem (engl. global positioning system)
HADES	Belgisches Untertagelabor bei Mol (engl. High-Activity Disposal Experimental Site)
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
JAEA	Japanische Atomanlagenbetreiber (engl. Japan Atomic Energy Agency)
KI	Künstliche „Intelligenz“
ML	Computergestütztes Lernen (engl. machine learning)
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NUMO	Japanische Agentur für radioaktive Abfälle (engl. Nuclear Waste Management Organization)
ONDRAF/NIRAS	Belgische Agentur für radioaktive Abfälle (frz. Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies)
REV	Repräsentative Elementarvolumen
SKB	Schwedische Agentur für radioaktive Abfälle (swe. Svensk Kärnbränslehantering AB)
StandAG	Standortauswahlgesetz
TBO	Tiefbohrungs-Kampagne der Nagra in der Nordschweiz
TDS	Summe der gelösten, leitfähigen Feststoffe (engl. total dissolved solids)
THMC	Thermo-hydro-mechanisch-chemisch
UBI	hochauflösendes geophysikalisches Messinstrument zur Abbildung der Bohrlochwand mittels Ultraschalls (engl. ultrasonic borehole imager)
VLF	passive, elektromagnetische Erkundungsmethode (engl. very low frequency)
v_p	Kompressionsgeschwindigkeit
v_s	Scherwellengeschwindigkeit
VSP	Vertikales Profil der seismischen Geschwindigkeiten (engl. vertical seismic profiling)

WIPP	Demonstrationsprojekt zur Endlagerung der Vereinigten Staaten von Amerika (engl. Waste Isolation Pilot Plant)
XRF	Röntgenfluoreszenzanalyse

0.1 Kurzzusammenfassung

Das vorliegende Gutachten stellt eine Bewertung dar, ob eine untertägige Erkundung mittels Schachtes und Bergwerken sicherheitsrelevante Zusatzinformationen liefert, die für die vergleichende Standortauswahl in den Phasen 2 und 3 nach StandAG zwingend erforderlich sind, oder ob moderne über-tägige Methoden hierfür hinreichend sind. Ausgehend vom dreistufigen Verfahren des StandAG und der gesetzlich verankerten Begründung für untertägige Erkundungen werden internationale Erfahrungen aus Felslaboren und Standortauswahlprozessen in Frankreich, Belgien, der Schweiz, Finnland, Schweden, Japan und Deutschland systematisch ausgewertet und die seit dem AkEnd-Bericht von 2002 erheblich weiterentwickelten Erkundungsmethoden – insbesondere Richtbohrtechnik, 3D-Seis-mik, Bohrlochlogs und faseroptische Messverfahren – beschrieben.

Der methodische Vergleich zeigt, dass über- und untertägige Erkundung komplementär sind und unterschiedliche räumliche Dimensionen adressieren. Entscheidend für die Bewertung ist das wirtsge-steinsabhängige Repräsentative Elementarvolumen, welches für Steinsalz und Tongestein üblicher-weise etwa im Bereich 0,1 bis 10 m³ liegt und somit mit Bohrungen zuverlässig erfassbar ist. Für Kris-tallingestein beträgt es hingegen 100 bis 100.000 m³, sodass für eine vollständige Charakterisierung ein Bergwerk in der Größe des späteren Endlagers selbst erforderlich ist. Erkenntnisse aus internati-onalen Untertagelaboren sind methodisch übertragbar, standortspezifische Parameter erfordern jedoch stets lokale Kalibrierung, weshalb für die standortspezifische Detailplanung nach getroffener Standor-entscheidung die untertägige Erkundung unverzichtbar bleibt. Soweit die Auffahrung mehrerer Er-kundungsbergwerke betrieblich darstellbar ist, ergeben sich durch eine Reduktion auf ein Bergwerk am finalen Endlagerstandort voraussichtlich nur geringfügige zeitliche Vorteile. Dagegen ist die Kos-tenersparnis von rund 500 Mio. Euro pro untertägige Erkundung an zusätzlichen Standorten erheblich.

Wir kommen daher zum Schluss, dass für Steinsalz und Tongestein alle für den Standortvergleich re-levanten Parameter zuverlässig aus Bohrungen gewinnbar sind und ein Bergwerk für diesen Vergleichs-schritt keinen verhältnismäßigen Mehrwert bietet. Für ein Endlager im Kristallin muss das Bergwerk ohnehin zwingend in der Größe des Endlagers aufgefahren werden, um den Standort zu charakteri-sieren. Nach dem heutigen Stand der Explorationstechnik ist die untertägige Erkundung mittels Berg-werks für die vergleichende Standortauswahl als nicht verhältnismäßig zu bewerten.

0.2 Executive Summary

This expert report presents an assessment of whether underground exploration by means of shafts and mines provides safety-relevant additional information that is strictly necessary for the comparative site selection in Phases 2 and 3 under the Site Selection Act (StandAG), or whether modern surface-based methods are sufficient for this purpose. Based on the three-phase procedure of the StandAG and the legally established justification for underground investigations, international experience from rock la-boratories and site selection processes in France, Belgium, Switzerland, Finland, Sweden, Japan and Germany is systematically evaluated, and the exploration methods that have advanced considerably since the AkEnd report of 2002 – in particular directional drilling, 3D seismics, borehole logging and fibre-optic measurement techniques – are described.

The methodological comparison shows that surface-based and underground exploration are comple-mentary and address different spatial dimensions. Decisive for the assessment is the host-rock-depend-ent representative elementary volume, which for rock salt and shales typically lies in the range of 0.1 to 10 m³ and can therefore be reliably characterized by boreholes. For crystalline rock, however, it amounts to between 100 and 100.000 m³, so that complete characterization would require a mine of the same size as the future repository itself. Findings from international underground rock laboratories are methodologically transferable, but site-specific parameters always require local calibration. Thus, underground exploration remains indispensable for site-specific detailed planning once the site deci-

sion has been made. Insofar as the excavation of several exploration mines can be managed operationally, a reduction to a single mine at the final repository site would be expected to yield only marginal time savings. In contrast, the cost saving of approximately 500 million euros per underground investigation at additional sites is considerable.

We conclude that for rock salt and shales all parameters relevant to the site comparison can be reliably obtained from boreholes, and that a mine offers no proportionate added value for this comparison step. For a repository in crystalline rock, the mine must in any case be excavated to the full size of the repository to characterize the site. Based on the current state of exploration technology, underground exploration by means of a mine is to be assessed as disproportionate for the purpose of comparative site selection.

1 Ausgangssituation

1.1 Ausgangssituation

Die Endlagersuche für hochradioaktive Abfälle erfolgt gemäß dem Standortauswahlgesetz (StandAG) in drei Phasen. Den Auftakt bildete 2017 eine bundesweite „weiße Karte“, in der alle Regionen einbezogen wurden; auf Basis vorhandener geologischer Daten wurden Gebiete grob bewertet und in den folgenden Phasen durch weitere Erkundungsprogramme verfeinert.

In Phase 1 sammelte die BGE mbH geologische Daten der Länder und bewertet sie nach gesetzlich festgelegten Kriterien. Ausschlusskriterien sind Erdbewegungen, Vulkanismus oder Bergbauschäden am Untergrund. Gleichzeitig wird geprüft, welche Gebiete grundsätzlich die Mindestanforderungen erfüllen könnten: So muss mindestens 300 m standfestes Gestein das Endlager von der Erdoberfläche trennen, und das Endlager muss von einer ausreichend dicken Schutzzone aus Granit, Salz oder Ton umgeben sein. Zur Transparenz veröffentlicht die BGE regelmäßig Zwischenberichte, die aufzeigen, welche Gebiete aus Sicht des Unternehmens aufgrund geologischer Nichteignung voraussichtlich ausscheiden; diese Berichte bedeuten noch keine endgültigen Entscheidungen. Nach Anwendung weiterer Kriterien und vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen legt die BGE am Ende der Phase 1 einen Vorschlag für übertägig zu erkundende Standortregionen an das BASE vor. Das BASE prüft den Vorschlag, die Öffentlichkeit wird beteiligt, und letztlich entscheidet der Bundestag gesetzlich, welche Gebiete weiter erkundet werden. Erst wenn ein Gebiet endgültig aus dem Auswahlverfahren ausscheidet, löst sich die zugehörige Regionalkonferenz auf.

In Phase 2 sollen übertägige Erkundungen in den Standortregionen stattfinden. Die BGE mbH möchte den Untergrund durch Bohrungen und geophysikalische Messungen untersuchen, wodurch ein möglichst genaues Bild der Geologie entstehen soll. Auf dieser Basis wird vorgeschlagen, welche Standorte in Phase 3 untertägig erkundet werden sollen; auch hier prüft das BASE den Vorschlag, und letztlich entscheidet wieder der Gesetzgeber.

In Phase 3 erfolgt die untertägige Erkundung von mindestens zwei Standorten durch die BGE. Laut StandAG wird das Gestein mit Bohrungen und weiteren Methoden untersucht; auf Grundlage einer vergleichenden Auswertung der Erkundungsdaten soll die BGE einen Standortvorschlag vorlegen. Das BASE bewertet die Ergebnisse aus den Untersuchungen sowie aus dem Beteiligungsverfahren und übermittelt den geprüften Vorschlag mitsamt seinen Empfehlungen für den Endlagerstandort, wobei die bestmögliche Sicherheit im Vordergrund steht.

Der Zeitplan sieht vor, dass Phase 1 voraussichtlich Ende 2027 mit den Regionenvorschlägen der BGE abgeschlossen wird. In den Phasen 2 und 3 liegt die zentrale Herausforderung darin, die für Langzeitsicherheit relevanten strukturgeologischen, petrophysikalischen, hydrogeologischen, geotechnischen und geophysikalischen Eigenschaften potenzieller Standorte zuverlässig zu erheben. Da mit Phase 1 bereits alle Regionen, welche die Ausschlusskriterien bzw. Minimalanforderungen nicht erfüllt haben, ausgeschlossen sind, steigt in Phase 2 und 3 die Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien werden nur herangezogen, wenn mehrere Standorte auch hier gleichwertig abschließen. Im „lernenden Verfahren“ stehen für den Standortvergleich anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien somit zwei zentrale Erkundungsstrategien zur Diskussion: Zum einen die übertägige Erkundung durch Bohrungen und geophysikalische Methoden der Standortregionen (Phase 2) gefolgt von der untertägigen Erkundung (Phase 3) gemäß StandAG; zum anderen die Verschmelzung der Schritte 2 und 3, sodass nur der bestmögliche Standort untertägig erkundet wird. Sollte auf Grund der übertägigen Erkundung keine Entscheidung möglich sein, so kann nachfolgend weiterhin die Möglichkeit bestehen, mehrere Standorte untertägig zu erkunden.

Die untertägigen Erkundungen in Schritt 3 nach StandAG werden gesetzlich mit sicherheits- und charakterisierungs-relevanten Vorteilen gegenüber reinen Bohrloch- bzw. Oberflächenerkundungen begründet. Zentral ist in diesem Verständnis die direkte Erfassung der Wirtsgesteinscharakteristika, die räumliche Prognostizierbarkeit sowie das Verständnis einlagerungsbeeinflussender Prozesse, insbesondere der Auflockerungszone um Auffahrungen („Excavation Damaged Zone“, kurz EDZ). Demgegen-

über stehen die technischen Entwicklungen der letzten Jahrzehnte, die eine hinreichende Charakterisierung zur vergleichenden Bewertung von Standortregionen möglich erscheinen lassen. Der Vergleich ist Gegenstand dieses Gutachtens.

Thematisch wird die Fragestellung phänomenologisch anhand internationaler Erfahrungen an Standorten wie Tournemire und Bure in Frankreich, Mont Terri, Grimsel und das Molassebecken in der Schweiz, Äspö, Forsmark, Oskarshamn und Stripa in Schweden, Onkalo in Finnland, Mizunami in Japan sowie Gorleben in Deutschland betrachtet (s. Anhang 1 und Abb. 1). Die Auswahl lässt sowohl Schlüsse auf das jeweilige nationale Vorgehen in der Standortsuche, die Vergleichbarkeit von ober- und untertägigen Erkundungen in den jeweiligen Wirtsgesteinen, als auch die wirtsgesteinsspezifische Anwendbarkeit von Erkundungsmethoden zu. Ein besonderer Fokus dieser Stellungnahme liegt auf Entwicklungen der Explorationsmethoden und eingesetzten Techniken seit 2002, da der Übergang von Phase 2 zu Phase 3 im StandAG dem Übergang von Verfahrensschritt 4 zu 5 des AKEnd-Berichts (2002) entspricht. Die technische Betrachtung konzentriert sich daher auf Entwicklungen nach 2002 und die daraus ableitbaren, zeitnah zu erwartenden Fortschritte der Bohrlocherkundung.

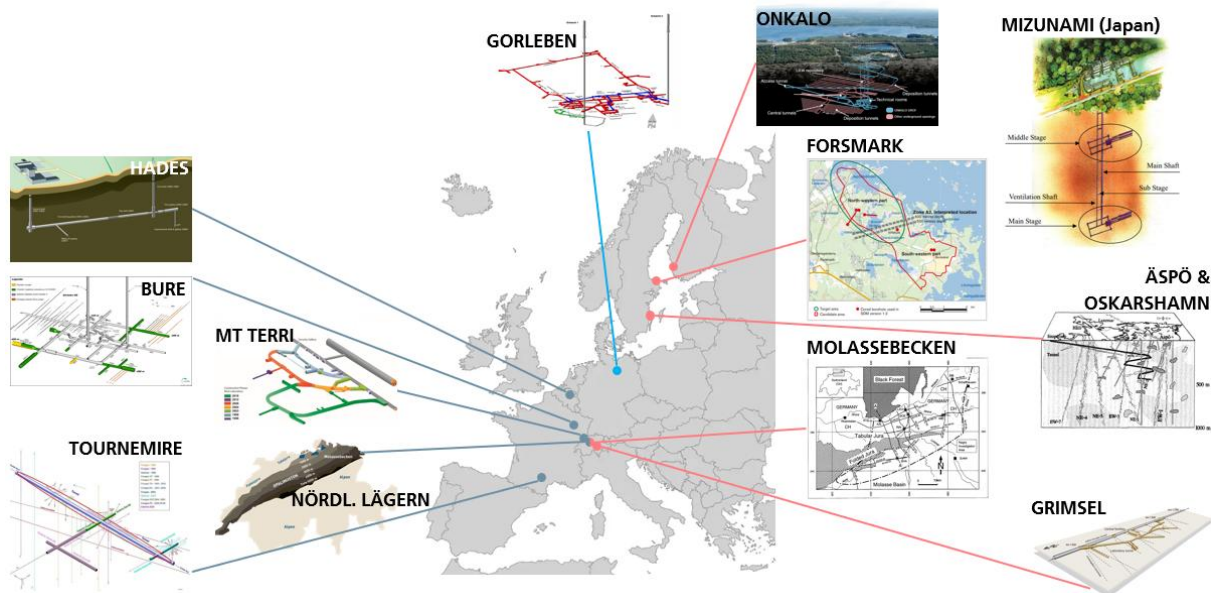


Abbildung 1: Im Gutachten dargestellte Untertagelabore und Endlagerprojekte. Graue Linien für Projekte in Tongesteinen; Blaue Linie für das Projekt in Steinsalz; Rosa Linien für Projekte in Kristallingesteinen (modifiziert nach Holt & Jalonen, 2024; JNC, 2002; Li et al, 2023; Nagra, 1994; SKB, 1997; 2008; https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Gorleben/Wesentliche_Unterlagen/20231211_Praesentation_Projekt_Schliessung_Gorleben_geschwaerzt_barrierefrei.pdf; <https://meusehautemarne.andra.fr/landra-en-meusehaute-marne/installations/le-laboratoire-souterrain>; <https://www.mont-terri.ch/de/innenansicht>; <https://nagra.ch/wissensforum/wieso-die-nordschweiz/>; <https://research-assessment.asnr.fr/tournemire-experimental-station>, letzte Abrufe jeweils 16.04.2026).

1.2 Grundlegende Fragestellungen

Das Gutachten verfolgt drei Hauptziele, die sich aus der dargestellten Ausgangssituation ableiten:

Erstens: Die Beschreibung und Gegenüberstellung der verschiedenen, teilweise wirtsgesteinsspezifischen Methoden entsprechend dem Stand der Wissenschaft und Technik sowie deren Vor- und Nachteile beziehungsweise Unterschiede in der über- beziehungsweise untertägigen Anwendung. Zentral ist die Bewertung, ob Schächte beziehungsweise Bergwerke sicherheitsrelevante Zusatzinformationen

liefern, die in Bohrlöchern allein nicht ausreichend genau und räumlich auflösend erhoben werden können, insbesondere in Bezug auf Gebirgsverhalten, hydraulischen Parametern, räumliche (und zeitliche) Prognostizierbarkeit und geologischen Bau. Im Fokus steht dabei die Identifikation sicherheitsrelevanter Parameter, die ausschließlich untertägig ermittelbar sind: Hydraulik, geologischer Bau, Variabilität der Eigenschaften und räumliche Prognostizierbarkeit.

Zweitens: Die Bewertung der Übertragbarkeit von Daten aus bestehenden Datensätzen mit speziellem Fokus auf Untertagelabore und Forschungsbergwerke. Dabei muss differenziert werden zwischen methodischen Erkenntnissen, die auf andere Standorte übertragbar sind, und standortspezifischen Parameterwerten, die lokale Bestimmung erfordern.

Drittens: Die Analyse der Unterschiede in der über- und untertägigen Erkundung hinsichtlich Effizienz, zeitlichem Aufwand, Kosten, Datenqualität und Datenquantität – mit besonderem Augenmerk auf die Behandlung des Deckgebirges und des Wirtsgesteins. Das Bergwerk sollte im Ergebnis einen klaren Sicherheitsvorteil gegenüber alternativen Erkundungsmethoden bieten, gemessen an Messunsicherheit, räumlicher Auflösung, lateraler/horizontaler Prognostizierbarkeit und der Robustheit der Daten mit Blick auf die Deckgebirgs-/Wirtsgesteinsvariabilität.

Die Beantwortung dieser Fragestellungen soll eine fundierte Grundlage für die Entscheidung über die Notwendigkeit und den Zeitpunkt untertägiger Erkundung im deutschen Standortauswahlverfahren liefern.

1.3 Relevante Eigenschaften

Zur Bewertung, ob ein aufzufahrendes Bergwerk einen sicherheitstechnischen Mehrwert bietet, wird auf die Bestimmungen aus §24 Absätze 3-5, sowie den Anlagen 1-11 StandAG verwiesen, aus denen hervorgeht, dass die notwendigen Parameter für ein hohes Einschlussvermögen, die zu erwartende Robustheit, Absicherung des Isolationsvermögens und weiterer sicherheitsrelevanter Eigenschaften ermittelt werden müssen. BGR (2018) konkretisiert diese geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zu Einzelparametern, welche in Tabelle 1 zusammengefasst werden. Diese rund 40 Parameter können in zwingend in-situ zu messende und im Labor zu messende unterteilt werden. Dabei wird deutlich, dass nur Parameter zur räumlichen Charakterisierung des ewG und des Deckgebirges, der hydraulischen Eigenschaften, dem Stressfeld und der Temperaturverteilung zwingend in-situ zur vergleichenden Bewertung der Standortsicherheit zu messen sind (unterstrichen in Tabelle 1). Viele weitere Parameter werden an Gesteins- und Grundwasserproben im Labor gemessen, die aus Bohrungen und Auffahrungen gewonnen werden. Aus Abwägungskriterium 2 geht zudem hervor, dass für die unterschiedlichen Wirtgesteinstypen die Parameter unterschiedliche Gewichtungen erhalten, womit eine Bewertung wirtgesteinsabhängig und lagersystemabhängig zu erfolgen hat.

Tabelle 1: Abwägungskriterien nach StandAG.

Nr.	Abwägungskriterium	Zu bestimmende Parameter
1	Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	<u>Mächtigkeit/Lage des ewG; Durchlässigkeit, Porosität; Kluftdichte, -Orientierung, -Vernetzung; hydraulischer Gradient, Grundwasserabstandsgeschwindigkeit; Diffusionskoeffizient für Radionuklide; Sorptionseigenschaften; Temperatur, pH/Eh/Redox-Werte, Salinität; Geometrie und Randbedingungen des Transportwegs; zeitliche Variationen (4D-Charakter).</u>
2	Konfiguration der Gesteinskörper	<u>Lage, Ausdehnung, Mächtigkeit des Gesteinskörpers; Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs; Grad der Umschließung des Einlagebereichs durch das ewG; Barriereigenschaften der Gesteine mit Blick auf den Konfigurationstyp ewG Typ I bzw. II); 2D/3D-Geometrie und räumliche Verteilung; Variation der Barriereigenschaften über das Gebiet.</u>
3	Räumliche Charakterisierbarkeit	<u>Geometrische Abgrenzung und Erkundungstiefe der Gesteinskörper; Datenabdeckung und -dichte; räumliche Auflösung der geowissenschaftlichen Informationen; Verfügbarkeit und Qualität von 2D-/3D-Modellen; Unsicherheiten in der räumlichen Zuordnung.</u>
4	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	Langzeitstabilität der Barriereverhältnisse; geomechanische Stabilität der Gesteinsprache; Zuverlässigkeit der Sicherheitsannahmen über Zeit; Annahmen zu Stress-, Temperatur- und Umweltveränderungen; Integrität der Barrierefunktionen im Langzeitszenario.
5	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	Gesteinsfestigkeit, Elastizitätsmodul, Schubmodul, Poisson-Zahl; Festigkeitseigenschaften des Gesteinsverbandes; Spaltbarkeit; <u>in-situ-Stresszustand</u> ; THMC-gekoppeltes Verhalten des Gesteinsverbandes; Anisotropie der mechanischen Eigenschaften.
6	Neigung zur Bildung von Fluidwegen	<u>Permeabilität, Porosität, Kluftkonnektivität; Kluftdichte, Kluftorientierung und -Durchmesser; Kluftöffnungsweite; räumliche Verteilung von offenen Fluidwegen; Anisotropie der Durchlässigkeit; potenzielle temporäre Änderungen durch Stress oder Temperatur.</u>
7	Gasbildung	Gasgenerationspotenzial (Radiolysis, Korrosion, Biogene Prozesse); Gasdruckentwicklung und Druckpfade; Gasmigration; Gaslöslichkeit in Wasser; Gaszusammensetzung; Gasretention und -Entweichungspotenzial.
8	Temperaturverträglichkeit	<u>in-situ-Temperatur</u> ; Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Wärmediffusivität des Gesteins; Wärmeproduktion durch Abkühlen bzw. radioaktiven Zerfall; THM-Kopplung; temperaturbedingte Materialveränderungen.
9	Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Retardationsverhalten gegenüber Radionukliden; Sorptionskapazität, Verteilungskoeffizienten; Diffusionskoeffizient im Gestein; Porosität und Porenwasserchemie; Barrieremächtigkeit; Raum- und Zeitverhalten der Diffusion/Transport.
10	Hydrochemische Verhältnisse	pH-Wert, Eh/Redox-Potential, Salinität; Hauptionenzusammensetzung; Gesamtmasse gelöster Feststoffe (TDS); Redoxbedingungen und Isotopensignaturen; Temperaturprofil des Grundwassers; chemische Reaktionsraten und Kopplungen (geochemische Prozesse).
11	Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge	<u>Mächtigkeit, Geometrie und Kontinuität des Deckgebirges; Barrierewirkung des Deckgebirges; geomechanische Stabilität des Deckgebirges; Klüftigkeit und Integrität des Deckgebirges; Hydraulische Isolationswirkung und Infiltration durch das Deckgebirge; geochemische Interaktionen zwischen Deckgebirge und ewG.</u>

2 Internationale Fallstudien

2.1 Frankreich

Die Endlagersuche in Frankreich begann in den 1990er Jahren mit dem Gesetz von 1991, das die Erforschung geologischer Formationen für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle vorsah. Nach dem Gesetz sollten mindestens zwei verschiedene Wirtsgesteine untersucht werden: Tonstein und Granit. Während für Granitformationen Pläne für ein unterirdisches Forschungslabor bestanden, wurden diese aufgrund von lokalem Widerstand und technischen Herausforderungen nicht weiterverfolgt. Stattdessen konzentrierte sich Frankreich auf Tonstein als bevorzugtes Wirtsgestein. Die französische Agentur ANDRA betreibt seit 1992 das Felslabor Tournemire (Aveyron) in einem stillgelegten Eisenbahntunnel für wissenschaftliche Grundlagenforschung zu Tongestein-Eigenschaften, Radionuklidtransport und Langzeitverhalten. Nach umfangreichen Untersuchungen wurde die Region um Bure (Meuse/Haute-Marne) als Standortregion ausgewählt. Dort betreibt ANDRA seit 2000 ein unterirdisches Forschungslabor in etwa 500 m Tiefe in der Callovo-Oxfordian-Tonformation, die aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit und Selbstabdichtungseigenschaften als besonders geeignet gilt. Das geplante Endlager Cigéo soll ab den 2030er Jahren in der Umgebung von Bure in Betrieb gehen.

2.1.1 Felslabor Bure

Das Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory (URL) in Bure wird von der französischen Behörde ANDRA betrieben und dient der Erforschung des Callovo-Oxfordium-Tonsteins in etwa 490 m Tiefe (Delay, 2006; Delay et al., 2006b, 2008; Makhijani et al., 2011).

Die übertägige geophysikalische Erkundung basiert maßgeblich auf seismischen Methoden. Zwischen 1994 und 2008 wurden insgesamt etwa 350 km 2D-seismische Profile sowie eine 3D-Seismik-Kampagne über 4,2 km² aufgezeichnet. Vertikale seismische Profilmessung in mehreren Bohrungen diente der Kalibrierung zwischen seismischen Reflektoren und geologischen Schichtgrenzen (Delay, 2010; Delay et al., 2006b; Makhijani et al., 2011). Die untertägige geophysikalische Erkundung umfasst seismische Tomographie, Ultraschallmessungen und passive seismische Überwachung mittels akustischen Emissionsaufnehmern zur kontinuierlichen Erfassung von Mikroseismizität (Delay et al., 2006b).

Die übertägige Bohrlocherkundung umfasst mehr als 29 Tiefbohrungen mit insgesamt über 25.000 Kernmetern bei Tiefen zwischen 517 und 1.865 m. Ein Teil der Bohrungen wurde mit Multipacker-Systemen für Langzeit-Druckmonitoring komplettiert. Das Wireline-Logging-Programm umfasst Gamma-Ray-Messungen, Spektral-Gamma-Ray, Sonic-Logs, Dichtemessungen, Neutron-Logs und Resistivity-Logs mit vertikalen Auflösungen zwischen 15 und 60 cm. Bohrlochbildgebung mittels Formation Micrologger und Borehole Televue erreicht Auflösungen im Millimeterbereich. Kernspinresonanz-Messungen liefern Informationen zur Porengrößenverteilung. Hydrogeologische Tests umfassen Slug-Tests, Pulse-Tests, Constant-Rate-Tests und Constant-Head-Tests für Permeabilitätsbereiche von 10⁻⁵ bis 10⁻¹³ m/s. Die Langzeit-Drucküberwachung erstreckt sich über Zeiträume von mehr als einem Jahr. Geomechanische Tests mittels hydraulischer Kluftinduktion und hydraulische Öffnung bestehender Klüfte dienen der Spannungsbestimmung. Geochemische Untersuchungen beinhalten Porenwasser-Extraktion und Isotopenanalysen (Delay, 2010; Delay et al., 2006a,b; Makhijani et al., 2011).

Insgesamt wurden etwa 1.900 m Streckenlänge mittels 3D-Laserscanning dokumentiert. Diese Methode wird für geologische Kartierung, Dokumentation von Rissbildung, Volumenberechnung sowie Konvergenzmessung eingesetzt. Ergänzend wurde hochauflösende Fotogrammetrie durchgeführt, die eine Pixelauflösung von 0,25 mm erreicht. Hyperspektrale Bildgebung wurde zur Fernerkennung von Mineralphasen im und Elektrische Widerstandstomographie zur Eingrenzung der Auflockerungszone um den Tunnel eingesetzt (Chazaly et al., 2021; Makhijani et al., 2011).

Die untertägige Bohrlocherkundung umfasst mehr als 500 Bohrungen in den Kategorien Hydromechanik, Hydrogeologie, Geochemie, Diffusion und Retention, Thermik sowie Versiegelung. Hydromechanische Untersuchungen nutzen instrumentierte Mine-by-Tests mit CSIRO-Zellen zur Dehnungsmes-

sung, Mehrpunkt-Extensometern und Inklinometern. Zur Porenwassercharakterisierung werden Wasser- und Gaszirkulationsversuche in Bohrlochintervallen über Zeiträume von mehreren Monaten durchgeführt. Diffusionsexperimente nutzen verschiedene Tracer wie tritiiertes Wasser und Anionen, die in Bohrlochintervalle injiziert werden, wobei die Konzentrationsverteilung über Zeit erfasst wird (Delay et al., 2006a,b; Renaud et al., 2005; Makhijani et al., 2011).

Thermische Untersuchungen erfolgen mittels Heizversuchen bei Temperaturen bis 100 °C über mehrjährige Zeiträume, sowohl in Einzelbohrungen als auch in Mikrotunneln mit Heizelementen. Gasmigrationstests nutzen Injektionen von Stickstoff, Helium und Wasserstoff. Permeabilitätsmessungen in der Auflockerungszone erfolgen mit Gas und Wasser als Testmedium in Bohrungen mit Mehrfach-Packersystemen. Versiegelungsuntersuchungen testen verschiedene Materialien in Schlitzen und Bohrlochern (Delay et al., 2006a,b; 2008; Makhijani et al., 2011).

2.1.2 Felslabor Tournemire

Das Untertagelabor Tournemire befindet sich in einem ehemaligen Eisenbahntunnel aus den Jahren 1882-1888, der eine 250 m mächtige Argilite-Formation (Toarcium und Domerium, ca. 180 Millionen Jahre alt) durchquert. Das Labor wird seit 1992 von Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) betrieben und umfasst einen 1.885 m langen Tunnel sowie sechs Galerien mit einer Gesamtlänge von über 285 m. Die Infrastruktur wurde durch mehr als 350 Bohrungen erweitert (IRSN, 2018).

Auf Grund der Reaktivierung eines alten Tunnels wird die Beschreibung der übertägigen Exploration vernachlässigt und nur die untertägige Exploration betrachtet. Diese ist spezifisch auf die neu ausgebrochenen Galerien fokussiert.

Die aktive seismische Tomographie wurde mit magnetostriktiven Vibratoren und Hammer-Quellen durchgeführt. Die Anordnung umfasste 17 Bohrungen mit 3-Komponenten-Geophonen. Die Datenquantität beinhaltet Baseline-Messungen aus 2022 sowie Wiederholungsmessungen 2024. Das Cross-hole seismische Tomographie-System verwendete einen Ultraschall-Transmitter mit Empfang an mehreren AE-Sensoren, woraus ein vorläufiges P-Wellen-Geschwindigkeitsmodell entwickelt wurde. Die faseroptische Temperaturmessung mittels Raman-Streuung erzeugte kontinuierliche Aufzeichnung seit September 2022 mit Profilen alle 4,5 min (Giese et al., 2026).

Hydraulische Versuche wurden in vielen Bohrungen mit einem Doppel-Packer-System durchgeführt. Die ermittelten Permeabilitäten zeigten Werte von $2,41 \times 10^{-18}$ bis $1,17 \times 10^{-17}$ m² für den Störungskern und $2,86 \times 10^{-16}$ m² für die Störungszone. Die Gasinjektionstests verwendeten Stickstoff und Argon in zehn separaten Tests zwischen Juni und Oktober 2024. Die Datenqualität der ermittelten Permeabilitätswerte zeigte sich in konsistenten Ergebnissen zwischen 1×10^{-20} m² und 7×10^{-17} m² (IRSN, 2018; Giese et al., 2026). Die lange Standzeit des Tournemire-Tunnels (über 130 Jahre) bietet einzigartige Möglichkeiten für Langzeitbeobachtungen der Excavation Damaged Zone (EDZ) und der Beton-Gesteins-Interaktionen, die in jüngeren Untertagelaboren nicht verfügbar sind (Bernier et al., 2021).

2.2 Belgien

Die Endlagersuche in Belgien begann in den 1970er und 1980er Jahren, als die belgische Agentur ONDRAF/NIRAS (Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies) mit der Erforschung geologischer Formationen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle beauftragt wurde. Im Fokus der Untersuchungen steht Tongestein, insbesondere der Boom-Ton, eine tertiäre Tonformation mit geringer Durchlässigkeit und guten Rückhalteeigenschaften. Seit 1980 betreibt ONDRAF/NIRAS das unterirdische Forschungslabor HADES in Mol (Provinz Antwerpen) in etwa 225 m Tiefe, wo umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen zu den Eigenschaften des Boom-Tons, zum Radionuklidtransport und zur technischen Machbarkeit der Tiefenlagerung durchgeführt werden. Als potenzieller Standort für ein Endlager für hochradioaktive und langlebige mittelradioaktive Abfälle wird die Region um Dessel-Mol diskutiert, wo bereits ein oberflächennahes Lager für kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle existiert. Die Standortentscheidung und Realisierung eines Tiefenlagers befinden sich in einem schrittweisen Prozess mit Beteiligung lokaler Gemeinschaften und öffentlichen Konsultationen, wobei eine Inbetriebnahme frühestens in den 2070er bis 2080er Jahren erwartet wird.

2.2.1 Felslabor HADES

Das HADES Untertagelabor liegt 225 m unter der Oberfläche in der Boom Clay Formation bei Mol, Belgien, wobei der Bau 1980 begann. Die Boom Clay Formation erstreckt sich am Standort von 185 bis 287 m Tiefe mit einer Mächtigkeit von etwa 100 m (Armand et al., 2023).

Vor dem Bau des HADES in den 1970er Jahren wurden seismische Kampagnen durchgeführt, um den Standort Mol bis zu einer Tiefe von 580 m zu charakterisieren. Dabei kamen 2D- und 3D-seismische Methoden zum Einsatz, wobei die 3D-Technik durch räumliche Kohärenz der Datensätze eine bessere Auflösung als 2D bietet. Ergänzend erfolgten regionale geologische Untersuchungen zur Identifikation der Ausdehnung der Boom Clay Formation (Armand et al., 2023; Delay, 2010; ESV EURIDICE EIG, 2010; Li et al., 2023).

Das Bohrprogramm umfasste Kernbohrungen bis 580 m Tiefe zur Charakterisierung der Boom Clay Formation hinsichtlich Lithologie, mineralogischer Zusammensetzung und geotechnischer Parameter. Laboruntersuchungen an Kernen erfassten mechanische Eigenschaften, Wassergehalt, Tonmineralgehalt und hydraulische Leitfähigkeit. Zur Bestimmung des Schermoduls wurden Bender Element Tests durchgeführt, wobei die Laborwerte durch in-situ seismische Messungen im HADES URL bestätigt wurden (Armand et al., 2023; De Craen et al., 2023; Delay, 2010; Li et al., 2023).

Zur EDZ-Charakterisierung erfolgten während der Exkavation systematisch Kartierungen von Rissen mit Fotodokumentation der Ausgrabungsfront und Erstellung einer detaillierten Datenbank zu Risstypen, Rissorientierung und räumlicher Verteilung. Nach dem Tunnelbau wurden Kernbohrungen durchgeführt, seismische Überwachung mit vier Beobachtungsbohrungen etabliert sowie computertomografische, bildgebende Verfahren zur Rissbestimmung eingesetzt (Li et al., 2023).

Für die Porenwassergewinnung aus Kernen wurden zwei Methoden entwickelt: die Auslaugungs-Methode mit zerkleinerten Tonproben und deionisiertem Wasser sowie das mechanische Auspressen. Zur hydromechanischen Charakterisierung wurden instrumentierte Bohrungen mit Porenwasserdrucksensoren, Totaldrucksensoren, Verschiebungssensoren und Temperatursensoren installiert. Akustische und seismische Transmissions- und Empfangsmessungen erfolgten in Beobachtungsbohrungen zur Charakterisierung der anisotropen elastischen Eigenschaften. Die hydromechanischen Monitoring-Daten umfassen kontinuierliche Aufzeichnungen über mehr als 20 Jahre (Armand et al., 2023; Chen et al., 2023 und darin enthaltene Zitate; De Craen et al., 2023; Delay, 2010; Delay et al., 2014; Li et al., 2023).

2.3 Schweiz

Die Endlagersuche in der Schweiz begann in den 1970er Jahren, als die Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) mit der Erforschung geeigneter geologischer Formationen beauftragt wurde. Zunächst wurden kristalline Gesteine (Granit/Gneis) untersucht, weshalb die Nagra seit 1984 das Felslabor Grimsel (Berner Oberland) in etwa 450 m Tiefe im Diorit und Granodiorit betreibt, wo grundlegende Untersuchungen zu den Eigenschaften kristalliner Formationen, Wasserwegsamkeiten, Radionuklidtransport und technischen Verfahren durchgeführt werden. Auf Grund negativer Explorationsergebnisse des Kristallins der Nordschweiz wurde Kristallin in der Schweiz zurückgestellt und auf Tonsteinformationen fokussiert. Seit 1996 wird das internationale Felslabor Mont Terri (Kanton Jura) für wissenschaftliche Grundlagenforschung zu Opalinuston genutzt, wo geologische, hydrogeologische, geochemische und geomechanische Eigenschaften sowie das Langzeitverhalten untersucht werden. Nach umfangreichen Bewertungen hat sich Opalinuston als bevorzugtes Wirtsgestein etabliert, eine tonreiche Formation mit geringer Durchlässigkeit, hoher Sorptionskapazität und Selbstabdichtungseigenschaften. Im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager durchlief die Schweiz ab 2008 ein strukturiertes, mehrstufiges Auswahlverfahren mit umfassender Standortbewertung und Beteiligung der betroffenen Regionen. Nach Eingrenzung mehrerer potenzieller Standortgebiete im Molassebecken der Nordschweiz wurde 2022 die Region Nördlich Lägern (Grenzgebiet Kantone Zürich und Aargau) als Standort für ein geologisches Tiefenlager für hochradioaktive sowie langlebige mittelradioaktive Abfälle ausgewählt. Der Aufschluss mittel Erkundungsbergwerk soll in den 2030 Jahren erfolgen. Die Realisierung des Endlagers wird schrittweise erfolgen, mit einer geplanten Inbetriebnahme frühestens ab den 2050er bis 2060er Jahren.

2.3.1 Felslabor Mont Terri

Eine Vielzahl von Erkundungsmethoden wurden seit 1996 im Felslabor Mont Terri eingesetzt. Es befindet sich in einer Tiefe von circa 300 m unter der Oberfläche. Es liegt innerhalb einer etwa 150 m mächtigen Schicht aus Opalinuston, die durch den rund 800 m hohen Berg Mont Terri verläuft. Im Untertagelabor Mont Terri werden die geologischen Verhältnisse des Opalinustons mit einem abgestuften System komplementärer Explorationsmethoden untersucht, das geophysikalische Bohrloch- und Stollenmessungen, hydraulische in-situ-Tests und hochkontrollierte Laborversuche umfasst (Bossart et al. 2017; Jaeggi et al., 2024; Schuster et al. 2017).

Ein Teil der geophysikalischen Exploration sind die hochauflösenden, kleinräumigen seismischen Messungen (seismische und untere Ultraschallfrequenzen) und in Einzelbohrlöchern, zwischen Bohrlöchern und zwischen Stollen zur hochauflösenden Schichtungserkundung eingesetzt werden. Die Methodik erlaubt die explizite Erfassung der auffahrung induzierten Auflockerungszone um Tunnel (EDZ) und der Bohrloch-Auflockerungszone (BdZ). Neben Einzelbohrlöchern werden tomografische Versuche zwischen Bohrungen und Bohrungsästen und Tunnel-zu-Tunnel-Transmissionsexperimente mit Weglängen bis 60 m eingesetzt, um Geschwindigkeitsverteilungen, Anisotropie und Störungen im Meter- bis Dekametermaßstab abzubilden. Ergänzend zur Seismik wird in denselben Bohrlochern und Stollen elektrische Widerstandstomographie (ERT) mit dicht beabstandeten Signalaufnehmern eingesetzt; invertierte Widerstandsprofile identifizieren Faziesbereiche und korrelieren eng mit v_p -Profilen und Gamma-Ray-Index-Logs (Furche & Schuster, 2015; Schuster et al. 2017).

Die hydraulische in-situ-Exploration des Opalinustons erfolgt mit Mehrfachpacker-Systemen in Bohrungen, in denen mehrere Intervalle separat getestet werden, um hydraulische Leitfähigkeiten und spezifische Speicherkoeffizienten zu bestimmen. Für Stressfeld und in-situ Gesteinsverhalten kommen zusätzlich hydraulische Kluftinduktions- und Dilatometermessungen zum Einsatz, die durch hochfrequente Druckzeitreihen, Raman-Spektroskopie und miniRUEDI-Analysen begleitet werden. Hydromechanische Eigenschaften wurden bevorzugt an Kernproben unter kontrollierten Spannungs- und Temperaturbedingungen im Labor gemessen. (Guglielmi et al. 2015; Guglielmi & Birkholzer, 2024; Heitzmann 2003; Lundy et al., 2024; Winhausen et al., 2021; Yu et al., 2017)

2.3.2 Vom Kristallin der Nordschweiz zum Standortvorschlag Nördlich Lägern

Die übertägige Exploration der Nordschweiz stützt sich seit den 1980er/1990er-Jahren auf ein dichtes Netz reflexionsseismischer Messungen (2D, später 3D), die Struktur, Mächtigkeit und Lagerung der mesozoischen und permokarbonen Abfolge systematisch erfassten. Die Region Nördlich Lägern wurde durch hochauflösende 2D-Seismik aus den frühen 1990er-Jahren eingebunden. Diese seismischen Datensätze bilden die Grundlage großräumiger 3D-Strukturmodelle und hydrogeologischer Modelle (Naef & Birkhäuser, 1996; Nagra, 2014).

Ein Tiefbohrprogramm seit Anfang der 1980er-Jahre umfasste mehrere Bohrungen, die das kristalline Grundgebirge über große Tiefenintervalle durchteuften. Insgesamt liegen mehrere Kilometer orientierter Bohrkerne vor, die eine kontinuierliche, meter- bis dezimetergenaue Aufnahme petrographischer, struktureller und geochemischer Merkmale ermöglichen.

Die Bohrungen wurden mit standardisierten geophysikalischen Bohrlochmessungen (Gamma-, Dichte-, Resistivitäts-, akustische und Bild-Logs, TelevIEWer), hydraulischen Packertests und Laboruntersuchungen bearbeitet. Langzeitbeobachtungen des Druckverhaltens erfassen zeitliche Schwankungen der Tiefendrucke. Laboranalysen umfassen Dünnschliff-Petrographie, Gefüge- und Deformationsanalysen, geochemische Bestimmungen, radiometrische Datierungen, physikalische Gesteinsparameter sowie Fluideinschluss- und Isotopenanalysen (Nagra, 1986; 2009; 2014).

In den Standortgebieten Jura Ost und Zürich Nordost sowie dem Standortvorschlag Nördlich Lägern erweiterten neun Tiefbohrungen (TBO-Bohrungen) das bestehende Wissensfundament. Die Bohrungen erschließen die Sedimentabfolge vom Malm über Dogger, Lias, Keuper und Muschelkalk teilweise bis in permokarbones Gestein.

Ein standardisiertes, qualitätsgesichertes Bohrloch-Log- und Testprogramm wurde durchgeführt: konventionelle und erweiterte Wireline-Logs (z.B. mechanische und Mehrarm-Kaliber, Total- und Spektral-Gamma, Dichte und fotoelektrischer Faktor, Neutron-Porosität und Sigma, Laterolog-Array-Resistivitäten, Sonic-Messungen, Elementarspektroskopie). Hochauflösende Bohrlochbildgebung erfolgte mit FMI (mikroresistiv) und UBI (ultraschallbasiert). Laboranalysen von Kernen umfassten XRD-Mineralogie, Tonmineralogie, Porosität aus Pyknometer- und Wasserverlust-Messungen sowie Multilogger-Daten (Dichte, v_p , Gamma-Spektrum, XRF-Elementgehalte).

Geomechanische in-situ-Versuche umfassten hydraulische Kluftinduktions-Messungen und Druck-Meter-Tests zur Spannungs- und Verformungsbestimmung. Hydrogeologisch wurden Fluid-Logging und hydraulische Packertests durchgeführt, wobei die gesamte Bohrlochdruckgeschichte rekonstruiert und in die Auswertung einbezogen wurde (Nagra, 2022).

2.3.3 Felslabor Grimsel

In der Grimsel Test Site wurden umfangreiche seismische Untersuchungen mittels Hochfrequenzsignalen durchgeführt. Die seismischen Versuche erlaubten die Darstellung von großen Störungszonen (Scherzonen, Lamprophyre). Die Kombination von v_p - und v_s -Wellen zeigte, dass offene und wasserführende Klüfte besser sichtbar sind als nicht hydraulisch aktive. Die Labormessungen umfassten seismische Geschwindigkeit und Dämpfung an intakten und geklüfteten Proben. Radar-Messungen wurden im Felslabor Grimsel ebenfalls durchgeführt, zeigten jedoch wegen eingeschränkter Eindringtiefe in kristallinen Gesteinen eine begrenzte Anwendungstiefe. Die Radarreflexionen konnten Lamprophyre und Störungszonen bis etwa 150 m Entfernung darstellen (Nagra, 1985; 1990b; 1992).

Im Rahmen der hydraulischen Charakterisierung wurden im Grimsel Test Site mehrere Bohrlöcher mit Mehrfachpacker-Systemen bis in Tiefen um 50 m abgeteuft und hydraulisch untersucht. Die Datenquantität ist umfangreich mit vielen Langzeitmessungen (Wochen bis Monate). Die Datenqualität ist hoch, aber komplex in der Interpretation durch Heterogenität, Tunneldrainage und mehrphasige Zustände. Die hydraulischen Tests zeigten eine heterogene Transmissivitätsverteilung. Die hydraulischen Tests wurden durch Druckflussmessungen ergänzt (Nagra, 1990b).

2.4 Finnland

Die Endlagersuche in Finnland begann in den 1980er Jahren, als die finnische Regierung die systematische Erforschung geologischer Formationen für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle initiierte. Im Fokus stehen kristalline Gesteine, insbesondere Granit und Ortho-Gneis, die aufgrund ihrer mechanischen Stabilität, geringen Wasserdurchlässigkeit und langfristigen geologischen Beständigkeit als geeignet gelten. Die Verantwortung für die Endlagerung trägt die Gesellschaft Posiva Oy, ein Gemeinschaftsunternehmen der finnischen Energieversorger. Nach umfangreichen Standortuntersuchungen an mehreren Orten wurde 2000 Olkiluoto (Gemeinde Eurajoki, Westfinnland) als Standort für das Endlager ausgewählt. Seit 2004 plant Posiva dort das unterirdische Forschungslabor und Endlager Onkalo in etwa 400-450 m Tiefe im kristallinen Grundgebirge. Die Baugenehmigung wurde 2015 erteilt, und Finnland ist damit weltweit das erste Land mit einer genehmigten Endlageranlage für hochradioaktiv abgebrannte Brennelemente. Die Inbetriebnahme von Onkalo erfolgte 2023, mit einer geplanten Betriebsdauer von etwa 100 Jahren bis zum endgültigen Verschluss.

2.4.1 Olkiluoto und Onkalo

Für Olkiluoto und das untertägige Labor Onkalo wird eine Kombination aus übertägigen und untertägigen Erkundungsmethoden eingesetzt, die sowohl geophysikalische als auch bohrlochbasierte Verfahren umfasst. Die übertägige Erkundung stützt sich im Wesentlichen auf ein Netz von Tiefbohrungen mit Kerngewinnung, die von der Insoberfläche aus abgeteuft wurden und in der Regel mehrere hundert m bis in den Bereich des späteren Endlagerniveaus reichen. Diese Bohrungen liefern kontinuierliche Kernproben und werden mit standardisierten Bohrlochmessprogrammen ergänzt, etwa geophysikalischer Bohrlochlogging, hydraulischen Tests und Wasserprobenahmen, so dass entlang der Bohr-

lochachsen viele verschiedene Parameter erfasst werden. Die Daten dieser Bohrungen liegen als linienhafte, vertikal oder schräg orientierte Datensätze vor, und die räumliche Abdeckung wird durch ein vergleichsweise enges Bohrnnetz im zentralen Untersuchungsgebiet bestimmt. Ergänzend kommen an der Oberfläche seismische Methoden sowie andere geophysikalische Verfahren wie Gravimetrie, Magnetik und elektrische/elektromagnetische Messungen zum Einsatz, mit denen flächenhaft Informationen über den Aufbau des Untergrundes und größere Strukturen gewonnen werden. Diese geophysikalischen Messungen liefern im Vergleich zu Bohrungen weniger dichte Punktdaten, decken dafür aber größere Bereiche von Olkiluoto ab und werden mit den Bohrungsinformationen kombiniert (Delay et al., 2014; NEA, 2024; Posiva, 2007; 2009; 2016).

Die untertägige Erkundung in Onkalo ergänzt die übertägigen Daten durch Bohrungen, die aus der Rampe, aus Tunneln und aus Nischen abgeteuft werden und auf das vorgesehene Endlagerniveau und dessen unmittelbares Umfeld ausgerichtet sind. Diese Bohrungen umfassen sowohl längere Kernbohrungen als auch kürzere Erkundungsbohrungen und werden mit ähnlichen Messprogrammen wie an der Oberfläche kombiniert, also mit orientierter Kernaufnahme, geophysikalischen Bohrlochmessungen, hydraulischen Tests und chemischen Analysen der Grundwässer. Die Verteilung dieser untertägigen Bohrungen ist eng an den Verlauf der Hauptzugänge und der geplanten Einlagerungsbereiche gekoppelt, sodass sich in Tunnelumgebung ein dichtes Netz von vertikal und horizontal ausgerichteten Bohrungen ergibt. Zusätzlich werden im Schacht- und Tunnelvorfeld zahlreiche kürzere Bohrungen für Zwecke der Vorerkundung und Dichtungsverfahren abgeteuft, die insbesondere Informationen zur Wasserführung und zur lokalen Kluftsituation in unmittelbarer Tunnelumgebung bereitstellen und damit eine hohe Datendichte entlang des Ausbaus liefern. Diese untertägigen bohrlochbasierten Maßnahmen konzentrieren sich räumlich auf das Endlagerniveau, liefern aber im Vergleich zur oberflächengestützten Erkundung detailliertere Datensätze direkt im relevanten Tiefenbereich (NEA, 2024; Posiva, 2007; 2009; 2016).

Parallel dazu wird die untertägige geophysikalische Erkundung in Onkalo durchgeführt, wobei geophysikalische Messverfahren an Tunnelwänden eingesetzt werden. Dazu gehören insbesondere seismische Messungen im Tunnel, mit denen ein Volumen um die Tunnelachsen herum untersucht wird, sowie weitere geophysikalische Verfahren, die der Abbildung des Gebirgsvolumens, der Identifikation von Strukturen und der Charakterisierung von durch den Ausbau beeinflussten Bereichen dienen. Die untertägige geophysikalische Erkundung erzeugt Datensätze, die den Bereich bis einige hundert m um die Tunnel herum erfassen und flächigere Informationen bereitstellen als einzelne Bohrungen, gleichzeitig aber durch die geringere Anzahl von Profilen und Messkampagnen im Vergleich zu Bohrungen eine andere Verteilung und Dichte der Daten aufweisen. Ergänzend zur geophysikalischen Erkundung wird in Onkalo die systematische geologische Kartierung der Tunnelwände genutzt, bei der lithologische Merkmale, Klüfte, Strukturen und weitere geologische Elemente aufgenommen werden. Diese Kartierungen erzeugen eine große Anzahl von Beobachtungen auf Tunnel-Skala und bilden damit ein engmaschiges Datengerüst entlang des untertägigen Ausbaus (Delay et al., 2014; NEA, 2024; Posiva, 2007; 2009; 2016).

Die Kombination dieser übertägigen und untertägigen Methoden wird für Olkiluoto und Onkalo systematisch eingesetzt, um einerseits flächenhafte geophysikalische und bohrlochbasierte Informationen vom Gelände aus zu erfassen und andererseits im Endlagerniveau selbst durch bohrlochbasierte Untersuchungen, geophysikalische Messungen und Tunnelkartierungen ein verdichtetes Datenbild zu erzeugen. Dabei greifen die in Onkalo eingesetzten Methoden auf international etablierte Erkundungs- und Untersuchungsansätze aus anderen untertägigen Laboren zurück, die für die spezifischen geologischen Verhältnisse in Olkiluoto angepasst wurden (Blechs Schmidt & Vomvoris, 2010; Delay et al., 2014; Holt & Jalonen, 2024; Mazurek et al., 2008; NEA, 2024; Posiva, 2007; 2009; 2016).

2.5 Schweden

Die Endlagersuche in Schweden begann in den 1970er Jahren, als die schwedische Gesellschaft SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) mit der systematischen Erforschung geologischer Formationen für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle beauftragt wurde. Im Fokus stehen kristalline Gesteine, insbesondere Granit und Ortho-Gneis, die aufgrund ihrer mechanischen Stabilität und geringen Wasserdurchlässigkeit als geeignet gelten. Seit 1995 betreibt SKB das Äspö Hard Rock Laboratory in der

Nähe von Oskarshamn (Südostschweden) in etwa 450 m Tiefe im kristallinen Grundgebirge, wo umfangreiche in-situ-Experimente zur Langzeitsicherheit und technischen Machbarkeit der Tiefenlagerung stattfinden. Nach einem schrittweisen Standortauswahlverfahren wurden Forsmark (Gemeinde Östhammar, Ostschweden) und Oskarshamn als potenzielle Standorte detailliert untersucht. 2009 wählte SKB Forsmark als bevorzugten Standort für das Endlager aus. Die Baugenehmigung wurde 2022 erteilt, und die Inbetriebnahme wird für die 2030er Jahre erwartet.

2.5.1 Felslabor Äspö und Standortregion Oskarshamn

Das Erkundungsprogramm für Oskarshamn umfasste die Teilgebiete Ävrö (inklusive Äspö), Laxemar und Simpevarp und entwickelte sich von einem 60 km² großen Regionalgebiet über ein 15 km² großes, lokales Gebiet bis zu einem fokussierten Bereich im Südwesten Laxemars. Die flächendeckende geologische Oberflächenkartierung umfasste petrologische und geochemische Analysen, Aufschlusskartierungen an Bohrplätzen, systematische Kluftkartierung für Klüfte mit 0,5-10 m Länge sowie regional etwa 750 km Lineamentkartierung (SKB, 1994; 2000; 2006a; 2007a,d).

Die geophysikalische Oberflächenerkundung kombinierte luftgestützte und bodengebundene Methoden. Hubschraubergestützte Magnetik, Elektromagnetik, VLF und Radiometrie erfassten 60-85 km² beziehungsweise circa 25×50 km im gesamten Simpevarp-Gebiet. Die detaillierte Bodengeomagnetik umfasste 15 km², elektromagnetische Messungen 12,6 km und 2,4 km sowie Resistivitätsmessungen in drei 400×400 m Plots. Seismische Reflexionsuntersuchungen erfolgten über 9,9 km in Laxemar und 3,7 km auf Ävrö, ergänzt durch multiple seismische Refraktionsprofile einschließlich Unterwasserprofilen. Boden-Radarmessungen umfassten drei N-S-Profile mit Messpunktabständen von 0,5 m, und Gravimetriemessungen erfolgten im regionalen Maßstab. GPS-Deformationsmessungen erfolgten ab 2000 mit sieben bis zehn Stationen über 15×20 km mit Basislinien von 2-7 km. Elf Messkampagnen über vier Jahre (2000-2004) mit drei Messungen pro Jahr umfassten circa 14 Millionen Beobachtungen. (SKB, 1994; 2000; 2004b; 2006a)

Das Äspö Hard Rock Laboratory wurde zwischen 1986 und 1990 charakterisiert und bis 1995 ausgebrochen. Die Untersuchungen erfolgten auf vier Modellierungsskalen: regional (>>1.000 m), Standort (100-1.000 m), Block (10-100 m) und Detail (0-10 m). Das untertägige Bohrprogramm umfasste 14 tiefe Kernbohrungen (200-1.000 m), vier flache Kernbohrungen (100 m), 36 tiefe Spülbohrungen (100-200 m) und acht flache Spülbohrungen (22-93 m). Die Kernkartierung erfolgte zur Identifikation von Gesteinseinheiten und Deformationszonen, wobei während der Betriebsphase alle Tunnelflächen und Bohrkerne kontinuierlich kartiert, alle Hauptdeformationszonen temporär markiert, alte Fotografien digitalisiert und kontinuierlich aktualisiert wurden (SKB, 1994; 2006b; 2017; Stanfors et al., 1999).

Das Loggingprogramm in allen Kernbohrungen und einigen Spülbohrungen umfasste Televiwer, Gamma-Gamma, Neutron, Bohrlochablenkung, Kaliber, Sonic, natürliche Gammastrahlung, Einzelpunkt-Widerstand, Selbstpotenzial, magnetische Suszeptibilität, Normal- und Lateralwiderstand, Temperatur sowie Bohrlochfluid-Widerstand. Bohrlochradarmessungen und vertikale seismische Profilierung wurde in einzelnen Bohrungen durchgeführt. Elektrische Widerstandstomographie mit Elektrodenarrays in einzelnen Bohrungen ermöglichte kontinuierliche Überwachung der Wasseraufnahme (SKB, 1994; 2006b; 2017).

Vielfach wurden Air-Lift-Tests, hydraulische Injektionstests sowie hydraulische Interferenztests durchgeführt. Drücke wurden ab 1992 durch ein zentrales System aufgezeichnet. Im Felslabor wurden Hauptbestandteile der Fluidphase analysiert. Externe Analysen umfassten Spurenelemente, Huminstoffe, Gase und Isotope. Teile des Bohrwassers wurde mit Uranin markiert und die Ausbreitung analysiert. Tracertests wurden unter anderem als radial konvergierende Tests durchgeführt (SKB, 1994).

Gesteinsspannungsmessungen durch hydraulisches Aufbrechen und Überbohren erfolgten in drei tiefen Bohrlöchern mit Minifrac. Laboruntersuchungen umfassten einaxiale Druckversuche an circa 10 Proben jedes Gesteinstyps und Scherversuche an wenigen Klüften. Thermische Gesteinseigenschaften wurden durch Labormessungen bestimmt, und Porositätsmessungen an Bohrkernmaterial umfassten Gesamtporosität und verbundene Porosität an Kernplugs verschiedener Dicken (SKB, 1994; 2006b).

Bis 2009 wurden im angrenzenden Laxemar 19 Bohrungen mit 16.184 m Gesamtlänge abgeteuft. Die durchschnittliche Tiefe betrug 850 m mit maximal 1.701 m. Zusätzlich waren 6-7 mittlere Bohrungen

und etwa 10 kurze Bohrungen geplant. Aus 14 Kernbohrungen wurden etwa 400 Gesteinsproben für Laboruntersuchungen entnommen (SKB, 2000; 2006a; 2007a; 2009).

Die Bohrlochgeophysik umfasste in allen Kernbohrungen Video-Logging, Radar-Messungen zur Strukturorientierung und Televiwer-Logging, Standardlogging (Dichte, Suszeptibilität, Gamma, Resistivität), Temperaturmessungen sowie Cross-Hole-Tomographie zwischen ausgewählten Bohrungen. Gesteinstechnische Untersuchungen bestimmten Klufteigenschaften, einaxiale Druckfestigkeit, E-Modul und Zugfestigkeit. Gebirgsspannungsmessungen erfolgten in einigen Bohrungen (SKB, 2000; 2003a; 2006a).

Hydrogeologische Untersuchungen in allen Kernbohrungen umfassten Posiva-Fluid-Logging für Kluft-Transmissivitäten, Pumpversuche, Interferenztests zwischen Bohrungen, kontinuierliches Grundwassermonitoring sowie hydraulische Doppelpackertests. Hydrochemische Untersuchungen erfolgten mittels Entnahme aus dem Steigrohr und kompletten Charakterisierungen in mehreren Bohrungen mit Analysen von Hauptionen, Spurenelementen, Isotopen, Gasen, Kolloiden und Mikroben sowie Redox-Messungen und Grundwasserprobenahmen in allen Kernbohrungen (SKB, 2000; 2004c; 2006a).

Das Laborprogramm umfasste Porositätsmessungen an 333 Proben (Wassersättigung), elektrische Resistivitätsmessungen an 167 Proben, chemische Messungen (102 Proben) und Batch-Sorptionsuntersuchungen sowie thermische Leitfähigkeitsmessungen ergänzend zu Dichtelogging (SKB, 2006a; 2009).

2.5.2 Forsmark

Am Standort Forsmark stützt sich die geophysikalische Erkundung auf ein breites Spektrum luft- und bodengeophysikalischer Methoden, insbesondere magnetische Messungen aus Flugzeug und Helikopter, hochauflösende Bodenmagnetik, elektromagnetische Verfahren, Gammaskpektrometrie sowie Reflexions- und Refraktionsseismik; diese Daten werden zur Ableitung von Lineamenten und zur geometrischen Modellierung von Gesteinsdomänen und Deformationszonen im regionalen und lokalen Modellvolumen verwendet. In Forsmark liegen flächenhaft erhobene Magnetik-Datensätze in hoher räumlicher Dichte vor, die mit hochauflösender Bodenmagnetik kombiniert wurden; auf dieser Grundlage wurden lineare Strukturen kartiert und in die deterministischen Strukturmodelle überführt. Ergänzend wurden seismische Reflexionsdaten an der Oberfläche und im Bohrloch reprozessiert und zusammen mit seismischen Refraktionsmessungen genutzt, um die Geometrie von Zonen in der Tiefe zu charakterisieren; diese seismischen Datensätze decken das Kandidaten- und Zielgebiet ab und wurden iterativ in die Anpassung der Deformationszonenmodelle einbezogen. Fernerkundungs-Gammaskpektrometrie sowie weitere geophysikalische Datensätze wie VLF und topographische beziehungsweise bathymetrische Lineamente wurden erhoben und zur Lineamentinterpretation herangezogen, wobei in späteren Modellstufen bestimmte, als geologisch weniger gesichert eingeschätzte Lineamenttypen nicht mehr zur deterministischen Zonenmodellierung verwendet wurden; diese Auswahl und das Ausschneiden einzelner Datensätze sind im geologischen Modellierungsbericht dokumentiert. Insgesamt besteht für Forsmark eine Kombination aus flächenhaften, luftgestützten Datensätzen und dichter bodengeophysikalischer Erkundung, die im Rahmen der geologischen Modellierung gemeinsam ausgewertet wird; die jeweilige Datengüte, räumliche Auflösung und methodenspezifische Einschränkungen sind in den methodischen Berichten und in der Zusammenfassung der Datengrundlage beschrieben (SKB, 2003b; 2004a; 2007c; 2008).

Die bohrlochbasierte Erkundung in Forsmark umfasst ein umfangreiches Programm mit Kernbohrungen, Schlagbohrungen und zugehöriger Bohrlochgeophysik, das zur systematischen Beschreibung der Geologie, Struktur, Hydraulik, Hydrochemie, Spannungen und Transporteigenschaften des kristallinen Wirtsgesteins eingesetzt wurde. Für die geologische Modellierung wurden Daten aus 21 Kernbohrungen und 33 Schlagbohrungen sowie detaillierte Kartierungen an mehreren Aufschlüssen genutzt; diese Bohrungen decken das Kandidatenvolumen und insbesondere das Zielgebiet in der Forsmark-Linse ab und liefern kontinuierliche Kerninformationen, optische Kamerabefahrungsbilddaten und geophysikalische Logs für die Ableitung von Gesteinsdomänen, Deformationszonen und Kluft-Domänen. Die Qualität der bohrlochgeologischen Daten wird durch standardisierte Kernbeschreibung, optische Bohrloch-

bildgebung und geophysikalische Logverfahren beschrieben; für Bohrlochlage und Orientierung werden spezifische Unsicherheiten angegeben, die in die geologischen Modelle und die Fehlerdiskussion einfließen. Die hydraulische Erkundung stützt sich in Forsmark auf ein dichtes Set bohrlochbasierter Tests und Profilierungen, einschließlich hochauflösender Durchflussmessungen und Langzeittests in ausgewählten Tiefenintervallen; für diese Methoden werden Messbereiche, Nachweisgrenzen und systematische Einflussgrößen beschrieben, und es werden Unterschiede in der Aussagekraft verschiedener Testtypen sowie die Berücksichtigung älterer, weniger detaillierter Datensätze dokumentiert. Die hydrochemische Erkundung umfasst ein strukturiertes Probenahme- und Logging-Programm in den Kernbohrungen, bei dem Proben hinsichtlich ihres Spülwassereinflusses und ihrer Repräsentativität kategorisiert werden; die verfügbaren Daten decken das Modellgebiet bis in größere Tiefen ab, und die räumlichen Lücken sowie die Einflüsse der Erkundungsmaßnahmen auf die Wasserzusammensetzung werden in der Datengrundlage und im Unsicherheitskapitel erläutert (SKB, 2003b; 2005a; 2007c; 2008).

Für die Beschreibung der Transporteigenschaften des Wirtsgesteins in Forsmark wurden an einer größeren Anzahl von Kernproben aus verschiedenen Bohrungen Laboruntersuchungen zu Porosität, Diffusivität, Formationsfaktor, Sorption und weiteren gesteins- und bruchbezogenen Eigenschaften durchgeführt; diese Untersuchungen decken die dominierenden Gesteinstypen der relevanten Gesteinsbereiche sowie ausgewählte Klufftfillungen und Gesteine der Störungszonen ab. Die Erhebungstiefe, räumliche Abdeckung und methodenspezifischen Grenzen der bohrlochbasierten Daten – einschließlich Spannungsmessungen, hydraulischer Tests, hydrochemischer Probenahme und Transportlaboruntersuchungen – werden in den technischen und zusammenfassenden Berichten für Forsmark beschrieben und bilden zusammen mit den geophysikalischen Datensätzen die Datengrundlage für die standortbezogene Modellierung (SKB, 2003b; 2005b,c; 2007b,c; 2008).

2.6 Japan

Die Endlagersuche in Japan begann in den 1980er und 1990er Jahren, als die japanische Regierung die systematische Erforschung geologischer Formationen für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle initiierte. Die japanische Agentur JAEA (Japan Atomic Energy Agency) betreibt seit den späten 1990er Jahren Forschungslabore zur Untersuchung verschiedener Wirtsgesteine. Zunächst lag der Fokus auf kristallinen Gesteinen, insbesondere Granit. In Mizunami (Präfektur Gifu, Zentraljapan) wurde ab 1996 das Mizunami Underground Research Laboratory im Granit aufgebaut und ab 2002 in etwa 300-500 m Tiefe betrieben, um die Eigenschaften kristalliner Gesteine, Grundwasserströmungen und technische Machbarkeit zu untersuchen. Parallel erkannte man die Notwendigkeit, auch Sedimentgesteine zu erforschen, um verschiedene geologische Optionen zu bewerten. Daher wurde ab 2001 in Horonobe (Hokkaido, Nordjapan) das Horonobe Underground Research Laboratory in Tonstein/Sedimentgestein in etwa 350-500 m Tiefe errichtet, das stufenweise zwischen 2006 und 2014 in Betrieb ging. Die Explorationsplanung wurde vom direkten Abteufen des Erkundungsschachtes in kristallinem Gestein (Mizunami) zu einer oberflächlichen Erkundung mit nachfolgender Exkavation des Labors im Tonstein von Hokkaido weiterentwickelt und ermöglicht einen umfassenderen Vergleich verschiedener Wirtsgesteine. Die NUMO (Nuclear Waste Management Organization of Japan) ist seit 2000 für die Standortauswahl zuständig. Ein konkreter Endlagerstandort ist noch nicht festgelegt, und die Standortsuche läuft weiterhin.

2.6.1 Felslabor Mizunami

In Mizunami wurde die übertägige geophysikalische Erkundung zunächst mit flächenhaften seismischen Methoden und elektromagnetischen Verfahren aufgebaut. Dazu gehören mehrlinige Reflexions- und Refraktionsseismikprofile im Maßstab von mehreren hundert m bis zu einigen km Länge, ergänzt um vertikale seismische Profile und seismische Tomographie zwischen Bohrungen, die speziell im Bereich des geplanten Standortes eingesetzt wurden. Hinzu kamen elektromagnetische Verfahren und Widerstandstomographie mit zahlreichen Messpunkten in einem regionalen Raster und mit wiederholten Messkampagnen, um den Untergrund sowohl im Bereich der Sedimentbedeckung als auch im Granit großräumig zu erfassen. Später wurde dieses Spektrum durch kontinuierliches Selbstpoten-

tial-Monitoring mit einem ausgedehnten Elektrodenetz sowie durch seismische Interferometrie erweitert, wobei vorhandene Baubetriebs- und Bohrvibrationen als Quellen genutzt wurden. Insgesamt liegen damit geophysikalische Oberflächendaten mit hoher Punktdichte und guter räumlicher Abdeckung vor, deren Qualität durch wiederholte Messungen, Kombination verschiedener Messgeometrien und die Auswertung mit mehreren Modellierungsansätzen abgesichert wurde (JNC, 2001; 2002; JAEA, 2011).

Die obertägige bohrlochbasierte Erkundung in Mizunami umfasst ein Netz mehrerer tiefreichender Kernbohrungen bis etwa 1.000 m Teufe im Shobasama-Gebiet sowie zusätzlicher Bohrungen im Bereich des Standortes, darunter eine tiefe, speziell für die Standorterkundung geplante Bohrung bis rund 1.350 m. In diesen Bohrungen wurde jeweils ein umfangreiches Standardprogramm durchgeführt, bestehend aus kontinuierlicher Kernaufnahme, geophysikalischen Bohrlochmessungen, Bohrlochkamerabefahrungen, hydraulischen Tests, Probenahmen für hydrochemische und mineralogisch-petrographische Untersuchungen sowie umfangreichen Laboruntersuchungen zu physikalischen und mechanischen Gesteinseigenschaften. Die Datenquantität ist durch die Kombination mehrerer Tiefbohrungen mit vollständigen Kernstrecken und umfangreichen Messprogrammen hoch, und die Datenqualität wurde durch eine hohe Auflösung und standardisierte AuswerteprozEDUREN gewährleistet (JNC, 2001; 2002; JAEA, 2011).

Untertägig wurden in Mizunami zahlreiche geophysikalische Methoden vom Schacht und aus den Zugangs- und Forschungstunneln eingesetzt. Dazu zählen unter anderem seismische Verfahren wie Reverse-VSP aus den Schächten mit dicht verteilten Geophonen an der Oberfläche sowie seismische Tomographie und interferometrische Auswertungen auf Basis von Spreng- und Betriebsquellen, um den Nahbereich der Schächte und Stollen dreidimensional zu erfassen. Ergänzend wurden elektrische und potenzialbasierte Verfahren entwickelt und schrittweise auch im Untertagebereich adaptiert, um Veränderungen im Strömungsfeld während des Ausbaus zu verfolgen. Die untertägigen geophysikalischen Datensätze zeichnen sich durch eine hohe Messdichte im Nahfeld der Bauwerke und durch wiederholte Messungen in verschiedenen Bauphasen aus (JAEA, 2011).

Die untertägige bohrlochbasierte Erkundung und die direkte Erkundung an Schacht- und Stollenwänden umfassen ein Programm von Kernbohrungen aus den Zugangs- und Forschungstunneln, begleitet von geologischer und geotechnischer Kartierung. In den Schächten und Stollen wurde die Geologie systematisch im Meter- bis Submeter-Raster aufgenommen und durch 3D-Laserscans der Stollenwandung ergänzt, aus denen hochauflösende Punktwolken und statistisch auswertbare Trennflächendatensätze erzeugt wurden. Bohrungen von Untertage aus wurden mit ähnlichen Programmen wie die oberirdischen Tiefbohrungen untersucht, also mit Kernaufnahme, Bohrlochgeophysik, akustischer bzw. optischer Teviewwer, hydraulischen Tests und Probenahmen für Laboruntersuchungen. Dadurch liegen im Nahfeld der Schächte und Stollen sehr dichte dreidimensionale Datensätze vor, die sowohl die Bauwerksumgebung als auch größere Tiefenbereiche abdecken; die Qualität dieser Daten beruht auf der Kombination von direkter Beobachtung an der Bauwerksoberfläche, hochauflösender 3D-Vermessung, standardisierten Bohrlochmessprogrammen und der engen Kopplung zu den bereits bestehenden obertägigen Datensätzen (JNC, 2001; 2002; JAEA, 2011).

2.7 Deutschland

Die Endlagersuche in Deutschland begann in den 1970er Jahren, als die Bundesregierung verschiedene geologische Formationen für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle untersuchte. Als potenzielle Wirtsgesteine wurden Salzgestein, Tonstein und Kristallingestein betrachtet. 1977 benannte die niedersächsische Landesregierung Gorleben (Landkreis Lüchow-Dannenberg, Niedersachsen) als Standort für ein Nukleares Entsorgungszentrum. Der Salzstock Gorleben-Rambow wurde ab 1979 oberirdisch und ab 1986 untertage durch ein Erkundungsbergwerk in etwa 840-1.200 m Tiefe untersucht. Die Erkundung war jahrzehntelang von massiven politischen Kontroversen und zivilgesellschaftlichem Widerstand begleitet. Von 2000 bis 2010 wurde die Erkundung durch ein Moratorium ausgesetzt. Mit dem Standortauswahlgesetz von 2013 (novelliert 2017) wurde ein Neustart der Endlagersuche beschlossen, der eine ergebnisoffene, wissenschaftsbasierte Suche in ganz Deutschland vorsieht und alle drei Wirtsgesteine gleichberechtigt betrachtet. Gorleben wurde damit nicht mehr privilegiert behandelt. Die BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung) ist seit 2016 für die Standortsuche zuständig. Im

Zwischenbericht 2020 wurde Gorleben nicht mehr als Teilgebiet ausgewiesen. Das Standortauswahlverfahren läuft weiterhin, eine Standortentscheidung wird laut Nationalem Entsorgungsprogramm bis Mitte des Jahrhunderts angestrebt.

2.7.1 Gorleben

Die Erkundung des Salzstocks Gorleben erstreckte sich von 1979 bis 2013 mit einem zehnjährigen Moratorium (2000–2010). Die Gesamtkosten beliefen sich auf rund 1,4 Milliarden Euro, davon etwa 140 Millionen für die übertägige und 965 Millionen für die untertägige Erkundung einschließlich Schachtbau, Infrastruktur und Offenhaltung (Bräuer et al., 2011; Deutscher Bundestag, 2006; Kukla et al., 2011).

Die geophysikalische Erkundung konzentrierte sich auf strukturelle Erfassung des Salzstocks. Reflexionsseismik erfasste den Salzstock auf 16 Profilen über 150 km Gesamtlänge in 3D mit einer Auflösung von etwa 50 m. Ergänzend kamen 549 refraktionsseismische Tiefensondierungen, 313 km Flachseismik sowie gravimetrische, magnetische und elektromagnetische Methoden zum Einsatz (Bornemann et al., 2008; Kukla et al., 2011).

Das Bohrprogramm umfasste 281 übertägige Projektbohrungen, darunter 158 Aufschlussbohrungen, 44 Salzspiegelbohrungen und bis zu 398 Grundwassermessstellen. Vier tiefe Salzstockerkundungsbohrungen erreichten circa 2.000 m, zwei Schachtvorboreungen circa 1.000 m Endteufe. In 167 Bohrungen wurden hochpräzise Temperaturprofile mit 10 mK Messgenauigkeit und 1 mK Auflösung erfasst. Die hydrogeologische Charakterisierung umfasste etwa 1.400 chemische Wasseranalysen, 82 Isotopenmessungen, 80 Pumpversuche und kontinuierliche Grundwasserstandsmessungen an 324 Messstellen über durchschnittlich 9 Jahre. Diese Datenbasis ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grundwasserbewegung, -chemie und hydraulischen Eigenschaften des Deckgebirges (Bornemann et al., 2008; Bräuer et al., 2011; Klinge et al., 2007; Köthe et al., 2007).

Zwei Schächte wurden bis etwa 933 m Tiefe abgeteuft, die Haupterkundungssohle lag bei 840 m. In beiden Schächten wurden jeweils fünf Erkundungshorizonte mit umfangreicher Messtechnik eingerichtet. Die systematische Auffahrung des Erkundungsbereichs 1 im Hauptsalz erfolgte zwischen 1996 und 2000 über mehrere Kilometer Streckenvortrieb. Alle Auffahrungen wurden kontinuierlich geologisch kartiert und dokumentiert.

Die geomechanische in-situ-Charakterisierung umfasste 95 Überbohrtests zur Spannungsmessung, die einen nahezu isotropen Spannungszustand entsprechend lithostatischer Überlagerung zeigten. Ein engmaschiges Netz von Konvergenz-, Extensometer- und Inklinometermessungen überwachte kontinuierlich Gebirgsverformungen. Langzeitmessungen über mehr als eine Dekade zeigten deutliche saisonale Schwankungen durch Temperatureinflüsse. Temperaturänderungen der Bewetterung um mehr als 20 °C führten zu Spannungsänderungen. Modellrechnungen konnten diese Risse eindeutig als thermisch induziert identifizieren (Bräuer et al., 2011; Kukla et al., 2011). Fast 900 Proben aus Schächten, Erkundungs- und Infrastrukturbereich wurden im Labor charakterisiert, davon über 400 Festigkeitstests und mehr als 600 Kriech-Teilversuche. Die systematische Erfassung elastischer Parameter, Druckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und thermophysikalischer Eigenschaften bildete die Grundlage für die Identifizierung von Homogenbereichen. Über 150 Salzproben wurden thermophysikalisch charakterisiert (Bräuer et al., 2011; Kukla et al., 2011).

Die gesteinshydraulische Charakterisierung umfasste Bohrlochpulstests mit Magnesiumchlorid-Lösung und Stickstoff. Die Auflockerungszone zeigte ab 0,3 m vom Stoß keine erhöhte Permeabilität mehr (Bräuer et al., 2011; Kukla et al., 2011). Die untertägige geophysikalische Erkundung nutzte elektromagnetische Hochfrequenz-Reflexionsmessungen. Diese ermöglichten im Nahfeld bis 50 m eine sehr gute Prognose für den Streckenvortrieb. Nahezu alle aufgefahrenen Strecken wurden systematisch vermessen (Bornemann et al., 2008; Bräuer et al., 2011; Kukla et al., 2011).

Umfangreiche Modellrechnungen mit der BGR-eigenen Software ANSALT validierten die Messergebnisse und dienten der Integritätsanalyse. Die thermomechanischen Berechnungen konnten die gemessenen Konvergenzen und Verformungen gut reproduzieren und zeigten, dass Extensometer-Ankerpunkte in 20 m Tiefe noch etwa 40 % der Stoßverschiebungen aufweisen und daher keine Festpunkte darstellen (Bräuer et al., 2011; Kukla et al., 2011).

3 Beschreibung der eingesetzten Erkundungsmethoden

Die in Kapitel 2 skizzierten Fallstudien zeigen üblich genutzte Methoden in der Charakterisierung von Endlagerstandorten bzw. Felslaboren auf, welche im Folgenden überblicksmäßig dargestellt werden. Dabei soll primär auf Weiterentwicklungen des Standes der Technik seit dem AkEnd-Bericht, also 2002 eingegangen werden. Für eine detaillierte Übersicht zu in der Standorterkundung und -Charakterisierung einsetzbaren Methoden inklusive weiterführenden Referenzen wird auf die Geowissenschaftliche Methodendatenbank GeM-DB der Bundesgesellschaft für Geowissenschaften und Rohstoffe verwiesen (BGR, 2022).

3.1 Richtbohrtechnik

Die Richtbohrtechnik ist ein zentraler Bestandteil der modernen Tiefbohrtechnik und ermöglicht das gezielte Abweichen von der Vertikalen, um unterirdische Ziele präzise zu erreichen. Im Gegensatz zu konventionellen vertikalen Bohrungen erlaubt sie die Steuerung des Bohrpfad in verschiedene Richtungen, was insbesondere in der Erdöl- und Erdgasförderung, im Tunnelbau sowie bei geothermischen Projekten von großer Bedeutung ist.

Eine der wichtigsten Technologien in der Richtbohrtechnik ist das sogenannte „Measurement While Drilling“ sowie „Logging While Drilling“. Diese Systeme liefern während des Bohrvorgangs Echtzeitdaten über Neigung, Azimut und geologische Formationen. Ergänzt wird dies durch steuerbare Bohrsysteme wie den „Downhole Mud Motor“ und das „Rotary Steerable System“. Während der Mud Motor, ausgestattet mit einem einstellbaren Knick, durch unterschiedliche Bohrstrangstellungen die Richtung beeinflusst, erlaubt das „Rotary Steerable System“ eine kontinuierliche Steuerung der Bohrung ohne Unterbrechung der Rotation, was die Effizienz und Präzision deutlich erhöht.

Zu den Möglichkeiten der Richtbohrtechnik zählt vor allem die Erschließung schwer zugänglicher Lagerstätten, beispielsweise unter Städten, Gewässern oder Naturschutzgebieten. Mehrfachbohrungen von einem einzigen Bohrplatz aus reduzieren zudem den Flächenverbrauch und die Umweltbelastung. Auch das gezielte Umgehen von Hindernissen im Untergrund sowie das präzise Ansteuern kleiner Zielzonen sind bedeutende Vorteile dieser Technik.

Trotz ihrer Vorteile weist die Richtbohrtechnik auch Limitationen auf. Ab einer Ablenkung von 3-5° pro 30 Meter spricht man bereits von einer hohen Ablenkung (DLS bzw. Dogleg Severity). Deutlich stärkere Ablenkungen (bis zu 18° pro 30 Meter) sind möglich, erhöhen aber die technische Komplexität und führen zu höheren Kosten im Vergleich zu vertikalen Bohrungen. Zudem steigen mit zunehmender Bohrtiefe und Ablenkung die mechanischen Belastungen auf das Bohrgestänge und die Verrohrung, was zu erhöhtem Verschleiß. Auch die Genauigkeit der Messsysteme kann durch extreme Bedingungen wie hohe Temperaturen und Drücke beeinträchtigt werden. Ein weiteres Problem, welches bei der Richtbohrplanung berücksichtigt werden muss, stellt die Bohrlochinstabilität dar, insbesondere in heterogenen oder wenig konsolidierten Gesteinsschichten. In der Industrie werden Bohrungen mit einer Gesamtablenkung von 15° bis 60° aufgrund der geringeren Kosten und geringeren technischen Herausforderungen bevorzugt. Lange Horizontalbohrungen mit einer Gesamtablenkung von 90° sind bei der Erschließung von Reservoiren für die Maximierung der Produktivität seit vielen Jahren Standard und technisch sicher beherrschbar. Auch Bohrungen mit mehr als 90° Ablenkung sind möglich. Limitierend stellt sich jedoch die Möglichkeit zum Kerngewinn dar, wobei Ablenkungsraten von >5° pro 30 m und eine Gesamtablenkung von >50° nur unter besten Bedingungen darstellbar sind.

3.2 Geophysikalische Erkundung

3.2.1 Reflexions- und Refraktionsseismik 2D/3D

Reflexionsseismik ist ein Standardverfahren in der strukturellen und petrophysikalischen Erkundung des tieferen Untergrundes, das in den letzten Jahrzehnten vor allem in der Kohlenwasserstoffindustrie

und in geringerem Maße der Erzexploration eingesetzt und weiterentwickelt wurde. In jüngerer Vergangenheit entstand zudem ein neuer Fokus im Bereich der erneuerbaren Energien, wie zum Beispiel bei der Aufsuchung von hydrothermalen geothermischen Systemen oder der Ozeanbodenuntersuchung für Offshore-Windanlagen.

Das Grundprinzip der Reflexionsseismik basiert auf der Reflexion von akustischen Wellen (v. a. Primärwellen, Kompressionswellen) an Impedanzkontrasten im Untergrund (Impedanz = Dichte \times v_p). Dabei wird von einer Signalquelle ein akustisches Signal in den Boden gesendet und von einer Anzahl verteilter Geophone die Laufzeit und Stärke der Reflexionen aufgenommen.

Signalquellen sind üblicherweise Vibroseis-Trucks, die Vibrationen mit kontrollierten Frequenzen in den Boden einbringen. Alternativ werden auch gelegentlich Sprengungen in flachen Bohrungen (üblicherweise weniger als 50 m tief) als Quellen eingesetzt, durch die deutlich stärkere Signale mit einem breiteren Frequenzspektrum erzeugt werden können. Diese Methode ist jedoch technisch und genehmigungsrechtlich aufwändiger.

Physikalisch wird bei einer seismischen Messung zunächst die sogenannte Zwei-Wege-Laufzeit (Two-Way-Traveltime) gemessen, also die Zeit, die das Signal von der Quelle zur reflektierenden Schichtgrenze und zurück zum Empfänger benötigt. Zur Bestimmung von Tiefen werden Geschwindigkeitsmodelle der Gesteinsschichten benötigt. Diese Modelle nutzen Bohrlochmessungen, Sonic-Logs, VSP-Daten oder Literaturwerte oder auch Refraktionsmethoden. Interpretationen der Seismik können dann entweder in der Zeit-Domäne erfolgen und anschließend in Tiefe umgerechnet werden, oder die Seismik selbst bereits mit einem Geschwindigkeitsmodell in die Tiefen-Domäne konvertiert werden.

Für die räumliche Abbildung unterscheiden sich 2D- und 3D-Seismik: linear aufgebaute 2D-Messungen liefern zweidimensionale Abbilder und können bei komplexer Geologie zu Mehrdeutigkeiten führen. 3D-Seismik nutzt eine Gitteranordnung von Geophonen und Quellpunkten, reduziert Mehrdeutigkeiten deutlich, ist aber kosten- und aufwandsintensiver. Oft beginnt man mit 2D-Seismik und erst bei positiven Beobachtungen folgt eine 3D-Seismik. Eine zusätzliche Nahbereichsbeschreibung wird durch Refraktionsseismik ermöglicht, die bis etwa 100 m Tiefe reicht und schnelle Schichtmodelle liefert. Neben der Erfassung von Strukturen kann Reflexionsseismik auch Hinweise auf Fluidkontakte geben, da Dichte und Wellengeschwindigkeit auch von Fluiden abhängen. Wiederholte 3D-Messungen ermöglichen eine 4D-Seismik, bei der zeitliche Veränderungen (z. B. Fluidbewegungen) sichtbar werden.

Seit dem Bericht des AkEnd (2002) sind Fortschritte durch höhere Auflösung und Genauigkeit in 3D durch fortgeschrittene Migration/Inversionsmethoden erzielt worden. Zudem werden stärker Hybridansätze, die Reflexions- und Refraktionsseismik kombinieren, sowie 4D-Seismik (Abbildung von Änderungen im Untergrund über die Zeit) eingesetzt. Der Einsatz von maschinellem Lernen in der Prozessierung wird konsequent ausgebaut, während Kosten- und Umweltaspekte eine effizientere Feldplanung und bessere Integration mit anderen Methoden fördern.

Für einen Endlager-Standort liefert Reflexionsseismik solide Strukturkartierung, identifiziert tiefe Geometrien und Störungen und unterstützt die Risikobewertung der Geologie. Aufgrund der Kosten und Planungsanforderungen ist eine schrittweise Vorgehensweise sinnvoll: Zunächst 2D oder 3D Reflexionsseismik nach Geologie- und Budgeteinschätzung, anschließend, falls nötig, 3D fortführen. Refraktionsseismik dient ergänzend für Nahbereichskorrekturen.

3.2.2 Vertical Seismic Profiling – VSP

Mit Vertical Seismic Profiles ist eine Reihe ähnlicher Methoden gemeint, die mit seismischen Methoden ein Bohrloch bzw. dessen nahe Umgebung untersuchen. Dabei werden seismische Quellen an der Oberfläche und Geophone im Bohrloch platziert, oder umgekehrt.

Eine einfache Variante des VSP ist die Geophonversenkmesung, auch Check-Shot oder Zero-Offset VSP genannt. Dabei wird eine seismische Quelle (z.B. Vibroseis-Truck) nah am Bohrlochkopf platziert und Geophone oder Geophonketten in regelmäßigen Abständen im Bohrloch platziert. Durch die Messung der Laufzeit zwischen Quelle und Empfänger kann so ein ein-dimensionales Geschwindigkeitsprofil im Umkreis der Bohrung erstellt werden, um zum Beispiel die Interpretation einer Seismik zu unterstützen.

Komplexere Messaufbauten mit mehreren Geophonen und Anregungspunkten in verschiedenen Konfigurationen erlauben unter Berücksichtigung höherer Kosten eine Anpassung an die Bohrlochverhältnisse und spezifische Aufgabenstellungen. Eine (Far-)Offset-VSP Messung ähnelt einer Zero-Offset Messung, hat aber einen größeren Abstand zwischen Signalquelle und Bohrloch, wodurch ein größerer Bereich des Untergrundes in der Messung berücksichtigt wird.

Wird an mehreren Punkten, entlang einer sich vom Bohrloch entfernenden Linie, nacheinander ein Signal angeregt, spricht man von einer Walk-Away VSP Messung. Sie erlaubt neben der Analyse der Kompressionswellen auch die der Scherwellen und entsprechender Anisotropien. Durch entsprechende Prozessierungen kann ein 2D-seismisches Bild erstellt werden, mit dem bohrlochnahe Strukturen wie lokale Schichteneinfaltungen und Diskontinuitäten interpretiert werden können. Sonderformen der Walk-Away VSP sind z.B. die Walk-Above VSP, bei der die Anregungspunkte dem Verlauf einer abgelenkten Bohrung folgen oder die 3D VSP, bei der analog zu einer 3D Reflexionsseismischen Messung Anregungspunkte in einem Gitter angeordnet sind, wodurch sich kleinräumig hochauflösende 3D Abbildungen realisieren lassen.

In manchen Fällen werden sogenannte 'Reverse VSP'- Messungen durchgeführt. Hierbei befindet sich die Quelle im Bohrloch und die Empfängergeophone befinden sich an der Oberfläche entlang von Linien oder Rastern.

3.2.3 Gravimetrie

Bei einer gravimetrischen Messung wird die Erdbeschleunigung punktuell oder in einem Messraster lokal mit einem sogenannten Gravimeter gemessen. Diese weicht in Abhängigkeit von der Dichte unterlagernder Gesteine lokal vom globalen Mittelwert (rund $9,81 \text{ m/s}^2$) ab. Sedimentgesteine geringer Dichte (z.B. Tone) zeigen dabei negative Abweichungen, sehr dichte Gesteine wie dichte Karbonatgesteine oder kristalline Gesteine zeigen positive Abweichungen. Darstellungen der Abweichung vom globalen oder regionalen Mittel heben geologische Variationen hervor, wobei besonders lineare Strukturen wie Störungen auffallen. Jede gravimetrische Messung ist jedoch immer eine Integration aller physischen Körper in der Umgebung, sodass einerseits keine sehr hohe horizontale Auflösung erreicht werden kann, andererseits auch komplexe Strukturen in der Tiefe nicht abgebildet werden können. Die Ergebnisse einer gravimetrischen Messung sind daher auch nicht eindeutig und erst mit weiteren Untergrunddaten (z.B. Dichten aus Bohrungen) können genauere Aussagen über den Untergrund getroffen werden. Aufgrund der, im Vergleich zu reflexionsseismischen Messungen, niedrigen Kosten gravimetrischer Messungen, werden diese häufig in frühen Projektphasen als Explorationswerkzeug eingesetzt.

3.2.4 (Geo-)Magnetik

Geomagnetische Methoden zur Erkundung des Untergrundes basieren auf der Messung kleinräumiger Störungen des natürlichen Erdmagnetfelds mit einer Stärke von etwa 50.000 nT (Nanotesla), wobei hochauflösende Magnetometer wie Protonenpräzessions- oder Fluxgate-Geräte das Feld oder seine Gradienten mit Genauigkeiten im Zehntel-Nanotesla-Bereich erfassen. Die Messungen erfolgen entlang von Profilen oder Rasternetzen zu Fuß, per Fahrzeug oder luftgestützt, mit GPS-gestützter Positionierung, bevor die gefilterten Rohdaten als Magnetogramme dargestellt werden, um Kontraste in der magnetischen Suszeptibilität oder Remanenz im Untergrund – etwa bei Störungszonen oder mafischen Gesteinskörpern – sichtbar zu machen. In der Endlagersuche für hochradioaktive Abfälle ergänzen sie zerstörungsfrei andere geophysikalische Verfahren wie Seismik oder Gravimetrie, indem sie tektonische Störungen, Bruchzonen, Intrusionen oder Übergänge zwischen Gesteinsarten abbilden, um die Homogenität, Mächtigkeit und Integrität potenzieller Wirtsgesteine zu bewerten und Standorte im Rahmen übertägiger Erkundungen nach StandAG zu vergleichen.

3.2.5 Elektrische und elektromagnetische Verfahren

Elektrische Verfahren zur Erkundung des Untergrundes basieren auf der Messung von Widerstandsunterschieden in Gesteinen durch Einspeisung eines elektrischen Stromes in den Boden und Erfassung

der resultierenden Spannungsabfälle mit Elektrodenanordnungen wie Wenner-, Schlumberger- oder Dipol-Dipol-Konfigurationen, wobei Geräte wie Resistivitätsmeter Widerstandswerte im $k\Omega m$ -Bereich mit hoher Auflösung bestimmen. Die Messungen erfolgen in Profilen oder 2D/3D-Netzen, gefolgt von Inversion der Daten zu Widerstandstomogrammen, die Kontraste in Porosität, Wassergehalt, Ton- oder Salzgehalt sowie Verwitterungszonen oder Klüfte abbilden. Elektromagnetische (EM) Verfahren nutzen hingegen induktiv erzeugte Wechselströme in Sendespulen, um abgestrahlte EM-Felder zu erzeugen, deren Dämpfung und Phasenverschiebung durch empfangende Spulen gemessen werden, was schnelle, kontaktlose Profile über Leitfähigkeitsvariationen ermöglicht. In der Endlagersuche ergänzen beide Methoden zerstörungsfrei seismische und gravimetrische Ansätze, indem elektrische Verfahren wasserdurchlässige Zonen, Verfüllungen oder Tonbarrieren identifizieren und EM-Verfahren salzhaltige Formationen oder mineralische Leitfähigkeitskontraste aufspüren, um die Dichtigkeit, Homogenität und Langzeitstabilität potenzieller Wirtsgesteine wie Tonstein oder Salz in übertägigen Erkundungen zu bewerten.

3.2.6 Ground Penetrating Radar (GPR)

Ground Penetrating Radar (GPR) ist ein hochauflösendes geophysikalisches Verfahren, bei dem kurze elektromagnetische Impulse in den Untergrund gesendet und die an Schichtgrenzen, Hohlräumen oder Objekten reflektierten Signale mit einer Antenne aufgezeichnet werden. Diese Methode vereint somit Aspekte der Reflexionsseismik (Signale werden an physikalischen Schichtgrenzen reflektiert) und Elektromagnetik (Elektromagnetische Wellen statt Akustische Wellen). Aus den Laufzeiten und Amplituden dieser Reflexionen lassen sich analog zur Reflexionsseismik in der Regel bis in einige m bis wenige Zehner m Tiefe detaillierte Radarprofile ableiten, in denen kleinräumige Strukturen wie Schichtungen, Klüfte, Leitungen, Hohlräume oder bauliche Elemente erkennbar sind. GPR reagiert stark auf Kontraste in der dielektrischen Eigenschaften und Leitfähigkeit, funktioniert daher besonders gut in trockenen, elektrisch wenig leitfähigen Materialien (z.B. trockenem Sand, Fels, Beton) und ist in stark leitenden Medien wie Ton oder salzhaltigem, wassergesättigtem Gestein deutlich in der Reichweite eingeschränkt. Im Endlagerkontext wird GPR vor allem für oberflächennahe und baunahe Untersuchungen eingesetzt, etwa zur Kontrolle von Bauwerken und Abdichtungen, zur Detektion von Hohlräumen oder Lockerzonen im Nahfeld von Strecken sowie zur Dokumentation von Einbauten und Leitungen, während für größere Tiefen andere Methoden (z.B. seismische Verfahren oder elektrische/EM-Methoden) geeigneter sind.

3.2.7 Magnetotellurik

Magnetotellurik ist ein elektromagnetisches Messverfahren, bei dem natürliche zeitliche Schwankungen des Erdmagnetfelds und des dadurch induzierten elektrischen Felds registriert werden, um daraus den elektrischen Widerstand (Resistivität) des Untergrundes in großer Tiefe abzuleiten. Aus Messungen an der Oberfläche (seltener in Bohrlöchern) über einen breiten Frequenzbereich (von hochfrequent für geringere Tiefen bis sehr niederfrequent für große Tiefen) wird über Inversionsrechnungen ein ein- oder mehrdimensionales Leitfähigkeitsmodell erstellt, das Unterschiede in Lithologie, Porenraum, Fluidgehalt und Salinität sichtbar macht. Magnetotellurik eignet sich besonders, um in mehrere Kilometer Tiefe Strukturgrenzen, Störungszonen, mächtige Ton-, Salz- oder kristalline Einheiten sowie potenziell wasserführende Bereiche zu erfassen, und wird damit auch in der Endlagersuche genutzt, um großskalige Wirtsgesteinskörper und ihre hydraulische Abgrenzung gegenüber umliegenden Formationen zu charakterisieren.

3.2.8 Passive seismische Verfahren

Passive seismische Methoden erfassen und analysieren natürliche oder technisch bedingte Erschütterungen im Untergrund, ohne dass dafür künstliche Sprengungen oder Vibrationsquellen eingesetzt werden. Die Messung erfolgt mit dicht verteilten Seismometern bzw. Geophonen, die über Tage bis Jahre kontinuierlich Bodenbewegungen aufzeichnen und so ein zeitabhängiges Bild seismischer Aktivität liefern. Typische Anwendungen sind die Erdbeben- und Mikroseismizitätsüberwachung, die Lokalisierung und Charakterisierung kleiner Bruchereignisse (z.B. in Bergwerken oder geothermischen

Reservoiren), die Überwachung von Fracking- oder Injektionsmaßnahmen (Mikro-Seismik) sowie die Abbildung von Strukturänderungen im Untergrund mithilfe von Methoden wie ambient noise interferometry, bei der Umgebungsrauschen zur seismischen Tomographie genutzt wird. In der Endlagersuche können passive seismische Methoden genutzt werden, um seismische Aktivität und Bruchzonen im potenziellen Wirtsgestein zu erfassen, Spannungs- und Störungfelder besser zu verstehen, langfristig die natürliche Seismizität eines Standortgebiets zu charakterisieren und damit zur Beurteilung der geomechanischen Langzeitstabilität eines Endlagerstandorts beizutragen. Passive Seismik eignet sich besonders für Langzeitmonitoring und Sicherheitsanalysen, weil sie kontinuierlich arbeitet, empfindlich auf kleinste Ereignisse reagiert und ohne aktive Eingriffe in das System auskommt, erfordert aber leistungsfähige Datenauswertung und sorgfältige Netzplanung, um Ereignisse präzise lokalisieren und interpretieren zu können.

3.3 Tunnelaufnahmen

Untertägige Kartierungsmethoden fokussieren auf die Erfassung der Geometrie, Klüftung, Oberflächenzustände und Materialeigenschaften direkt im Aufschlussraum, wie bspw. Schächte, Tunnel und Kavernen. Typische Ansätze sind Laserscanning, Fotogrammetrie (auch Structure-from-Motion oder Stereo-Fotogrammetrie), Terrestrische Laser-Scanning-Methoden mit Hochoauflösung, sowie die Erhebung der Klufthöhe, -orientierung und -eigenschaften entlang und im Nahfeld des untertägigen Aufschlusses. Ergänzend kommen Methoden zur voxelbasierten Modellierung aus Bilddaten, Deformations- und Spannungsmessungen (z. B. Instrumentierungsdaten aus Extensometern, Inklinometern) und punkt- oder flächenbasierte Materialtests im Tunnelumfeld (z. B. Druck- und Korntests) zum Einsatz. Ergebnisse sind detaillierte 3D-Geometrien des Tunnelabschnitts, quantitative Modellierungen von Klufnetzwerken („Discrete Fracture Network“ – DFN) und deren Eigenschaften, Oberflächenzustand, sowie Ungewissheitsabschätzungen, die direkt in die Sicherheitsbewertungen eingehen. Geotechnik, Geophysik und Hydrogeologie nehmen üblicherweise mittels Bohrlöchern aus dem untertägigen Aufschluss heraus ergänzende Datensätze auf, welche integral in die Kartierung eingespeist werden.

3.4 Bohrlochlogs

Bohrloch-Logging im Rahmen der Endlageruntersuchung dient der detaillierten Charakterisierung des Bohrlochs und des umliegenden Wirtsgesteins entlang des Bohrpfads. Ziel ist es, Geometrie, Klufnetzwerke, Porengehalte, Durchlässigkeit, Temperaturen, Drücke, Wasserchemie sowie Sediment- und Gesteinszusammensetzung zu erfassen und als Kalibrierung für geologische Modelle sowie zur Bewertung der Barrierefunktion heranzuziehen. Logs erfolgen sowohl unter Tage als auch oberirdisch. Die Methodik basiert auf passiven geophysikalischen und physikalischen Messtechniken. Typische Logs umfassen geophysikalische Messungen wie Gamma-, Neutronen-, Dichte-, Sonic- und Widerstandslogs zur Bestimmung von Lithologie, Porosität und Gesteinsdichte; Temperatur- und Druckprofile zur kontinuierlichen Abbildung thermischer und hydraulischer Verhältnisse; bildgebende Verfahren wie Kamerabefahrung und akustische Logs zur Visualisierung von Wandstrukturen, Klufnetzwerken und Verwitterungsmerkmalen; telemetrische Messungen zur kontinuierlichen Erfassung von Deformationen oder Spannungen im Bohrloch. Die Ergebnisse liefern tiefenabhängige Profile der physikalischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften, identifizieren Klufnetzwerke und deren Geometrie, Gesteinsättigung, Porosität sowie Temperatur- und Druckverhältnisse im bohrlochnahen Umfeld; diese Informationen dienen als zentrale Parameter für geo- und hydrogeologische Modelle sowie zur Bewertung der Barrierefunktion des Wirts- und Rahmengesteins.

3.5 Bohrlochversuche

Ergänzend zu den in Abschnitt 3.4 beschriebenen passiven Bohrlochlogs erfolgen aktive Bohrlochversuche, bei denen das Gestein gezielt belastet oder manipuliert wird, um seine hydraulischen, geomechanischen und hydrochemischen Eigenschaften unter in-situ-Bedingungen zu charakterisieren. Das Spektrum umfasst hydraulische Tests wie Packer-Tests, Slug-Tests und Pumpversuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit, der hydraulischen Leitfähigkeit und möglicher Anisotropien; geomechanische in-

situ-Tests wie Dilatometer-, Pressiometer- und hydraulische Fracturing-Tests zur Charakterisierung von Festigkeit, Verformungsmodul und Hauptspannungsrichtungen; hydrochemische Probenahmen durch Entnahme von Wasserproben aus verschiedenen Tiefen zur Bestimmung von Salinität, Redoxbedingungen und Isotopensignaturen für die Datierung von Grundwässern; Tracer-Tests zur Quantifizierung bevorzugter Fließwege und Transportzeiten zwischen Bohrlöchern; Langzeitmonitoring durch Sensoren für Druck, Temperatur und Chemie zur Erfassung zeitlicher Variationen über Monate bis Jahre. Die Ergebnisse liefern Parameter für hydraulische Durchlässigkeit, geomechanische Stabilität, Spannungszustand und hydrochemische Evolution mit der Tiefe, die als Eingangsgrößen für numerische Modelle der Langzeitsicherheitsanalyse dienen.

3.6 Erwartbare Entwicklungen

Mit Blick auf die Erkundung von Standortregionen in der ersten Hälfte der 2030er Jahre sollen hier kurz zu erwartende Entwicklungen in der Zwischenzeit nachgezeichnet werden. Da dies keine gesicherten Technologien sind, werden diese nicht in die Bewertung einbezogen; stellen also einen Ausblick dar.

Die Richtbohrtechnik wird von bedeutenden Entwicklungen geprägt sein, getrieben von Digitalisierung, neuen Bohrverfahren und Effizienzsteigerungen. Ein zentraler Trend ist die zunehmende Automatisierung und der Einsatz von Künstlicher Intelligenz, der Bohrprozesse in Echtzeit optimiert und teils autonom steuert; dadurch steigen Präzision, Sicherheit und Effizienz, während Kosten sinken. Gleichzeitig liefern Mess- und Steuerungssysteme hochauflösende Echtzeitdaten, die eine dynamische Anpassung der Bohrtrajektorie ermöglichen und damit die Richtungsgenauigkeit erhöhen. Im Hardwarebereich kommen fortlaufend Verbesserungen, etwa optimierte Bohrköpfe und robusteres Material zum Einsatz, was Standzeiten verlängert und Bohrgeschwindigkeiten erhöht. Darüber hinaus gewinnen nicht-mechanische Bohrverfahren wie Laser-, Plasma- oder elektrische Pulsbohrtechnologien an Bedeutung, da sie Verschleiß reduzieren und tiefere Bohrungen potenziell wirtschaftlicher machen; diese Ansätze befinden sich jedoch noch in der frühen Entwicklung. Ein weiterer Pfad ist die Integration von Echtzeit-Geodaten und 3D-Untergrundmodellen, wodurch Geosteering präziser und effizienter wird. Insgesamt wird die Richtbohrtechnik stärker datengetrieben und automatisiert arbeiten, mit dem Ziel, tiefere und komplexere Bohrungen schneller, sicherer und kosteneffizienter durchzuführen.

Die Seismik verschränkt sich stärker mit der Bohrtechnik, um Transparenz, Automatisierung und datenbasierte Entscheidungen zu fördern. Verbesserte Verarbeitungstools erhöhen die Seismikauflösung, auch in kristallinen Wirtsgesteinen, während 4D-Analytik, oft ML/KI-gestützt, verlässlichere Untergrundabbilder liefert und standardisierte Berichte die Vergleichbarkeit verbessern. Im Bohrprozess sorgt KI-gestützte Echtzeitauswertung dafür, Anomalien unmittelbar zu identifizieren und adaptive Versuchsprogramme zu ermöglichen; autonome Bohrlochroboter ermöglichen Inspektionen und Reparaturen auch in großen Tiefen, während die 4D-geophysikalische Inversion Zeitreihen in dynamische Modelle integriert, um Bohrprozesse besser zu steuern. Beim Logging verschmelzen verschiedene Messmethoden in Echtzeit oder nahe Echtzeit; KI-gestützte Datenfusion aus geophysikalischen, chemischen und hydraulischen Logs sowie fortschrittliche Kalibrierung erhöhen Tiefen- und Qualitätsauflösung; virtuelle in-situ-Loggings gewinnen an Bedeutung und Berichte werden stärker standardisiert, während Logging-Operationen zunehmend automatisiert werden. Ergänzend liefern hyperspektrale Analytik oder nukleare Messmethoden an Kernen oder im Bohrloch zusätzliche Einsichten in Gesteinszustände, Mineralogie und Barrierestrukturen. Bei Bohrlochtests ersetzen faseroptische Messungen konventionelle Geophonketten; Glasfasern fungieren als verteilte Sensoren unter der Erde, während Laserimpulse Rückstreuungseffekte nutzen, um Parameter entlang kilometerlanger Kabel hochauflösend zu erfassen. Distributed Acoustic Sensing misst Vibrationen und Schallwellen durch Rayleigh-Streuung als Dehnungsschwankungen und eignet sich ideal zur seismischen Abbildung von Strukturen oder zur Echtzeit-Überwachung von Wellenfeldern; Brillouin-Streuung quantifiziert absolute Dehnungen und Verformungen, Raman-Streuung liefert Temperaturprofile, etwa für Fluidflüsse oder thermische Anomalien. Nanotechnologie-basierte Sensoren ermöglichen zudem Langzeit-Monitoring über Jahrzehnte mit minimalem Wartungsaufwand. Die unterirdische Kartierung, Messung und Überwa-

chung wird datengetrieben, automatisiert und als integraler Bestandteil sicherheitsrelevanter Endlagerbewertungen eingesetzt; IoT-Sensorik in Schächten und Tunneln ermöglicht kontinuierliche Deformations- und Temperaturprofile über längere Strecken. Die Kombination aus hochauflösenden faser-optischen Messungen über lange Distanzen, kontinuierlicher Überwachung und dynamischer Modellierung zielt darauf ab, Qualität, räumliche Auflösung und Prognosegenauigkeit weiter zu steigern, bei gleichzeitig sinkenden Gesamtkosten.

4 Vergleich der Erkundungsmethoden

4.1 Räumliche, geometrische und sicherheitstechnische Erwägungen

Aus strategischer Perspektive zeichnet sich eine fundamentale Entwicklung in der Endlagerstandorterkundung ab. Während Gorleben eine untertägige Erkundung als notwendig erscheinen ließ, zeigen Erfahrungen aus Forsmark (2009) und Nördlich Lägern (2022), dass moderne übertägige Erkundungsmethoden Standortentscheidungen ohne standortspezifische untertägige Vorerkundung ermöglichen können. Daraus ergibt sich eine flexible Vorgehenslogik: Die Erkundungsstrategie muss abhängig von Geologie, Datenlage und Sicherheitsanforderungen zwischen überwiegend übertägigen Verfahren und gezielter untertägiger Vorerkundung unterscheiden und transparent begründet werden, wobei Zwischenberichte und Kosten-Nutzen-Analysen in den Entscheidungsprozess einfließen sollten.

Geophysikalische Messmethoden von der Oberfläche dienen primär der Bestimmung geologisch-geometrischer Eigenschaften und der Einschätzung der Grundwasserführung; sie ersetzen nicht die detaillierte Bohrlochcharakterisierungen, sondern ergänzen sie sinnvoll. In der Detailerkundung werden pro Standortregion üblicherweise drei oder mehr Bohrungen vorgesehen. Die Tiefbohrungen in erfolgten Standortauswahlprozessen weisen üblicherweise je nach Region unterschiedliche effektive Normdurchmesser im Wirtsgestein auf: In den Tongesteinen der Schweizer Molasse und um Bure (Frankreich) typischerweise etwa 150 bis 200 mm, im Kristallingestein Skandinaviens, Finnlands und Japans etwa 75 bis 100 mm, während Salzbohrungen in Gorleben und WIPP Durchmesser von ungefähr 150 bis 300 mm aufweisen.

Schächte haben üblicherweise Durchmesser von 4,5 bis 8 m (Ausnahme: HADES mit rund 3,5 m). Untertägige Erkundungseinrichtungen erfordern zudem oft zusätzliche Nischen oder Kavernen zur Erkundung mittels Bohrungen aus dem Schacht bzw. den Tunneln heraus. Die notwendige Größe skaliert dabei mit der Bohrtiefe und somit dem zu erkundenden Volumen um den Schacht oder Tunnel.

Kluft- und Porositätsverteilungen können über Bohrlochlogs oder entlang der Tunnelwände aufgenommen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ggf. die Auflockerungszone von mehreren m für repräsentative Werte um Auffahrungen durch Bohrungen erfasst und überwunden werden muss. Hydraulische Parameter, mechanische Eigenschaften, Wasserchemie und Langzeitmonitoring werden überwiegend aus Bohrungen gewonnen. Mineralogie, petrophysikalische, thermische und gesteinsmechanische Eigenschaften werden aus Kernproben bestimmt und analysiert.

Beim Risikoprofil der untertägigen Erkundung stehen zwei Kernüberlegungen im Vordergrund: Zum einen ein einzelner Standort mit einem größeren Erkundungsvolumen um den Schacht bzw. Tunneln (Durchmesser maximal ca. 100–200 m) und zum anderen mehrere Standorte mit kleineren Erkundungsvolumen um Bohrlöcher (ca. 50 m). Je nach geologischer Homogenität können beide Ansätze ausreichend sein, um repräsentative Eigenschaften abzubilden. Typische repräsentative Elementarvolumen (REV: Mindestvolumina für eine repräsentative Parameterermittlung) variieren je nach Messparameter und Gesteinsart (z.B. Müller et al., 2010; Zhang et al., 2017). Sie können für die die Wirtsgesteine wie folgt grob eingegrenzt werden:

- Steinsalz (ohne Anhydrit) ca. 0,1 bis 1 m³ (z.B. Beauheim & Roberts, 2002, Fjær et al., 2008)
- Tongestein ca. 0,1 bis 10 m³ (z.B. Nordahl & Ringrose, 2008; Yu et al., 2017)
- Kristallin ca. 100 bis 100.000 m³ (z.B. Li et al., 2018; Toth & Vass, 2011; Xia et al., 2016)

Für Steinsalz und Tongesteine ist somit ein Radius von <<50 m um Bohrungen oder Schächte als hinreichend repräsentativ zu bewerten; für Kristallingesteine hingegen nicht.

Kritisch zu benennen ist, dass untertägige Auffahrungen, wie Schächte und Tunnel, permanente Schwächezonen im Wirtsgestein erzeugen können, sowie eventuell bestehende Kluftnetzwerke aktivieren und damit zu einer tiefer reichenden Auflockerungszone führen können. Damit können auch neue Wasserwegsamkeiten entstehen, die als hydraulischer Kurzschluss zwischen Aquiferen und dem potenziellen Lagerbereich wirken. Die genannten Effekte führen für die Bestimmung hydraulischer

Eigenschaften potenziell zu längerfristig transienten Druckantworten als um ein Bohrloch, was die Dauer der repräsentativen Bestimmung von hydraulischen Eigenschaften wie Durchlässigkeit und Speicherkapazität beeinflusst. Fluidwegsamkeiten erlauben auch Gasmigration, welches während und nach der Einlagerung der Kanister entsteht, aus dem Endlager zur Oberfläche.

4.2 Ausschließlich über- oder untertägig messbare Daten

Über- und untertägige Explorationen sind nicht redundant, sondern komplementär und adressieren unterschiedliche räumliche Dimensionen. Oberflächenbasierte Geophysik erfasst Geometrie und Grundwasserführung, ist jedoch unter der Oberfläche nicht uneingeschränkt realisierbar. Untertägig spezialisierte Methoden benötigen einen Tunnelzugang und liefern dort notwendige Detailinformationen, während bohrlochbasierte Ansätze universell einsetzbar bleiben: Übertägige Bohrungen erschließen vertikale Tiefenbereiche bis jenseits von 1.500 m, untertägige Bohrungen liefern dagegen horizontale und laterale Informationen im Zielhorizont. Eine Kombination beider Verfahren stellen die abgelenkten Bohrungen dar, welche sowohl vertikale als auch laterale Bohrstrecken erlauben. Neuere Versuchsgeometrien zwischen mehreren Bohrungen bzw. unter Nutzung von kleinkalibrigen Nebenbohrungen rund um ein Hauptbohrloch ermöglichen die Erhebung relevanter Eigenschaften in repräsentativen Gesteinsvolumina von mehreren Dekametern Durchmesser um eine Hauptbohrung. Die strategische Frage lautet daher nicht „übertägig versus untertägig“, sondern wann welche Kombination aus beiden Ansätzen für welchen Entscheidungsstand erforderlich ist.

Methodisch erfolgte ein Wandel von Einzelmethoden zu integrierten, multi-physikalischen Ansätzen mit iterativer Modellverbesserung. Die Datenerfassung entwickelte sich von punktuellen Messungen zu kontinuierlichem Langzeitmonitoring über mehr als 20 Jahre, bis hin zu quasi-Echtzeit. Organisatorisch etablierten sich standardisierte, qualitätsgesicherte Programme mit systematischer Unsicherheitsquantifizierung. Viele Methoden sind universell einsetzbar. In Einzelfällen zeigen sich jedoch wirtsgesteinsspezifische Präferenzen, die sich aus den physikalischen Eigenschaften der Wirtsgesteine bzw. deren Rahmengesteine herleiten. Neueste Entwicklungen zeigen, dass für die vergleichende Bewertung von potenziellen Standorten moderne übertägige Methoden bereits hochwertige Daten liefern; eine untertägige Erkundung bleibt jedoch unverzichtbar, wenn im Anschluss eine detaillierte Planung erfolgen soll.

Für untertägige Messungen ergeben sich primär geologisch-strukturelle Schwerpunkte. So erfolgen Detailaufnahmen von Gesteinsstrukturen, Schichtung und Klüftung sowie die Charakterisierung auslegungsrelevanter Störungen. Die räumliche Kontinuität des Wirtsgesteins entlang der Auffahrungen kann direkt und in einem Umkreis von rund 50 m mittels geophysikalischer Verfahren oder Bohrungen approximativ aufgenommen werden. Erfahrungsgemäß hat die EDZ typischerweise eine Größe im Dezimeter- bis Meterbereich und kann mittels flacher Bohrungen erkundet werden. Der Vergleich von Modellierungen mit kartierten EDZ-Daten zeigt jedoch eine gute Prognostizierbarkeit, sofern Gesteinseigenschaften und Spannungsfeld bekannt sind. Die für die Modellierungen notwendige Datengrundlage kann durch Kernproben sowie Bohrlochversuche gewonnen werden.

Hydrogeologisch ermöglichen untertägige Untersuchungen direkte Beobachtungen von Wasserzutritten, Fließwegen, Tropfstellen und Gasaustritten (z.B. CO₂, H₂, CH₄, Radon). Es können in Bohrungen vom Tunnel aus Messungen von Wassermengen, Druckverteilung und deren Langzeit-Schwankungen durchgeführt werden. Diese Daten sind aber auch nach Ausbau von übertägigen Erkundungsbohrungen zu Langzeitmessstellen erfassbar. Geomechanisch richten sich die Schwerpunkte in Untertagemessungen auf Konvergenzen, Langzeitstabilität und THMC-gekoppelte Gesteinsverhalten, wobei aber viele Befunde aus Untertagelaboren abgeleitet oder übertragen werden können.

4.3 Datenübertragbarkeit von Untertagebauwerken auf andere Standorte

Forschungslabore wie Tournemire, Mont Terri, Grimsel, Äspö und HADES erfüllen eine grundlegend andere Funktion als Standorterkundungen. Sie führen systematische Langzeitcharakterisierungen über Jahrzehnte durch und liefern methodisch übertragbare Erkenntnisse zur EDZ-Charakterisierung, zur wirtsgesteinsspezifischen Parametrisierung und zum Verständnis THMC-gekoppelter Vorgänge. Die

einzigartige Langzeitvalidierung, exemplarisch die rund 130 Jahre währende EDZ-Beobachtung in Tournemire, ist ausschließlich in solchen Laboren möglich. Methodische Ergebnisse lassen sich auf andere Standorte übertragen; standortspezifische Parameterwerte erfordern jedoch lokale Bestimmung. Die genannten Laborstandorte verfolgen im Detail zwar unterschiedliche fachliche Schwerpunkte, bleiben jedoch in drei Kernfragen konsistent: THMC-Langzeitverhalten der Wirtsgesteine und der Barrieren, Sorption- und Retardationsprozesse von Radionukliden in Kluftnetzwerken sowie generalisierte Modellierungsmethoden werden erforscht. Dabei liefern die Laborbefunde eine methodische Referenz, die grundsätzlich auf andere Standorte übertragbar ist, doch konkrete Kennzahlen müssen lokal kalibriert werden, da sie von Gesteinsart, Geotektonik und geologischen Rahmenbedingungen abhängen. Diese führen ggf. zu variierenden EDZ- und BdZ-Charakteristika und erfordern Anpassungen in der Modellierung. Insgesamt liefern Felslaborstudien zentrale, wenn auch standortspezifische Grundlagen, welche eine Vergleichsgrundlage für die Bewertung zukünftiger Standortstudien bieten.

4.4 Zeitliche und wirtschaftliche Erwägungen

Aus den dargestellten Fallstudien lässt sich ableiten, dass die übertägige Explorationsphase, bestehend aus geophysikalischen Messungen, (Tief-) Bohrungen und Messungen in diesen Bohrungen von der Oberfläche, wirtsgesteinsunabhängig typischerweise fünf bis sieben Jahre dauert. Diese Dauer blieb über die letzten vier Jahrzehnte der Endlagersuche stabil, weil höhere Qualitätsanforderungen und längere Monitoring-Phasen technologische Fortschritte kompensieren. Im Detail ist erkennbar, dass in einzelnen Regionen Referenzdaten aus Untertagelaboren bzw. anderen Standortregionen (vor allem in Schweden) die Standortcharakterisierung beschleunigen konnte. Deutlich wurde aber auch, dass diese Daten einer lokalen Kalibrierung bedurften.

Mit dem Gesetzesentwurf zum StandAG wurden in 2013 für jede untertägige Erkundung Kosten von etwa 500 Mio Euro pro Standort zusätzlich zur übertägigen geophysikalischen und Bohrlocherkundung (Schätzung zufolge etwa 100 Mio Euro pro Standort) angesetzt – im Schnitt dauern diese 5-10 Jahre (<https://www.deutschlandfunk.de/teure-endlagersuche-100.html>, letzter Abruf 19.04.2026). Daraus ergibt sich, dass ein Zusammenlegen der Phasen 2 und 3 StandAG eine Kostenreduktion bedeuten würde, aber kaum oder keine Zeitersparnis, falls betrieblich mehrere Aufschlüsse parallel erfolgen können.

Nichtsdestotrotz stellen später zu verschließende Schächte ein Sicherheitsrisiko dar, weswegen Behörden den Nachweis der Wiederherstellung oder der Barrierewirkung verlangen können. Auch besteht die Möglichkeit, dass ein Erkundungsschacht eine geeignete Formation bereits in einem Maße verritzt, dass diese nicht mehr zu einem Endlager ausgebaut werden kann.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Wirtsgesteinsspezifische Ableitungen

Auf Grund der unterschiedlichen Eigenschaften der möglichen Wirtsgesteine Kristallingestein, Tongestein und Steinsalz werden in Deutschland unterschiedliche Lagerkonzepte diskutiert.

Im Typ 1 befindet sich der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) in einer kontinuierlichen und homogenen Formation. Die Schutzwirkung wird überwiegend von der Geosphäre sichergestellt; endlagerbaubedingte Auffahrungen werden durch ingenieurtechnische Verschlussbauten geschlossen, welche aus ähnlichem Material wie das Umgebungsgestein bestehen und absehbar auf Grund der Spannungsbedingungen um das Endlager Bestandteil des ewG werden (für eine detailliertere Darstellung wird auf ESK, 2025 verwiesen). Nach bisherigen Erkenntnissen wird dieser Typ 1 von den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein erfüllt.

Im Kristallin ist aufgrund der heterogenen Zerklüftung und Durchlässigkeiten zusätzlich der Endlagertyp 2 angedacht, bei dem die Schutzwirkung überwiegend von einer technischen bzw. geotechnischen Barriere übernommen wird (Details siehe ESK, 2025).

Tongestein und Steinsalz: Typische repräsentative Volumina (REV) um Bohrungen liegen bei etwa 0,1 bis 10 m³; alle relevanten Daten für eine vergleichende Untersuchung potenzieller Standorte sind nach heutigem Stand der Technik zuverlässig aus Bohrungen zu gewinnen. Der Mehrwert einer Erkundung für den Standortvergleich aus einem Bergwerk wird als gering eingestuft.

Kristallines Wirtsgestein (z. B. Granit/Gneis): Mit einem REV zwischen 100 bis 100.000 m³ sind die zu charakterisierenden Volumina deutlich größer als bei Tonstein oder Steinsalz. Oberflächengeophysik liefert zwar die großskalige Strukturgeologie ab, kann aber nur im Idealfall mittelskalige – somit für die Endlagerfindung relevante – Strukturen abbilden. Aufschlüsse und Untertagebohrungen liefern die notwendige Detailauflösung, um Kluft-Netzwerke abzubilden. Somit wäre zur Charakterisierung des ewG im Kristallingestein (Endlagertyp I) ein Bergwerk notwendig, welches die Dimensionen des Endlagers selbst besitzt. Für den Typ II spielt eine Charakterisierung des Wirtsgestein nur eine untergeordnete Rolle, da die technische Barriere die hauptsächliche Schutzwirkung übernimmt. Hier müssen in-situ einzig Bereiche ausgehalten werden, die ungeeignet sind (siehe Planungen der Lagerauslegung von SKB und Posiva). Für das Wirtsgestein Kristallingestein wird also geschlussfolgert, dass für Typ I eine unterirdische Exploration unabdingbar ist und für Typ II ggf. erst im Verlauf der Auffahrung bestimmbar wird, wo keine Einlagerung möglich ist.

5.2 Allgemeine Schlussfolgerung

Da das Kristallin, wie dargestellt, einer Sonderbehandlung bedarf, wird für die abschließende Bewertung die Abwägung für die Erfolgswahrscheinlichkeit der folgenden Erkundungsstrategien nur für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz bewertet:

- a) vergleichende Standortauswahl nach übertägiger Erkundung und Auffahrung von Bergwerken an mindestens zwei ausgewählten Endlagerstandorten zum vertiefenden Vergleich oder
- b) eine vergleichende übertägige Standortauswahl und Auffahrung des Bergwerks am ausgewählten Standort.

Der Zeit- und Kostenrahmen zeigt, dass oberirdische Exploration typischerweise 5–7 Jahre dauert und um die 100 Mio Euro pro Standort kostet. Mit Blick auf die Entwicklung der bohrlochbasierten Messtechnik der letzten 25 Jahre ist mit Blick auf das „Lernende Verfahren“ somit zu attestieren, dass durch eine oberirdische Erkundung mittels Tiefbohrungen und geophysikalischen Messungen eine Standortregion zuverlässig stratigraphisch, tektonisch, hydrogeologisch, petrophysikalisch und mechanisch bewertbar und somit eine fundierte Entscheidungsgrundlage für den Standortvergleich ableitbar ist.

Die untertägige Erkundung mittels Auffahrungen ist kosten-, risiko- und zeitintensiv, liefert aber Daten aus direkten Beobachtungen zu Gasmigration, präferentiellen Fließpfaden und EDZ, sowie den Raum

um Experimente zum THMC-Verhalten durchzuführen. Diese Kenntnisse sind für die standortspezifische Detailplanung entscheidend, nicht jedoch für die vergleichende Bewertung. Felslabor-Erkenntnisse liefern übertragbare methodische Grundlagen, müssen aber lokal kalibriert werden, da standort-spezifische Parameter bspw. durch detaillierte Gesteinszusammensetzung oder geotektonischem Rahmen variieren können.

Insofern die Erkundungsbergwerke parallel aufgefahren werden, entstehen damit durch eine Verschmelzung der Phasen 2 und 3 gegenüber dem Status Quo nach StandAG kaum zeitliche Vorteile, da auch bei der Verschmelzung der Phasen 2 und 3 ein Bergwerk am ausgewählten Standort aufgefahren und in einen Laborbetrieb überführt werden muss. Erfolgt die Auffahrung bspw. aus betrieblichen Gründen dagegen sequenziell, so ist beim Status Quo mit einer zusätzlichen Dauer von etwa 5 Jahren und Zusatzkosten von etwa 500 Mio Euro pro Standort zu rechnen.

Schlussendlich ist somit nach heutigem Stand der technischen Möglichkeiten zur Oberflächenerkundung im Hinblick auf die vergleichenden Untersuchungen und Standortwahl eine Erkundung mit Bergwerken als nicht verhältnismäßig zu bewerten.

6 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Im Gutachten dargestellte Untertagelabore und Endlagerprojekte.
Graue Linien für Projekte in Tongesteinen; Blaue Linie für das
Projekt in Steinsalz; Rosa Linien für Projekte in Kristallingesteinen. 10

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abwägungskriterien nach StandAG.....	12
Tabelle 2: Kenndaten der Untertagelabore und Endlagerprojekte.....	42
Tabelle 3: Fortsetzung der Kenndaten der Untertagelabore und Endlagerprojekte.....	42
Tabelle 4: In den Untertagelaboren und Endlagerprojekten eingesetzte geowissenschaftliche Messmethoden.	43
Tabelle 5: Fortsetzung der in den Untertagelaboren und Endlagerprojekten eingesetzte geowissenschaftliche Messmethoden.	44

8 Literaturverzeichnis

- Armand, G., Plas, F., Talandier, J., Dizier, A., Li, X. L., & Levasseur, S. (2023). Contribution of HADES URL to the development of the Cigéo project, the French industrial centre for geological disposal of high-level and long-lived intermediate-level radioactive waste in a deep clay formation.
- Beauheim, R. L., & Roberts, R. M. (2002). Hydrology and hydraulic properties of a bedded evaporite formation. *Journal of Hydrology*, 259(1-4), 66-88.
- Bernier, F. J., Detilleux, V., Lemy, F., Pochet, G. M., Surkova, M., Volckaert, G., & Mommaert, C. (2021). Underground research laboratories, an important support to the Belgian Regulatory Body's Research and Development programme and the management of uncertainties.
- Blechs Schmidt, I., & Vomvoris, S. (2010). Underground research facilities and rock laboratories for the development of geological disposal concepts and repository systems. In *Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste* (pp. 82-118). Woodhead Publishing.
- Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008). Standortbeschreibung Gorleben Teil 3.
- Bossart, P., Bernier, F., Birkholzer, J., Bruggeman, C., Connolly, P., Dewonck, S., Fukaya, M., Herfort, M., Jensen, M., Matray, J.-M., Mayor JC., Moeri, A., Oyama, T., Schuster, K., Shigeta, N., Vietor, T., & Wiczorek, K. (2017). Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments. *Swiss Journal of Geosciences*, 110(1), 3-22.
- Bräuer, V., Eickemeier, R., Eisenburger, D., Grisse mann, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J., & Weber, J. R. (2012). Standortbeschreibung Gorleben Teil 4.
- Chazaly, B., Righini-Waz, C., Le Puth, J., Minici, S., & Dottesi, A. (2021). Numérisation des levés géologiques et modélisation géométrique 3D haute résolution dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne de l'Andra à Bure. Digital geological surveys and high resolution 3D modelling in the Andra's Bure underground research laboratory (Meuse/Haute).
- Chen, G., Li, X., Dizier, A., Verstricht, J., Sillen, X., & Levasseur, S. (2023). Characterization of Boom Clay anisotropic THM behaviour based on two heating tests at different scales in the HADES URL.
- De Craen, M., Moors, H., Honty, M., & Van Geet, M. M. (2023). The role of the HADES URL in better understanding of the Boom Clay pore water geochemistry.
- Delay, J. (2006). Overview of the current and planned activities in the French Underground Research Laboratory at Bure. In *International topical meeting TOPSEAL 2006*. Transactions (No. INIS-BE-V--001, pp. 132-136).
- Delay, J. (2010). Clay geological repository systems: Characterisation and site surveying technologies and techniques. In *Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste* (pp. 153-187). Woodhead Publishing.
- Delay, J., Bossart, P., Ling, L. X., Blechs Schmidt, I., Ohlsson, M., Vinsot, A., Nussbaum, C., & Maes, N. (2014). Three decades of underground research laboratories: what have we learned?.
- Delay, J., Distinguin, M., & Dewonck, S. (2006a). Characterization of a clay-rich rock through development and installation of specific hydrogeological and diffusion test equipment in deep boreholes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7), 393-407.
- Delay, J., Lesavre, A., & Wileveau, Y. (2008). The French underground research laboratory in Bure as a precursor for deep geological repositories.
- Delay, J., Vinsot, A., Krieguer, J. M., Rebours, H., & Armand, G. (2006b). Making of the underground scientific experimental programme at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, North Eastern France. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(1-7), 2-18.
- Deutscher Bundestag (2006). Eignung der Standorte Gorleben und Schacht Konrad für die Endlagerung von radioaktivem Müll (Bundestagsdrucksache Nr. 16/1963).
- ESV EURIDICE EIG (2010). Fiche - Boomse Klei.
- ESK (2025). Stellungnahme zur Möglichkeit der Durchführung der Erkundung ohne Auffahrung eines Bergwerks im Standortauswahlverfahren der Endlagerkommission, 04.12.2025, RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung.

- Fjær, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M., & Risnes, R. (2008). Geological aspects of petroleum related rock mechanics. *Developments in petroleum science*, 53, 103-133.
- Furche, M., & Schuster, K. (2015). Neuartige Kombination von Geoelektrik (ERT)-und Miniseismik-Messungen zur Charakterisierung von Tongesteinen erfolgreich getestet.
- Giese, R., Bonnelye, A., Boese, C., Cunow, C., Dick, P., Esefelder, R., Foerster, T., Fuchs, S., Jaksch, K., Kwiatek, G., Lüth, S., Norden, B., Plenkers, K., Sass, I., von Specht, S., Zang, A., & Zimmermann, G. (2026). The CHENILLE experiment: Monitoring of fault-heating and fluid-injection in shale rocks at the underground research facility Tournemire, Southern France. *Geological Society, London, Special Publications*, 561(1), gslspecpub2025-42.
- Guglielmi, Y. G., Henry, P., Nussbaum, C., Dick, P., Gout, C., & Amann, F. (2015). Underground Research Laboratories for conducting fault activation experiments in shales. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2015). ARMA.
- Guglielmi, Y., & Birkholzer, J. (2024). Experiments of fault zone activation in caprock analogs: implications for CO₂ sequestration. In *1st Caprock Integrity & Gas Storage Symposium 2024* (p. 18).
- Heitzmann, P., Tripet, J. P., & Suisse. Office fédéral des eaux et de la géologie. (2003). Mont Terri Project: Geology, Paleohydrology and Stress Field of the Mont Terri Region (p. 4). Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG.
- Holt, E., & Jalonen, T. (2024). Recent advances from Finland's R&D, supporting final operation of the deep geological repository. In *WM2024 Conference (10-14.03. 2024)*. Phoenix, Arizona, USA (Vol. 24356).
- IRSN (2018). Identifier et prévenir les risques liés au stockage géologique de déchets nucléaires – Station expérimentale de l'IRSN à Tournemire.
- JAEA (2011). JAEA Research Report 2010-039: Study on Geology on Mizunami Underground Research Laboratory Project - Annual Report for Fiscal Year 2008. Shirakata/Japan.
- Jaeggi, D., Madritsch, H., Möri, A., Nussbaum, C., & Ziegler, M. (2024). Current and planned activities of the Swiss Geological Survey in the context of geological carbon storage. In *1st Caprock Integrity & Gas Storage Symposium 2024* (p. 3).
- JNC (2001). JNC Technical Note TN7400 2003-004: Mizunami Underground Research Laboratory Project - Results from 1996-1999 (Revised edition). Muramatsu/Japan.
- JNC (2002). JNC Technical Note TN7410 2003-001: Master Plan of the Mizunami Underground Research Laboratory Project. Muramatsu/Japan.
- Klinge, H., Boehme, J., & Grisseemann, C. (2007). Standortbeschreibung Gorleben Teil 1.
- Köthe, A., Hoffmann, N., & Krull, P. (2007). Standortbeschreibung Gorleben Teil 2.
- Kukla, P., Pechinig, R., & Urai, J. (2011). Analysis and evaluation of the Gorleben site characteristics. Report on the working package 2. Preliminary safety analysis Gorleben; Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2. Vorläufige Sicherheitsanalyse fuer den Standort Gorleben.
- Li, X., Neerdael, B., Raymaekers, D., & Sillen, X. (2023). The construction of the HADES underground research laboratory and its role in the development of the Belgian concept of a deep geological repository.
- Li, Y., Chen, J., & Shang, Y. (2018). Determination of the geometrical REV based on fracture connectivity: a case study of an underground excavation at the Songta dam site, China. *Bull Eng Geol Environ* 77, 1599–1606. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1063-y>.
- Lundy, M., Ostertag-Henning, C., Agnel, M., Wechner, S., Lettry, Y., & Vinsot, A. (2024). Fate of hydrogen gas injected in a clay-rich rock: an in-situ experiment. In *1st Caprock Integrity & Gas Storage Symposium 2024* (p. 104).
- Makhijani, A., Makhijani, A., Daemen, J., Danko, G., Jentzsch, G., Kalinina, E., & Wahi, K. (2011). Critical Review of Andra's Program of Research Conducted in the Underground Laboratory at Bure and in the Transposition Zone to Define the ZIRA.
- Mazurek, M., Gautschi, A., Marschall, P., Vigneron, G., Lebon, P., & Delay, J. (2008). Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33, S95-S105.
- Müller, C., Siegesmund, S., & Blum, P. (2010). Evaluation of the representative elementary volume (REV) of a fractured geothermal sandstone reservoir. *Environ Earth Sci* 61, 1713–1724. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0485-7>.

- Naef, H., & Birkhäuser, P. (1996). Reflexionsseismik zur Erkundung des Opalinustons in der Nordschweiz. *Bull. angew. Geol.* Vol. 1(2), 113-134.
- Nagra (1985). Nagra Technischer Bericht NTB 85-34: Felslabor Grimsel – Rahmenprogramm und Statusbericht. Baden/Schweiz.
- Nagra (1986). Nagra Technischer Bericht NTB 87-15: Beiträge zur Geologie der Nordschweiz. Baden/Schweiz.
- Nagra (1990a). Nagra Technischer Bericht NTB 89-15: Hydrogeological characterisation of the migration experimental area at the Grimsel Test Site. Wettingen/Schweiz.
- Nagra (1990b). Nagra Technischer Bericht NTB 90-49: Joint seismic, hydrogeological and geomechanical investigations of a fracture zone in the Grimsel Rock Laboratory, Switzerland. Wettingen/Schweiz.
- Nagra (1992). Nagra Technischer Bericht NTB 90-07: Grimsel Test Site – Geophysical Methods for the detection of discontinuities ahead of a tunnel face. Wettingen/Schweiz.
- Nagra (1994). Nagra Technischer Bericht NTB 93-01: Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland – Synthesis of Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme. Wettingen/Schweiz.
- Nagra (2009). Nagra Arbeitsbericht NAB 09-28: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Wettingen/Schweiz.
- Nagra (2014). Nagra Technischer Bericht NTB 14-02: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlagen. Wettingen/Schweiz.
- Nagra (2022). Nagra Arbeitsbericht NAB 22-04: TBO Bachs-1-1: Data Report. Wettingen/Schweiz.
- NEA (2024). NEA/RWM/R(2023)2: Underground Research Laboratories (URL) – 2024 Update.
- Nordahl, K. & Ringrose, P.S. (2008). Identifying the Representative Elementary Volume for Permeability in Heterolithic Deposits Using Numerical Rock Models. *Math Geosci* 40, 753–771. <https://doi.org/10.1007/s11004-008-9182-4>
- Posiva (2007). Posiva Working Report WR-2007-32: Geological Data Acquisition for Site Characterisation at Olkiluoto: a Framework for the Phase of Underground Investigations. Olkiluoto/Finland.
- Posiva (2009). Posiva Working Report WR-2009-31: Programme for Repository Host Rock Characterisation in the ONKALO (ReRoC). Olkiluoto/Finland.
- Posiva (2016). Posiva Report WR-2016-14: Outcome of Geological Mapping and Prediction/Outcome Studies of ONKALO. Olkiluoto/Finland.
- Renaud, V., Lahaie, F., Armand, G., Verdel, T., & Bigarre, P. (2005). Conception, numerical prediction and optimization of geomechanical measurements related to a vertical Mine-by-Test at the Meuse/Haute-Marne URL. In *Clays in natural & engineered barriers for radioactive waste confinement* (pp. 139-140).
- Schuster, K., Amann, F., Yong, S., Bossart, P., & Connolly, P. (2017). High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). In *Mont Terri Rock Laboratory, 20 Years: Two Decades of Research and Experimentation on Claystones for Geological Disposal of Radioactive Waste* (pp. 215-233). Cham: Springer International Publishing.
- SKB (1994). SKB Report TR-94-24: Äspö Hard Rock Laboratory – Feasibility and usefulness of site investigation methods: Experiences from the pre-investigation phase. Stockholm/Schweden.
- SKB (1997). SKB Report TR-97-06: Äspö Hard Rock Laboratory – Models based on site characterization 1986-1995. Stockholm/Schweden.
- SKB (2000). SKB Report TR-00-20: Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository. Stockholm/Schweden.
- SKB (2003a). SKB Report P-03-107: Oskarshamn site investigation - Borehole: KSH01A: Results of tilt testing. Stockholm/Schweden.
- SKB (2003b). SKB Report R-03-07: Geological Site Descriptive Model - A strategy for the model development during site investigations. Stockholm/Schweden.
- SKB (2004a). SKB Report P-04-29: Forsmark site investigation - Interpretation of airborne geophysics and integration with topography: Stage 1 (2002). Stockholm/Schweden.
- SKB (2004b). SKB Report P-04-196: Oskarshamn site investigation - A deformation analysis of the Äspö GPS monitoring network from 2000 to 2004. Stockholm/Schweden.

- SKB (2004c). SKB Report P-04-219: Oskarshamn site investigation - Hydrochemical logging in KLX04A. Stockholm/Schweden.
- SKB (2005a). SKB Report P-05-21: Forsmark site investigation - Comparison of measured EC in selected fractures in boreholes KFM02A, KFM03A and KFM04A from difference flow logging and hydro-geochemical characterization – Analysis of observed discrepancies in KFM03A. Stockholm/Schweden.
- SKB (2005b). SKB Report P-05-76: Forsmark site investigation - Resistivity measurements and determination of formation factors on samples from KFM03A, KFM04A and KFM05A. Stockholm/Schweden.
- SKB (2005c). SKB Report R-05-35: Evaluation of the state of stress at the Forsmark site - Preliminary site investigation Forsmark area - version 1.2. Stockholm/Schweden.
- SKB (2006a). SKB Report R-06-29: Oskarshamn site investigation - Programme for further investigations of bedrock, soil, water and environment in Laxemar subarea. Stockholm/Schweden
- SKB (2006b). SKB Report TR-06-10: Äspö Hard Rock Laboratory: Annual report 2005. Stockholm/Schweden
- SKB (2007a). SKB Report P-06-286: Oskarshamn site investigation - Data report from the laboratory investigations of the transport properties of the rock: Data delivery for data freeze Laxemar 2.2. Stockholm/Schweden.
- SKB (2007b). SKB Report P-07-139: Forsmark site investigation - Laboratory measurements within the site investigation programme for the transport properties of the rock - Final report. Stockholm/Schweden.
- SKB (2007c). SKB Report R-07-45: Geology Forsmark - Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. Stockholm/Schweden.
- SKB (2007d). SKB Report R-07-66: Construction experiences from underground works at Oskarshamn - Compilation report. Stockholm/Schweden.
- SKB (2008). SKB Report R-08-82: Confidence assessment - Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark. Stockholm/Schweden.
- SKB (2009). SKB Report P-07-179: Oskarshamn site investigation - Laboratory measurements within the site investigation programme for the transport properties of the rock: Final report. Stockholm/Schweden.
- SKB (2010). SKB Report R-10-05: Oskarshamn site investigation Bedrock geology – overview and excursion guide. Stockholm/Schweden.
- SKB (2017). SKB Report P-14-15: Äspö site descriptive model - Geological single-hole interpretation of KAS04, KAS06 and KAS08. Stockholm/Schweden.
- Stanfors, R., Rhén, I., Tullborg, E. L., & Wikberg, P. (1999). Overview of geological and hydrogeological conditions of the Äspö hard rock laboratory site. *Applied Geochemistry*, 14(7), 819-834.
- M. Tóth, T., & Vass, I. (2011). Relationship between the geometric parameters of rock fractures, the size of percolation clusters and REV. *Mathematical Geosciences*, 43(1), 75-97.
- Winhausen, L., Amann-Hildenbrand, A., Fink, R., Jalali, M., Khaledi, K., Hamdi, P., Urai, J., Schmatz, J., & Amann, F. (2021). A comparative study on methods for determining the hydraulic properties of a clay shale. *Geophysical Journal International*, 224(3), 1523-1539.
- Xia, L., Zheng, Y., & Yu, Q. (2016). Estimation of the REV size for blockiness of fractured rock masses. *Computers and Geotechnics*, 76, 83-92.
- Yu, C., Matray, J. M., Gonçalves, J., Jaeggi, D., Gräsle, W., Wiczorek, K., Vogt, T., & Sykes, E. (2017). Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay (Switzerland). In *Mont Terri Rock Laboratory, 20 years: Two decades of research and experimentation on claystones for geological disposal of radioactive waste* (pp. 87-106). Cham: Springer International Publishing.
- Zhang, L., Xia, L., & Yu, Q. (2017). Determining the REV for Fracture Rock Mass Based on Seepage Theory. *Geofluids*, 4129240. <https://doi.org/10.1155/2017/4129240>.

A.1 Anhang

Tabelle 2: Kenndaten der Untertagelabore und Endlagerprojekte.

Land	Salzgestein		Tongestein					
	Deutschland		Frankreich			Belgien		Schweiz
Standort	Gorleben		Bure	Tournemire	HADES		Mont Terri	Nörtl. Lägern
Wirtsgestein	Salz		Tonstein/Mergel			Tonstein	Tonstein/Mergel	Tonstein/Mergel
Rahmengestein	Ton bis Sand		Karbonate			Ton bis Sand	Tonstein/Mergel	Tonstein/Mergel
Zweck	Standort & URL		Standort & URL	URL	URL		URL	Standort
Absolute Teufe [m]	2000	933	490	250-300	225		300	2482
Bohrungslänge [km]	15-20	15-25	15-19	8-12	1,2-2,3	2-3	3-5	5-8
Schachtlänge (vertikal, kummuliert) [m]	-	1773	-	1000	-	-	478	-
Schachtdurchmesser [m]	7,5		5-6		-	2,5-3,5		-
Strecken [km]	-	8-10	-	2-3	2-2,2	-	0,25	0,8
Explorationskosten [Mio]	140 EUR	965 EUR	280 EUR		-	nicht rechechierbar		-
Zeitraum (hauptsächliche Untersuchungen)	1979-1985	1986-2000 2010-2013	1994-2008	2004+	(1887) 1992+	1972-1980	1980+	1996+
								2007+

Tabelle 3: Fortsetzung der Kenndaten der Untertagelabore und Endlagerprojekte.

Land	Kristallingestein							
	Schweiz		Finnland		Schweden			Japan
Standort	Grimsel	Molassebecken	Onkalo/Olkiluoto		Forsmark	Oskarshamn	Äspö	Mizunami
Wirtsgestein	Granodiorit	Granit/Gneis	Ortho-Gneis		Ortho-Gneis	Gneis	Granite & Diorite	Granit
Rahmengestein	Granodiorit	variabel	Ortho-Gneis		Ortho-Gneis	Gneis	Granite & Diorite	Granit
Zweck	URL		(Standort)	Standort & URL	Standort	Standort	URL	(Standort) & URL
Absolute Teufe [m]	<450	2485	1000	437	1001	1000	460	1000
Bohrungslänge [km]	8-12	14,3	10-14	1,5-2	>18	21	12-20	8-12
Schachtlänge (vertikal, kummuliert) [m]	-	-	-	1611	-	-	-	-
Schachtdurchmesser [m]	-	-	3,5-5,5		-	-	5,5	4,5-6,5
Strecken [km]	1	-	-	5,5	-	-	3,6	-
Explorationskosten [Mio]	-	unklar	total 1000 EUR		600 SKR	nach -600 SKR(USD 50	USD 530
Zeitraum (hauptsächliche Untersuchungen)	1984+	1978-1994	1983-2004	2004-2012 (2023)	2002-2009	2002-2008	1986+	1996-2002
								2002-2019

Tabelle 4: In den Untertagelaboren und Endlagerprojekten eingesetzte geowissenschaftliche Messmethoden.

Land	Standort	Salzgestein		Tongestein						
		Deutschland		Frankreich			Belgien		Schweiz	
		Gorleben		Bure		Tournemire	HADES		Mont Terri	Nördl. Lägern
Eingesetzte Methoden		übertägig	untertägig	übertägig	untertägig	untertägig	übertägig	untertägig	übertägig	
Sicherheitsrelevantes REV				< 1 mm		< 2 mm	1 cm ³			
Kartierung	Boden	x	o	x	o	o	x	o	o	x
	Aufschluss	x	x	x	o	o	x	o	o	x
	Tunnel	o	x	o	x	x	o	x	x	o
Geophysik	Elektrische Widerstandstomografie	x	o	x	x	(x)	x	o	(x)	(x)
	Magnetik	x	o	o	o	o	o	o	o	x
	2D-Seismik	x	o	x	o	x	(x)	o	(x)	x
	3D-Seismik	x	x	x	x	o	o	o	?	x
	passive Seismik	o	x	o	x	(x)	o	x	x	o
	Gravimetrie	o	o	o	o	o	o	o	o	x
	Bohrlochlogs - z.B.									
	- Temperatur									
	- Dichte									
	- Geometrie	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	- Kaliber									
- Gamma										
- Ultraschall										
- Salinität										
Geothermische Logs	x	o	x	o	x	x	o	o	x	
GPR	x	x	o	x	x	(x)	x	?	(x)	
Elektromagnetik	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
Hydraulik	Hydraulische Bohrlochversuche	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Hydrochemie	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Langzeit-Monitoring	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kernaufnahme	Hydraulik	x	x	x	x	o	o	o	x	x
	Petrografie und Mineralogie	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Geothermische Eigenschaften	x	?	?	?	o	o	o	x	x
	Mechanische Eigenschaften	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Sorptions & Diffusionsversuche	(x)	(x)	(x)	(x)	x	(x)	(x)	x	x
Geotechnik	Extensometer	o	x	o	x	x	o	x	x	o
	Inklinometer	(x)	x	o	x	(x)	o	x	x	o
	Temperatur	x	x	o	x	x	o	x	x	x
	Konvergenzmessungen	o	x	o	x	x	o	x	x	o
	Spannungsmessungen	o	x	o	x	x	o	x	x	x
	GNSS	x	o	x	o	o	x	o	x	x

(x) ... Methode im begrenzten Umfang genutzt

x ... Methode genutzt

o ... Methode wahrscheinlich nicht genutzt

* ... +Weilach nur Bohrung und Bohrlochversuche

Tabelle 5: Fortsetzung der in den Untertagelaboren und Endlagerprojekten eingesetzte geowissenschaftliche Messmethoden.

Land		Kristallingestein								
		Schweiz		Finnland		Schweden			Japan	
		Grimsel	Molassebecken	Onkalo/Olkiluoto	Forsmark	Oskarshamn	Äspö	Mizunami		
Standort	untertägig	übertägig	übertägig	untertägig	übertägig	übertägig	untertägig	übertägig	untertägig	
Eingesetzte Methoden										
Kartierung	Boden	o	x	x	o	x	x	o	x	o
	Aufschluss	o	x	x	o	x	x	o	x	o
	Tunnel	x	o	o	x	o	o	x	o	x
Geophysik	Elektrische Widerstandstomografi	o	x	o	o	x	x	x	x	x
	Magnetik	o	x	x	o	x	x	x	x	(x)
	2D-Seismik	o	x	x	x	x	x	x	x	x
	3D-Seismik	o	o	x	x	(x)	o	x	(x)	x
	passive Seismik	x	o	o	x	o	o	x	o	x
	Gravimetrie	o	x	x	o	x	x	x	x	(x)
	Bohrlochlogs - z.B. - Temperatur - Dichte - Geometrie - Kaliber - Gamma - Ultraschall - Salinität	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Geothermische Logs	x	x	o	o	x	x	x	x	x
	GPR	x	o	x	x	x	x	x	x	x
	Elektromagnetik	o	o	x	o	x	x	x	x	x
Hydraulik	Hydraulische Bohrlochversuche	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Hydrochemie	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Langzeit-Monitoring	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kernaufnahme	Hydraulik	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Petrografie und Mineralogie	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Geothermische Eigenschaften	x	x	x	o	x	x	x	x	x
	Mechanische Eigenschaften	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Sorptions & Diffusionsversuche	x	x	o	x	x	x	x	x	x
Geotechnik	Extensometer	x	o	o	o	x	x	x	(x)	x
	Inklinometer	(x)	o	x	x	x	x	x	x	x
	Temperatur	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Konvergenzmessungen	x	o	o	x	o	o	x	o	x
	Spannungsmessungen	x	x	x	x	x	x	x	(x)	x
	GNSS	o	x	x	o	x	x	o	x	o

(x) ... Methode im begrenzten Umfang genutzt
 x ... Methode genutzt
 o ... Methode wahrscheinlich nicht genutzt
 * ... +Weiach nur Bohrung und Bohrlochversuche