

**Kristallingestein als
Wirtsgestein für
ein Endlager für
hochradioaktive Abfälle**

**Protokoll zum Workshop
am 24./25.06.2025
in Hannover**

Kristallingestein als Wirtsgestein für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle

**Protokoll zum Workshop
am 24./25.06.2025
in Hannover**

Judih Flügge
Oliver Czaikowski
Marc Johnen
Kim-Marisa Mayer
André Rübel
Jens Wolf

Juli 2025

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH im Rahmen des Vorhabens „Kristallin-WS“ unter der Bestellnr. 430207 erstellt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung der BGE übereinstimmen.

Deskriptoren

Anforderungen, Endlagerung, Erkundung, Kristallingestein, Prognostizierbarkeit, Standortauswahlverfahren

Danksagung

Die Autoren danken den Expert*innen für ihre Teilnahme, Redebeiträge und rege Diskussionen während des Workshops. Besonderer Dank gilt dabei den Vortragenden Kristian Bär, Peter Achtziger-Zupančič, Eva-Maria Gottron, Matthias Bauer, Wolfram Rüh-aak, Dennis Gawletta, Lukáš Vondrovic und Piet Zuidema. Für die Unterstützung bei der Organisation des Workshops danken wir Claudia Hommers und Friederike Richter, für die kritische Durchsicht des Protokolls Ulrich Noseck (alle GRS). Für die gute Zusammenarbeit bei der Vorbereitung des Workshops danken die Autoren Sarah Knopf, Matthias Bauer und Wolfram Rüh-aak (alle BGE). Der Workshop wurde mit finanziellen Mitteln der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ziele des Workshops	2
1.2	Format des Workshops.....	2
2	Impuls-Vorträge.....	9
2.1	Gesamtschau deutsches Kristallin.....	9
2.2	Anforderungen an kristalline Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle.....	10
2.3	Behälter für radioaktive Abfälle im Kristallingestein.....	12
2.4	Exploration of crystalline host rock formations: possibilities and limitations.....	13
2.5	Betrachtung des Kristallins im Schweizer Standortauswahlverfahren	14
3	Ergebnisse.....	17
3.1	AG 1: Anforderungen	17
3.1.1	Ist ein ewG im Kristallingestein ein ungeklüfteter Gesteinsbereich oder kann dieser auch nicht verheilte/verheilte Klüfte umfassen?	18
3.1.2	Welche Anforderungen muss das Kristallingestein erfüllen, bzw. welche geologischen Merkmale sind entscheidend, damit man (3a) einen ewG ausweisen kann bzw. (3b) damit ein Typ 2 (ohne ewG) durch geotechnische und technische Barrieren realisiert werden kann? ..	19
3.1.3	Kann ein ewG im Kristallin ausgewiesen werden?.....	21
3.1.4	Zusätzliche Fragen	23
3.1.5	Diskussion im Plenum zu AG 1	23
3.2	AG 2: Erkundung.....	25
3.2.1	Wo liegen die Grenzen der Erkundbarkeit des Kristallingesteins?	25
3.2.2	Welche zusätzlichen Erkenntnisse gewinnt man durch übertägige Erkundung (einschließlich Bohrungen) in Phase 2? Welchen Erkenntnisgewinn haben wir in Phase 2?.....	28

3.2.3	Was sind die Randbedingungen für die Inter- /Extrapolierbarkeit/Übertragbarkeit der erhobenen Daten zwischen den Messpunkten? Wie groß sind die Ungewissheiten und wie geht man mit Ihnen um?	29
3.2.4	Diskussion im Plenum zu AG 2	31
3.3	AG 3: Prognostizierbarkeit	33
3.3.1	Welche Eigenschaften müssen prognostiziert werden? „Worauf kommt es wirklich an?“	33
3.3.2	Welche Prozesse könnten die wichtigen Eigenschaften/Parameter verändern?	35
3.3.3	Wie groß sind die Ungewissheiten und wie geht man mit Ihnen um? Lassen sich die Ungewissheiten quantifizieren? Welche sind minimierbar und wie?	38
3.3.4	Zusätzliche Fragen	42
3.3.5	Diskussion im Plenum zu AG 3	44
4	Zusammenfassung	45
5	Literatur und weiterführende Informationen	49
A	Anhang	51
A.1	Antworten der Diskussionsteilnehmenden auf die Fragen der Arbeitsgruppen	51
A.1.1	Anforderungen	51
A.1.2	Erkundung	54
A.1.3	Prognostizierbarkeit	57
A.2	Präsentationsfolien	61
A.2.1	Gesamtschau deutsches Kristallin	61
A.2.2	Anforderungen an kristalline Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle	79
A.2.3	Behälter für radioaktive Abfälle im Kristallingestein	89
A.2.4	Exploration of crystalline host rock formations: possibilities and limitations	99
A.2.5	Betrachtung des Kristallins im Schweizer Standortauswahlverfahren	129

1 **Einleitung**

Unter den nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG¹) für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Frage kommenden Wirtsgesteinen nimmt das Kristallingestein eine besondere Stellung ein. Kristalline Gesteine zeichnen sich durch ihre hohe Festigkeit, hohe Gesteinsstabilität, geringe Wärmeempfindlichkeit sowie eine geringe Wasserdurchlässigkeit aus. Gleichzeitig können diese Gesteine Diskontinuitäten aufweisen, die abhängig von ihrer Ausprägung (Häufigkeit, Größenordnung, Vernetzung, Öffnungsweite, Füllung, etc.) eine Wasserführung ermöglichen können. Damit haben Diskontinuitäten erheblichen Einfluss auf die Entwicklung von Standorten im Kristallingestein. Die Bewertung der Durchlässigkeit und der Fluidbewegung ist ein integraler Bestandteil von Sicherheitsnachweisen für geologische Tiefenlager.

Um einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) ausweisen und den sicheren Einschluss bewerten zu können, müssen die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des ewG modellierbar und prognostizierbar sein. Die benötigten Daten, z. B. zur Bewertung des Massenaustrags nach § 4 EndlSiAnfV², liegen jedoch für Standorte im Kristallingestein in Deutschland in der Regel nicht vor.

Gemäß StandAG kann der Einschluss der Abfälle durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) oder durch eine den Einlagerungsbereich überlagernde Schicht (üewG) erfolgen. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich kann gemäß EndlSiAnfV aus einem oder mehreren Gebirgsbereichen gebildet werden (Endlagersystem Typ 1). Weiterhin besteht die Möglichkeit im Kristallin den Einschluss über die technischen und geotechnischen Barrieren nachzuweisen (Endlagersystem Typ 2). Dabei muss geprüft werden, ob die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können.

Internationale Erfahrungen und Erkenntnisse bei der Charakterisierung und Bewertung von Kristallingesteinen liegen aus Endlagerprogrammen anderer Länder vor, insbesondere aus Finnland und Schweden. Diese lassen sich jedoch nur bedingt auf die nationalen Gegebenheiten anwenden, da die standortspezifischen Bedingungen stark in den

¹ Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

² Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)

geologischen und hydrogeochemischen Eigenschaften variieren können. Erkundungsmethoden, die auf Tongestein und Steinsalz angewendet werden, können nicht immer auch auf Kristallingesteine angewendet werden.

Entscheidende Fragen für die Bewertung möglicher Standorte im Kristallingestein sind:

- Kann grundsätzlich ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Kristallin ausgewiesen werden?
- Wo liegen die Grenzen der Erkundbarkeit des Kristallingesteins?
- Unter welchen Bedingungen ist die Entwicklung von Standorten im Kristallingestein modellier- und prognostizierbar?

Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH hat am 24./25.06.2025 in Hannover im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) einen nationalen Workshop zur Diskussion dieser und weiterer Fragen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Kristallingestein ausgerichtet.

1.1 Ziele des Workshops

Der Workshop bot eine Plattform für nationale Expert*innen, um die Anforderungen an, sowie Methoden zur Erkundung und Prognostizierbarkeit von kristallinen Wirtsgesteinen auf nationaler Ebene zu diskutieren. Nach fünf Impuls-Vorträgen wurden die Schwerpunkt-Themen „Anforderungen“, „Erkundung“ und „Prognostizierbarkeit“ in Arbeitsgruppen (AG) diskutiert. Eine Zusammenfassung und Diskussion im Plenum rundete den Workshop ab. Das Ziel des Workshops war es, gemeinsame Aussagen zu kristallinen Gesteinen als Wirtsgestein für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in einem Protokoll festzuhalten. Dieses Protokoll enthält auch solche Punkte, bei denen die Expert*innen keinen gemeinsamen Standpunkt finden konnten, und listet offene Fragen auf.

1.2 Format des Workshops

Der Workshop wurde als zweitägige Veranstaltung am 24./25.06.2025 in Hannover durchgeführt. Der eingeladenen Teilnehmerkreis setzte sich zusammen aus vorwiegend

deutschen Expert*innen zum Thema Kristallingestein in Deutschland, darunter die deutschen Mitglieder des OECD³ Nuclear Energy Agency (NEA) Crystalline Clubs (CRC)⁴.

43 Personen von den folgenden Einrichtungen haben am Workshop teilgenommen:

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
- BGE TECHNOLOGY GmbH
- Brenk Systemplanung GmbH
- Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH
- Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN)
- Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien (IEG)
- Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU)
- Nationales Begleitgremium (NBG)
- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
- Helmholtz-Zentrum Dresden-Rosendorf e.V. (HZDR)
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Solexperts AG
- Czech Radioactive Waste Repository Authority (SÚRAO)

³ Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

⁴ Der CRC ist eine Expertengruppe der OECD/NEA als Untergruppe der Integration Group for the Safety Case (IGSC). Sie wurde 2017 gegründet und hat im Jahr 2025 41 technische Expert*innen von 21 Mitgliedsorganisationen aus 10 Mitgliedsländern als Mitglieder. Die deutsche Delegation im CRC ist mit derzeit 15 Mitgliedern im Gegensatz zu den anderen Delegationen relativ groß. Im Fokus der Arbeiten des CRC stehen der Informationsaustausch, das Identifizieren von Wissenslücken und F&E-Bedarf und gemeinsame Projekte. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung des Workshops lag es nahe, die nationalen Expert*innen des CRC mit weiteren nationalen Expert*innen zum Kristallingestein zusammenzubringen, um die für Deutschland relevanten Fragestellungen für die Endlagerung im Kristallingestein auf fachlicher Ebene zu diskutieren.

- TU Bergakademie Freiberg (TUBAF)
- Vulcan Energie Ressourcen GmbH
- Zuidema Consult GmbH

Die Agenda (Tab. 1.1) gliederte sich in vier Blöcke:

1. Impuls-Vorträge zu Schwerpunkt-Themen
2. Drei Arbeitsgruppen (AG) zu den Schwerpunkt-Themen „Anforderungen“ (AG 1), „Erkundung“ (AG 2) und „Prognostizierbarkeit“ (AG 3)
3. Abschließende Plenumsdiskussion
4. Zusammenfassung

Die Teilnehmer*innen wurden den drei Arbeitsgruppen vorab durch die Planungsgruppe fest zugeteilt. Jede Arbeitsgruppe wurde durch eine Person moderiert und von einer weiteren Person begleitet/protokolliert. Drei zu diskutierende Hauptfragen für jede Arbeitsgruppe wurden vorab ausgearbeitet. Zusätzliche Fragen konnten von den Workshop-Teilnehmer*innen formuliert werden.

Die Arbeit in den Arbeitsgruppen gliederten sich in drei Phasen. In der ersten Phase wurde den Teilnehmenden die Gelegenheit gegeben sich vorzustellen und zusätzlich ein Kurzstatement abzugeben. In der zweiten Phase haben die Teilnehmenden auf Karteikarten Stichpunkte zu den Hauptfragen der AG und eventuell bestehende zusätzliche Fragen notiert und an bereitgestellte Pinnwände angeheftet. Die Diskussion zu den Fragen wurde dann in der dritten Phase unter dem Impuls dieser Stichpunkte durchgeführt.

Tab. 1.1 Agenda des Kristallin-Workshops am 24./25.06.2025 in Hannover

Dienstag, 24. Juni 2025		
13:00 Uhr	Begrüßung und Vorstellung der Ziele des Workshops	Knopf (BGE)
13:10 Uhr	Ablauf des Workshops/ Organisatorisches	Flügge (GRS) / Knopf (BGE)
13:15 Uhr	Gesamtschau dt. Kristallin	Bär (Vulcan Energie)/ Achtziger-Zupančič (Fraunhofer IEG)
14:15 Uhr	Anforderungen an kristalline Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle	Rühaak, Gotttron, Bauer (BGE)
14:45 Uhr	Behälter für radioaktive Abfälle im Kristallingestein	Gawletta (BGE)
15:15 Uhr	Pause	
15:45 Uhr	Exploration of crystalline host rock formations: possibilities and limitations	Vondrovic (SÚRAO)
16:45 Uhr	Betrachtung des Kristallins im Schweizer Standortauswahlverfahren	Zuidema (Zuidema Consult)
17:45 Uhr	Ende des 1. Tages	

Mittwoch, 25. Juni 2025		
08:30 Uhr	Arbeit in den Arbeitsgruppen: Anforderungen (AG 1), Erkundung (AG 2), Prognostizierbarkeit (AG 3)	Alle, Moderation/ Protokoll (GRS)
11:00 Uhr	Pause	
11:15 Uhr	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Arbeits- gruppen durch Moderatoren; Diskussion im Plenum	Sprecher*innen der AGs, Wolf (GRS, Ses- sion Chair)
12:15 Uhr	Schlusswort	Knopf (BGE) / Flügge (GRS)
12:30 Uhr	Ende der Veranstaltung	

2 **Impuls-Vorträge**

Im Rahmen des ersten Tages des Kristallin-Workshops gaben Fachvorträge verschiedener Expert*innen Einblicke in den aktuellen Stand der wissenschaftlichen und regulatorischen Betrachtung des Kristallingesteins als potenzielles Wirtsgestein in der Standortauswahl für ein Endlager hochradioaktiver Abfälle in Deutschland. Ziel dieser Beiträge war es, die Teilnehmenden auf einen gemeinsamen Wissensstand zu bringen und zentrale Grundlagen für die weitere inhaltliche Auseinandersetzung im Workshop zu schaffen. Die vermittelten Perspektiven dienten als Ausgangspunkt für den fachlichen Austausch und die vertiefende Diskussion im weiteren Verlauf des Workshops. Die Präsentationsfolien zu den Vorträgen sind im Anhang A.2 aufgeführt.

2.1 **Gesamtschau deutsches Kristallin**

Vortragende: Kristian Bär (Vulcan Energie) & Peter Achtziger-Zupančič (Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien IEG)

Die Präsentation gab einen Überblick über die kristallinen Wirtsgesteine in Deutschland, die im Standortauswahlverfahren von der BGE in den Teilgebieten noch betrachtet werden. Für etwa 50 % der Kriterien in den 11 Anlagen zu § 24 Absatz 5 des StandAG sind zur Bewertung Parameter heranzuziehen, die nahezu ausschließlich aus repräsentativen bohrlochgeophysikalischen und hydraulischen Bohrlochuntersuchungen (von der Oberfläche oder aus Bergwerken) gewonnen werden müssen. Die räumliche Variabilität und Prognostizierbarkeit der geologischen, hydraulischen, geochemischen und geomechanischen Verhältnisse sind herausfordernd. Die Daten hierzu sind aber zwingend zu erheben. Auf verschiedenen Skalen können Messdaten zu den Eigenschaften aus Bohrkernen und Logs (Wärmeleitfähigkeit, Diffusivität, Wärmekapazität, radiogene Wärmeproduktion, Porosität, Permeabilität, Gebirgsmechanik), den Lithologien aus Bohrkernen und Logs (Struktur, Textur, Foliation, Mineralogie, Petro- und Lithologie, Modalzusammensetzung, Zementierung) und Trennflächennetzwerken (Ausrichtung, Abstand, Länge, Apertur, Dichte, Persistenz, Interkonnektivität, Füllungen, Mineralisierung,

Alteration) erhoben werden. In den Projekten AMPEDEK⁵ und Hessen 3D 2.0⁶ wurden geologische Daten aufbereitet und unterschiedliche geologische Einheiten mit statistischer Verteilung für einige Kennwerte versehen.

Ein weiterer Fokus im Vortrag war die Vorhersagbarkeit des Gesteinsverhaltens. Es wurde auf das Versagen von Gestein unter verschiedenen Druckbedingungen eingegangen. Die konventionellen Mohr-Coulomb- oder Hoek-Brown-Kriterien sind nicht in spröden Gesteinen unter hohem Stress anwendbar. Ein weiterer Aspekt des Vortrages war die hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit und der Einfluss der Gesteinsmatrix auf den Wasserfluss und die Verteilung der Fließwege in Störungen. Dabei haben die verschiedenen Ausprägungen von Klüften (z.B. Durchlässigkeit, Vernetzung, Orientierung, Häufigkeit) Einfluss auf die Menge an Fluiden, die durch die Klüfte fließen können. Die Permeabilität spielt dabei ebenfalls eine bedeutende Rolle. Mithilfe von großen Datensätzen von tausenden hydraulischen In-situ-Messungen an unterschiedlichen internationalen Standorten wurden Trends für die Permeabilität in Abhängigkeit von der Teufe im Kristallin abgeleitet. Im Vortrag wurden weitere wichtige Kennwerte für das Kristallin genannt, die auf Basis von Datensätzen und Auswertungen Aussagen zu typischen Wertebereichen von Eigenschaften zulassen. Die Themenbereiche umfassten Kontaktmetamorphose, Hydraulik, Hydrogeochemie, Bodengasmessungen zur Prognostizierung von weiteren geologischen Strukturen, Gravimetrie und Magnetik. Mit solchen Datensätzen und den entsprechenden Explorationsmethoden kann eine gute Daten- und Wissensbasis für die Suche nach einem Endlagerstandort im Kristallin aufgebaut werden.

2.2 Anforderungen an kristalline Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Vortragende: Eva-Maria Gottron, Matthias Bauer, Wolfram Rühaak (BGE)

In diesem Vortrag wurde ein Überblick zu den Anforderungen an kristalline Wirtsgesteine im Zusammenhang mit den drei Phasen des Standortauswahlverfahrens gegeben.

⁵ BGE-gefördertes Forschungsvorhaben „Atlas der Mineralogischen und Petrophysikalischen Eigenschaften Deutscher Kristalliner Wirtsgesteine“ ([AMPEDEK](#))

⁶ BMWi-gefördertes Forschungsvorhaben „3D Modell der petrothermalen und mitteltiefen Potenziale zur Stromerzeugung, Wärmenutzung und –speicherung von Hessen“ ([Hessen 3D 2.0](#))

Aktuell befindet sich das Standortauswahlverfahren in Schritt 2 der Phase 1, die nach der Veröffentlichung des Zwischenberichts Teilgebiete vom 28.09.2020⁷ durch die BGE gestartet hat. In Schritt 2 sollen die Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung und die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) bearbeitet werden. Im kristallinen Wirtsgestein sind nach dem Zwischenbericht Teilgebiete noch sieben Teilgebiete aus verschiedenen stratigraphischen Einheiten im Auswahlprozess. Dazu gehören zwei Teilgebiete aus dem Rhenoharzynikum und jeweils eins aus der nördlichen Phyllitzone, der südlichen Phyllitzone, der Mitteldeutschen Kristallinzone, dem Saxothuringikum und dem Moldanubikum.

Mithilfe der rvSU sollen die Teilgebiete in verschiedene Kategorien (A bis D) eingeteilt werden. Mit Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) nach StandAG auf Gebiete der Kategorie A und gegebenenfalls der Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (planWK) nach StandAG sollen die Standortregionen ausgewählt, benannt und Ende 2027 an das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) übermittelt werden. Die rvSU werden jeweils auf Basis von Kriterienkatalogen für die einzelnen Wirtsgesteine durchgeführt, die Einbindung von Forschung und Entwicklung ist dabei eine wichtige Grundlage für die Sicherheitsuntersuchungen. Die Hauptsicherheitsfunktionen für den Bewertungszeitraum sind die Integrität des Barrierensystems und die Rückhaltung von Radionukliden. Im Kristallin wird zwischen Endlagersystem Typ 1 und Endlagersystem Typ 2 unterschieden. Bei Typ 1 soll ein ewG ausgewiesen werden, der die wesentliche Barriere bildet, bei Typ 2 sollen technische und geotechnische Barrieren die Radionuklide zurückhalten, die geologische Barriere ist in Typ 2 keine wesentliche Barriere. Für die Endlagerauslegung wird Typ 2 als abdeckend zugrunde gelegt. Wenn der Nachweis bereits über die geotechnischen Barrieren erbracht werden kann, ist der sichere Einschluss unter Berücksichtigung des Behälterkonzepts nach Typ 2 auch für einen Typ 1 gegeben. Das Endlagersystem Typ 1 bietet der BGE zufolge eine größere Sicherheit und Robustheit gegenüber dem Endlagersystem Typ 2. Für die Gebietsbewertungen für den Endlagersystem Typ 1 wird keine Differenzierung für den multiplen ewG gemacht.

⁷ BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.

Die BGE ist der Meinung, dass entsprechend dem AkEnd-Bericht⁸ die regulatorischen Sicherheitsanforderungen der Konzentration und des sicheren Einschlusses mittels eines überlagernden ewG Konzepts nicht gewährleistet werden kann. Aktuell wird von einer vertikalen Bohrlochlagerung analog zum Vorgehen der schwedischen Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) und der finnischen Posiva Oy mit einem Behälterkonzept in Anlehnung an das KBS3-Konzept ausgegangen. Die Flächenberechnung des Endlagers wird auf Basis des Infrastrukturflächenbedarfs, der gebirgsmechanischen und der thermischen Auslegung ermittelt.

Mit der Veröffentlichung der Arbeitsstände 2024 sind nach dem ersten Prüfschritt 37 % der Gesamtfläche aller kristalliner Teilgebiete ungeeignet (Kategorie D), weitere Teile wurden in Prüfschritt 2 mit einer geringen Eignung klassifiziert (Kategorie C). Die rvSU-Kriterien für kristallines Wirtsgestein sind:

- eine ungünstige tektonische Gesamtsituation,
- die ungünstige räumliche Charakterisierbarkeit kristalliner Wirtsgesteinskomplexe,
- eine ungünstige räumliche Charakterisierbarkeit durch mächtige sedimentäre Überdeckung (max. 200 m),
- die ungünstige Geometrie des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (Mindestbreite) und
- die Fläche des Endlagers ($\geq 6 \text{ km}^2$), die gegeben sein muss.

2.3 Behälter für radioaktive Abfälle im Kristallingestein

Vortragender: Dennis Gawletta (BGE)

Der Vortrag gab einen Überblick zu den laufenden Arbeiten der BGE zu dem Thema der Endlagerbehälterentwicklung für hochradioaktive Abfälle. Dazu wurde zunächst erläutert, warum die Behälterentwicklung bereits jetzt durchgeführt wird, warum diese Barrieren als Teil des Endlagersystems relevant seien und welche Herausforderungen bei der Entwicklung auftreten. Darauf folgend wurde die Vorgehensweise und Ergebnisse des

⁸ AkEnd: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd 2002, K-Drs. 268)

Projektes ELBRock⁹, im Rahmen dessen Behälterkonzepte im kristallinen Wirtsgestein für deutsche Randbedingungen entwickelt wurden, vorgestellt. Zu Projektbeginn wurde der Stand von Wissenschaft und Technik zum Thema Endlagerbehälterkonzepte im kristallinen Wirtsgestein zusammengetragen und diese in Bezug auf die deutschen Anforderungen ausgewertet. Anschließend erfolgte die Ausarbeitung von drei unterschiedlichen Behälterkonzepten mit jeweils einem anderen Behälterwerkstoff, wobei aufgrund der höheren Anforderungen an den Behälter das Endlagersystem Typ 2 zu Grunde gelegt wurde. Bei den drei Behälterkonzepten wurden folgende Werkstoffe als vorteilhaft identifiziert: korrosionsbeständiger Stahl, Kupfer sowie Nickel. Für das Endlagersystem Typ 1 wurde eine Deltabetrachtung durchgeführt, inwiefern diese Werkstoffe ebenfalls als Behälterwerkstoffe verwendet werden können. Die endgültige Entscheidung, welches der drei Behälterkonzepte zu bevorzugen ist, ist dabei immer auch abhängig von den standortspezifischen Gegebenheiten, die erst im weiteren Verfahren in der benötigten Detaillierung vorliegen werden.

2.4 Exploration of crystalline host rock formations: possibilities and limitations

Vortragender: Lukáš Vondrovic (SÚRAO)

In diesem Vortrag wurde ein Überblick zum Stand der Endlagersuche in Tschechien aus Sicht der tschechischen Behörde für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (SÚRAO (Správy úložišť radioaktivních odpadů)) gegeben. In Tschechien wurden Sicherheitsfunktionen und Anforderungen festgelegt, die erfüllt werden müssen. Dabei wird auf ein Endlager in etwa 500 m Tiefe und ein Multibarrieren-Konzept gesetzt. Der Behälter aus Stahl wird im Endlager mit einem Ca-Mg Bentonit umgeben. In Tschechien steht nach der bisherigen Standortsuche nur Kristallin als Wirtsgestein zur Auswahl. Im Jahr 2020 wurde die Endlagersuche auf vier Standorte begrenzt, nachdem einzelne Anforderungen geprüft wurden. Die letzten verbliebenen vier Standorte wurden auf Basis einer multikriteriellen Bewertung ausgesucht. Der Zeitplan zielt auf einen Sicherheitsnachweis für einen Referenzstandort im Jahr 2026 ab, 2032 soll der Endlagerstandort genehmigt werden und 2037 die Baugenehmigung vorliegen, so dass ab 2050 die Abfälle eingelagert werden können.

⁹ BGE-gefördertes Forschungsvorhaben „Entwicklung von Endlagerbehälterkonzepten für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein“ ([ELBRock](#))

Die potenziellen Standorte werden auf verschiedenen Skalen geologisch beschrieben. Es gibt die regionale Bewertung, das modellierte Gebiet und ein für die geologische Charakterisierung geeignetes Gebiet, in dem die verschiedenen Anlagen über- und untertägig liegen sollen. Auf dem Gebiet der regionalen Bewertung (mit einem Radius von etwa 25 km um den potenziellen Standort) wird die Erfüllung der regulatorischen Anforderungen geprüft, die die Oberflächenverformungen, Verwerfungen, das Vorhandensein von linearen morphologischen Merkmalen, das Vorhandensein scharfer lithologischer Grenzen, die auf eine mechanische Verformung des Gesteins entlang tektonischer Zonen hinweisen, das Vorhandensein von Tonmineralien und deren Wassersättigung, das Auftreten von instrumentell aufgezeichneten oder historischen Erdbeben und Hinweise auf Störungszonen betreffen. Im kleineren Gebiet für die Modellierung (etwa 150 km²) liegt der Fokus auf der möglichst realen Abbildung des Gebiets in einem hydrogeologischen Modell, das auch die morphologischen Einheiten und die geologische Entwicklung berücksichtigt. Im Bereich der detaillierteren Exploration sollen die über- und untertägigen Anlagen bestmöglich geplant werden, indem alle verfügbaren Daten betrachtet werden.

Die vier potenziellen Standorte in Tschechien sind Březový potok (Granodiorit, 354 Ma, magmatisch), Hrádek (S-Granit, 325 Ma, Dekompressionsschmelzen), Horka (Syenit-Durbachit, 340 Ma, Mischung verschiedener Magmen) und Janoch (Paragneiss, 340 Ma, hoch metamorph). Für diese Standorte werden verfügbare Daten gesammelt, geologische Kartierungen durchgeführt bzw. alte geologische Karten aufgearbeitet, Fernerkundungsmethoden angewandt und hydrogeologische Kartierungen und Monitoring durchgeführt. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die strukturgeologische Kartierung, um Daten für DFN¹⁰-Modelle zu erheben. Zudem werden auch geophysikalische Messung in der Luft und am Boden und Bohrkampagnen durchgeführt, um die Standorte weiter zu untersuchen.

2.5 Betrachtung des Kristallins im Schweizer Standortauswahlverfahren

Vortragender: Piet Zuidema (Zuidema Consult)

Der Vortrag gab eine Übersicht zur 1978 begonnenen Standortevaluation in der Schweiz. Als potenzielle Wirtsgesteine standen schon damals Tongestein und

¹⁰ discrete fracture network

Kristallingesteine im Vordergrund. Im Kristallingestein erfolgten ab 1980 umfangreiche regionale Erkundungen, inklusive Seismik und sieben Tiefbohrungen. Seit 1984 besteht mit dem Felslabor Grimsel zudem die Möglichkeit, Kristallingestein untertage zu untersuchen und endlagerbezogene Experimente durchzuführen. Auch heute noch werden in diesem Felslabor internationale Forschungs- und Entwicklungsarbeiten umgesetzt.

Die durchgeführte Seismik und die abgeteuften Bohrungen führten mit der Kartierung von Permokarbontrögen von einem vorher nicht bekannten Ausmaß zu einer Neuinterpretation des geologischen Aufbaus und der tektonischen Situation im Kristallin der Nordschweiz, welche die Standortmöglichkeiten im Kristallin stark einengt. Weiter zeigte sich, dass wegen der sedimentären Überdeckung die Möglichkeiten zur Erfassung kleinräumiger Strukturen mit seismischen Untersuchungen im Kristallin in der Nordschweiz beschränkt sind.

Für die Modellierung der Radionuklidausbreitung ist die detaillierte Berücksichtigung der wasserführenden Strukturen („Channels“) und der Matrixdiffusion von großer Bedeutung. Bereits wenige „Channels“ mit ungünstigen Eigenschaften haben einen großen Einfluss auf die Barrierewirkung. Daher ist die Erfassung der geologischen Ausbildung der „Channels“ und der umgebenden Matrix für die Modellierung von wesentlicher Bedeutung. Diese ist aufwändiger als in anderen Wirtsgesteinen und der Betrag der Seismik klein. Auch die Erfahrungen in Finnland und Schweden zeigen, dass die Erfassung dieser kleinräumigen Heterogenitäten wie kleinere Klüfte im Gegensatz zu Störungs- und Deformationszonen selbst bei Abwesenheit einer Sedimentüberdeckung mit seismischen Methoden kaum zu erfassen sind. Als Konsequenz sind untertägige Erkundungen zu einem späteren Zeitpunkt unabdinglich, wobei auch dann noch Ungewissheiten verbleiben. Eine wichtige Kernaussage der Erkenntnisse in der Schweiz ist, dass ein sicheres Endlager im Kristallingestein zwar grundsätzlich möglich ist, dass aber der Opalinuston eindeutige Vorteile hat. Deshalb wird das Kristallin als Wirtsgestein in der Schweiz seit Mitte der Neunzigerjahre nicht weiter betrachtet. Es wurde den Expert*innen mitgegeben, dass in Deutschland abgewogen werden muss, inwiefern ein kristallines Wirtsgestein aufgrund seiner charakteristischen Eigenschaften den Kriterien eines bestmöglichen Standorts gerecht werden kann.

3 Ergebnisse

Dieses Kapitel fasst die Diskussionen innerhalb der drei Arbeitsgruppen: AG 1 – Anforderungen, AG 2 – Erkundbarkeit und AG 3 – Prognostizierbarkeit zusammen. Ausgangspunkt waren im Vorfeld formulierte Hauptfragen (3 Hauptfragen pro AG, siehe Kap. 1.2), die im Rahmen des Workshops ergebnisoffen und auf wissenschaftlicher Grundlage, losgelöst von politischen oder regulatorischen Bewertungen, diskutiert werden sollten.

Zu Beginn des Austauschs stellten die Teilnehmenden sich und die jeweiligen Projekte ihrer Institutionen zum Kristallingestein kurz vor. Anschließend wurden individuelle Einschätzungen zu den Hauptfragen auf Karteikarten festgehalten, die später anonymisiert in den Gruppen zur Diskussion standen. Ziel war es, unterschiedliche Perspektiven sichtbar zu machen und gemeinsame fachliche Grundlagen und Forschungsausrichtungen für die weitere Arbeit zu identifizieren. Die zu Beginn der Arbeitsgruppensitzungen von den Teilnehmenden in Form von Karteikarten notierten Stichpunkte zu den drei Hauptfragen der jeweiligen AG werden in den Tabellen (Anhang A.1 bis Anhang A.1.3) ohne Interpretation wiedergegeben.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Diskussionen, Meinungen und Erkenntnisse immer den fachlichen Hintergrund der Teilnehmenden widerspiegeln. Es ist daher nicht auszuschließen, dass weitere fachliche Aspekte in den Arbeitsgruppen nicht berücksichtigt wurden und der Schwerpunkt und fachliche Fokus der Diskussionen bei einer anderen Zusammensetzung der Arbeitsgruppen und anderen Rahmenbedingungen anders gelagert gewesen wäre.

3.1 AG 1: Anforderungen

In dieser Arbeitsgruppe wurden die Fragestellungen zu den Anforderungen an das Kristallin als Wirtsgestein diskutiert. Bis auf einzelne Diskussionspunkte wurde das Protokoll der Chronologie nach verfasst und grob in die drei Fragen untergliedert. Jedes Unterkapitel widmet sich dabei einer der drei Hauptfragen, zu denen die Teilnehmenden einen Diskussionsbeitrag leisten konnten, indem sie vorab diesen Fragen beschriftete Karteikarten zuordneten. Die Inhalte dieser Beiträge sind jeweils im Anhang in Form einer Tabelle aufgeführt (A.1.1). Es wurden keine weiteren Fragen der Teilnehmenden zur Diskussion verfasst.

Frage 1: „Kann ein ewG im Kristallin ausgewiesen werden?“, Ja/Nein-Kurzumfrage

In dieser Arbeitsgruppe wurde direkt zu Beginn, noch vor der Vorstellungsrunde, die Frage 1 vom Moderator als Ja/Nein-Frage gestellt. Die Meldungen zeigten eine Stimmenverteilung von drei „Ja“-Stimmen, sechs „Nein“-Stimmen und fünf Enthaltungen. Wissenschaftlich ist diese Umfrage nicht belastbar, zeigt aber die uneinheitliche Meinung auf, ob ein Endlagersystem Typ 1 im Kristallin möglich ist.

3.1.1 Ist ein ewG im Kristallingestein ein ungeklüfteter Gesteinsbereich oder kann dieser auch nicht verheilte/verheilte Klüfte umfassen?

Danach wurde zunächst auf die Frage 2 eingegangen. Es wurde geäußert, dass die Anwesenheit von Klüften nicht den Anforderungen widersprechen und vorhanden sein dürfen, sofern die Geringfügigkeitsanforderungen¹¹ eingehalten werden. Als Vergleich wurde das Beispiel für Tongestein genannt, bei dem auch eine effektive Porosität größer 0 erlaubt ist. Die Anforderung, dass im ewG keine Klüfte vorhanden sein dürfen, wird als zu streng angesehen. Bei der Modellierung von Kristallingestein werden Kluftscharen auf Basis stochastischer Methoden angenommen und der Nachweis für § 4 EndlSiAnfV geprüft. Von einem auf allen Skalen kluftfreien Kristallingestein als Wirtsgestein auszugehen ist unrealistisch.

Es wurde der Integritätsbegriff in § 5 EndlSiAnfV diskutiert. Dabei wurde hinterfragt, ob die Integritätsanforderungen verletzt würden, wenn z. B. die Zugfestigkeitsuntersuchungen am Gestein nicht die Anforderungen erfüllen, oder ob die Anforderung ignoriert werden kann, wenn die übergeordnete Anforderung zum sicheren Einschluss nach § 4 EndlSiAnfV nachgewiesen sei, bzw. ob die Schadstoffausbreitung nach § 4 EndlSiAnfV bestimmend für die Einhaltung der Anforderungen ohne Betrachtung einzelner Kriterien sei. Es wurde festgestellt, dass es keine Untersuchungen oder klaren Aussagen gäbe, welches Kriterium strenger sei; deshalb müsse immer geprüft werden, welche Kriterien eingehalten werden und welche nicht. Ein Konsens der Teilnehmenden war, dass die Anforderungen nach StandAG und EndlSiAnfV immer vollumfassend betrachtet werden müssen, um die Integrität und Einhaltung der Anforderung zu prüfen. Ob Klüfte in einem

¹¹ Mit Geringfügigkeitsanforderung war hier vermutlich die Gewährleistung des sicheren Einschlusses gemäß § 4 EndlSiAnfV gemeint.

ewG zulässig sind, ebenso wie die Frage, welches Kriterium strenger ist, bleibt eine standortspezifische Frage. Unter diesem Aspekt kam die Frage auf, zu welchem Zeitpunkt im Verfahren das Wissen zu den Eigenschaften des Gesteins erhoben wird, da kleinere Klüfte voraussichtlich erst spät im Verfahren, ggf. erst in Phase 3 nach der untertägigen Erkundung, detektiert werden und damit der Nachweis zum sicheren Einschluss erst dann erbracht werden kann.

Es gab keinen Widerspruch zu der Aussage, dass ein ewG im Kristallin unverheilte Klüfte umfassen darf, unter der Voraussetzung, dass die Sicherheitsanforderungen nach § 4 EndlSiAnfV eingehalten werden. Es wird angenommen, dass die Klüfte in Bezug auf die Sicherheitsbetrachtung nicht zu groß oder es nicht zu viele sein dürfen, da sonst die Sicherheitsanforderungen nicht erfüllt werden könnten.

3.1.2 Welche Anforderungen muss das Kristallingestein erfüllen, bzw. welche geologischen Merkmale sind entscheidend, damit man (3a) einen ewG ausweisen kann bzw. (3b) damit ein Typ 2 (ohne ewG) durch geotechnische und technische Barrieren realisiert werden kann?

Aus den vorangegangenen Diskussionen wurde ersichtlich, dass die Erfüllung der Anforderung nach § 4 EndlSiAnfV ein Kernelement darstellt. Daneben müssen die Anforderungen zu den mechanischen Lasten, den hydraulischen Bedingungen und der Hydrochemie geprüft werden. Zudem stellt die Matrixdiffusion aus geochemischer Sicht einen wesentlichen Prozess für den verlangsamten Transport oder Rückhalt von Radionukliden dar. Im Zuge dieser Fragestellung wurde auch die Präparation der Proben diskutiert, da bei der Probennahme eine Relaxation der Probe eine Überschätzung der Diffusionskoeffizienten zur Folge hat, die nicht immer mitdiskutiert oder mitbetrachtet wird.

Diskutiert wurde, ob der Transport im Kristallingestein für einen Langzeitsicherheitsnachweis ausreichend beschrieben werden kann. Es wurde geäußert, dass dies ein standortspezifisches Problem sei, das mit ausreichend Daten gelöst werden könne.

Dabei können Klüfte nach Studien aus Skandinavien auch eine Art der Verdünnung durch die Verteilung von Radionukliden aus defekten Behältern verursachen und wie eine weitere Sicherheitsfunktion fungieren. Damit verbunden kann die Matrixdiffusion an den Grenzflächen zwischen Klüften und Matrix als Zwischenpuffer wirken. In der Folge ergibt sich eine weitere Verzögerung oder Verteilung von Radionukliden, die sich positiv auf die Dosisbetrachtungen auswirken kann. In Deutschland könnte Verdünnung jedoch

irrelevant sein, da eines der Kriterien nach § 4 EndlSiAnfV die integrale Radionuklidfreisetzung aus dem ewG in einer Million Jahre begrenzt.

Regulatorische Rahmenbedingungen und Standortauswahlverfahren

Es wurde geäußert, dass am bestmöglichen Standort festzuhalten und das Verfahren wie geplant unter den regulatorischen Rahmenbedingungen durchzuführen sei. In Verbindung mit Forschungsergebnissen zu den Wirtsgesteinen und Standortregionen wäre das Ergebnis nachvollziehbar. In Frage gestellt wurde, ob Standorte ausgeschlossen werden können, für die zu wenig Daten für eine hinreichende Bewertung des Standortes vorhanden sind. Dies wäre im Kristallin durch die Klüfte und deren späterer Detektion während der Erkundung relevant für das weitere Standortauswahlverfahren. Das Verfahren zur Reduzierung der Teilgebiete ist komplex, so dass der neutrale Vergleich zwischen den Wirtsgesteinen schwierig ist. Das Standortauswahlverfahren ist so ausgelegt, dass Prognosen gemacht werden müssen, was im weiteren Verfahren zu Problemen führen kann. Andere Auswahlverfahren führten möglicherweise zu einem anderen Ergebnis, jedoch ist das festgelegte Verfahren eine transparente Grundlage.

Bentonit und Hydrogeochemie

Damit ein Endlagerkonzept mit technischen und geotechnischen Barrieren realisiert werden kann, muss ein Behälterkonzept vorgelegt werden, in dem der Behälter nachweislich über 1 Million Jahre intakt bleibt. Dazu ist die Hydrochemie des Standortes zu betrachten, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Korrosion des Behälters hat. In Studien wurde teilweise auf Standardwässer (z. B. aus der Schweiz) für die Behälterauslegung zurückgegriffen. Daneben wurden für „What-if-Betrachtungen“ nachteilige Wasserzusammensetzungen mit korrosivem Potenzial hinzugezogen. Es müssen Prognosen getroffen werden, ob und wie sich die Wasserzusammensetzung über den Nachweiszeitraum ändern kann. Das gilt auch für die mechanischen Belastungen, wie die Scherspannung, die am Standort untersucht werden muss. Der Nachweis für den Erhalt der Integrität des Bentonit-Buffers muss gegeben sein. Die Frage nach der Stabilität des Bentonit-Buffers wurde diskutiert. Durch mechanische Beanspruchung kann die Mächtigkeit des Bentonit-Buffers reduziert und damit die Rückhaltewirkung und Stabilität verringert werden. Ein weiterer Aspekt ist der Kontakt von Fluiden mit dem Bentonit-Buffer. Es ist zu klären, ob ausreichend Wasser in Kontakt mit dem Bentonit-Buffer kommen kann, sodass der Bentonit quellen kann, oder ob es am Standort so trocken ist, dass der Bentonit nicht quellen kann. Es ist zu klären, welche Auswirkungen dies auf die

mechanische Stabilität im Endlagerbereich hat. Die Entwicklung des Behälterkonzeptes kann erst abgeschlossen werden, wenn der Standort feststeht und die Rahmenbedingungen klar sind. Es ergibt sich erneut die Frage, wie mit vorhanden und nicht vorhandenen Datensätzen umzugehen ist und ob Regionen mit wenig Daten direkt auszuschließen sind (was nach StandAG nicht zulässig ist) oder dort Untersuchungen durchgeführt werden müssen.

3.1.3 Kann ein ewG im Kristallin ausgewiesen werden?

Diskutiert wurde, ob im Kristallingestein eine umfangreichere Erkundung die Wahrscheinlichkeit erhöht, nachteilige Eigenschaften des Standortes festzustellen. Dies sei stark mit der Explorationsmethodik und Erkundbarkeit verknüpft. Vor allem besteht zwischen dem Sicherheitsnachweis, für den Klüfte nach der vorangegangenen Diskussion vorhanden sein dürfen, und der Ermittlung der hydraulischen Parameter für den Sicherheitsnachweis eine starke Verknüpfung, so dass Daten von der Exploration für den Sicherheitsnachweis gebraucht werden und somit die zeitliche Abfolge der Verfahrensschritte, in denen diese Daten erhoben werden können (vgl. AG 2) und die Entscheidung für oder gegen Standortregionen in den Vordergrund rückt. Damit verknüpft ist die Fragestellung, zu welchem Zeitpunkt welche Kenntnisse vorliegen müssen (muss beispielsweise der Nachweis eines ewG bereits in Phase 2 erfolgen können?).

Dabei kristallisierte sich die Frage heraus, ob auch für ein Endlagersystem Typ 1 ein Behälterkonzept intensiv betrachtet werden muss, da die explorierten und untersuchten Parameter am Standort schlechter sein könnten als erwartet. Gesetzlicher Auftrag ist die Suche im Kristallin nach einem Endlagersystem Typ 1. Das Wissen aus der Forschung und der Behälterentwicklung zu Typ 2 kann bei Bedarf auch für Typ 1 verwendet werden. Auf der anderen Seite kann ein Gesteinsbereich, der die Anforderungen für Typ 1 nicht erfüllt, möglicherweise für Typ 2 den Sicherheitsanforderungen entsprechend ausreichend sein. Die Einschlusswirksamkeit ist für Typ 1 und Typ 2 sehr unterschiedlich. Bei Typ 1 soll die Einschlusswirksamkeit des Kristallingesteins hoch sein und die Integrität des Behälters muss nicht für 1 Mio. Jahre sichergestellt werden. Bei Typ 2 kann die Einschlusswirksamkeit des Kristallingesteins geringer ausfallen und die Integrität des Behälters muss für lange Zeiträume sichergestellt werden.

Eine Kombination der Endlagersystemtypen im Kristallingestein wäre für einen Wirtsgesteinsvergleich negativ für das Kristallin zu sehen. Sollte für die Wirtsgesteine Steinsalz oder Tongestein ebenfalls ein langlebiger Behälter zugrunde gelegt werden, wäre dies

ein Sicherheitsgewinn, der bei Typ 2 im Kristallin durch den fehlenden ewG nicht gegeben wäre. Dies würde sich nachteilig auf eine Bewertung eines Endlagersystems Typ 2 im Kristallingestein auswirken. Unter diesem Aspekt ist die Frage nach einer möglichen Ausweisung eines ewG im Kristallingestein weiterhin von großer Wichtigkeit.

Anwendung geotechnischer Barrieren für andere Wirtsgesteine

Es wurde angemerkt, dass die NAGRA für Ihr Behälterkonzept die Argumentation der Optimierung verwendet. Primär sind die regulatorischen Anforderungen zu erfüllen. Darüber hinaus wird Sicherheit gegen die zu erwartenden Kosten aufgetragen und ein Kompromiss gesucht. Im Zuge dieser Diskussion wurde angemerkt, dass die Öffentlichkeit hinterfragt, warum für den bestmöglichen und sichersten Standort nicht immer ein langlebiger Behälter zusätzlich zum ewG geplant wird und ob in Zukunft nicht doch die Kosten als Entscheidungskriterien mit in die Endlagerkonzeption einfließen, obwohl sie kein Entscheidungsmerkmal sein sollen. Auf der anderen Seite steht in § 28 (4) StandAG „Bei der Umsetzung des Standortauswahlverfahrens sind die Grundsätze der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit zu beachten.“ Die Frage ist, inwiefern das für den Bau und Betrieb des Endlagers gilt.

Für Steinsalz und Tongestein ist der Stand von Wissenschaft und Technik so weit, dass die Standorteigenschaften räumlich relativ zuverlässig prognostiziert werden können. Wenn diese Untersuchungsergebnisse sich unter Tage nicht bestätigen und die Anforderungen möglicherweise nicht erfüllt wären, bleibt in der AG die Frage, wie das Standortauswahlverfahren damit umgeht. Würden weitere Standorte, die nach Bewertung aus der Phase 1 und 2 als weniger günstig bewertet wurden, in Erwägung gezogen oder würde nach Optimierungsmöglichkeiten an den Standorten gesucht, wie beispielsweise einem stärkeren Fokus auf ein Behälterkonzept? Diese Frage würde für alle Wirtsgesteine gelten. Diese Fragestellung kann entgegen der vorherigen Diskussion wiederum für die Umsetzung eines Endlagers im Kristallin Typ 2 sprechen, da die geologischen Ungewissheiten eine geringfügigere Rolle für den Typ 2 spielen. Es wird angemerkt, dass die Wahrscheinlichkeit, einen Standort für ein Endlagersystem Typ 1 für Salz- oder Tonstein zu finden jedoch größer ist.

Frage 1: „Kann ein ewG im Kristallin ausgewiesen werden?“, Zweite Ja/Nein-Kurzumfrage

Abschließend wurde erneut Frage 1 als Ja/Nein-Frage gestellt. Fünf Teilnehmende meldeten sich für „ja“, drei für „nein“. Nach der Diskussion hat sich demnach ein etwas anderes Meinungsbild ergeben. Mehr Teilnehmende waren der Meinung, dass ein ewG im Kristallingestein ausgewiesen werden kann als bei der ersten Umfrage.

3.1.4 Zusätzliche Fragen

Während der Diskussion kam ein weiteres Themengebiet auf, das hier zusätzlich aufgeführt wird. Es wurde die Anmerkung angeführt, dass das Konzept des multiplen ewG nach EndlSiAnfV nicht umsetzbar sei, da die Anforderungen nicht klar genug formuliert seien. Es wurde ergänzt, dass das Konzept der multiplen ewG (geltend für alle drei Wirtsgesteine) anhand der Anforderungen nicht oder nur schwer realisierbar sei, da jeder ewG die Anforderungen erfüllen müsste. Über die Frage, ob die Sicherheitsanforderungen für jeden einzelnen der potenziell etwa 10,000 Abfallbehälter gelten, besteht ein Konsens in der Runde, dass die Sicherheitsanforderungen für jeden einzelnen ewG einzuhalten sind. In Bezug auf die Größe eines solchen Endlagers wäre ein multipler ewG wahrscheinlich nicht umzusetzen. Diese Diskussion steht im Widerspruch zur Diskussion in AG 3 zur Prognostizierbarkeit (Kap. 3.1.5 und Kap. 3.3.3).

3.1.5 Diskussion im Plenum zu AG 1

Nach der Zusammenfassung der wichtigsten Aussagen zur AG 1 durch die Moderation wurde im Plenum die Integrität des ewG über den gesamten Bewertungszeitraum diskutiert. Es muss ein günstiges geomechanisches und hydrogeochemisches Milieu für die nächsten eine Million Jahre zu erwarten sein, da die Anforderungen der EndlSiAnfV für den gesamten Bewertungszeitraum gelten, ausdrücklich besprochen wurde diese Frage in der Arbeitsgruppe jedoch nicht.

Es folgten zwei Fragen, die sich aus der Diskussion in AG 3 (Prognostizierbarkeit) ergeben haben. Gilt die Mindestanforderung nach StandAG § 23 Abs. 5 zur Mindestmächtigkeit von 100 m für den kristallinen ewG für jeden der multiplen ewG? In AG 1 ist der Konsens, dass die Mindestmächtigkeit für jeden einzelnen ewG gilt, in AG 3 ist der Konsens, die Mindestmächtigkeit müsse nicht für jeden ewG einzeln 100 m umfassen. Hier gibt es demnach weiteren Diskussionsbedarf, auf den in der Abschlussdiskussion und

im Plenum nicht weiter eingegangen wurde. In AG 1 wurde die Ansicht vertreten, dass die Ausweisung eines Standortes mit entsprechender Größe bzw. Fläche eines multiplen ewG im Kristallingestein durch diese Mindestanforderung deutlich erschwert wird, da ein sehr großes Gebiet benötigt würde.

In der zweiten Frage ging es um die Berücksichtigung des Konzeptes des überlagernden ewG. In der AG 1 gab es dazu keine Diskussion. Im Plenum wurde geäußert, dass durch den § 4 der EndlSiAnfV, der die Konzentration und den Einschluss der Radionuklide fordert, der überlagernde ewG nicht mehr berücksichtigt werden kann, da hier eine Verletzung des Kriteriums zu erwarten sei. Vom restlichen Plenum wurde keine gegenteilige Meinung geäußert.

Es wurde gefragt, welche Unterschiede in den Anforderungen für den Endlagersystem Typ 1 und Typ 2 vorhanden sind. Daraufhin wurde geäußert, dass die grundsätzlichen Fragestellungen für beide Endlagersystem-Typen ähnlich seien, die Differenzen für die Anforderungen in der AG aber nicht eindeutig herausgearbeitet wurden. Ein Unterschied liegt im Integritätsnachweis für geologische Barrieren (§ 5 EndlSiAnfV) im Vergleich zu technischen und geotechnischen Barrieren (§ 6 EndlSiAnfV). Hierbei muss für die geologische Barriere beispielsweise das Dilatanzkriterium erfüllt sein, während bei technischen und geotechnischen Barrieren der Schwerpunkt u.a. auf der möglichen Beeinträchtigung der Behälter durch hydraulische, chemische und physikalische Prozesse liegt. Dennoch werden für den Nachweis des sicheren Einschlusses nach § 4 EndlSiAnfV für beide Endlagertypen die Indikatoren des sicheren Einschlusses innerhalb der wesentlichen Barrieren herangezogen.

Abschließend wurde über den Zeitpunkt diskutiert, ab dem ein möglicher ewG (sofern eine Ausweisung möglich ist) ausgewiesen sein soll. Ist das bereits in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens möglich? Welche Informationen werden dafür benötigt und können diese Daten bereits erhoben werden? Die AG 1 sieht die Ausweisung eines ewG erst in den nächsten Phasen der Standortsuche, da die Ungewissheiten im aktuellen Schritt zu groß sind. Kernbohrungen aus Phase 2 können helfen, relevante Informationen zur Ausweisung eines ewG zu erheben, ein vollständiges Kluftinventar ist jedoch erst mit der untertägigen Erkundung zu erstellen. Es folgte keine weitere Wortmeldung dazu. Die Ausweisung eines ewG erscheint der AG 1 demnach ein eher nachweistheoretisches Problem und nicht ein Problem der Fragestellung an sich zu sein.

3.2 AG 2: Erkundung

In dieser Arbeitsgruppe wurden die Fragestellungen zur Erkundbarkeit des kristallinen Wirtsgesteins diskutiert. Jedes Unterkapitel widmet sich dabei einer der drei Hauptfragen, zu denen die Teilnehmenden einen Diskussionsbeitrag leisten konnten, indem sie vorab diesen Fragen beschriftete Karteikarten zuordneten. Die Inhalte dieser Beiträge sind jeweils im Anhang in Form einer Tabelle aufgeführt (A.1.2). Es wurden keine weiteren Fragen der Teilnehmenden zur Diskussion verfasst.

3.2.1 Wo liegen die Grenzen der Erkundbarkeit des Kristallingesteins?

Als wesentliche Grenzen der Erkundbarkeit im Kristallingestein wurden die Mächtigkeit und der Aufbau der Überdeckung, die Charakteristik der Klüfte und die Auflösung und Korrelierbarkeit der geophysikalischen Untersuchungen genannt. Andererseits bestehen bezüglich hydraulischer Untersuchungen größere Erkundungspotenziale als in anderen Wirtsgesteinen.

Grenze Überdeckung, Grenze Kluftlage und -öffnung

Kristalline Wirtsgesteinskomplexe unterscheiden sich in ihren strukturellen und seismischen Eigenschaften deutlich von sedimentären Gesteinskomplexen. Es kommt in seismischen Untersuchungen aufgrund der hohen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten, der geringen Impedanzkontraste und der stärkeren Heterogenität zu geringerer räumlicher Auflösung der Strukturen und Mehrfachstreuung des seismischen Wellenfeldes das sich als „Rauschen“ bemerkbar macht. Im Falle einer Sedimentüberdeckung wird viel Wellenenergie durch das Sediment reflektiert, bevor es das Kristallin erreicht. Abhängig vom Aufbau des darüberliegenden Sediments (Einflussfaktoren sind z. B. die Anisotropie oder Heterogenität der Sedimente) liegt die Grenze der Erkundbarkeit bei einer Überdeckung¹² von 200 – 400 m. Die BGE hat für ihre Kriterien eine Überdeckung von 200 m als Grenze festgelegt (s. Kap. 2.2). Dazu kommt die Frage, ob Bohrlöcher für zusätzliche Informationen zur Verfügung stehen. Diese helfen, auch steilstehende Reflexionen leichter zu erfassen. Klüfte mit geringer Öffnungsweite können schwer detektierbar sein. Hierbei spielen die räumliche Lage und Länge ebenfalls eine Rolle. Die Möglichkeit der

¹² Eine genaue Erläuterung kann der Stellungnahme „Bewertung der Erkundbarkeit von kristallinen Wirtsgesteinskomplexen mit Oberflächenseismik“ (Buske, 2024) entnommen werden.

Identifikation von Klüften ist von der räumlichen Ausbildung der Kluft abhängig. Eine Kluft mit geringer Öffnungsweite von wenigen Millimetern, die sich über mehrere hundert Meter erstreckt, kann sehr gut identifiziert werden.

Grenze Oberflächengeophysik

Die Oberflächengeophysik stellt ein Ausschlussverfahren dar, indem durch sie Gebiete identifiziert werden, die sicher verworfen werden sollten. Das Ziel ist eine räumliche Charakterisierung des Gebietes. Es wurde die Frage aufgeworfen, ob es alternative Methoden zur Oberflächengeophysik gibt für Gebiete, in denen sie nicht anwendbar ist. Bohrungen stellen eine gute Alternative oder auch Ergänzung dar, weisen aber Einschränkungen bei der Extrapolierbarkeit auf, da im kristallinen Wirtsgestein keine Fazies vorliegen und ein Wechsel der Gesteinsart abrupt erfolgen kann. Eine Vielzahl an Methoden sowie ihre Eignung für das kristalline Wirtsgestein kann der GeM-DB¹³ entnommen werden. Im Projekt GeoMetEr¹⁴ wird die Frage nach den Grenzen (inkl. der Extrapolierbarkeit) der Methoden und ihre Auflösung adressiert. Magnetik und Elektromagnetik sollen gemeinsam mit Inversion und Vorwärts-Modellierung genutzt werden. Es soll auch in diesem Rahmen in einem Homogenbereich¹⁵ gebohrt werden (Kap. 3.2.3).

Möglichkeit hydraulischer Untersuchungen

Als ein wesentlicher Vorteil bei der Erkundung von kristallinem Gestein wurden die hydraulischen Untersuchungen hervorgehoben. Aufgrund der stabilen Bohrlöcher und der

¹³ BGR-Vorhaben für eine Datenbank zur Recherche geeigneter Methoden zur Erkundung der Auswirkungen geologischer Prozesse (GeM-DB): Hier sind Methoden für die Erkundung gelistet und nach unterschiedlichen Zielen, wie dem StandAG (Ausschlusskriterien, Mindestanforderung und geowissenschaftliche Abwägungskriterien), oder den Erkundungszielen für Phase 2 gruppiert (siehe z.B. Richter et al. 2022). Es wird ausgewiesen, welche Attribute die Methode aufweist (z. B. Eindringtiefe, Auflösung, Messunsicherheit Zeitaufwand), für welche Wirtsgesteine und wie gut sich eine Methode eignet. Anwendungsbeispiele in der nationalen und internationalen Erkundung werden angegeben und die herangezogene Literatur bereitgestellt.

¹⁴ BGE-gefördertes Forschungsvorhaben „Entwicklung geophysikalischer Messverfahren und Methodenkombinationen zur Erstellung hochauflösender übertägiger Erkundungsprogramme“ (GeoMetEr): In zwei bis drei Forschungsregionen mit unterschiedlicher Geologie kommen verschiedene geophysikalische Messverfahren am Boden und aus der Luft zum Einsatz. Bei der Auswertung und Interpretation der Daten werden neuartige Ansätze entwickelt und erprobt. Die verbesserten Verfahren können zukünftig bei verschiedensten Aufgaben für die Erkundung des Untergrundes genutzt werden, beispielsweise um Kenntnisse zu Grundwasser, Geothermie oder Rohstoffen zu erlangen.

¹⁵ Ein Bereich, der auf Grundlage der Oberflächengeophysik als potenziell ungeklüftet identifiziert wurde.

Beschaffenheit des Kristallins können hierüber, anders als in Ton- oder Salzgesteinen, leichter wesentliche Informationen zur Durchlässigkeit gewonnen werden. Über hydraulische Untersuchungen kann beurteilt werden, ob vorhandene Klüfte hydraulisch verbunden sind oder nach einer Zeit wieder enden. Wenn für zwei Bohrungen Gamma-Ray Logs¹⁶ zur Verfügung stehen, können die Ergebnisse der hydraulischen Untersuchungen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Wenn in der Oberflächengeophysik kleinere Klüfte übersehen wurden, die in der Bohrung sichtbar werden, bietet es sich an, auch über einen längeren Zeitraum hydraulische Untersuchungen durchzuführen, um eine höhere Auflösung der Erkundungsergebnisse auch bei geringerer Durchlässigkeit zu erhalten. Dies ist im kristallinen Wirtsgestein günstig umsetzbar, da es sich um stabile Bohrlöcher handelt. Für die Bestimmung der Hydraulik ist die hydraulische Diffusivität (T/S) wesentlich. Im kristallinen Wirtsgestein ist der Speicherkoeffizient (S) klein, daher kann man auch bei kleiner Transmissivität (T) Informationen zur Hydraulik über größere Entfernungen erhalten.

Weitere Fragen, die sich ergeben haben

- Welche Skalierung/Auflösung wird für die Standortauswahl benötigt?
- Welche Informationen werden benötigt? Muss der Nachweis eines kompletten ewGs von 3 km² bereits in Phase 2 erbracht werden und wie gut muss dieser aufgelöst werden?

Es muss pragmatisch in der Standortauswahl vorgegangen werden: Aus Zeitgründen kann nicht jede Standortregion bis ins Detail erkundet werden. In diesem Rahmen wurde diskutiert, ob ein Endlagersystem Typ 2 im kristallinen Wirtsgestein erfolgversprechender wäre. Dem Gesetz folgend ist allerdings Typ 1 vorzuziehen. Im Laufe des Verfahrens wird deutlich werden, wie groß die gering geklüfteten bzw. ungeklüfteten Gebiete im kristallinen Wirtsgestein tatsächlich sind. Dabei muss darauf geachtet werden, dass im Laufe der Suche nach Typ 1 das Wirtsgestein nicht vielfach durchbohrt wird und ein potenzieller Homogenbereich damit im Zuge des Nachweises unbrauchbar wird.

¹⁶ Bei Gamma-Ray Logging wird die natürliche Gammastrahlung von Isotopen erfasst. Die Methode eignet sich zur mineralogisch-lithologischen Gesteinscharakterisierung. In magmatischen und metamorphen Gesteinen können oft Verzerrungen identifiziert werden, die mit Störungen einhergehen. Die Methode eignet sich, um Bohrungen an zwei Lokationen zueinander in Beziehung zu setzen. Hierfür werden charakteristische in der Bohrung auffindbare Gamma-Ray-Extrema genutzt (Quelle: GeM-DB).

(siehe dazu auch Kap. 3.2.3). Weisen zwei abgelenkte Bohrungen keine Klüfte auf, wäre dies ein guter Indikator für einen möglichen Homogenbereich im Gestein.

Die Erkundung des kristallinen Wirtsgesteins ist grundsätzlich genauso möglich wie für andere Wirtsgesteine auch. Ein Standort kann nicht anhand von Vermutungen (z. B., ob ein ewG in einer bestimmten Mächtigkeit überhaupt identifiziert werden kann) vorzeitig aus dem Verfahren ausgeschlossen werden. Die Erkundungsergebnisse müssen die Eignung oder Nichteignung zeigen (siehe dazu auch Kap. 3.2.3 Extrapolation). Aufgestellte Kriterien helfen bei der objektiven Bewertung. Ein Kriterien-basierter Ausschluss des kristallinen Wirtsgesteins kann ein Ergebnis im Laufe des Verfahrens sein, dem soll aber in keinem Fall vorgegriffen werden (siehe dazu auch Kap. 3.2.3 Ungewissheiten).

Fazit zur Grenze der Erkundbarkeit: Die Erkundung des kristallinen Wirtsgesteins ist grundsätzlich genauso möglich wie in anderen Wirtsgesteinen auch. Eine Überdeckung gibt eine wichtige Grenze/Einschränkung bei der Erkundbarkeit vor. Oberflächenmethoden allein reichen nicht zur Erkundung aus und müssen mit weiteren Methoden kombiniert werden (siehe dazu auch Frage 3 zur Extrapolation Kap. 3.2.3). Das Projekt GeoMetEr testet neue Herangehensweisen und wird bei der Einschätzung nach den Grenzen der Methodik helfen. Andererseits geben hydraulische Untersuchungen zur Bewertung der Konnektivität von Klüften wesentliche Hinweise zur Art der Klüftung. Die Erkundung muss iterativ erfolgen. Es muss geklärt werden, wann welche Informationen vorliegen müssen und in welchem Detailgrad. Hierfür ist es erforderlich, Kriterien aufzustellen. Es muss so erkundet werden, dass potenzielle Homogenbereiche erhalten bleiben und dennoch gesicherte Informationen über sie vorliegen.

3.2.2 Welche zusätzlichen Erkenntnisse gewinnt man durch übertägige Erkundung (einschließlich Bohrungen) in Phase 2? Welchen Erkenntnisgewinn haben wir in Phase 2?

Es wurde betont, dass bei Neukartierungen immer wieder auffällt, dass die in den Karten eingezeichnete Strukturen im Gelände so nicht auffindbar sind. Bei der Interpretation und Nutzung alter Karten müssen die Rahmenbedingungen, unter denen sie entstanden sind, berücksichtigt werden. Beispielsweise können Informationen in heute vorliegenden Karten ungeprüft von älteren Versionen übernommen worden sein. Außerdem können Strukturen falsch interpretiert worden sein, beispielsweise indem Schichtgrenzen als Störungen aufgenommen wurden. Auch sollte der Entstehungshintergrund der Karten berücksichtigt werden. Handelt es sich um fachfremde Ersteller und stehen die Autoren

noch für Nachfragen zur Verfügung? Sind die angewendeten Methoden noch aktuell oder liegen heute bessere vor? Liegen Erläuterungen zur Karte vor? Falls nicht, wird die Interpretation erschwert. Ein weiterer Grund, warum eine übertägige Erkundung von Bedeutung ist, ist, dass im kristallinen Wirtsgestein ein Wechsel von einem in ein anderes Gestein innerhalb weniger Meter erfolgen kann.

Fazit zum Erkenntnisgewinn in Phase 2: Die Erkundung des Kristallins in Phase 2 liefert wesentliche neue Erkenntnisse, die unverzichtbar sind.

3.2.3 Was sind die Randbedingungen für die Inter-/Extrapolierbarkeit/Übertragbarkeit der erhobenen Daten zwischen den Messpunkten? Wie groß sind die Ungewissheiten und wie geht man mit ihnen um?

Die letzte Frage behandelt die Themenbereiche Extrapolierbarkeit, für die die Erkundungsstrategie von großer Bedeutung ist, und Ungewissheiten.

Erkundungsstrategie

Liegen in einem Untersuchungsraum ausschließlich (vertikale) Bohrungen vor, ist eine Extrapolation dieser punktartigen Informationen schwer durchführbar. Eine Kombination mit horizontalen seismischen Methoden ist für eine flächenhafte Aussage erforderlich. Andersherum sind geophysikalische Untersuchungen ohne Bohrungen ebenfalls nicht aussagekräftig genug. Sie müssen mittels Bohrungen in Beziehung gesetzt werden. Eine Kombination mit abgelenkten Bohrungen ist sinnvoll, es darf aber nicht nur abgelenkte Bohrungen geben, da sonst keine ausreichende Information in die Tiefe gegeben wird. Eine Alternative sind hier auch teilweise abgelenkte Bohrungen, bei denen der Bohrverlauf nach einer vertikalen Anfahrtstrecke gezielt von der Vertikalen abgelenkt wird, um einen erweiterten Untersuchungsraum im kristallinen Gebirge zu erfassen und charakterisieren zu können.

Es wurde diskutiert, dass bei einem potenziellen Homogenbereich erst im Randbereich gebohrt werden und die Erkundung des Homogenbereichs mittels Oberflächenmethoden erfolgen sollte. Ein iteratives Vorgehen, bei dem mit einer groben Eingrenzung begonnen wird, ist sinnvoll. Zu einem späteren Zeitpunkt müsste ein potenzieller Homogenbereich zur Verifizierung allerdings angebohrt werden. Hierbei ergab sich die Frage, was dieser Schritt für die Einlagerung bedeutet, da hier ein unverritztes Gebirge

gefordert wird. Es bestehen zwei Möglichkeiten zur Ableitung von Informationen über den Homogenbereich ohne ihn anbohren zu müssen:

- Die Charakteristik des Gebietes ist hinreichend bekannt und aufgrund von statistischen Bewertungen besteht eine gewisse Aussagesicherheit über den Homogenbereich. Beispielsweise wurden andere Homogenbereiche dieses Gesteinskörpers bereits angebohrt.
- Es gelingt, über das Zusammenspiel von verschiedener Erkundungsmethoden eine sichere Aussage über den Homogenbereich zu treffen. Dabei werden Bohrungen im Randbereich des Homogenbereiches abgeteuft und zerstörungsfreie oberflächengeophysikalische Untersuchungen ergänzen die Methodik.

Im Projekt GeoMetEr (Kap. 3.2.1) wird diese Frage adressiert. Es soll im Rahmen dieses Projekts in einem potenziellen Homogenbereich gebohrt werden. Dies soll bei der Einschätzung helfen, ob sich die vorangegangene Bewertung bestätigt oder ob Merkmale (z.B. Klüfte), die vorher in den geophysikalischen Untersuchungen nicht detektiert wurden, aufgefunden werden können.

Ungewissheiten

Liefert die Erkundung Hinweise, dass ein Standort weniger geeignet ist, sollte das Gebiet aus dem Verfahren ausgeschlossen werden, auch wenn dabei eine Restwahrscheinlichkeit besteht, dass sich das Gebiet dennoch eignet. Es ist nicht verhältnismäßig, mehrere Millionen Euro in eine (weitere) Bohrung zu investieren, damit bei der nächsten Bohrung wieder bestätigt wird, was bereits gesehen wurde. Andererseits gilt auch, dass eine unauffällige Bohrung später keine Garantie für eine Eignung darstellt. Erst die weitere Erkundung wird hier eine Eignung zeigen können.

Im Verfahren ist verankert, dass ein Gebiet aufgrund einer geringen Datenlage nicht ausgeschlossen werden darf. Es werden konkrete Anforderungen an das kristalline Wirtsgestein benötigt. Eine Anforderung muss die Charakteristik der Störungen betreffen: Wie groß darf eine Störung sein bzw. wie klein muss sie sein? Anschließend kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob diese Anforderung erkundbar ist. Die Ungewissheiten sind also in Bezug zu selbst aufgestellten Kriterien zu setzen. Kann die erforderte Auflösung nicht bereitgestellt werden, muss das in die Ungewissheitsbetrachtung miteinfließen. Wenn eine umfassende Erkundung zudem nicht sichergestellt werden kann, beispielsweise aufgrund von Unzugänglichkeit des Geländes wegen der

Topografie (z. B. Relief) oder der Vegetation (z. B. Bewaldung), müssen die hiermit verknüpften Ungewissheiten ebenfalls einbezogen werden.

Fazit zur Extrapolation und zu Ungewissheiten: Bohrungen sind in jedem Fall zwingend erforderlich für die Erkundung von Kristallin, denn sie werden auch zur Korrelation der Seismik benötigt. Gebiete, die sich als ungeeignet ausweisen lassen, sollen frühzeitig ausgeschlossen werden, auch wenn eine Restungewissheit bestehen bleibt, da die Rechtfertigung der Kosten nach außen schwer möglich ist. Es muss abgewogen werden, wo für die Korrelation mit der Geophysik gebohrt wird, sodass die Schädigung potenzieller Homogenbereiche möglichst verhindert oder minimiert wird. Das Projekt GeoMetEr (Kap. 3.2.1) kann einen wichtigen Beitrag leisten, um geeignete Verfahren aufzuzeigen und zu verstehen, wo die Grenzen der Aussagen über einen Homogenbereich ohne Durchbohrung liegen. Hier liegt derzeit noch kein ausreichendes Verständnis vor. Es werden konkrete Anforderungen/Kriterien benötigt (z. B. zur Öffnungsweite, Länge von Klüften/Störungen). Wenn nicht jede Störung/Kluft erkannt werden kann, muss das in die Ungewissheitsbetrachtung miteinfließen und die Auswirkung bewertet werden. Gebiete, deren Erkundungsergebnisse darauf hinweisen, dass sie nicht geeignet sein könnten, sollten mit Hinsicht auf Kosten und Nutzen frühzeitig zurückgestellt werden.

3.2.4 Diskussion im Plenum zu AG 2

Zusammenfassend und aus der Podiumsdiskussion ergab sich zur Frage nach den Grenzen der Erkundbarkeit des Kristallingesteins, dass für die Beantwortung standortbezogene Randbedingungen relevant sind. Die Vorgeschichte eines Standortes spielt maßgeblich in die Grenzen der Erkundbarkeit ein. Auf Nachfrage wurde ergänzt, dass eine Erkundung im Kristallingestein prinzipiell schwieriger ist als in anderen Wirtsgesteinen, z.B. auch, da die Auflösung der geophysikalischen Untersuchungen geringer ist. Im Rahmen dieses Workshops wird das Kristallin allerdings nicht im Vergleich betrachtet, sondern für sich und hier muss klar gesagt werden, dass eine Erkundbarkeit gegeben ist und die Eignung von Gebieten für Phase 3 bewertet werden kann. Es gibt keinen Grund, warum das kristalline Wirtsgestein vorzeitig aus dem Standortauswahlverfahren ausscheiden sollte. Eine Erkundung ist hier genauso möglich wie in anderen Wirtsgesteinen auch. Erkundungsmethoden inkl. ihrer Grenzen und Eignung können der sogenannten GeM-DB entnommen werden. Die Erkundbarkeit in die Tiefe ist dabei standortspezifisch zu beurteilen. Die Überdeckung des Kristallingesteins gibt eine gewisse Einschränkung für die flächenhafte oberflächengeophysikalische Erkundung vor, da es

mit zunehmender Überdeckung zu einer geringeren Auflösung der Erkundungsergebnisse kommt.

Zusätzliche Erkenntnisse durch übertägige Erkundung in Phase 2 sind zu erwarten. Es können Widersprüche zwischen Karten und der tatsächlichen Geologie im Gelände beobachtet werden, was häufig ihren Ursprung in den veralteten vorliegenden Karten hat. Die Widersprüche betreffen dabei weniger die überregionalen Strukturen, sondern vielmehr regionale Ausprägungen von Störungen und Schichtgrenzen. Es ergab sich die Frage, was dies für das Auswahlverfahren bedeutet, da es sich derzeit stark auf dieses Kartenmaterial stützt. Hier muss daher im kommenden Schritt der Kenntnisstand dieser Karten aufgearbeitet werden und es ist für jede Störung zu prüfen, ob diese belegt ist oder nicht. Eine Erkundung in Phase 2 ist daher auch für Kristallingestein wichtig und wird wesentliche Ergebnisse liefern. Vertikale Bohrungen liefern dabei punktuelle und geophysikalische Untersuchungen flächenhafte Informationen. Abgelenkte Bohrungen liefern dabei einen wesentlichen Mehrwert. Es wird postuliert, dass eine Erkundung von Homogenbereichen im Kristallin grundsätzlich möglich ist, auch wenn die Ungewissheiten bei der Erkundung höher sind als bei den anderen Wirtsgesteinen. Die Identifizierung von Gebieten, die sich für die untertägige Erkundung eignen, ist möglich. Hier kann noch nicht zwischen Endlagersystem Typ 1 oder Typ 2 unterschieden werden. Zur Diskussion über die Zeitlichkeit der benötigten Erkundungsergebnisse wird auf Kapitel 3.3.5 verwiesen.

Die Randbedingungen für die Inter-/Extrapolierbarkeit der Daten und die Ungewissheiten der Erkundung sind standortbezogen zu bewerten. Für die Bewertung der Ungewissheiten in der Erkundung sollten vorab Kriterien aufgestellt worden sein. Beispielsweise kann die Topografie ein Grund für eine niedrigere Auflösung der Ergebnisse aus der flächenhaften Erkundung darstellen. Zur Extrapolation wird das Projekt GeoMeteR einen wesentlichen Beitrag zu den folgenden Fragen leisten. Können beispielsweise mithilfe von Bohrungen im Randbereich und geophysikalischer Methoden Aussagen über Homogenbereiche hinreichend gesichert getroffen werden, ohne diese Bereiche zu durchörtern? Wie können abgelenkte Bohrungen in der Erkundung optimal genutzt werden? Zur Charakterisierung der heterogenen und homogenen Bereiche im Rahmen der Erkundung wird auf Kap. 3.3.5 verwiesen.

3.3 AG 3: Prognostizierbarkeit

In dieser Arbeitsgruppe wurde sich den Fragestellungen zur Prognostizierbarkeit des kristallinen Wirtsgesteins gewidmet. Jedes Unterkapitel widmet sich dabei einer der drei Hauptfragen, zu denen die Teilnehmenden einen Diskussionsbeitrag leisten konnten, indem sie vorab diesen Fragen beschriftete Karteikarten zuordneten. Die Inhalte dieser Beiträge sind jeweils im Anhang in Form einer Tabelle aufgeführt (A.1.3).

3.3.1 Welche Eigenschaften müssen prognostiziert werden? „Worauf kommt es wirklich an?“

Alle Eigenschaften, die in die Sicherheitsanalysen eingehen, müssen prognostiziert werden. Eine der zentralen Fragen ist, ob der dauerhafte sichere Einschluss nachgewiesen werden kann. Dazu müssen die Gesteinsparameter, die dafür benötigt werden, die Erfüllung der regulatorischen Vorgaben nachweisen zu können, bekannt sein. Diese lassen sich direkt aus den Vorgaben ableiten und beziehen sich z. B. auf die geometrischen Eigenschaften; die Kristallinoberfläche und wie tief diese verwittert ist, den Gesteinstyp, das Gefüge, die Textur, die Matrixdiffusion, die Sorptionseigenschaften des Gesteinskörpers, die geochemischen und geomechanischen Eigenschaften, den Gradient der Strömung und die Mächtigkeit des Deckgebirges. Eine besondere Rolle für die Transporteigenschaften spielen die Kluftnetzwerke (z. B. Öffnungsweiten, Füllung, Häufigkeit, Abstand und Konnektivität der Klüfte). Bei der Bewertung der Barrierewirkung ist es auch relevant, solche Klüfte zu identifizieren, die für den Transport zur Verfügung stehen (z. B. verbundene Klüfte oder solche, die reaktiviert werden können) und diese von isolierten Klüften abzugrenzen, die für den Transport keine Rolle spielen. Generell wurde die Durchlässigkeit der Barrieren als wichtiger Parameter angesehen. Dies schließt das Deck- und Nebengebirge mit ein. Je nach Sicherheitskonzept müssen auch die weiteren Barrieren mitbetrachtet werden, z. B. die Behälter und die geotechnischen Barrieren.

Bezüglich der Prognostizierbarkeit sind zwei Aspekte zu beachten. Zum einen müssen die Eigenschaften der Gesteine zwischen den Messpunkten räumlich prognostiziert (extrapoliert) werden, zum anderen müssen die Eigenschaften und Prozesse in die Zukunft prognostiziert werden können. Sollte ein Standort heute als günstig bewertet werden können, muss dieser auch in der Zukunft günstige Eigenschaften aufweisen. Dies setzt eine Stabilität voraus, sowohl hinsichtlich der Kluftnetzwerke und der Durchlässigkeit der Gesteine als auch hinsichtlich der Geochemie.

Ungewissheiten sind dabei nicht nur numerischer Art, sondern bestehen auch bezüglich der relevanten Prozesse, z. B. zu den geochemischen Rückhaltemechanismen. Ein relevanter Aspekt ist dabei die Skalierbarkeit von Parametern. Nicht alle Parameter, die z. B. auf der Nano-Skala bestimmt werden, können auch auf das komplette Endlagersystem übertragen werden. Bei der Bewertung des Austrags von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist es auch relevant, ob diese bis in die Biosphäre transportiert werden können.

Wenn das Behälter-Konzept (Typ 2) zugrunde gelegt wird, sind die Korrosionseigenschaften der Behälter die entscheidenden Parameter zur Bewertung des sicheren Einschlusses. Bei Wasserwegsamkeiten und dem Kontakt von Fluiden zu den eingelagerten Abfällen kann es zur Korrosion kommen, die eine Radionuklidmobilisierung und einen Transport entlang der Wegsamkeiten zur Folge haben kann. Verschiedenste Prozesse können darauf Einfluss nehmen, weshalb die Betrachtung von Szenarien basierend auf Zuständen, Ereignissen und Prozessen (engl. Features, Events and Processes, FEP) eine wichtige Rolle bei der Bewertung von der zukünftigen Entwicklung eines Endlagerstandortes spielen.

In der nachfolgenden Diskussion wurde zunächst das Konzept der geotechnischen Barrieren adressiert. Sollte es zum Behälterausfall kommen, wird die geotechnische Bentonit-Barriere die Radionuklidfreisetzung nur für einen bestimmten Zeitraum (sehr stark abhängig vom Radionuklid, oft in der Größenordnung von einigen zehntausend Jahren je nach Mächtigkeit der Barriere) verzögern können. Allein durch die Erhöhung der Mächtigkeit des Buffers um die Behälter kann eine Freisetzung der Radionuklide nicht verhindert werden. Infolge einer Behälterkorrosion wäre die mechanische Integrität der Behälter nicht mehr gegeben. Auf der anderen Seite trügen die sich bildenden reaktiven Eisenphasen zu einer erhöhten Sorption der Radionuklide bei. Diese chemischen Prozesse seien jedoch noch nicht ausreichend untersucht.

Letztendlich kommt es bei der Frage nach den relevanten zu prognostizierenden Eigenschaften darauf an, welche Fragestellung genau verfolgt wird und wofür die Parameter verwendet werden sollen (z. B. Erstellung eines geologischen Modells/numerischen Modells). Es wurde darauf hingewiesen, dass der Fokus der Fragestellung ausschlaggebend für die Auswahl der relevanten Parameter sei. Aus wissenschaftlicher Sicht bestehen viele offene Fragen in Bezug auf das Kristallingestein. In Finnland und Schweden liegt der Fokus z. B. auf dem Nachweis der Dichtheit des Kristallingesteins und dem Ausschluss des Kontakts der Behälter mit dem Grundwasser. Für den Fall, dass dies

nicht ausgeschlossen werden kann, müsse dann gezeigt werden, dass der Radionuklidaustrag begrenzt sei. Im Gegensatz zum deutschen Verfahren würde jedoch in Skandinavien ein Zeitraum von 100.000 Jahren betrachtet. Für den darüberhinausgehenden Zeitraum werden Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt.

Es wurde festgehalten, dass die Diskussion in der Arbeitsgruppe nur unter dem Aspekt der Prognostizierbarkeit geführt wurde, die Aspekte aber immer im Zusammenspiel mit den Anforderungen (Kap.3.1) und der Erkundbarkeit (Kap. 3.2) betrachtet werden müssen.

Fazit zu den zu prognostizierenden Eigenschaften: Wichtig und zu prognostizieren sind alle Eigenschaften, die den sicheren Einschluss begründen. Wichtig sind z. B. Transportparameter im Wirtsgestein, insbesondere die Klüftigkeit, das Kluftnetzwerk und die daraus resultierende Gebirgsdurchlässigkeit. Wichtig ist auch die Mineralzusammensetzung und die daraus resultierenden Rückhalte Mechanismen. Dadurch, dass die ablaufenden Prozesse untereinander zusammenhängen, ist es aber schwierig, ohne tiefgreifende Analyse einzelne Parameter als die relevanten Parameter zu identifizieren. Beim Endlagersystem Typ 2 spielen auch die Korrosionseigenschaften des Behältermaterials eine wichtige Rolle.

3.3.2 Welche Prozesse könnten die wichtigen Eigenschaften/Parameter verändern?

Generell lassen sich die beeinflussenden Prozesse in hydraulisch-mechanische Prozesse und chemische Prozesse einteilen. Die nachfolgend diskutierten Punkte behandeln nicht immer Prozesse, sondern auch verschiedene weitere Aspekte.

Endogene und exogene Prozesse, Hydraulik

Mehrfach als relevante Prozesse genannt wurden (a)tektonische endogene und exogene Prozesse, z. B. Rissbildungen nach Verschluss des Endlagers durch Erdbeben oder Spannungsänderungen durch Gletscherauflast. Langzeitlich stabile geologische Verhältnisse sind vorteilhaft für den sicheren Einschluss der Radionuklide. Einen entscheidenden Einfluss auf das Endlagersystem hat auf lange Zeiträume betrachtet die Änderung der klimatischen Bedingungen, da diese das Potenzial hat, alle relevanten Eigenschaften und Prozesse zu beeinflussen und vor allem auf das Strömungsfeld

(Wasserwegsamkeiten, Grundwasserdynamik und ihre langzeitliche Entwicklung) und das Spannungsfeld einen großen Einfluss hat.

Temperaturveränderung

In der Anfangsphase ist die Temperatur und die Temperaturentwicklung im Endlager von Relevanz, da die Temperatur Auswirkungen auf die Bentonitbarriere hat und somit ihre Ausprägung für den Nachweiszeitraum beeinflussen kann. Die Temperatur beeinflusst verschiedene Parameter und Prozesse unterschiedlich stark. Hinsichtlich der chemischen Bedingungen und der Sorptionseigenschaften ist der Einfluss eher gering. Der Einfluss der Temperatur und die damit einhergehenden Druckerhöhung auf die mechanischen Prozesse wurde hingegen kritisch diskutiert, vor allem hinsichtlich der Volumenänderungen des Bentonits an der Behälteroberfläche und möglicher Rissbildungen bei der Abkühlung. Zudem kann die Temperaturänderung einen Einfluss haben auf Mineralzusammensetzung der Gesteine, Kluffüllungen und des Bentonits.

Korrosion

Ein Lösungszutritt zu den Behältern wird als relevant angesehen. Auf der einen Seite ist ein Lösungszutritt die Voraussetzung für das Quellen von Bentonit, auf der anderen Seite kann ein zu hoher Lösungszutritt die Sicherheitsfunktion der Barrieren beeinträchtigen. Aus geochemischer Sicht sind die Redox-Prozesse von großer Bedeutung. Mit größeren Ungewissheiten verknüpft ist die Frage, wann reduzierende Bedingungen auftreten können. Für die Matrixelemente ist die Rückkopplung zwischen Chemie und Transportpfaden bzw. dem Clogging¹⁷ und Auflösungsprozessen relevant. Zudem stellt sich die Frage, welche geochemischen Prozesse irreversibel und welche reversibel sind.

Endlagersystem Typ 2

Kein Konsens konnte gefunden werden bezüglich der Frage, ob auch für den Endlagersystem Typ 2 Kredit von der Schutzfunktion des Deckgebirges genommen werden sollte, auch wenn der überlagernde ewG als Endlagerkonzept aufgrund von regulatorischen Vorgaben nicht mehr betrachtet wird. Dementsprechend konnte auch keine gemeinsame Aussage bezüglich der Relevanz der Erosion des (sedimentären) Deckgebirges für den

¹⁷ Reduktion des Hohlraums/Porenraums

sicheren Einschluss gefunden werden. Konsens herrschte bei der Aussage, dass die Korrosion ein wichtiger Prozess für das Endlagersystem Typ 2, bzw. die Integrität des Behälters ist.

FEP-Analyse

Es wurde festgehalten, dass die Antworten der Arbeitsgruppe stark beschränkt sind auf den fachlichen Hintergrund und das Wissen der Teilnehmenden und somit nur einen Ausschnitt der tatsächlich relevanten Prozesse abbilden können. Weiterhin sind die relevanten Prozesse immer abhängig vom Endlagerkonzept und den Sicherheitsfunktionen. Konsens war, dass ausgehend von internationalen Arbeiten eine FEP-Analyse durchgeführt, bzw. ein FEP-Katalog erstellt werden muss, um die tatsächlich relevanten Prozesse identifizieren zu können. Dies wird derzeit für die rvSU¹⁸ durch die BGE schon durchgeführt.

Fazit zu beeinflussenden Prozessen:

Da das Kluftnetzwerk entscheidend für den sicheren Einschluss ist, sind insbesondere solche Prozesse zu betrachten, die die Barriereigenschaften des Wirtsgesteins (inkl. möglicher Klüfte) ändern. Dies sind vor allem Prozesse, die das Spannungsfeld im Kristallingestein ändern (tektonische Prozesse, Inlandvereisung und (glaziale) Erosion/Sedimentation, die eine Änderung der Auflast bewirken). Ein Lösungszutritt, und damit einhergehend eine geänderte Lösungsschemie haben Auswirkungen auf das Nahfeld und die dort vorhandenen (geo-) technischen Barrieren (besonders relevant bei Endlagersystem Typ 2). Kein Konsens konnte erreicht werden bei der Frage, ob der Wärmeeintrag durch die Abfälle einen Einfluss auf den sicheren Einschluss hat. Es wurde kritisiert, dass nicht einzelne Prozesse allein für die Änderung der relevanten Parameter oder Eigenschaften verantwortlich sind. Um die relevanten Prozesse und deren Zusammenspiel zu identifizieren, sei eine Szenarienanalyse nötig.

¹⁸ repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen nach §14 StandAG

3.3.3 Wie groß sind die Ungewissheiten und wie geht man mit ihnen um? Lassen sich die Ungewissheiten quantifizieren? Welche sind minimierbar und wie?

Die Größe der Ungewissheiten kann je nach Fokus der Fragestellung sehr unterschiedlich sein. Es sollte zunächst festgestellt werden, welche Ungewissheiten relevant und wie belastbar die Aussagen dazu sind. Für eine Sicherheitsanalyse muss festgestellt werden, wie belastbar diese sind, bzw. wie wahrscheinlich es ist, dass der Prozess eintritt. Diskutiert wurde, ob bereits alle Ungewissheiten bekannt sind (gibt es noch „unkown unknowns“?).

Ungewissheiten lassen sich nur quantifizieren, wenn sie bekannt sind. Es wurde vermutet, dass die Ungewissheiten im Ist-Zustand bezüglich der Behälter geringer sind als diejenigen bezüglich der geologischen Daten, die in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens verwendet werden. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Bohrungen, auf die in der Phase 1 zurückgegriffen wird, mit Ausnahme von Geothermie-Bohrungen das Kristallin meist nur erreicht, aber nicht tiefer durchteuft haben. Trotzdem ist es wichtig, auch diese Ungewissheiten zu quantifizieren. Dies wird im Rahmen des BGE-Vorhabens URS teilweise bereits adressiert¹⁹. Ungewissheiten sollten durch Sensitivitätsanalysen und Verwendung von Parameterbandbreiten untersucht werden, um darauf aufbauend die relevanten Ungewissheiten minimieren zu können. Eine einfache Methode zur Quantifizierung der Ungewissheiten in den geologischen Modellen wäre, die Belegpunkte nachzuführen (Herkunft der Informationen nachhalten, z. B. „direkte Erbohrung des Kristallins“ oder „indirekte Bestimmung der Kristallinoberfläche in der Seismik“), inkl. der Güte der Daten (z. B. durch Belegung der Befunde durch weitere Belegpunkte). Dissens bestand bezüglich der Frage, ob der Ist-Zustand eines Endlagerstandorts im

¹⁹ Der BGE-geförderte Forschungscluster URS (Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle) besteht aus insgesamt sechs verschiedenen Forschungsverbünden, die sich mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle mit unterschiedlichen Fragestellungen hinsichtlich des Umgangs mit im Standortauswahlverfahren auftretenden Ungewissheiten beschäftigen. Die Verbünde sind RADON (Risk-based Assessment of Salt Domes as Disposal Sites for Nuclear Waste), MeQUR (Ungewissheiten in THM-gekoppelten Integritätsbewegungen), ENSURE (Endlagersicherheit: Ungewissheiten und Regulatorische Aspekte), REDUKLIM (Reduzierung von Szenariungewissheiten durch Klimamodelle), Smart-Monitoring (Verbesserung der prädiktiven Güte endlagerrelevanter Simulationen durch optimale Datenakquise und Smart-Monitoring sowie GeoBlocks (Bausteine zur Quantifizierung von Ungewissheiten in Geologischen Modellen). In den Verbünden werden unterschiedliche Themen hinsichtlich Ungewissheiten anhand verschiedener Fragestellungen untersucht, um hierdurch die Robustheit und damit die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle zu verbessern. Dies beinhaltet unter anderem die Erweiterung des Kenntnisstandes von Ungewissheiten, aber auch die Entwicklung von Methoden zum Umgang mit Ungewissheiten.

Kristallingestein im weiteren Verlauf des Verfahrens gut erkundet werden kann. Große Ungewissheiten bestehen zudem im Hinblick auf die Entwicklung eines Standorts über die Zeit. Ungewissheiten können durch die Erkundung minimiert werden. Verbleibende Ungewissheiten, vor allem im Hinblick auf die lokalen Gegebenheiten, sollten transparent gemacht werden.

Endlagersystem Typ 1

Die Existenz eines ausreichend großen ewG im Kristallingestein in Deutschland zur Errichtung eines Endlagers nach Endlagersystem Typ 1 wird nicht ausgeschlossen. Die Herausforderung wird sein, diese Bereiche im Kristallingestein zu identifizieren und auszuweisen. Die Expert*innen konnten sich auf keine übereinstimmende Aussage einigen, ob im Kristallin Bereiche identifiziert werden können (aufgrund von nicht ausreichenden Messmethoden oder der Nicht-Existenz dieser Bereiche), die eine ausreichende Ausdehnung und Homogenität aufweisen, dass ein ewG ausgewiesen werden kann. In diesem Zusammenhang gibt es Überschneidungen mit den Diskussionen in der AG 1 zu den Anforderungen (Kap.3.1) und in der AG 2 zu der Erkundung (Kap.3.2).

Konzept der multiplen ewG (mewG)

Wenn Gesteinsbereiche die Anforderungen aus dem StandAG in ihrer Gesamtheit nicht erfüllen, da sie beispielsweise eine Kluft enthalten, müssten in diesen Bereichen multiple einschlusswirksame Gebirgsbereiche ausgewiesen werden. Unklarheit besteht bezüglich der Frage, ob diese verschiedenen Gesteinsbereiche jeweils sämtliche Anforderungen, z. B. bezüglich der Ausdehnung und der Mächtigkeit des ewG, erfüllen müssen oder ob die Anforderungen in diesem Fall auf den gesamten Bereich, der die multiplen ewG enthält, angewendet werden müssen. In diesem Zusammenhang ist das StandAG aus Sicht der Expert*innen nicht eindeutig formuliert. Da der ewG rechnerisch nachgewiesen werden muss, liegt es nahe, die Anforderungen auf den gesamten ewG anzuwenden und nicht auf die einzelnen multiplen ewG. Diese Diskussion überschneidet sich mit der Diskussion in AG 1 zu den Anforderungen (Kap. 3.1.4).

Konzept des überlagernden ewG (üewG)

Laut StandAG ist nachzuweisen, dass die Radionuklide am Ort der Einlagerung verbleiben. Dies wird für das Endlagerkonzept des überlagernden ewG schwierig nachzuweisen sein. Oftmals befinden sich Schichten mit höherer Durchlässigkeit zwischen dem

Kristallingestein und dem üewG (Permokarbon oder verwittertes Kristallingestein). Es wird in Frage gestellt, ob es in Deutschland Gebiete gibt, in denen das Kristallingestein direkt von einem möglichen überlagernden ewG aus Steinsalz oder Tongestein überlagert wird. Das Endlagerkonzept des üewG wurde seitens der BGE insofern präzisiert, dass nur noch Kristallinstandorte betrachtet werden, die direkt von einem ewG überlagert werden.

Chemische Prozesse

Chemische Prozesse in wässrigen Lösungen sind relativ gut bekannt. Sorptionseigenschaften und Redoxprozesse unterliegen höheren Ungewissheiten. Generell sollte zunächst geprüft werden, welche Prozesse für den sicheren Einschluss relevant sind. Dazu können Sensitivitätsanalysen herangezogen werden. Über chemische Analogiesysteme können Vergleiche gezogen werden und dadurch Tendenzen identifiziert und Prozesse ausgeschlossen werden. Eine Quantifizierung von Ungewissheiten erscheint insofern schwierig, dass bei einem generell begrenzten Wissen über ein chemisches System auch kein Wissen darüber vorliegt, welche Ungewissheiten damit einhergehen. In diesem Fall muss das Prozessverständnis geschaffen werden.

Behälter und technische Barrieren

Ungewissheiten in Bezug auf die Behälter und die technischen Barrieren wurden kritisch diskutiert. Zum jetzigen Zeitpunkt geht die BGE davon aus, dass keine Behälter ausfallen werden. Der Hintergrund ist, dass die Behälter vor der Einlagerung untersucht werden und beim Feststellen von schadhaften Behältern diese nicht verwendet werden können. Es wurde diskutiert, ob bezüglich des Umgangs mit Ungewissheiten das Endlagesystem Typ 1 gegenüber dem Endlagersystem Typ 2 Vorteile haben könnte. Es wurde festgehalten, dass dies möglicherweise für die Bewertung des Ist-Zustandes zutreffend ist, jedoch nicht für die Prognose der Entwicklung. Die Charakterisierbarkeit der Behälter im Ist-Zustand ist besser als die des Gesteins, vor allem wegen der möglichen großen Ausdehnung des zu untersuchenden Raumes für Typ 1. Diese Aussage treffe aber auf alle Wirtsgesteine zu und sei keine Besonderheit des Kristallingesteins. Generell in Frage gestellt wurde, ob eine Priorisierung der Endlagersysteme Typ 1 und Typ 2 aufgrund der Ungewissheiten überhaupt möglich sei. Eine Kombination der beiden Endlagersysteme Typ 1 und Typ 2 erscheint sinnvoll, um die bestmögliche Sicherheit durch die Kombination aller Barrieren sicherzustellen. Dies steht im Widerspruch mit der Diskussion in AG 1 zu den Anforderungen (Kap. 3.1).

Umgang mit Ungewissheiten

Es gibt für den Umgang mit Ungewissheiten etablierte Verfahren. Welche gewählt werden, muss im Einzelfall entschieden werden. Ein Beispiel für den Umgang mit Ungewissheiten sind abdeckende Analysen. Sollten jedoch sehr viele Ungewissheiten vorliegen und daher für viele Parameter abdeckende Analysen vorgenommen werden, kann es sein, dass die Sicherheitsanalysen letztendlich eine ungünstige Bewertung des Standortes ergeben, obwohl in der Realität günstige Verhältnisse vorliegen. Zudem lassen sich einige Parameter oder Prozesse nicht abdeckend beschreiben, z. B. die Grundwasserströmungsrichtung. Hier müssen wiederum Szenarien entwickelt werden, um diese in den Sicherheitsanalysen berücksichtigen zu können. Letztlich wird der Umgang mit Ungewissheiten voraussichtlich aus einer Kombination von verschiedenen Herangehensweisen bestehen und die Vermittlung dieses Ansatzes stellt eine große Herausforderung dar. Die Teilnehmenden weisen darauf hin, dass diese Problematik nicht nur auf das Kristallingestein zutrifft, jedoch im Kristallingestein die Besonderheit besteht, dass schon die Beschreibung des Ist-Zustands von sicherheitsrelevanten Eigenschaften höheren Ungewissheiten unterliegt, die in die Prognose der Entwicklung ebenfalls einfließen. Wie stark die Ungewissheiten, insbesondere in Bezug auf die Langzeitprognose des Klufnetzwerkes und der Fluidwegsamkeiten, den Nachweis des sicheren Einschusses beeinflussen, kann nicht ohne Weiteres beantwortet werden. Es besteht Forschungsbedarf hinsichtlich des Vorgehens beim Umgang mit Ungewissheiten.

Ungewissheiten können zudem miteinander gekoppelt sein. Es stellt sich die Frage, ob diese dann noch belastbar quantifiziert werden können, um Sicherheitsbewertungen durchzuführen. Sollten die Ungewissheiten insgesamt für einen Standort (oder Wirtsgestein) zu groß sein, ist es fraglich, ob dieser dann noch als bestmöglicher Standort (oder Wirtsgestein) ausgewiesen werden kann. Es wurde diskutiert, welcher Aufwand betrieben werden sollte, um Ungewissheiten für einen Standort (oder Wirtsgestein) zu minimieren, sollte ein anderer Standort (oder Wirtsgestein) bereits als günstig ausgewiesen worden sein.

Fazit zu Ungewissheiten in der Prognostizierbarkeit

Die Ungewissheiten in (der Erkundung und) der Prognostizierbarkeit sind sehr hoch, da wenig belastbare Informationen verfügbar sind. Der Anfangszustand der wesentlichen Barrieren ist bei Endlagersystem Typ 2 mit weniger Ungewissheiten behaftet als bei

Typ 1²⁰. Für den Bewertungszeitraum sind die Ungewissheiten aber für beide Systeme sehr hoch.

Ungewissheiten können in Prognosemodellen durch Ungewissheits- und Sensitivitätsanalysen adressiert werden, damit wären Ungewissheiten auch quantifizierbar. Die dafür zu verwendenden Verteilungsfunktionen sind in der Regel aber nicht bekannt. Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil der (geologischen) Ungewissheiten mit Hilfe einer Szenarienanalyse behandelt werden kann. Dann sind Ungewissheiten nur qualitativ bewertbar. Das entspricht den gesetzlichen Anforderungen.

3.3.4 Zusätzliche Fragen

Wie kann die Güte von Modellen und Prognosen überprüft werden?

Die Frage zielte auf Verifikationsmöglichkeiten auf verschiedenen Skalen ab. Einerseits können Modelle und Prognosen im Labormaßstab und für den Zeitraum von Forschungsvorhaben überprüft werden. Andererseits sind die Möglichkeiten, diese im Feldmaßstab und über lange Zeiträume zu verifizieren, begrenzt.

Hierfür eignen sich Laborexperimente (definierte Randbedingungen, aber kurze Zeiträume), Felduntersuchungen und In-situ-Experimente in Unterlagelaboren (weniger gut definierte Randbedingungen, realistischere Bedingungen, längere Untersuchungsdauer) und natürliche Analoga (Randbedingungen sind hier zum Teil unbekannt, Vorteil: die Entwicklung über lange Zeiträume wird nachvollziehbar). Aus den drei Komponenten können kombinierte Rückschlüsse gezogen werden. Verifikationsmöglichkeiten für Modelle und Prognosen sind ggf. unter diesen Gesichtspunkten begrenzt. Die Thematik wird in verschiedenen Projekten und Veranstaltungsformaten²¹ adressiert.

²⁰ Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung sind die Ungewissheiten bei Typ 2 ebenfalls höher, da Langzeitstudien zur Detektion von initialen Defekten und zur Behälterlebensdauer noch durchgeführt werden müssen.

²¹ Z. B. Fachworkshop-Reihe „Trust in Models“ des BASE: <https://www.base.bund.de/shareddocs/kurzmel-dungen/de/2024/forschung-trust-in-models-2.html> und das internationale DECOVALEX-Projekt: <https://decovallex.org/>

Wie kann in Phase 2 des Standortauswahlverfahrens die Prognostizierbarkeit verbessert werden?

Die Frage zielte darauf ab, dass die Prognostizierbarkeit durch die übertägige Erkundung in Phase 2 des Standortauswahlverfahrens aus den diskutierten Gründen nicht verbessert werden wird. Folgende Punkte wurden von den Teilnehmenden vor dem Hintergrund der eigenen Kompetenzfelder benannt:

Aus chemischer Sicht können zwei Schritte unternommen werden (Ergebnisse des PARFREI-Projektes²²). Zum einen liegen eine Reihe von Kristall-Bestandteilen (vor allem Biotit, Chlorit und die Feldspäte) als Mischkristalle (Solid Solutions) vor. Für die Löslichkeiten in solchen Konstellationen existieren bereits Modelle (basierend auf den Endgliedern). Diese theoretischen Ansätze müssten nun auf die Bildung von Oberflächenkomplexen übertragen werden. Zum anderen ist die Datenlage zur Löslichkeit von Kristallinkomponenten generell eher dürftig, z.B. für Klino- und Orthopyroxene, Amphibole und Olivine. Hier sind noch eine systematische Datenrecherche und ggfs. sogar punktuelle Laborversuche notwendig.

Zur Modellierung der Grundwasserströmung sollten Daten aus Bohrungen erhoben werden. Bohrungen werden in Phase 2 möglich sein. Bei Erkundungsbohrungen wäre jedoch zu beachten, dass der potenzielle ewG nicht (zu sehr) beeinträchtigt wird. In diesem Punkt gibt es Überschneidungen zu den Diskussionen in AG 1 zu den Anforderungen. Es wird in Frage gestellt, ob bereits die Erkundungsbohrungen sich an der zukünftigen Auslegung eines potenziellen Endlagers orientieren können, um den ewG nicht zu beeinträchtigen. In diesem Punkt gibt es Überschneidungen zu den Diskussionen in AG 2 zur Erkundung (Kap. 3.2).

Können Anforderungen geändert werden, wenn sich dies als sinnvoll herausstellt? AG 1 ↔ AG 3

Diese Fragen wurde aus Zeitgründen nicht weiter diskutiert, sondern auf AG 1 zu den Anforderungen verwiesen.

²² BGE-gefördertes PARFREI-Vorhaben (Parameter der Freisetzung, Sorption und Löslichkeit): https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Forschung/20231215_Forschungssteckbrief_PARFREI_barrierefrei.pdf

3.3.5 Diskussion im Plenum zu AG 3

Es wurde diskutiert, wie groß der Unterschied zwischen Endlagersystem Typ 1 und Typ 2 für den Langzeitsicherheitsnachweis ist. Nach den Diskussionen aus AG 1 ist primär die Anforderung nach § 4 EndlSiAnfV zum sicheren Einschluss relevant. Wenn dieser Nachweis erbracht ist, ist eine Definition nach Typ 1 oder Typ 2, von nicht mehr allzu großer Bedeutung. Unterschiede lägen dann möglicherweise an den Messpunkten, die für den Nachweis zu Rate gezogen werden würden. Mit diesem Vorgehen wäre kein Bedarf zur Anpassung der gesetzlichen Anforderungen nötig.

Eine wichtige Frage, die im Plenum aufgegriffen wurde, betrifft die Zeitlichkeit der benötigten Erkenntnisse über den Standort. Wann muss welcher Kenntnisstand über ein Gebiet vorliegen und durch wen wird dies festgelegt? Dies ist eine Frage des Verfahrens. Darf die Beantwortung wesentlicher Fragen in Phase 3 verschoben werden? Dies betrifft im Kristallin vor allem auch die Frage, ob bereits in Phase 2 eine Aussage dazu getroffen werden muss, ob ein Endlagersystem Typ 1 an einem Standort sicher zu realisieren ist. Hierbei muss auch berücksichtigt werden, dass bereits am Ende von Phase 2 das Erkundungsprogramm und die Erkundungsziele für Phase 3 definiert werden. Es wird der bestmögliche Standort gesucht und daher ist es erforderlich, dass Gebiete im Kristallin gestein mit denen in anderen Wirtsgesteinen vergleichbar sind. Dazu müsse ein ähnlicher Kenntnisstand vorliegen. Die Vergleichbarkeit der Wirtsgesteine wird als große Herausforderung für die zukünftigen Phasen der Standortauswahl angesehen.

Eine weitere Frage aus dem Plenum adressierte den Homogenbereich und die Frage danach, wie dieser definiert wird und ob es nicht bedeutender ist, die Heterogenität des Gebietes zu charakterisieren. Hierbei ist wieder entscheidend, welcher Kenntnisstand zu welchem Zeitpunkt benötigt wird. Zu welchem Zeitpunkt müssen die potenziellen Gebiete identifiziert werden, die einen ewG aufnehmen können? Im Zuge der Erkundung werden heterogene Bereiche genauso charakterisiert werden wie Homogenbereiche. Schlussendlich stellt sich die Frage, ob das Ergebnis ausreichend vermittelt werden kann. Die Anwesenheit einer Klüftung ist nicht das Einzige, das einen heterogenen oder homogenen Bereich ausmacht. Zusätzlich muss der Vernetzungsgrad, die Ausprägung der Klüfte (z.B. Kluftlänge), die Spannungsfelder im Gebiet aufgrund möglicher Reaktivierung von Klüften und die An- oder Abwesenheit eines hydraulischen Gradienten mitberücksichtigt werden. Auch die zeitliche Entwicklung und die damit verbundenen Prozesse über den Bewertungszeitraum sind dabei zu berücksichtigen.

4 Zusammenfassung

Der Workshop bot eine Plattform für nationale Expert*innen, um die Anforderungen, Methoden und Prognostizierbarkeit von kristallinen Wirtsgesteinen auf nationaler Ebene zu diskutieren. Es wurde sich in Arbeitsgruppen jeweils Fragestellungen zu den Themen "Anforderungen", „Erkundung“ und „Prognostizierbarkeit“ gewidmet. Hierbei konnten wesentliche Diskussionspunkte und Arbeitsaufträge identifiziert werden.

Zusammenfassung der wichtigsten Punkte aus AG 1 – Anforderungen:

1. Es gab ein heterogenes Meinungsbild vor und nach der Diskussion der Arbeitsgruppe bei der Umfrage zu Frage 1, ob ein ewG im Kristallin ausgewiesen werden kann.
2. Konsens: Wenn der Nachweis zum sicheren Einschluss nach § 4 EndlSiAnfV gegeben ist, sind Verletzungen anderer Bewertungskriterien von geringerer Bedeutung (Klufthäufigkeit, Kluftöffnungsweite, Vorhandensein verheilte/unverheilte Klüfte, Dilatanzkriterium, etc.).
3. Der Zeitrahmen des Standortauswahlverfahrens ist von großer Bedeutung. Wann werden welche Daten benötigt (einige Klüfte können teilweise erst in Phase 3 unter Tage kartiert werden), wann muss der Nachweis zum sicheren Einschluss gegeben sein?

Zusammenfassung der wichtigsten Punkte aus AG 2 – Erkundung:

1. Es besteht Einigkeit darüber, dass kristalline Wirtsgesteine grundsätzlich erkundbar sind. Die Erkundbarkeit ist daher kein Ausschlussgrund für kristalline Gesteinsformationen.
2. Eine übertägige Erkundung in Phase 2 wird Widersprüche zwischen Karten und der tatsächlichen Geologie im Gelände auflösen.
3. Für die Bewertung der Ungewissheiten in der Erkundung sind Kriterien erforderlich. Es konnte zum jetzigen Zeitpunkt keine abschließende Einschätzung zu der Möglichkeit der Extrapolation mithilfe von Bohrungen und oberflächengeophysikalischen Untersuchungen gegeben werden. Hier sollen Projekte wie GeoMetEr einen wichtigen Beitrag leisten.

Zusammenfassung der wichtigsten Punkte aus AG 3 – Prognostizierbarkeit:

1. Wichtig und zu prognostizieren sind alle Eigenschaften, die den sicheren Einschluss begründen. Dies betrifft z. B. Transportparameter im Wirtsgestein, insbesondere die Klüftigkeit, das Kluftnetzwerk und die daraus resultierende Gebirgsdurchlässigkeit. Wichtig sind auch die Mineralzusammensetzung und die daraus resultierenden Rückhaltemechanismen. Beim Endlagersystem Typ 2 spielen auch die Korrosionseigenschaften des Behältermaterials eine wichtige Rolle.
2. Da das Kluftnetzwerk entscheidend für den sicheren Einschluss ist, sind insbesondere solche Prozesse zu betrachten, die die Barriereigenschaften des Wirtsgesteins (inkl. möglicher Klüfte) ändern. Dies sind vor allem Prozesse, die das Spannungsfeld im Kristallingestein ändern. Ein Lösungszutritt und damit einhergehend eine geänderte Lösungsschemie haben Auswirkungen auf das Nahfeld und die dort vorhandenen (geo)technischen Barrieren (besonders relevant bei Endlagersystem Typ 2).
3. Die Ungewissheiten bei der Prognose (räumlich und zeitlich) sind sehr hoch, da wenig belastbare Erkundungsdaten vorliegen. Endlagersystem Typ 2 birgt weniger Ungewissheiten im Ist-Zustand als Typ 1, für den Bewertungszeitraum sind sie für beide Typen sehr hoch. Eine Minimierung der Ungewissheiten ist nur sehr eingeschränkt und dann vor allem durch die Erkundung möglich.

Eine wichtige Frage, die im Plenum aufgegriffen wurde, betrifft die Zeitlichkeit der benötigten Erkenntnisse über den Standort. Aufgestellte Kriterien helfen bei der objektiven Bewertung. Ein Kriterien-basierter Ausschluss des kristallinen Wirtsgesteins kann ein Ergebnis im Laufe des Verfahrens sein, dem soll aber in keinem Fall vorgegriffen werden.

Die gesetzlichen Anforderungen bilden die Grundlage für die beiden Aspekte Erkundbarkeit und Prognostizierbarkeit. Sie geben den Erkundungsbedarf vor und legen fest, was prognostiziert werden soll.

Die in der Erkundung erfassten Daten und Erkenntnisse fließen als Inputparameter in die Modelle ein. Zudem müssen Aspekte, die nicht erkundet werden können, anhand von Modellen prognostiziert werden. Andersherum ergibt sich aus den Erkenntnissen durch die Modellierung und die identifizierten Ungewissheiten die Formulierung neuen

Erkundungsbedarfs. So stehen die Aspekte Erkundbarkeit und Prognostizierbarkeit in einer engen Beziehung zueinander.

Theoretisch könnte sich aus den Erfahrungen in den Gebieten der Erkundung und Prognostizierbarkeit ein Bedarf für die Anpassung der gesetzlichen Anforderungen ergeben. Dies wird in (Abb. 4.1) durch gelbe Pfeile symbolisiert.

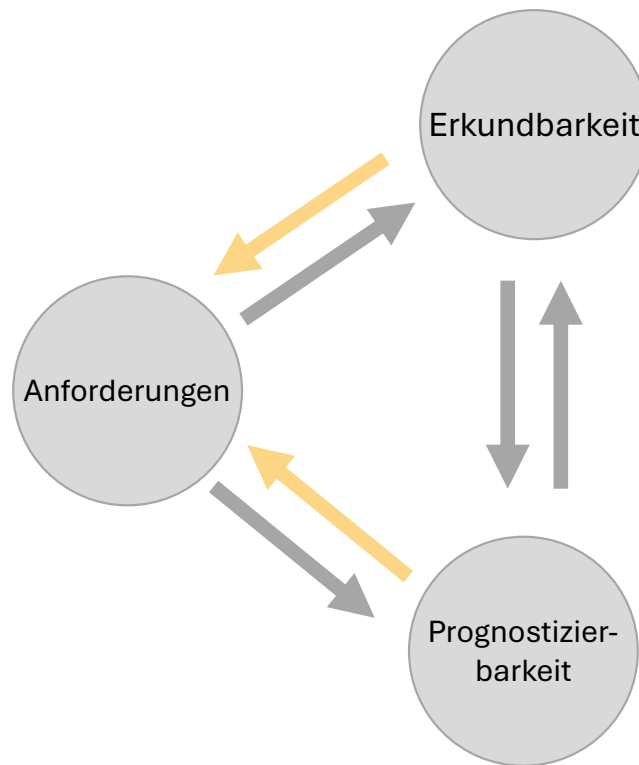


Abb. 4.1 Verbindung zwischen den Themengebieten der Anforderungen, der Erkundung und der Prognostizierbarkeit

5 **Literatur und weiterführende Informationen**

Buske, S. (2024): Bewertung der Erkundbarkeit von kristallinen Wirtsgesteinskomplexen mit Oberflächenseismik, Stellungnahme. Team | TU Bergakademie Freiberg

Richter, L.; Beilecke, T.; Dlugosch, R.; Kneuter, T.; Pollok, L.; Schubarth-Engelschall, N.; Semroch, R. (2022): „GeM-DB“ – eine Datenbank zur Recherche geeigneter Methoden zur Erkundung der Auswirkungen geologischer Prozesse, Poster, Tage der Standortauswahl vom 8.-10.6.2022, Aachen.

Weiterführende Informationen:

GeoLab Forschungsprojekt zur zukünftigen Nutzung von Erdwärme (Geothermie) mit Erkundung durch abgelenkte Bohrungen und Seismik: GeoLaB

GeoMetEr-Vorhaben: GeoMetEr: Forschungsprojekt zur Methodenentwicklung

URS-Forschungscluster: <https://urs.ifgt.tu-freiberg.de/de/home>

TiM-Workshop „Trust in Models“ des BASE: <https://www.base.bund.de/shareddocs/kurz-meldungen/de/2024/forschung-trust-in-models-2.html>

DECOVALEX-Projekt: DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments <https://decovallex.org/>

PARFREI-Vorhaben (Parameter der Freisetzung, Sorption und Löslichkeit): https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Forschung/20231215_Forschungssteckbrief_PARFREI_barrierefrei.pdf

A Anhang

Im Folgenden sind die Antworten auf den Karteikarten der Diskussionsteilnehmenden auf die Fragen der Arbeitsgruppen tabellarisch aufgeführt (Anhang A.1). Die Präsentationen der Impuls-Vorträge (Kap. 2.1 bis 2.5) sind im Anhang A.2 enthalten.

A.1 Antworten der Diskussionsteilnehmenden auf die Fragen der Arbeitsgruppen

A.1.1 Anforderungen

Tab. A.1 Stichpunkte der AG 1 „Anforderungen“ zur Frage 1

Kann ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Kristallin in Deutschland ausgewiesen werden?
- Weiß nicht, aber es muss dann gut dargelegt, warum nicht! ewG?
- Ja, grundsätzlich auf Basis der jetzigen Kenntnis nicht auszuschließen!
- Unsicher (Problem „Röhren“)
- Erfordert aufwändige Erkundung - Bergwerk unumgänglich - Ausgangslage schwierig → starke tektonische Überprägung
- Das soll die BGE erarbeiten
- Ja, abhängig von der Erkundungsmethodik und Größe des ewG
- Nein, da der Nachweis eines ausreichend großen Gebirgsbereichs mit ewG-Eigenschaften nicht möglich
- Ja aber Frage der Größe → kleine Flächen (wenige km ²) vermeintlich Ja - große Flächen (10er km ²) → ?
- in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode/-aufwand vielleicht ja
- ewG 3x3 km NEIN - multipler ewG JA (z. B. Gebirgskörper n 200x200m)
- Unklar, nach aktuellem Stand - Exploration zu bspw. Geothermie mit Fokus auf geklüftetes Gestein → ist es überhaupt möglich für vermutete ungeklüftete Bereiche eine Exploration durchzuführen, die diesen Nachweis bringen kann, in vertretbarem Zeitraum?

Tab. A.2 Stichpunkte der AG 1 „Anforderungen“ zur Frage 2

Ist ein ewG im Kristallingestein ein ungeklüfteter Gesteinsbereich oder kann dieser auch nicht verheilte/verheilte Klüfte umfassen?	
-	Verheilt geht, wenn /schon lang verheilt (34 Mio. a) /Verheilung unter Durchlässigkeitswerten
-	ewG muss ungeklüftet sein, oder kein verbundenes Netzwerk aufweisen → Nachweis extrem schwierig; andernfalls Reaktivierung von Klüften
-	Komplett ohne Mikro-Klüfte wahrscheinlich nicht möglich. Entscheidend sollte Durchlässigkeit sein
-	Subseismische Störungen existieren auch im Tonstein, darf Klüfte umfassen...
-	Kann auch Klüfte enthalten, solange Anforderungen (Durchlässigkeit, ...) erfüllt sind
-	Der ewG im Kristallin darf verheilte Klüfte enthalten. Nicht verheilte Klüfte dürfen nicht hydraulisch wirksam sein.
-	Regulatorische Anforderung an ewG sind streng → spricht eher für die Abwesenheit von Klüften inkl. Channels
-	Ja, wenn diese nicht hydraulisch wirksam sind. Nachweis?
-	Nicht nur Einschlusseigenschaften des Wirtsgesteins (heute) bedenken, sondern auch langfristige Stabilität & Integrität → Klüfte = Schwachstelle? (→ AG 3)
-	Klüfte dürfen sein, solange die Geringfügigkeitskriterien der EndlSiAnfV erfüllt werden (Natürlich auch die Dosisgrenzwerte)
-	Ungeklüfteter Gesteinsbereich, da Kluftapertur ~10 ⁻⁵ m zu Nichterfüllung von 10 ⁻¹⁰ m/s führt

Tab. A.3 Stichpunkte der AG 1 „Anforderungen“ zur Frage 3

Welche Anforderungen muss das Kristallingestein erfüllen, bzw. welche geologischen Merkmale sind entscheidend, - damit man einen ewG ausweisen kann? - damit ein Typ 2 (ohne ewG) durch geotechnische und technische Barrieren realisiert werden kann?
- Typ 1: Kluftparameter Aperture, Konnektivität, hydraulische Eigenschaften der Matrix Diffusivität, „Permeabilität“ - Typ 2: Geomechanischer Schutz des ELB²³, günstige hydrochemische Verhältnisse, dispersive Peak-Abschwächung
- ewG nur – wenn Freisetzung unter Verordnungswerten begrenzt
- weniger hydraulisch wirksame Klüfte - stabiles geologisches Umfeld - ausreichende Größe und Tiefenlage - Homogenität
- Typ 1 Geochemie → Behälterkorrosion - Typ 2 Spannungsfeld Mechanik
- Anforderung für Typ 2 - mechanische Lasten aller Art müssen hinreichend abgehalten werden - Hydrochemie muss stimmen
- Geochemie (Randbedingungen, I, ...) Matrixporosität, Diffusionslänge
- Anf. Typ 2 - günstiges chemisches Milieu - mechanische Stabilität - ausreichend geringe Durchlässigkeit für d. Fall. d. Versagens einzelner Behälter
- ewG: geringe hydraulische Leitfähigkeit (Klüftigkeit)
- möglichst geringe tektonische Überprägung - Gebirgsbereich in Tiefen größer 500 m Dekompaktion/Verwitterung
- Durchlässigkeit, Mächtigkeit (gesetzl. Anf.) - Prognostizierbarkeit, dass sich Eigenschaften über Bewertungszeitraum nicht (wenig?) verändern
- Sehr geringe Permeabilität - geochemische Randbedingungen reduz., ... usw. - RISIKO AK Grundwasseralters
- „dicht“ - gute geochemische Eigenschaften für noch unbekannten Behälter → Henne-Ei-Problem

²³ Anm. GRS: Wahrscheinlich ist Einlagerungsbereich gemeint.

A.1.2 Erkundung

Tab. A.4 Stichpunkte der AG 1 „Erkundung“ zur Frage 1

Welche Skalierung muss aufgelöst werden? Wie repräsentativ sind punktuelle Infos? Muss der ewG als Grenzen erkundet werden?
- Boden/Überdeckung erschwert Detailkartierung/Kluftkartierung; Übertragbarkeit der Oberflächeninformation in die Tiefe, vor allem Kluftparameter; Übertragbarkeit der hydraulischen Eigenschaften
- Zieltiefe mit max. 200-400 m moderat komplexer Überdeckung; Skalenlänge der Heterogenität (Klüfte) im Bereich $\frac{1}{4}$ der seismischen Wellenlänge (10er m Oberflächenseismik, 1er m Bohrlochseismik, 1er Zentimeter Sonic log, ...)
- Vertikale, laterale Übertragbarkeit von Aufschlusskenntnissen auf direkte Umgebung beschränkt; Limitationen ergeben sich aus eingesetzten Methoden wobei seismische Erkundung nicht die einzige Methode ist.
- Räumlich, da erkunden, wo homogener Kristallinkörper an der Oberfläche ansteht, vermutlich wird das ein Pluton sein, weil die doch im Durchschnitt homogen sind (das glauben wir zumindest); <200 m Überdeckung, in diesen Bereichen wird sich dann oberflächennah und in Bohrungen anhand von Proben zeigen ob die Eigenschaften Salz/Ton schlagen?
- 200-400 m
- Hydraulisch → abhängig von T/S *t
- Weitläufige Konnektivität von Klüften
- Viele unterschiedliche Erkundungsmethoden, existierende Erfahrungen
- Fläche bezogen auf Anzahl Bohrungen, Bohrpfade (horizontal)

Tab. A.5 Stichpunkte der AG 1 „Erkundung“ zur Frage 2

Mineralogie und Gefüge des Wirtsgesteins in der Tiefe (Bohrkerne); Kluftdetektion um das Bohrloch (10er bis 100 m); In-situ Zustandsbedingungen (Temperatur, Stressfeld, Grundwasserzusammensetzung)	
-	Erkenntnisgewinn Bohrungen → Grundwasser-Hydraulik; hydraulische Parameter + Ruhedruck im Profil; Fließmodell, Randbedingungen, Gebirgsspannung (Magnitude + Orientierung); E/D-Modelle → Optional: Transportparameter, Anisotropie, Heterogenität
-	Räumliche Charakterisierung; Bestätigung/Anpassung der geologischen Modelle; punktuelle Detailinformationen zur Eignung des Wirtsgesteins/Deckgebirge
-	Grad der Beanspruchung; Gebirgsdurchlässigkeit; Strukturelles Inventar in 3D inkl. Klüftigkeitshinweise
-	Es geht immer um Kluftnetzwerke im Kristallin. Diese können oberflächlich mit Einschränkungen erhoben werden und müssen an Untergrunddaten (Bohrungen) kalibriert werden
-	Bohrungen → genaue Zusammensetzung des Lagergesteins in der Tiefe
-	Bisher weniger Daten als z.B. bei Salzstöcken (Öl-/Gasindustrie)
-	Ziel: Kriterien + Anforderungen wvSU24
-	Welche zusätzlichen Erkenntnisse gewinnt man in Phase 2? Für mich schwer abwägbar?
-	Nachweis von Störungszonen/ Klüftigkeit → Frage nach Skalierbarkeit/ Übertragbarkeit (mikroskopisch/makroskopisch)

²⁴ wvSU: weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

Tab. A.6 Stichpunkte der AG 1 „Erkundung“ zur Frage 3

Beschreibung der Ungewissheiten wichtig	
-	Randbedingungen: Homogenität, Entstehungsgeschichte Ungewissheiten: Pragmatismus
-	Abhängig vom Grad der Erkundung und Auflösung der Methoden
-	Erkenntnisgewinn über Methodenkombinationen (Oberflächengeophysik und Bohrungen)
-	→ Korrelierbarkeit der Ergebnisse; → Joint Inversion
-	Interpolation/Ungewissheiten abhängig von Kenntnis der allgemeinen geologischen Bedingungen um die Daten; Extrapolation immer schwierig bzw. nicht empfehlenswert
-	Hydraulisch → grundsätzlich gibt es Ungewissheiten in der Abschätzung der Parameter
-	Unsicherheit groß wegen Genese des Systems, sehr heterogen auf kleinen Skalen
-	Ausreichend dichte Messgeometrie und seismische Frequenzen voraussagen: „ausgedehnte Struktur-Elemente“
-	Ungewissheiten: Oberfl. → Bohrung!

A.1.3 Prognostizierbarkeit

Tab. A.7 Stichpunkte der AG 3 „Prognostizierbarkeit“ zur Frage 1

Welche Eigenschaften müssen prognostiziert werden? „Worauf kommt es wirklich an?“
- Kluftnetzwerk (Häufigkeit, Öffnungsweite, Abstand, Lage, Interkonnektivität) - Mineralzusammensetzung - Porenwasserzusammensetzung - Gesteinsparameter zur Bewertung der gesetzlichen Vorgaben - Zeitliche Variabilität - Deck- und Nebengebirge kann eine Rolle spielen
- Geometrische Eigenschaften: - Kluftintensität - Kluftlänge - Topologie - Geomechanische Parameter
- Klüftigkeit, Kluftnetzwerk wasserführend -> Gebirgsdurchlässigkeit - Absorption der Radionuklide durch Minerale und Zusammensetzung des Porenwassers
- Transporteigenschaften der Barrieren (Permeabilität, Durchlässigkeit) - Prognostiziert werden muss, ob die Barrieren diese behalten, bzw. erreichen
- Eigenschaften, die bei der Erstellung numerischer Modelle, die im Rahmen von SA²⁵ verwendet werden, eine Rolle spielen, z. B. Charakterisierung des Kluftsystems → Transport [...]
- Wasserwegsamkeiten → Strömung → Korrosion → Radionuklidfreisetzung → Radionuklidausbreitung
- Tiefenlage der Kristallinoberfläche - Tiefe der Verwitterung der Kristallinoberfläche - Gesteinstyp/Gefüge/Textur - Klüftung/Art der Klüftung - Mächtigkeit/Eigenschaften sedimentärer Überdeckung
- Geologische Stabilität → können sich neue Klüfte bilden? - Gebirgsdurchlässigkeit - Chemische Stabilität
- Rückhaltemechanismen, welche über lange Zeiträume wirken - Skalierbare Parameter - Übergänge in die Biosphäre
- Dauerhafter sicherer Einschluss (hydraulisch) im dichten Gestein
- THMC-Prozesse

²⁵ Anm. GRS: Wahrscheinlich sind „Safety Assessments“ gemeint.

Welche Eigenschaften müssen prognostiziert werden? „Worauf kommt es wirklich an?“

- Trennflächengefüge
- Sorption/Desorption
- Gradient
- Korrosionseigenschaften
- Behältermaterial

Tab. A.8 Stichpunkte der AG 3 „Prognostizierbarkeit“ zur Frage 2

Welche Prozesse könnten die wichtigen Eigenschaften/Parameter verändern?
- Reaktivierung bestehender strukturgeologischer Merkmale (→ Störungen, Kluftsysteme) - Chemische Prozesse (→ Ausfällung) - FEPs → Szenarienanalyse
- Thermisch-chemisch: RN-Austritt²⁶ aus Behälter - Mechanisch-hydraulisch: Temperaturanstieg
- Wärmeentwicklung - Korrosion der Barrieren - Änderungen von Strömungsrichtungen - Änderungen des Chemismus
(a)tektonische Prozesse: Rissbildungen nach Verschluss durch Erdbeben/Gletscher-Spannungen
- Redoxprozesse - Rückkopplung Chemie ↔ Wegsamkeiten - Änderungen der Transportgeschwindigkeit - Reversibilitäten
- Tektonik → Klüfte/Gebirgsdurchlässigkeit
- Änderungen des „stress field“ - Änderungen der Grundwasserdynamik - Änderungen der sedimentären Überdeckung (Erosion, etc.)
Im Vergleich guter Erhalt der Barrierewirkung (?)
- FEP-Analyse ausgehend von bisherigen (internationalen) Arbeiten - Zeitliche Komponente: Wann und unter welchen Umständen kann ein Prozess stattfinden?
- Tektonik - Chemische Prozesse in Kluftfüllungen
- Klima → Hydrochemie, Gradient - (Erosion?) → Spannungsfeld - Korrosion → Behälterintegrität
Lösungszutritt + dann folgende Prozesse
- H+M-Prozesse - C-Prozesse

²⁶ Anm. GRS: Vermutlich ist Radionuklid-Austritt gemeint.

Tab. A.9 Stichpunkte der AG 3 „Prognostizierbarkeit“ zur Frage 3

Wie groß sind die Ungewissheiten und wie geht man mit ihnen um? Lassen sich die Ungewissheiten quantifizieren? Welche sind minimierbar und wie?
Die Größe der Ungewissheiten ist sehr unterschiedlich, es kommt darauf an, die Ungewissheiten zu verstehen, die wichtig sind. Eine Quantifizierung ist nicht immer möglich oder nötig.
Sehr groß Abdeckende Annahmen aber nicht zielführend hinsichtlich einzuhaltender Kriterien
- Ungewissheiten sind groß und sollten durch Unsicherheitsquantifizierung & Sensitivitätsanalysen adressiert werden - Entwicklung zerstörungsfreier Messmethoden? - Anpassung Endlagerkonzept?
Wie belastbar kann das Endlagersystem bewertet werden, wenn die Ungewissheiten nicht abbaubar sind?
- Bewertung ist Gegenstand aktueller Projekte? - Kann man das aktuell belastbar quantifizieren?
- Groß >>>> - Multiple Realisierungen des Systems - Sensitivitätsanalyse
- Geringe Ungewissheiten: Eingelagerte Behälter - Sehr große Ungewissheiten: Verhalten über Nachweiszeitraum
Fokus Geochemie/Radiochemie (Bias!)
a) Können mehrere Größenordnungen umfassen (z. B. Redoxchemie), Reduktion über Prozessverständnis, Analogien, Messungen, Statistik b) Kommt drauf an c) Minimierbar nur bei fehlenden oder ungenauen Messungen, nicht bei Heterogenitäten
Ungewissheiten minimieren durch gute, flächendeckende Erkundungsdaten + zusätzliche Sicherheit bei der Einlagerung (Behälter + Versatz)
- Ungewissheiten groß, wenig „harte“ Daten - Quantifizierung der Ungewissheiten in geologischen Modellen
- Ungewissheiten sollten transparent gemacht werden - Ungewissheiten eines lokalen Kluftnetzwerkes können signifikant sein - Minimierung von Ungewissheiten über gebirgsspezifische Erkundung sowie F&E-Projekte²⁷ - Quantifizierung wahrscheinlich nur begrenzt möglich

²⁷ F&E: Forschung und Entwicklung

A.2 Präsentationsfolien

A.2.1 Gesamtschau deutsches Kristallin (Bär, Achtziger-Zupančič)



Schlüsselparameter gemäß StandAG

Anlage 1: Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG (Abstandsgeschwindigkeit, Durchlässigkeit, Diffusionskoeffizient, Porosität, Verfestigungsgrad)

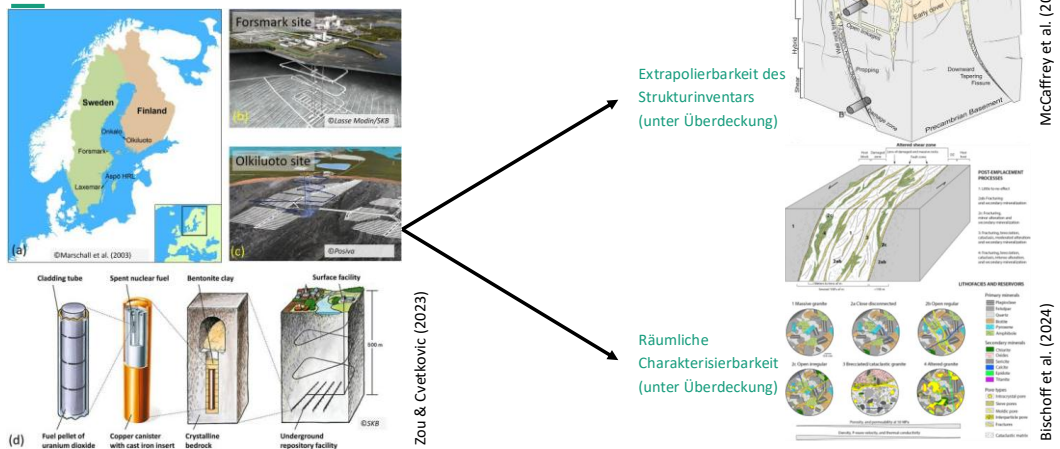
Anlage 2: Bewertung Konfiguration Gesteinskörper (u.a. wasserleitende Schichten)

Anlage 3: Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit (u.a. Variationsbreite der Eigenschaften; Zuverlässigkeit in der Erhebung) in vertikaler und horizontaler Richtung

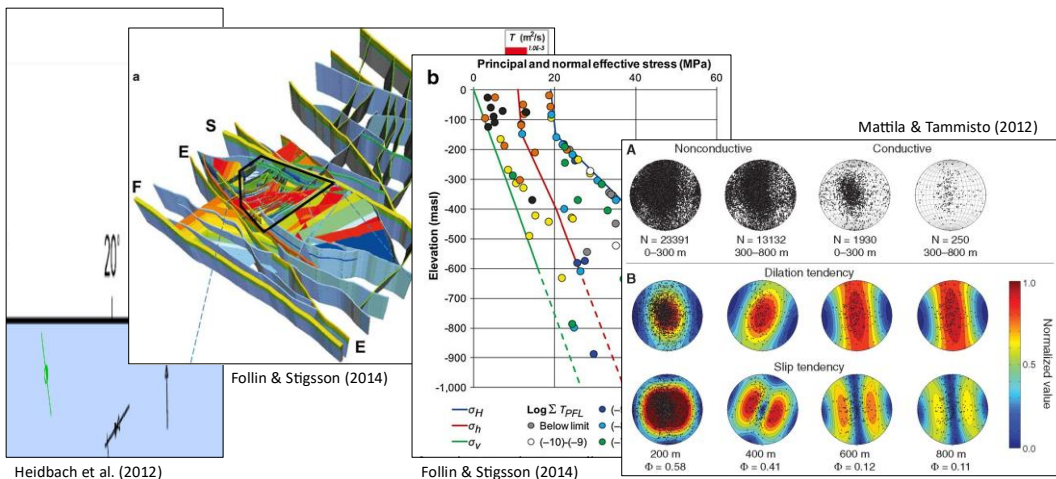
Anlage 6: Bewertung Fluidwegsamkeiten (u.a. Verhältnis Gebirgs- / Gesteinsdurchlässigkeit)

- Für etwa 50% der Kriterien in den 12 Anlagen StandAG sind zur Bewertung Parameter zentral, die nahezu ausschließlich aus repräsentativen bohrlochgeophysikalischen und hydraulischen Bohrlochuntersuchungen (von der Oberfläche oder aus Bergwerken) gewonnen werden müssen
- Die räumliche Variabilität und Prognostizierbarkeit der geologischen, hydraulischen, geochemischen und geomechanischen Verhältnisse sind herausfordernd und zwingend zu erheben

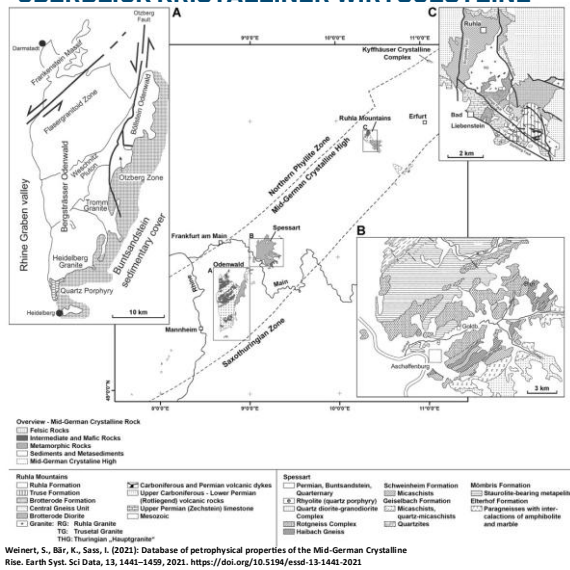
Herausforderungen



Extrapolierbarkeit von natürlichen Strukturen und deren Eigenschaften



ÜBERBLICK KRISTALLINER WIRTSGESTEINE



EIGENSCHAFTEN KRISTALLINERWIRTSGESTEINE

Multi-Skalen Untersuchung der Gesteins- und Gebirgseigenschaften als Basis der Charakterisierung

Die Charakterisierung von Gesteins- und Gebirgskörpern ist ein hochdimensionales, systemabhängiges Problem mit mehreren bestimmenden Feldparametern:

Geplante Untersuchungen betreffen:

Eigenschaften aus Bohrkernen und Logs:

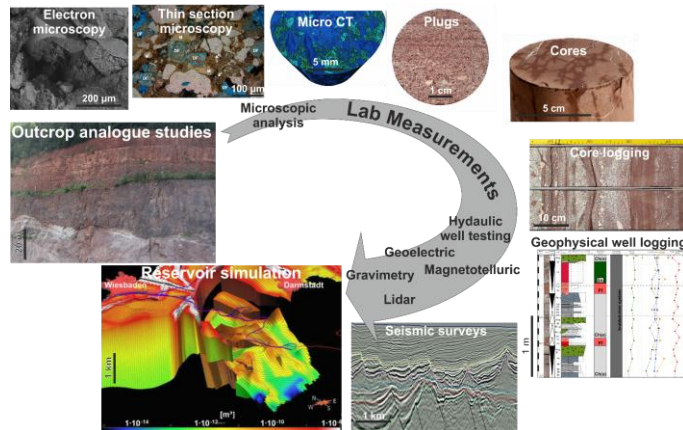
- Wärmeleitfähigkeit, Diffusivität, Wärmekapazität
- Radiogene Wärmeproduktion
- Porosität, Permeabilität
- Gebirgsmechanik

Lithologie aus Kernen und Logs:

- Struktur, Textur, Foliation
- Mineralogie, Petro- und Lithologie, Modalzusammensetzung, Zementierung

Trennflächennetzwerk

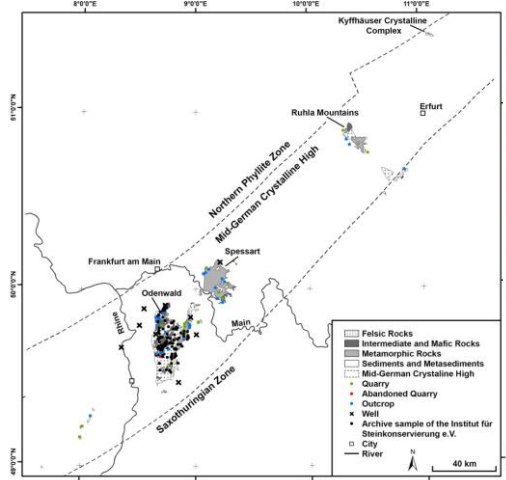
- Ausrichtung, Abstand, Länge, Apertur, Dichte
- Persistenz, Interkonnektivität
- Füllungen, Mineralisierung, Alteration



Bär, K., Reinsch, T., Bott, S. (2020): The PetroPhysical Property Database (P²) – a global compilation of lab-measured rock properties. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2485–2515, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2485-2020>

EIGENSCHAFTEN KRISTALLINERWIRTSGESTEINE

Projekte „Hessen 3D 2.0“ und „AMPEDEK – Atlas der Mineralogischen und Petrophysikalischen Eigenschaften Deutscher Kristalliner Wirtsgesteine“



Weinert, S., Bär, K., Sass, I. (2021): Database of petrophysical properties of the Mid-German Crystalline Rte. Earth Syst. Sci. Data, 13, 1441–1459, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1441-2021>



- Bayern:**
- Fichtelgebirge:**
 - Epprechtsteiner Granit (hell)
 - Epprechtsteiner Granit
 - Kössener Granit
 - Reines Reuther Granit
 - Zufurt Granit (gelb)
 - Zufurt Granit (hell)
 - Oberpfälzer Wald:**
 - Flossenbühler Granit
 - Thansteiner Granit
 - Bayrischer Wald (Süd):**
 - Hauzenberger Granit
 - Herrnholzer Granit
 - Hinterleesener Granit
 - Fürstensteiner Granit
 - Tittlinger Feinkorn Granit
 - Tittlinger Grobkorn Granit
 - Nammeringer Granit
 - Weiskupf Granit
- Thüringen:**
- Thüringer Hauptgranit (fünf verschiedene Bohrkeme)
- Niedersachsen:**
- Harzburger Gabbro (BK)
- Rheinland-Pfalz:**
- Granit (Steinbruch Waldhambach)
- Hessen:**
- Dieburger Granit (Steinbruch)
 - Tromm Granit (fein)
 - Tromm Granit (grob)
- Baden-Württemberg:**
- Murgtal-Gneisanatexit (BK)
 - Gneis (BK Bühl)
 - Malsburger Granit
 - Paragneis (Aufschluss bei Bühl)

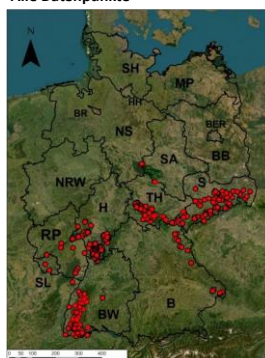
Weydt, L., Ramirez, A., Sass, I. (2024): Abschlussbericht für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „AMPEDEK“ im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

7

ATLAS DER MINERALOGISCHEN UND PETROPHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DEUTSCHER KRISTALLINER WIRTSGESTEINE

Beprobungspunkte und Untersuchungsmethoden

Alle Datenpunkte



Petrophysik



Felsmechanik



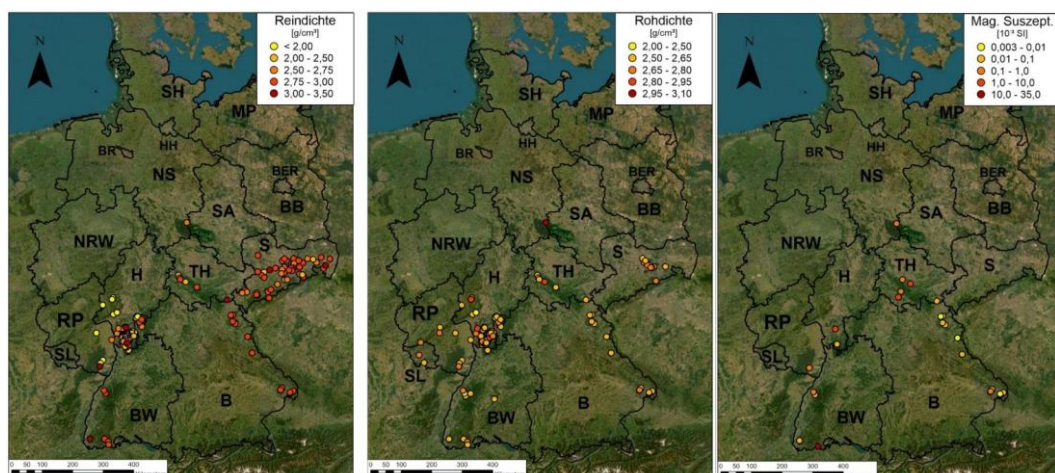
Geochemie



Weydt, L., Ramirez, A., Sass, I. (2024): Abschlussbericht für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „AMPEDEK“ im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

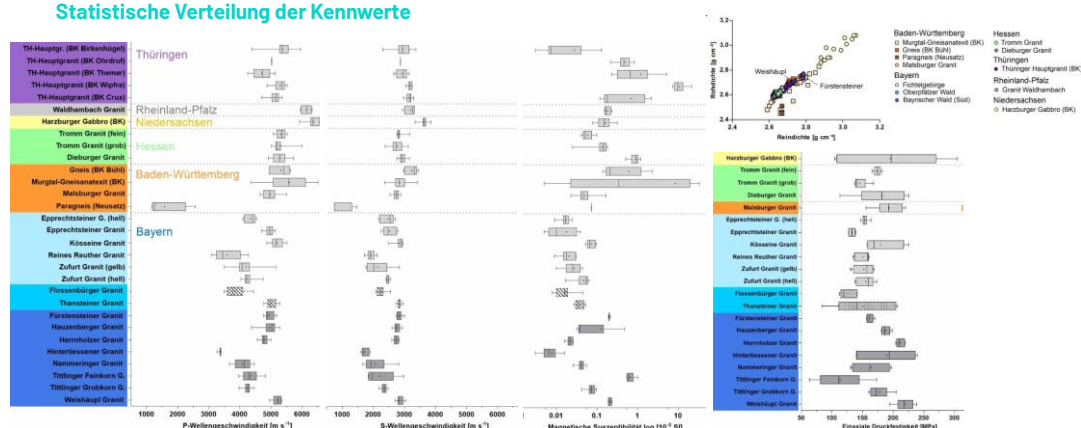
8

ATLAS DER MINERALOGISCHEN UND PETROPHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DEUTSCHER KRISTALLINER WIRTSGESTEINE



Weydt, L., Ramirez, A., Sass, I. (2024): Abschlussbericht für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „AMPEDEK“ im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

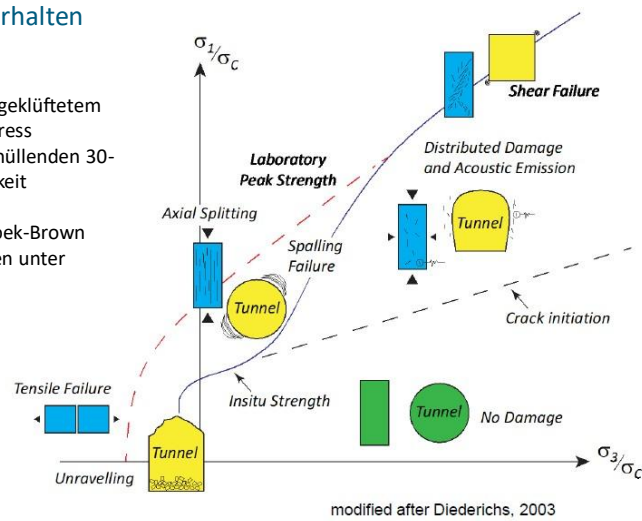
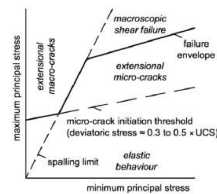
ATLAS DER MINERALOGISCHEN UND PETROPHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN
DEUTSCHER KRISTALLINER WIRTSGESTEINE
Statistische Verteilung der Kennwerte



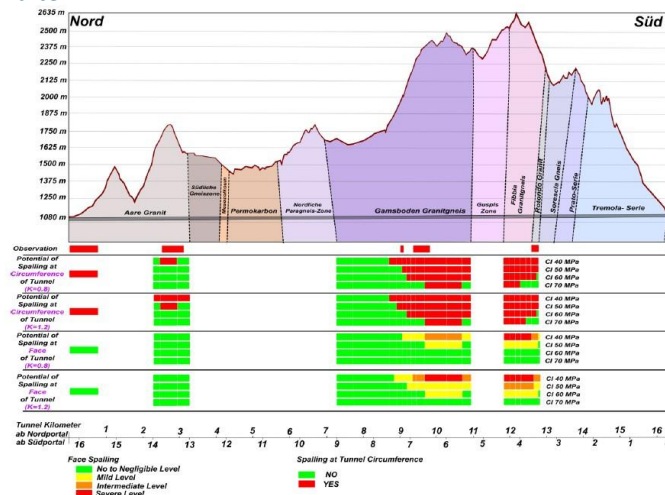
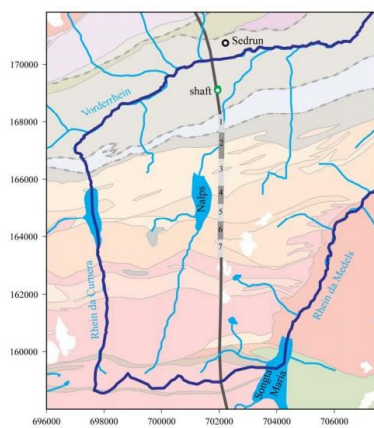
Weydt, L., Ramirez, A., Sass, I. (2024): Abschlussbericht für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „AMPEDEK“ im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE).

10

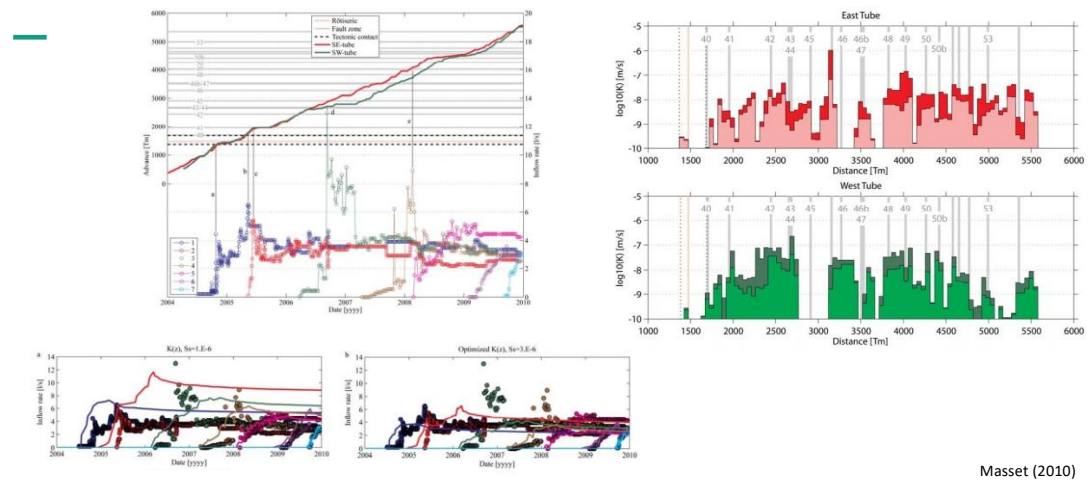
- Das Versagen von moderat bis intensiv geklüftetem Gestein beginnt, wenn der Tangentialstress (Maximumstress) an der Ausbruchsumhüllenden 30-50% der uniaxialen Kompressionsfestigkeit überschreitet (UCS).
- Konventionelle Mohr-Coulomb oder Hoek-Brown Kriterien sind nicht in spröden Gesteinen unter hohem Stress anwendbar.



modified after Diederichs, 2003



Vorhersagbarkeit von Gesteinsverhalten



Masset (2010)

Seite 13

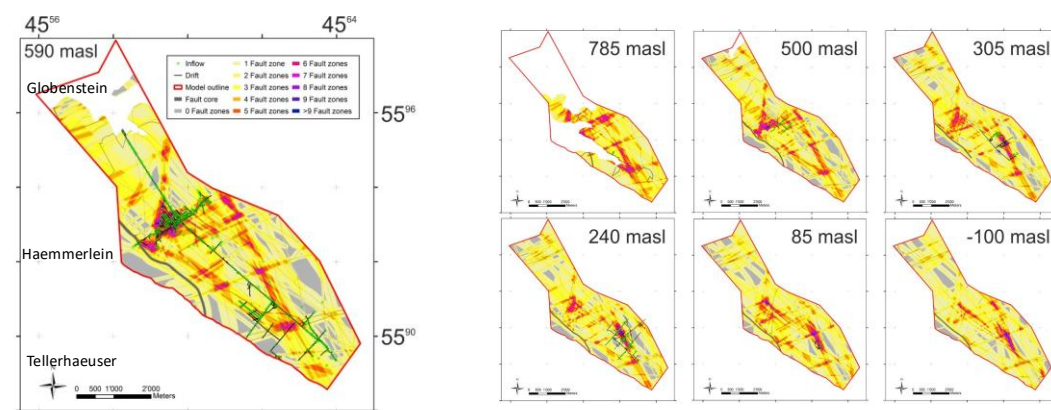
02.02.2026

2022 © Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

Fraunhofer
IEG

Korrelation der Zerlegung und des Zuflusses



Achtziger-Zupančič et al. (2016)

Seite 14

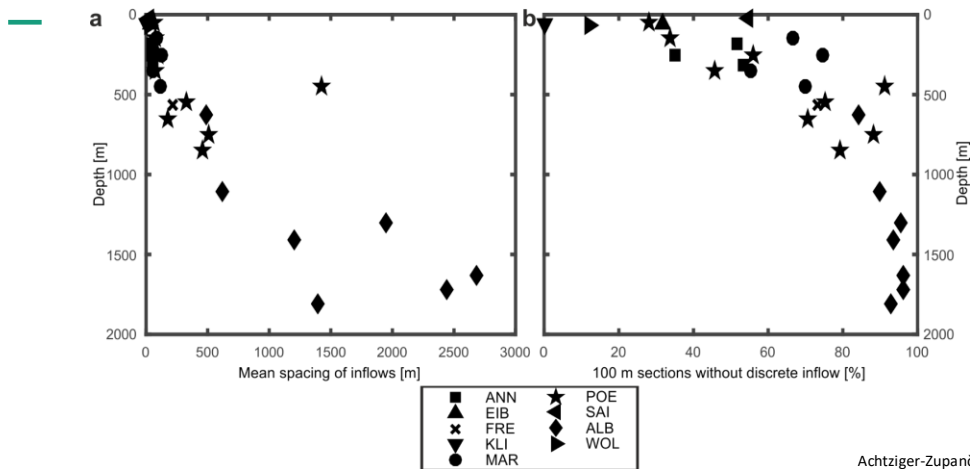
02.02.2026

© Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

Fraunhofer
IEG

Hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit – Einfluss der Matrix



Achtziger-Zupančič et al. (2017)

Seite 15

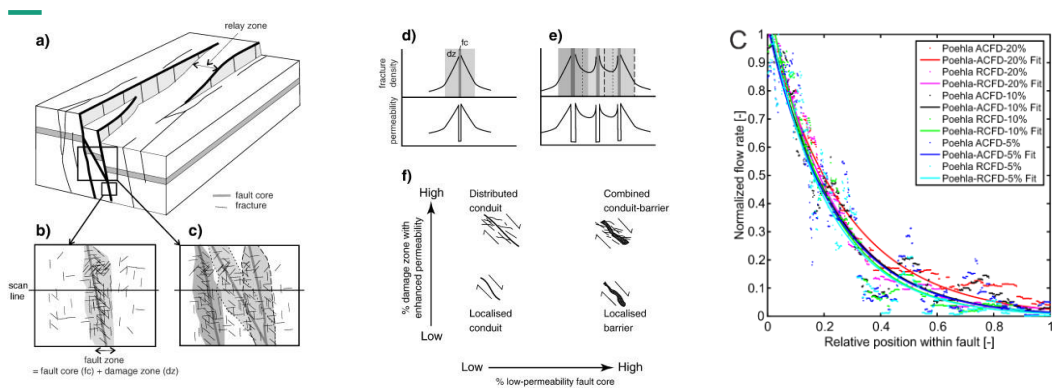
02.02.2026

© Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

Fraunhofer
IEG

Verteilung der Fließwege in Störungen



Bense et al. (2013)

Achtziger-Zupančič et al. (2016)

Seite 16

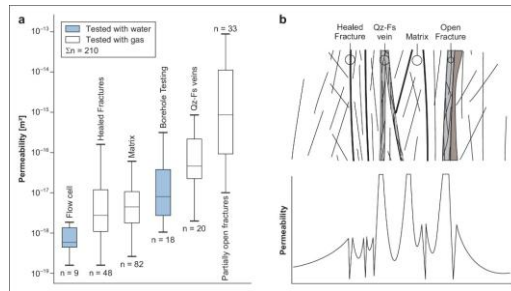
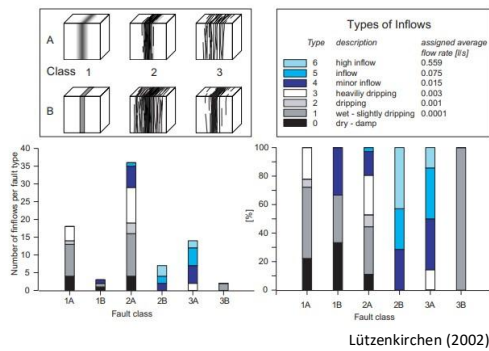
02.02.2026

© Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

Fraunhofer
IEG

Verteilung der Fließwege in Störungen



Seite 17

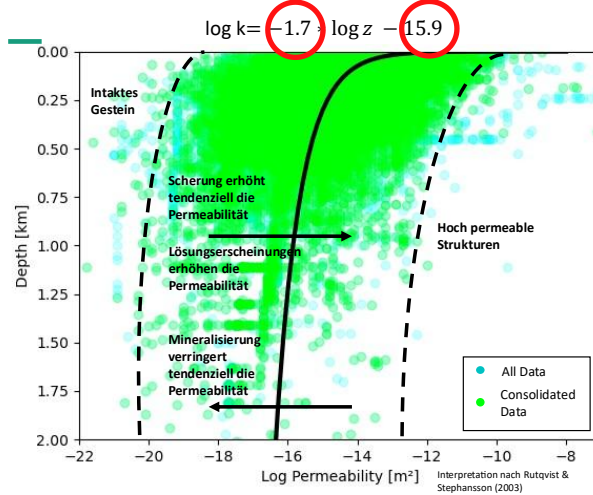
02.02.2026

© Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

Fraunhofer IEG

Globale Trends der Permeabilität im Kristallin



Vollständiger Datensatz: ~42'000
Konsolidierter Datensatz: ~31'000
nur in-situ hydraulische Messungen (keine Labordaten!)

Charakteristik:

- Permeabilität über 8 Magnituden in jeder Teufe
- Mittlere Reduktion der Permeabilität mit der Teufe resultiert aus Erhöhung der Spannungsmagnituden zurück

Seite 18

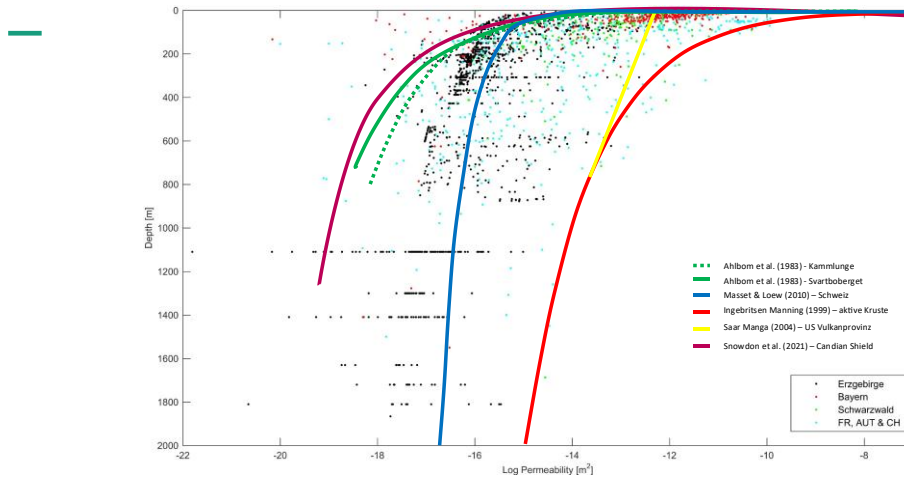
02.02.2026

© Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

Fraunhofer IEG

Regionale Trends der Permeabilität des Kristallins in Deutschland



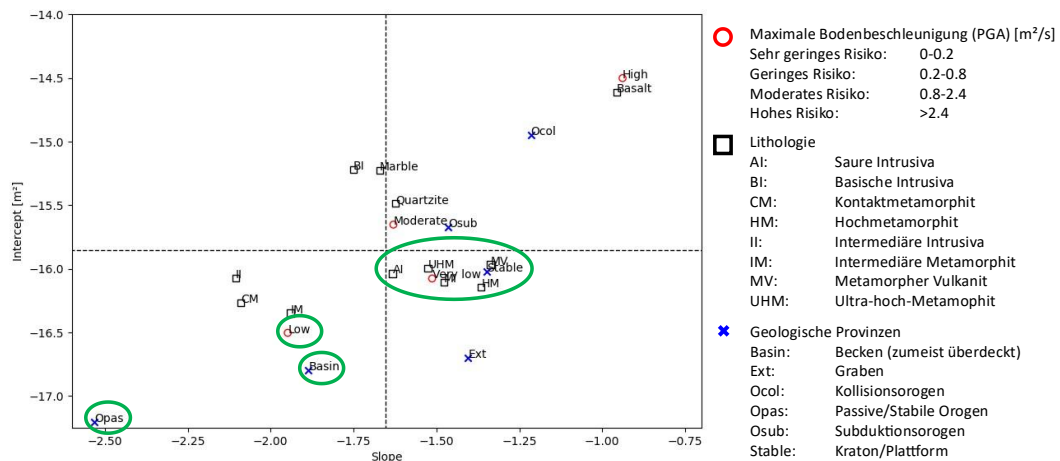
Seite 19

02.02.2026

© Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

Geologische Faktoren – Großräumige Faktoren



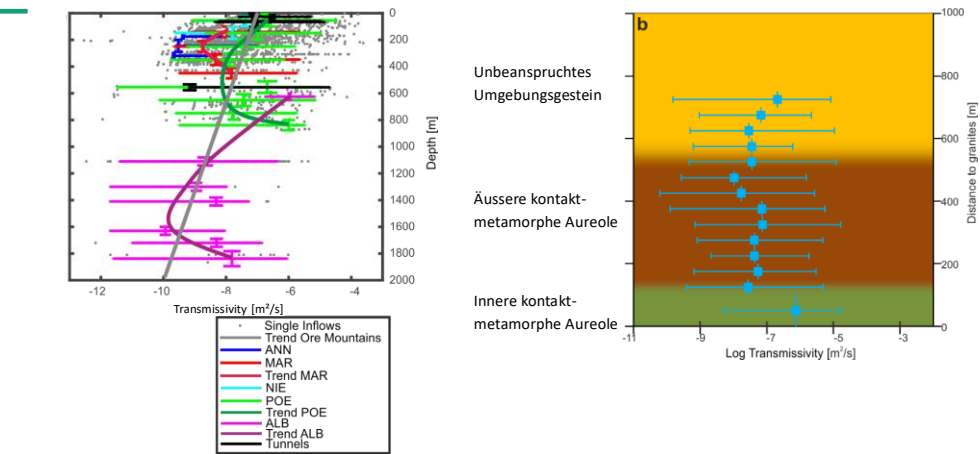
Seite 20

02.02.2026

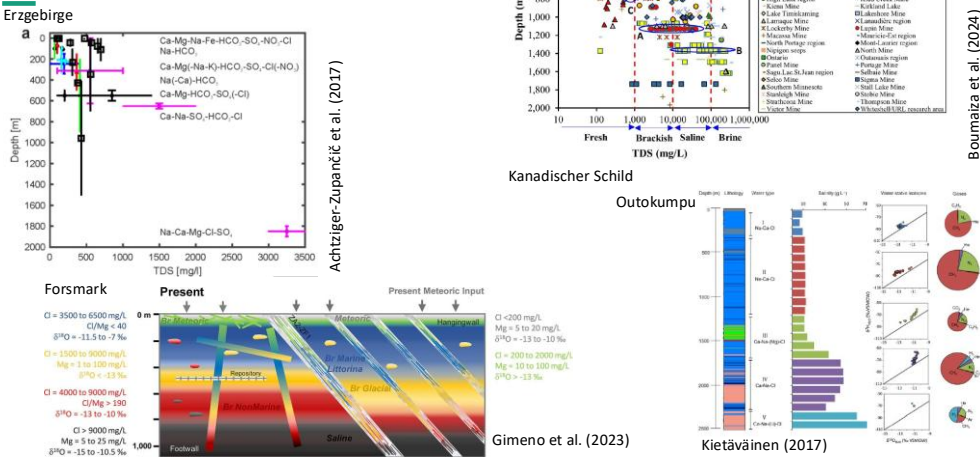
© Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

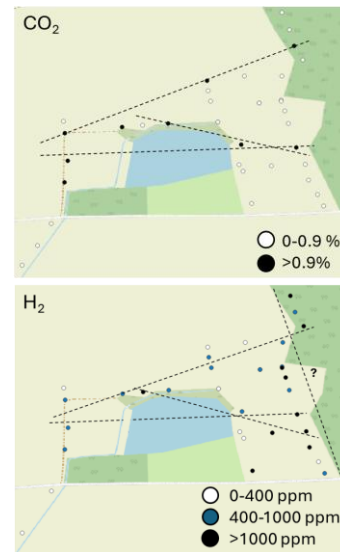
Geologische Faktoren - Kontaktmetamorphose



Hydro-Geochemie



Bodengasmessungen zur Strukturaufklärung



Seite 23

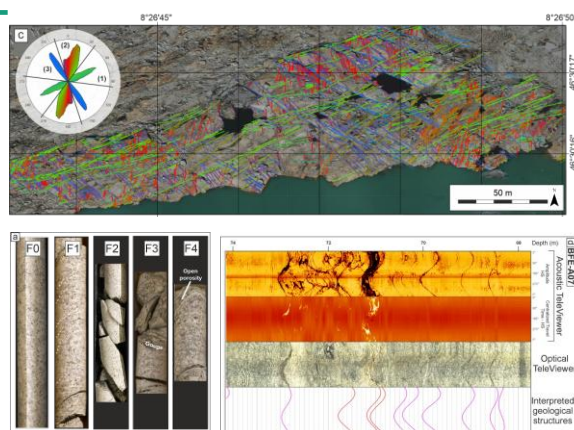
02.02.2026

© Fraunhofer IEG

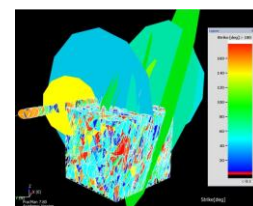
Kristallin allgemein

Fraunhofer
IEG

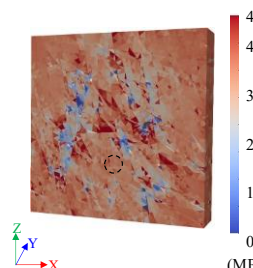
Extrapolierbarkeit des Strukturinventars



Achtziger-Zupančič et al. (2024)



Jordan (2019)



Xiaokun & Shakkas (2024)

Seite 24

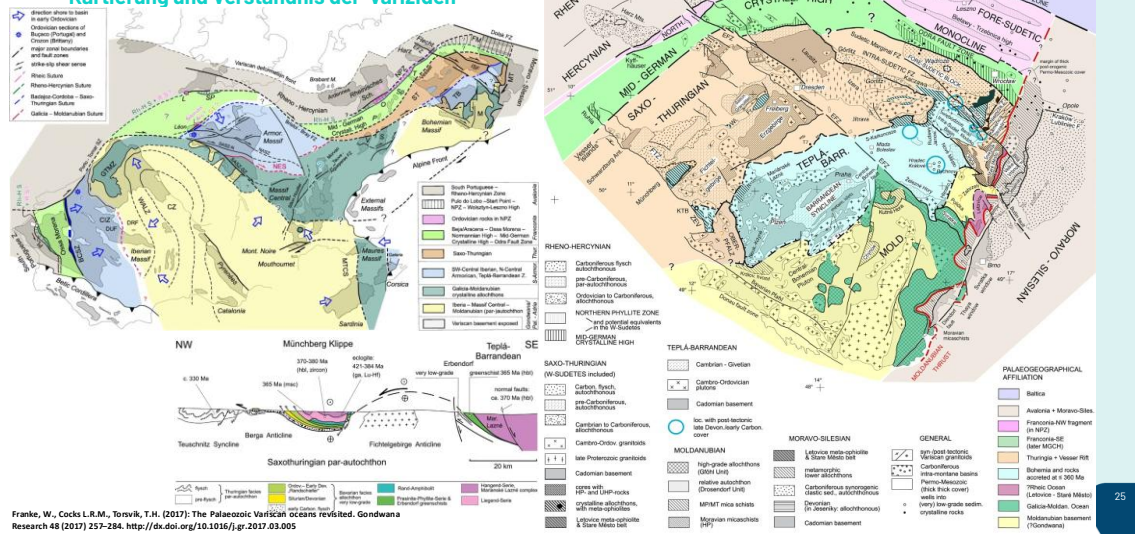
02.02.2026

© Fraunhofer IEG

Kristallin allgemein

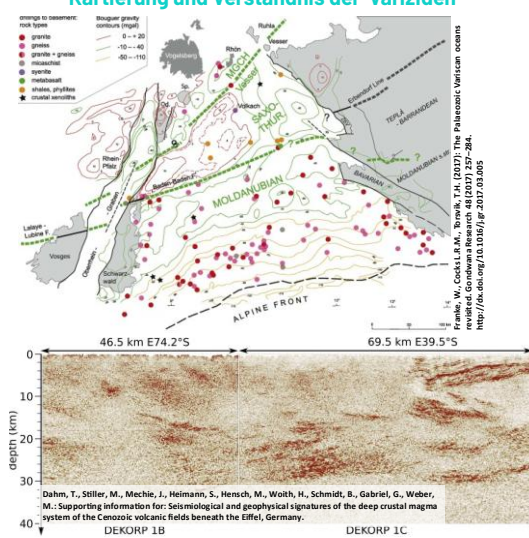
Fraunhofer
IEG

Kartierung und Verständnis der Variziden

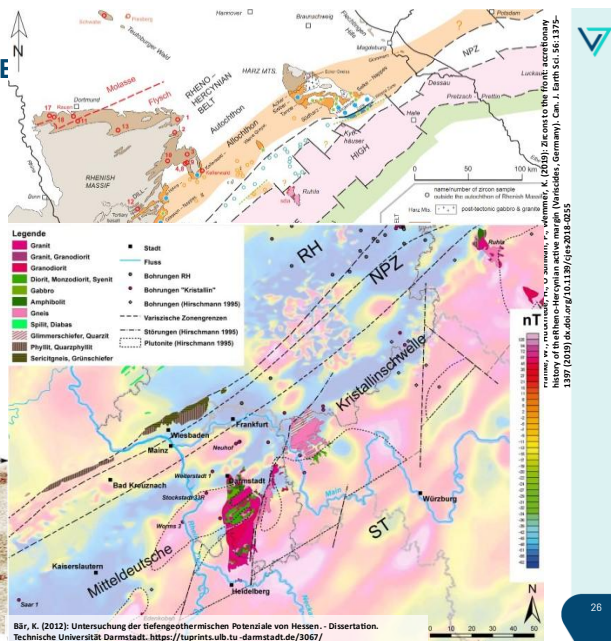


Franke, W., Cocks L.R.M., Torsvik, T.H. (2017): The Palaeozoic Variscan oceans revisited. *Gondwana Research* 48 (2017) 257–284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2017.03.005>

Kartierung und Verständnis der Variziden



Dahm, T., Stiller, M., Mechie, J., Heimann, S., Hensch, M., Woith, H., Schmidt, B., Gabriel, G., Weber, M.: Supporting information for: Seismological and geophysical signatures of the deep crustal magma system of the Cenozoic volcanic fields beneath the Eifel, Germany.



Bär, K. (2012): Untersuchung der tiefergeothermischen Potenziale von Hessen. - Dissertation Technische Universität Darmstadt. <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3067/>

26

EXPLORATION KRISTALLINER GESTEINE

Niedrige Kosten – Explorationsmethode mit hohem Gewinn als Ergänzung zu seismischen Daten

Gravimetrie kann helfen

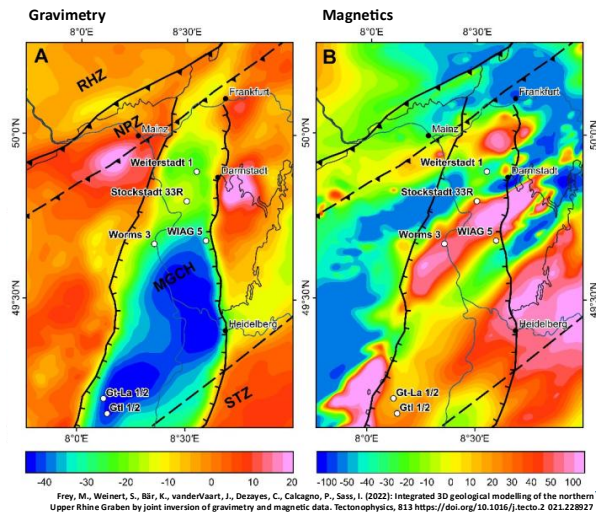
zur Abbildung der Dichteverteilung im Untergrund

Unterscheidung von Gesteinen mit geringer Porosität und hoher Porosität (Primär- oder Sekundärgestein)

Magnetik kann helfen

zur Abbildung der räumlichen Verteilung von Orientierung und Stärke des Magnetfeldes

magnetische Körper als vulkanisches oder plutonisches Gestein im Untergrund zu detektieren



27

EXPLORATION KRISTALLINER GESTEINE

Hohe Dichte an Eingangsdaten sind entscheidend

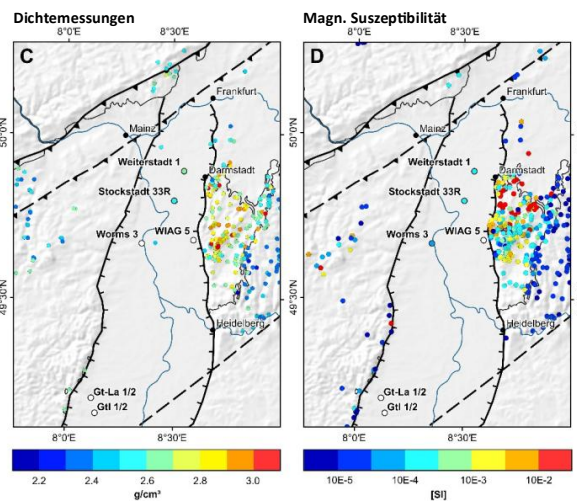
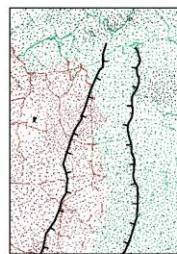
Dichte der Eingangsdaten

bestimmt die Qualität der Modelle

bestimmt die Differenzierung der lithologischen Kartierung

bestimmt die Sicherheit / Unsicherheit der Prognose

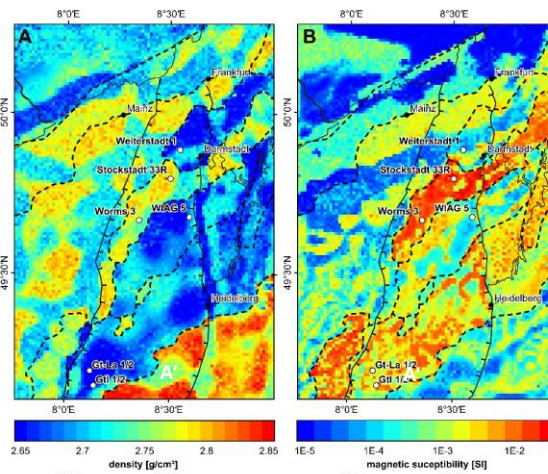
Gravimetrie



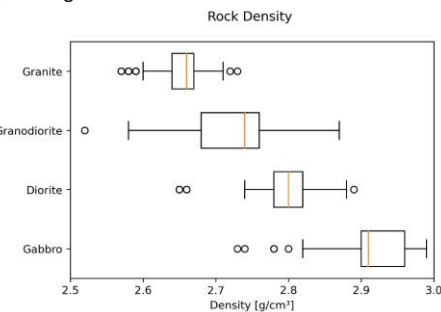
28

EXPLORATION KRISTALLINER GESTEINE

Petrophysikalische Eigenschaften lassen sich kartieren



- Invertierte Dichte/Suszeptibilität im Grundgebirge
- Erlaubt es verschiedene lithologische Einheiten anhand ihrer Eigenschaftsbereiche zu identifizieren

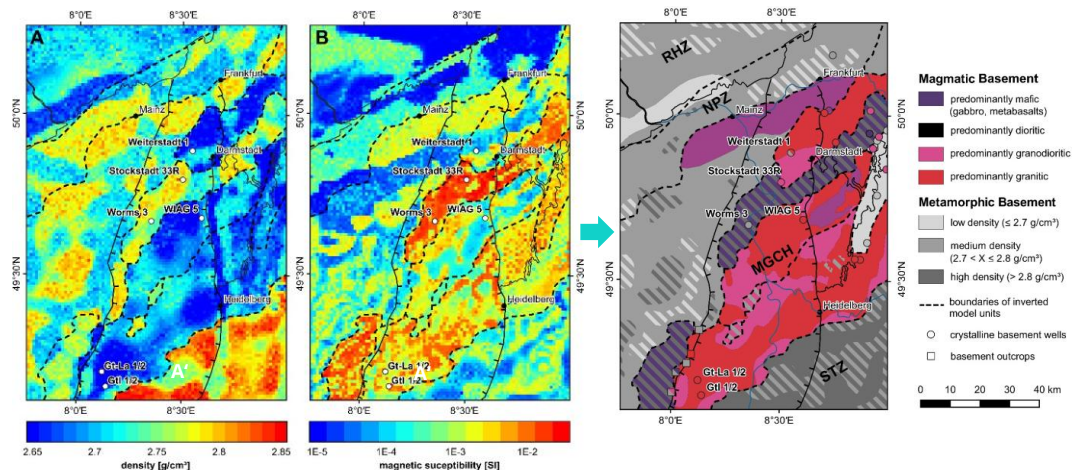


Frey, M., Weinert, S., Bär, K., vanderVaart, J., Dezayes, C., Calcagno, P., Sass, I. (2022): Integrated 3D geological modelling of the northern Upper Rhine Graben by joint inversion of gravimetry and magnetic data. *Tectonophysics*, 813 <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2.021.228927>

29

EXPLORATION KRISTALLINER GESTEINE

Mit Hilfe petrophysikalischer Eigenschaften zur Lithologie



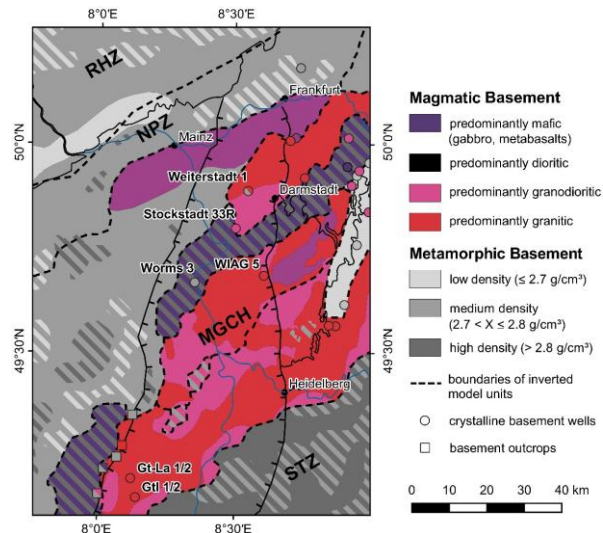
Frey, M., Weinert, S., Bär, K., vanderVaart, J., Dezayes, C., Calcagno, P., Sass, I. (2022): Integrated 3D geological modelling of the northern Upper Rhine Graben by joint inversion of gravimetry and magnetic data. *Tectonophysics*, 813 <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2.021.228927>

30

EXPLORATION KRISTALLINER GESTEINE

Interpretierte Geologie des Grundgebirges

- Die gemeinsame Inversion von Gravimetrie und Magnetik liefert das detaillierteste geologische Modell auf regionaler Skala
- Ergebnis durch Bohrungen und Aufschlüsse validiert
- Regionales Modell ist Grundlage für lokale Untersuchungen (z.B.):
- Kartierung von Dichte- und Magnetikunterschieden
- Kartierung von regionalen oder lokalen Störungen- oder lithologischen Kontakten
- zur Berechnung der radiogenen Wärmestromdichte,



Frey, M., Weinert, S., Bär, K., vanderVaart, J., Dezayes, C., Calcagno, P., Sass, I. (2022): Integrated 3D geological modelling of the northern Upper Rhine Graben by joint inversion of gravimetry and magnetic data. *Tectonophysics*, 813 <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228927>

31

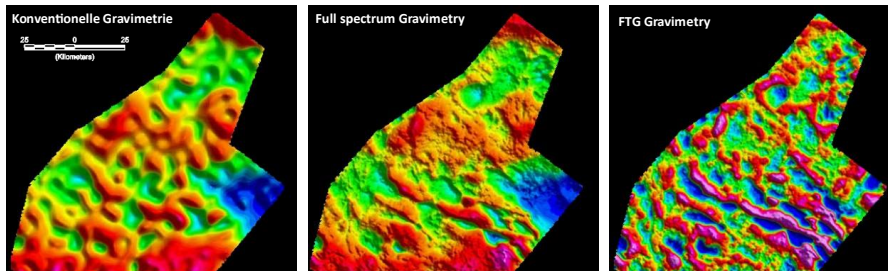
EXPLORATION KRISTALLINER GESTEINE

Vorteile aktueller Explorationsmethoden

- Regionale Datensätze des BGR oder LIAG haben eine zu geringe Auflösung
- Moderne flugzeuggestützte Gravimetrie-Gradiometrie und Magnetik zur Vorerkundung des Untergrundes (oder EM etc.)
- Ideale Methode zur Vorbereitung von 3D Seismik, Bodengaskartierungen etc.



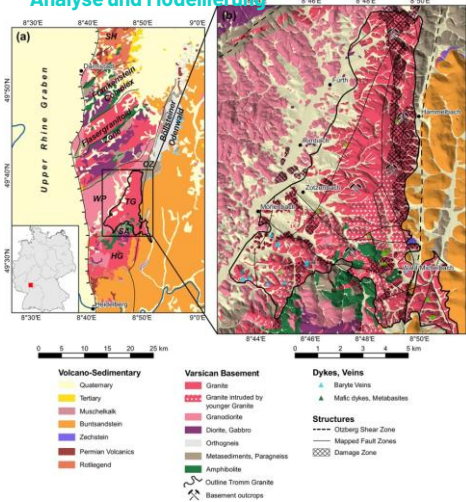
Gravimetrie – Stand der Technik



32

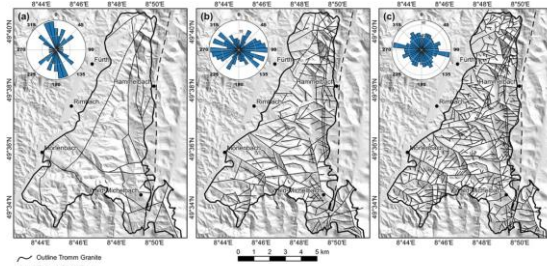
EXTRAPOLATION DES STRUKTURINVENTARS KRISTALLINER GESTEINE

Beispiel Vorerkundung GeoLab – Strukturinventar,
Analyse und Modellierung

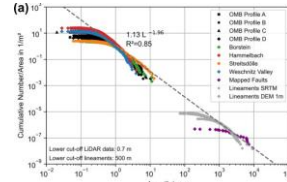


Frey, M., Bossennec, C., Seib, L., Bär, K., Schill, E., Sass, I. (2022): Interdisciplinary fracture network characterization in the crystalline basement: a case study from the Southern Odenwald, SW Germany. Solid Earth, 13, 935-955, 2022 <https://doi.org/10.5194/se-13-935-2022>

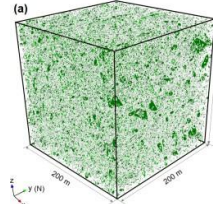
Lineamentanalyse



Normalisierte Längen-Häufigkeitsverteilung



DFN-Modell

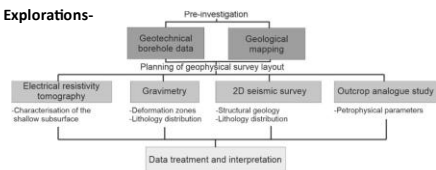


33

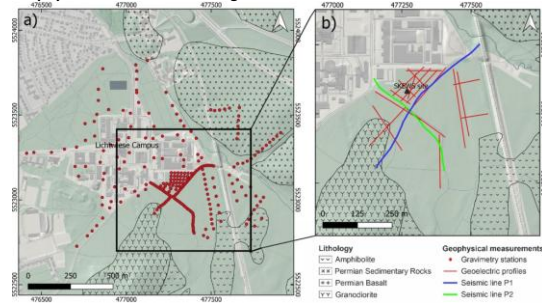
EXPLORATION KRISTALLINER GESTEINE

Standortspezifische Vorerkundungen – Multidisziplinäre Ansätze

Schema Explorations-
konzept

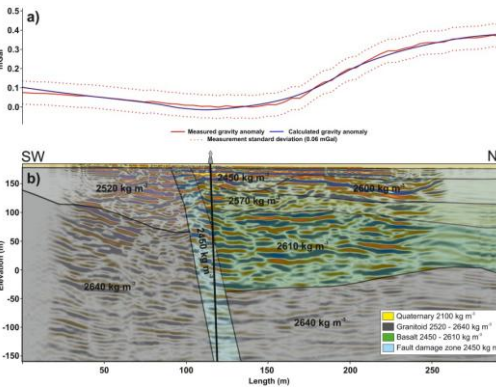


Geophysikalische Datenerhebung



Seib, L., Frey, M., Bossennec, C., Krusemark, M., Burschil, T., Buness, H., Weydt, L., Sass, I. (2024): Assessment of a medium-deep borehole thermal energy storage site in the crystalline basement: A case study of the demo site Lichwiese Campus, Darmstadt. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102913>

Kombination Gravimetrie-Seismik



34



Kontakt

Dr. Kristian Bär
Interim Vice President Subsurface
Director New Business & Exploration
Tel. +49 171 670 0248
kbaer@v-er.eu

Vulcan Energie Ressourcen GmbH
Amalienbadstraße 41, Bau 54,
76227 Karlsruhe
www.v-er.eu



Kontakt

Dr. Peter Achtziger-Zupančič
Competence Center for Geomechanics and Geohazards
Tel. +49 241 80 96780
peter.achtziger-zupancic@ieg.fraunhofer.de

Fraunhofer IEG
Lochnerstrasse 4-20
52056 Aachen
www.fraunhofer.de

A.2.2 Anforderungen an kristalline Wirtsgesteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Rühaak, Gottron, Bauer)



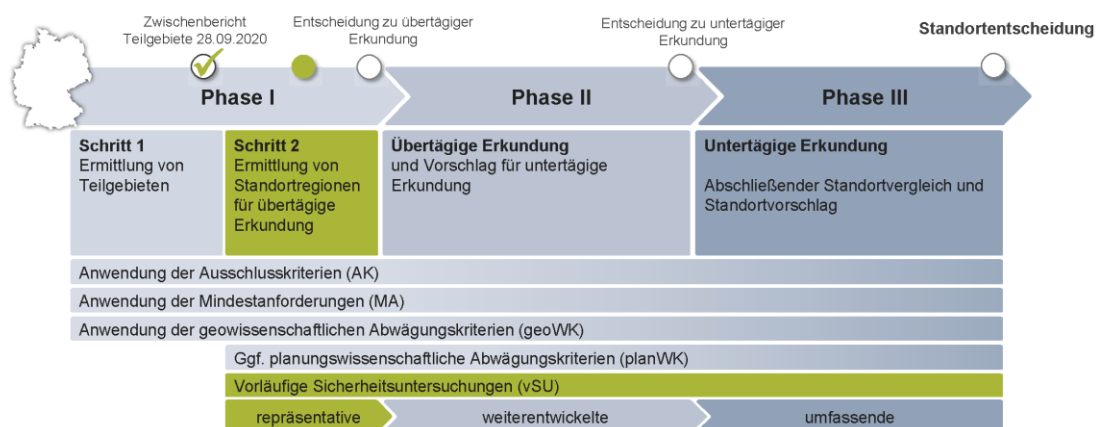
NATIONALER WORKSHOP: KRISTALLINGESTEIN ALS WIRTSGESTEIN FÜR EIN ENDLAGER FÜR HOCHRADIOAKTIVE ABFÄLLE

ANFORDERUNGEN AN KRISTALLINE WIRTSGESTEINE FÜR DIE ENDLAGERUNG HOCHRADIOAKTIVER ABFÄLLE

M. BAUER, E.-M. GOTTRON, W. RÜHAAK
Hannover, 24. Juni 2025

GZ: 50230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

STANDORTAUSWAHLVERFAHREN

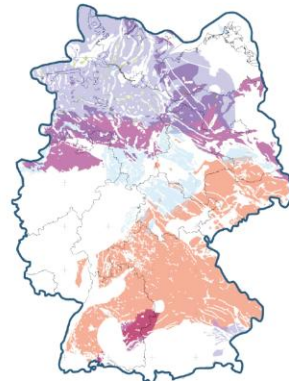


SCHRITT 1, PHASE I

Zwischenbericht Teilgebiete 28.09.2020



- 90 Teilgebiete ermittelt
→ 54 % der Landesfläche
- 7 im Kristallinen Wirtsgestein
 - 9 im Tongestein
 - 74 im Steinsalz



Tongestein
Kristallines Wirtsgestein
Steinsalz (steile Lagerung)
Steinsalz (stratiforme Lagerung)

SCHRITT 1, PHASE I

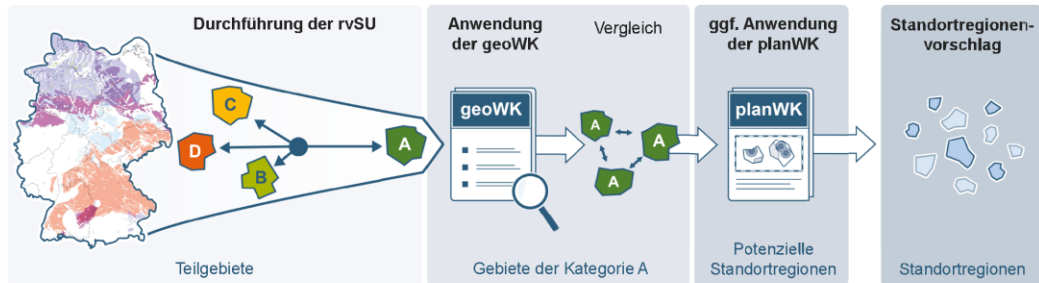
Teilgebiete (TG) im kristallinen Wirtsgestein

Stratigraphie	Anzahl TG
Rhenoharzynikum	2
Nördliche Phyllitzzone	1
Südliche Phyllitzzone	1
Mitteldeutsche Kristallinzone	1
Saxothuringikum	1
Moldanubikum	1



SCHRITT 2, PHASE I

Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten



Quelle: BGE

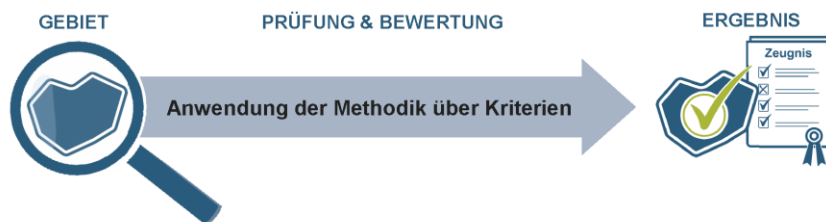
- Aktuell erfolgt Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU)
- Übermittlung Standortregionenvorschlag ans BASE geplant für Ende 2027

5 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

DURCHFÜHRUNG DER rvSU

Herausforderungen bei der Ermittlung von Standortregionen



- **Ziel** ist die vergleichsweise geeignetsten Gebiete zu identifizieren um im Ergebnis den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu ermitteln.
- **Einengung** der Gebiete ist wichtiger Bestandteil der rvSU.
- **Die Einbindung von Forschungs- und Entwicklung** ist wichtige Grundlage für die Sicherheitsanalysen.

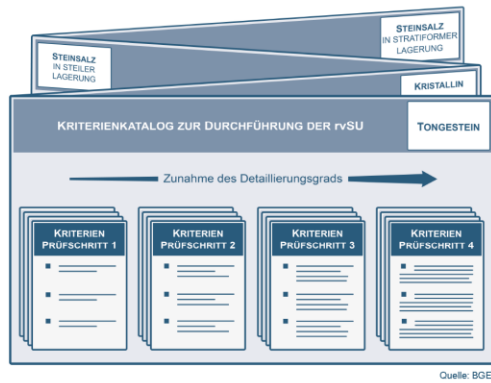
6 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

Quelle: BGE

DURCHFÜHRUNG DER rvSU (1/2)

Kriterienbasierter Ansatz zur Bewertung der Gebiete



Die Kriterien werden **zunehmend detaillierter**
„die Hürde wird höher“

Kriterienkatalog

- **Kriterien** zur Durchführung jedes Prüfschritts sind festgeschrieben im **Kriterienkatalog**
- ermöglicht **systematische Prüfung** und Bewertung jedes Gebiets
- die Bewertungen werden **für jedes Gebiet** durchgeführt und dokumentiert

7 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 1391663

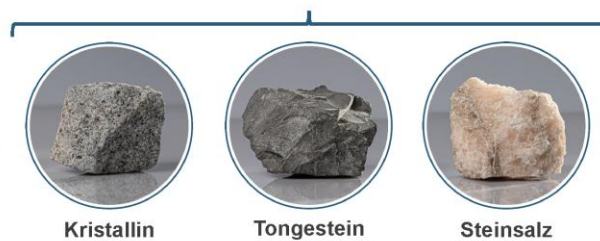
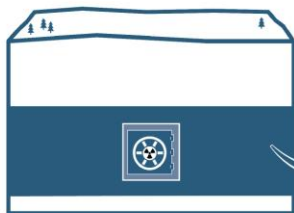
DURCHFÜHRUNG DER rvSU (2/2)

Kriterienbasierter Ansatz zur Bewertung der Gebiete

Bewertung der Sicherheit des
Endlagerstandorts

=

insb. Bewertung der sicherheitsrelevanten Aspekte
jedes der Wirtsgesteine



Individuelle Herausforderungen
und sicherheitsrelevante Aspekte

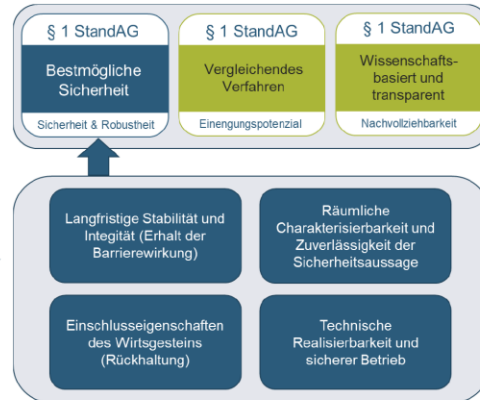
8 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 1391663

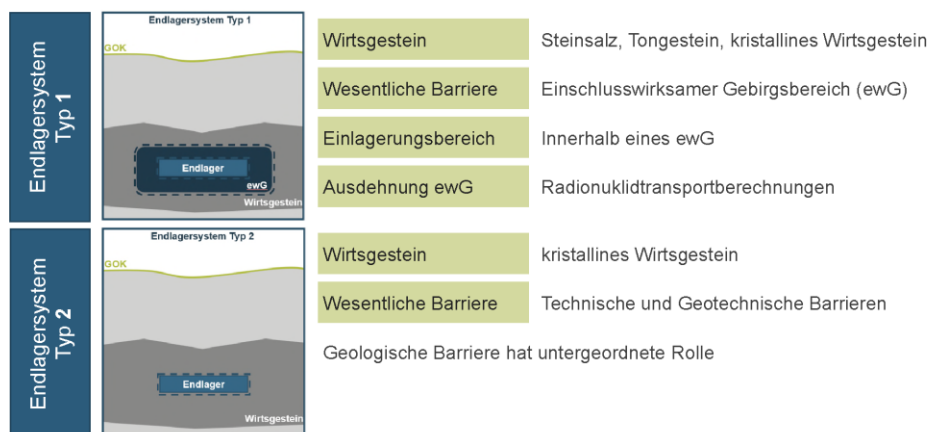
Quelle: BGE

VORLÄUFIGES SICHERHEITSKONZEPT

- Die Konzentration und der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre wird durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen gewährleistet.
- Hauptsicherheitsfunktionen für den Bewertungszeitraum:
 - Integrität des Barriersystems und
 - Rückhaltung von Radionukliden.



SONDERFALL KRISTALLIN – ZWEI MÖGLICHE ENDLAGERSYSTEMTYPEN



VORLÄUFIGES SICHERHEITSKONZEPT FÜR DAS KRISTALLINE WIRTSGESTEIN IN DEN rvSU



- Es wurden vorläufige Sicherheitskonzepte für Typ 1 und Typ 2 entwickelt, für die vorläufige Endlagerauslegung wird das Endlagersystem Typ 2 als abdeckend zugrunde gelegt (ebenso für das Projekt ELBRock).
- Für die Gebietsbewertungen in Schritt 2 Phase I wird das Endlagersystem Typ 1 zugrunde gelegt sowie für die erneute Anwendung der geoWK und den Vergleich der Kategorie-A-Gebiete. Eine Differenzierung hinsichtlich eines sogenannten multiplen ewG erfolgt nicht.
- Ein Endlagersystem Typ 2 ist nach Einschätzung der BGE sowohl aus naturwissenschaftlich-fachlicher als auch aus rechtlicher Perspektive nachrangig gegenüber einem Endlagersystem Typ 1. Das Endlagersystem Typ 1 bietet aus Sicht der BGE grundsätzlich eine größere Sicherheit und Robustheit.
- Aus Sicht der BGE kann die Einhaltung der regulatorischen Sicherheitsanforderungen bezüglich der Konzentration und des sicheren Einschlusses nicht mittels eines überlagernden ewG Konzepts (AkEnd 2002, K-Drs. 268) gewährleistet werden.

11 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025W6 | Objekt-ID: 13916663

SICHERHEITSANFORDERUNGEN AN DAS KRISTALLINE WIRTSGESTEIN FÜR DIE rvSU



Auszug aus den regulatorischen Vorgaben (StandAG und EndISiAnfV)

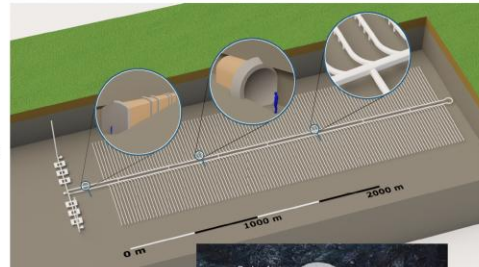
1. Mindestanforderungen, u. a.: Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s, 100 m Mächtigkeit, minimale Teufe von mind. 300 m unter GOK
 2. Geowissenschaftliche Abwägungskriterien – „günstige“ Bewertung, u. a.: k_f weniger als 10^{-12} m/s, effektiver Diffusionskoeffizient für HTO bei 25 °C weniger als 10^{-11} m²/s, Mächtigkeit mehr als 300 m, Teufe mehr als 500 m unter GOK
 3. Einhaltung der Grenzwerte für den Massen- und Stoffmengenaustrag: insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9} sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren
- Da das kristalline Wirtsgestein selbst keine Selbstabdichtungseigenschaften aufweist, resultieren hohe Anforderungen an die geotechnischen und technischen Barrieren.

12 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025W6 | Objekt-ID: 13916663

VORLÄUFIGE ENDLAGERAUSLEGUNG

- Art der Einlagerung: vertikale Bohrlochlagerung (analog SKB/Posiva)
- Behälterkonzept: in Anlehnung an KBS-3-Konzept (skaliert auf Dimensionen insb. Längen der Abfälle in Deutschland)
- Verfüll- und Verschlusskonzepte: in Anlehnung an Posiva und CHRISTA-II
- Flächenberechnung des Endlagers auf Basis
 - Infrastrukturflächenbedarf
 - gebirgsmechanischer Auslegung
 - thermischer Auslegung

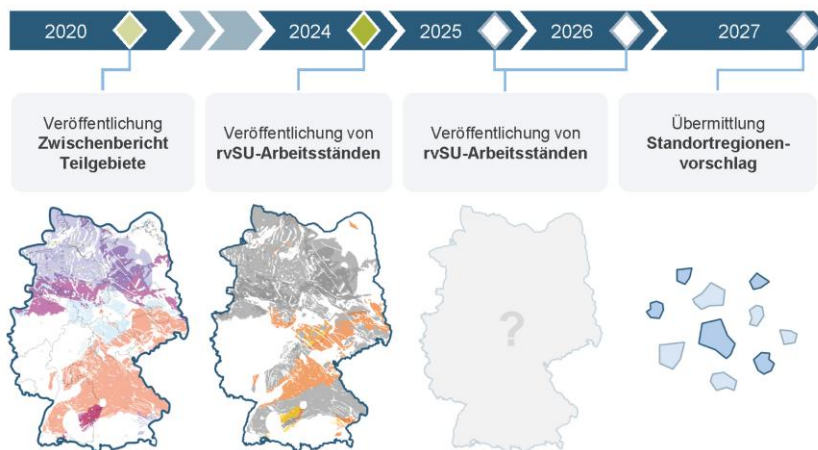


Quelle: BGE



Quelle: Posiva Oy 2021

VERÖFFENTLICHUNG ARBEITSSTÄNDE STANDORTSUCHE



DER WEG ZU DEN STANDORTREGIONEN

Veröffentlichung Arbeitsstände 2024

BGE Endlagersuche Navigator

Teilgebiete kristallines Wirtsgestein (von Norden nach Süden)

- Rhenoharzynikum (TG 012_01 und TG 012_02)
- Mitteldeutsche Kristallinzone (TG 010)
- Nördliche und Südliche Phyllitzone (TG 014 und TG 011)
- Saxothuringikum (TG 009)
- Moldanubikum (TG 013)

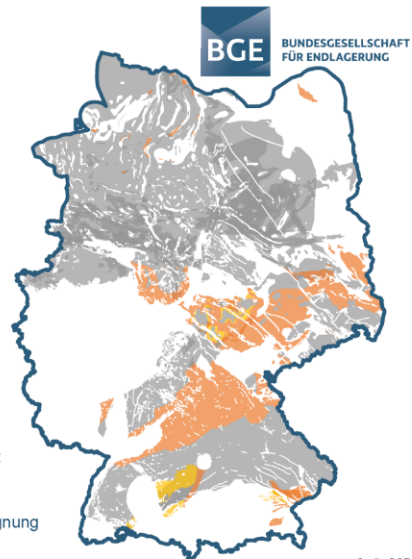
Kategorie-D-Gebiete = 37 % der Gesamtfläche aller kristalliner Teilgebiete

Prüfschritt 1

Kategorie D = ungeeignet

Prüfschritt 2

Kategorie C = geringe Eignung



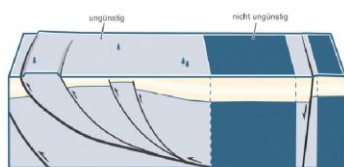
15 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

62: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

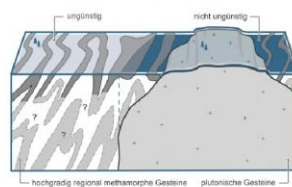
Quelle: BGE

rvSU-KRITERIEN KRISTALLINES WIRTSGESTEIN

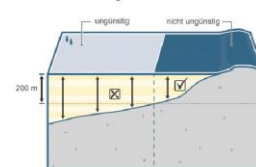
Ungünstige tektonische Gesamtsituation



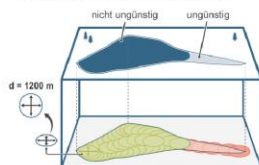
Ungünstige räumliche Charakterisierbarkeit kristalliner Wirtsgesteinskomplexe



Ungünstige räumliche Charakterisierbarkeit durch mächtige sedimentäre Überdeckung



Ungünstige Geometrie des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion – Mindestbreite



Fläche des Endlagers



16 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

62: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

Quelle: BGE

**VIelen DANK FÜR IHRE AUfMERKsAMKEIT!
SIE WOLLEN NOCH EINMAL NACHLESEN?**



[Zwischenbericht Teilgebiete mit allen Unterlagen und Anlagen](#)

[Interaktive Karte mit allen Teilgebieten und den ausgeschlossenen Gebieten](#)

[Interaktive Einführung zur Erstellung des Zwischenberichts](#)

[Steckbriefe für die Gebiete zur Methodenentwicklung](#)

[Arbeitsstand Methodik repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen](#)

[NBG-Gutachten zur Methodenentwicklung](#)

[Arbeitsstand Methodik Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien](#)

[Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten](#)

[Stellungnahmen und fachliche Einordnungen der BGE](#)

[Ihre Fragen und unsere Antworten](#)

[BGE Endlagersuche Navigator](#)

17 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

Quelle: BGE

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

ABKÜRZUNGEN



AK	Ausschlusskriterien
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
CHRISTA-II	Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland
ELBRock	Entwicklung von Endlagerbehälterkonzepten für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
geoWK	geowissenschaftliche Abwägungskriterien
GOK	Geländeoberkante
HTO	Tritiumoxid, tritiiertes Wasser
MA	Mindestanforderungen
planWK	planungswissenschaftliche Abwägungskriterien
Posiva	Posiva Oy Olkiluoto
rvSU	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
TG	Teilgebiet
vsU	vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

18 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

LITERATUR



- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). Köln
- EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)
- K-Drs. 268: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Berlin, 5. Juli 2016
- Posiva Oy (2021): Safety Case for the Operating Licence Application - Synthesis (SYN). Posiva Report 2021-01. Posiva Oy. Eurajoki
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

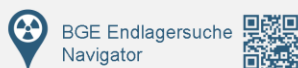
19 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: S06230/111-341-2025W6 | Objekt-ID: 13910663



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

www.bge.de
www.einblicke.de



A.2.3 Behälter für radioaktive Abfälle im Kristallingestein (Gawletta)

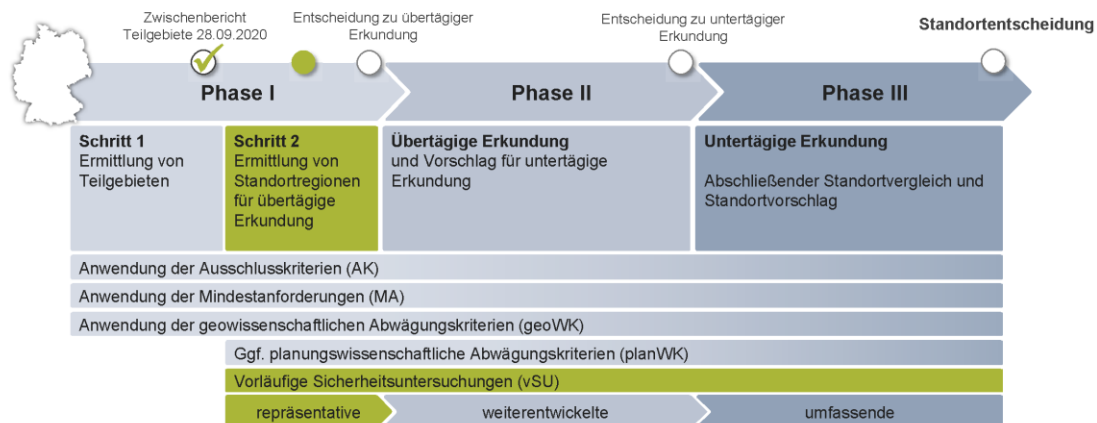
**NATIONALER WORKSHOP: KRISTALLINGESTEIN
ALS WIRTSGESTEIN FÜR EIN ENDLAGER FÜR
HOCHRADIOAKTIVE ABFÄLLE**

**ANFORDERUNGEN AN KRISTALLINE WIRTSGESTEINE FÜR DIE
ENDLAGERUNG HOCHRADIOAKTIVER ABFÄLLE**

M. BAUER, E.-M. GOTTRON, W. RÜHAAK
Hannover, 24. Juni 2025

GZ: 500230/111-3/41-2025/6 | Obstd-ID: 1391663

STANDORTAUSWAHLVERFAHREN

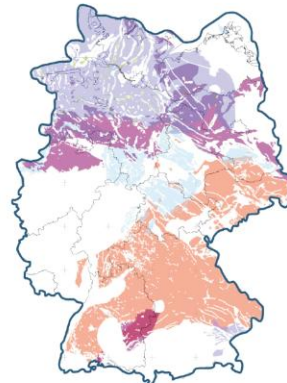


SCHRITT 1, PHASE I

Zwischenbericht Teilgebiete 28.09.2020



- 90 Teilgebiete ermittelt
→ 54 % der Landesfläche
- 7 im Kristallinen Wirtsgestein
 - 9 im Tongestein
 - 74 im Steinsalz



Tongestein
Kristallines Wirtsgestein
Steinsalz (steile Lagerung)
Steinsalz (stratiforme Lagerung)

SCHRITT 1, PHASE I

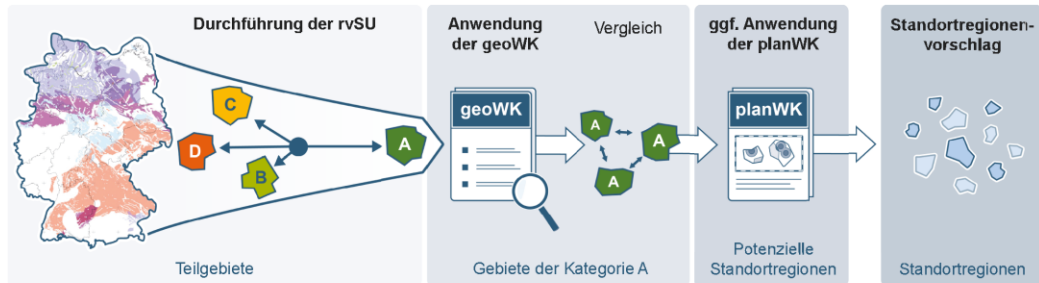
Teilgebiete (TG) im kristallinen Wirtsgestein

Stratigraphie	Anzahl TG
Rhenoharzynikum	2
Nördliche Phyllitzone	1
Südliche Phyllitzone	1
Mitteldeutsche Kristallinzone	1
Saxothuringikum	1
Moldanubikum	1



SCHRITT 2, PHASE I

Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten



Quelle: BGE

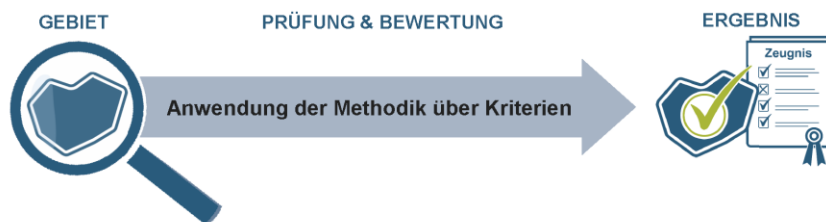
- Aktuell erfolgt Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU)
- Übermittlung Standortregionenvorschlag ans BASE geplant für Ende 2027

5 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

DURCHFÜHRUNG DER rvSU

Herausforderungen bei der Ermittlung von Standortregionen



- **Ziel** ist die vergleichsweise geeignetsten Gebiete zu identifizieren um im Ergebnis den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu ermitteln.
- **Einengung** der Gebiete ist wichtiger Bestandteil der rvSU.
- **Die Einbindung von Forschungs- und Entwicklung** ist wichtige Grundlage für die Sicherheitsanalysen.

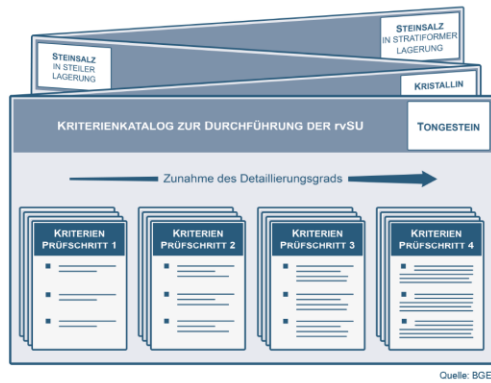
6 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

Quelle: BGE

DURCHFÜHRUNG DER rvSU (1/2)

Kriterienbasierter Ansatz zur Bewertung der Gebiete



Die Kriterien werden **zunehmend detaillierter**
„die Hürde wird höher“

Kriterienkatalog

- **Kriterien** zur Durchführung jedes Prüfschritts sind festgeschrieben im **Kriterienkatalog**
- ermöglicht **systematische Prüfung** und Bewertung jedes Gebiets
- die Bewertungen werden **für jedes Gebiet** durchgeführt und dokumentiert

7 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 1391663

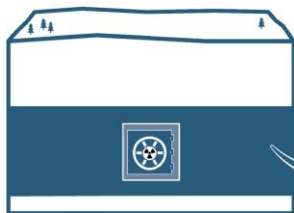
DURCHFÜHRUNG DER rvSU (2/2)

Kriterienbasierter Ansatz zur Bewertung der Gebiete

Bewertung der Sicherheit des
Endlagerstandorts

=

insb. Bewertung der sicherheitsrelevanten Aspekte
jedes der Wirtsgesteine

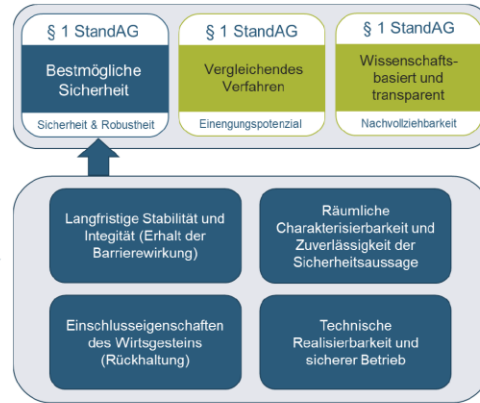


8 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

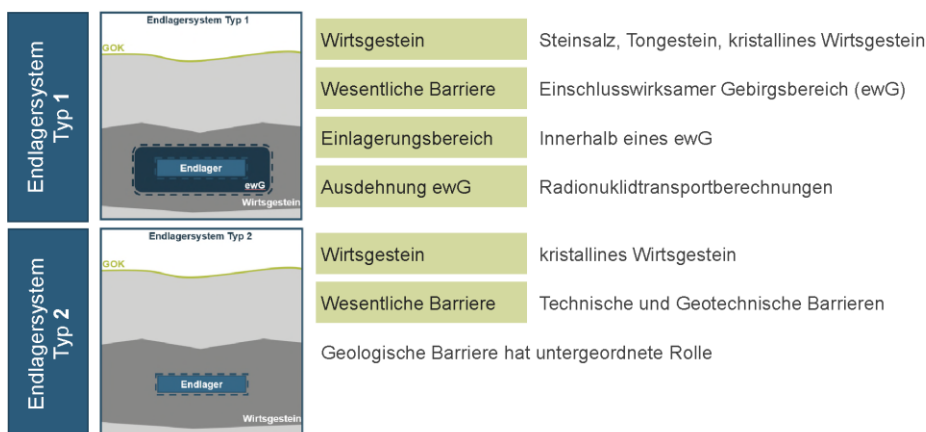
GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 1391663

VORLÄUFIGES SICHERHEITSKONZEPT

- Die Konzentration und der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre wird durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen gewährleistet.
- Hauptsicherheitsfunktionen für den Bewertungszeitraum:
 - Integrität des Barriersystems und
 - Rückhaltung von Radionukliden.



SONDERFALL KRISTALLIN – ZWEI MÖGLICHE ENDLAGERSYSTEMTYPEN



VORLÄUFIGES SICHERHEITSKONZEPT FÜR DAS KRISTALLINE WIRTSGESTEIN IN DEN rvSU



- Es wurden vorläufige Sicherheitskonzepte für Typ 1 und Typ 2 entwickelt, für die vorläufige Endlagerauslegung wird das Endlagersystem Typ 2 als abdeckend zugrunde gelegt (ebenso für das Projekt ELBRock).
- Für die Gebietsbewertungen in Schritt 2 Phase I wird das Endlagersystem Typ 1 zugrunde gelegt sowie für die erneute Anwendung der geoWK und den Vergleich der Kategorie-A-Gebiete. Eine Differenzierung hinsichtlich eines sogenannten multiplen ewG erfolgt nicht.
- Ein Endlagersystem Typ 2 ist nach Einschätzung der BGE sowohl aus naturwissenschaftlich-fachlicher als auch aus rechtlicher Perspektive nachrangig gegenüber einem Endlagersystem Typ 1. Das Endlagersystem Typ 1 bietet aus Sicht der BGE grundsätzlich eine größere Sicherheit und Robustheit.
- Aus Sicht der BGE kann die Einhaltung der regulatorischen Sicherheitsanforderungen bezüglich der Konzentration und des sicheren Einschlusses nicht mittels eines überlagernden ewG Konzepts (AkEnd 2002, K-Drs. 268) gewährleistet werden.

11 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025
GZ: SG0230/111-3/41-2025W6 | Objekt-ID: 13916663

SICHERHEITSANFORDERUNGEN AN DAS KRISTALLINE WIRTSGESTEIN FÜR DIE rvSU



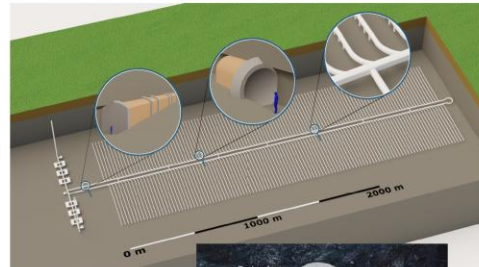
Auszug aus den regulatorischen Vorgaben (StandAG und EndISiAnfV)

1. Mindestanforderungen, u. a.: Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s, 100 m Mächtigkeit, minimale Teufe von mind. 300 m unter GOK
 2. Geowissenschaftliche Abwägungskriterien – „günstige“ Bewertung, u. a.: k_f weniger als 10^{-12} m/s, effektiver Diffusionskoeffizient für HTO bei 25 °C weniger als 10^{-11} m²/s, Mächtigkeit mehr als 300 m, Teufe mehr als 500 m unter GOK
 3. Einhaltung der Grenzwerte für den Massen- und Stoffmengenaustrag: insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9} sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren
- Da das kristalline Wirtsgestein selbst keine Selbstabdichtungseigenschaften aufweist, resultieren hohe Anforderungen an die geotechnischen und technischen Barrieren.

12 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025
GZ: SG0230/111-3/41-2025W6 | Objekt-ID: 13916663

VORLÄUFIGE ENDLAGERAUSLEGUNG

- Art der Einlagerung: vertikale Bohrlochlagerung (analog SKB/Posiva)
- Behälterkonzept: in Anlehnung an KBS-3-Konzept (skaliert auf Dimensionen insb. Längen der Abfälle in Deutschland)
- Verfüll- und Verschlusskonzepte: in Anlehnung an Posiva und CHRISTA-II
- Flächenberechnung des Endlagers auf Basis
 - Infrastrukturflächenbedarf
 - gebirgsmechanischer Auslegung
 - thermischer Auslegung

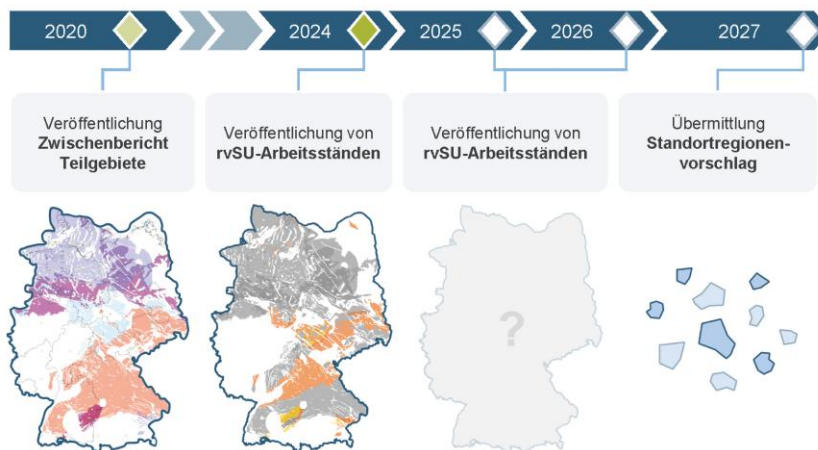


Quelle: BGE



Quelle: Posiva Oy 2021

VERÖFFENTLICHUNG ARBEITSSTÄNDE STANDORTSUCHE



DER WEG ZU DEN STANDORTREGIONEN

Veröffentlichung Arbeitsstände 2024

BGE Endlagersuche Navigator

Teilgebiete kristallines Wirtsgestein (von Norden nach Süden)

- Rhenoharzynikum (TG 012_01 und TG 012_02)
- Mitteldeutsche Kristallinzone (TG 010)
- Nördliche und Südliche Phyllitzone (TG 014 und TG 011)
- Saxothuringikum (TG 009)
- Moldanubikum (TG 013)

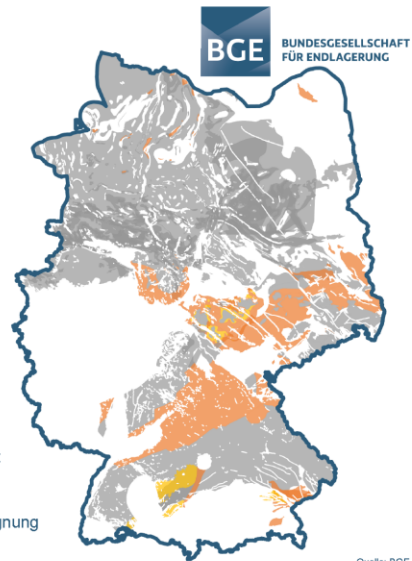
Kategorie-D-Gebiete = 37 % der Gesamtfläche aller kristalliner Teilgebiete

Prüfschritt 1

Kategorie D = ungeeignet

Prüfschritt 2

Kategorie C = geringe Eignung



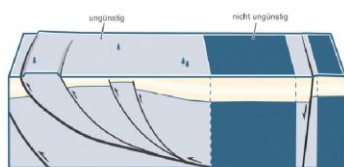
15 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

62: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 1391663

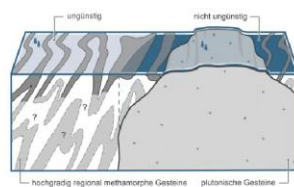
Quelle: BGE

rvSU-KRITERIEN KRISTALLINES WIRTSGESTEIN

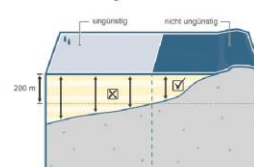
Ungünstige tektonische Gesamtsituation



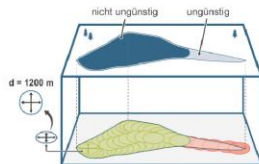
Ungünstige räumliche Charakterisierbarkeit kristalliner Wirtsgesteinskomplexe



Ungünstige räumliche Charakterisierbarkeit durch mächtige sedimentäre Überdeckung



Ungünstige Geometrie des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion – Mindestbreite



Fläche des Endlagers



16 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

62: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 1391663

Quelle: BGE

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT! SIE WOLLEN NOCH EINMAL NACHLESEN?



[Zwischenbericht Teilgebiete mit allen Unterlagen und Anlagen](#)

[Interaktive Karte mit allen Teilgebieten und den ausgeschlossenen Gebieten](#)

[Interaktive Einführung zur Erstellung des Zwischenberichts](#)

[Steckbriefe für die Gebiete zur Methodenentwicklung](#)

[Arbeitsstand Methodik repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen](#)

[NBG-Gutachten zur Methodenentwicklung](#)

[Arbeitsstand Methodik Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien](#)

[Vorgehen zur Ermittlung von Standortregionen aus den Teilgebieten](#)

[Stellungnahmen und fachliche Einordnungen der BGE](#)

[Ihre Fragen und unsere Antworten](#)

[BGE Endlagersuche Navigator](#)

17 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

Quelle: BGE

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

ABKÜRZUNGEN



AK	Ausschlusskriterien
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
CHRISTA-II	Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland
ELBRock	Entwicklung von Endlagerbehälterkonzepten für die geologische Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in kristallinem Wirtsgestein
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
geoWK	geowissenschaftliche Abwägungskriterien
GOK	Geländeoberkante
HTO	Tritiumoxid, tritiiertes Wasser
MA	Mindestanforderungen
planWK	planungswissenschaftliche Abwägungskriterien
Posiva	Posiva Oy Olkiluoto
rvSU	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
TG	Teilgebiet
vsU	vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

18 WORKSHOP KRISTALLINGESTEIN | BAUER, GOTTRON, RÜHAAR 24.06.2025

GZ: SG0230/111-3/41-2025/6 | Objekt-ID: 13916663

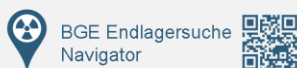
LITERATUR

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). Köln
- EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)
- K-Drs. 268: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Berlin, 5. Juli 2016
- Posiva Oy (2021): Safety Case for the Operating Licence Application - Synthesis (SYN). Posiva Report 2021-01. Posiva Oy. Eurajoki
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

www.bge.de
www.einblicke.de



A.2.4 Exploration of crystalline host rock formations: possibilities and limitations (Vondrovic)

Exploration of crystalline host rock formations: possibilities and limitations

Lukáš Vondrovic
SÚRAO

10.02.2026

1

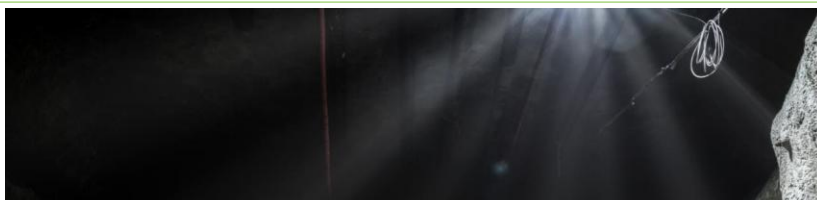
Presentation outlook

- Disposal and safety concept, requirements, legislation
- Geological pattern of CZ DGR potential sites, site selection process
- Geological exploration methods and results
- Conclusions



10.02.2026

2

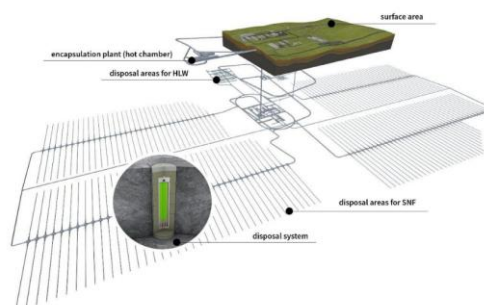


Disposal and safety concept, requirements, legislation

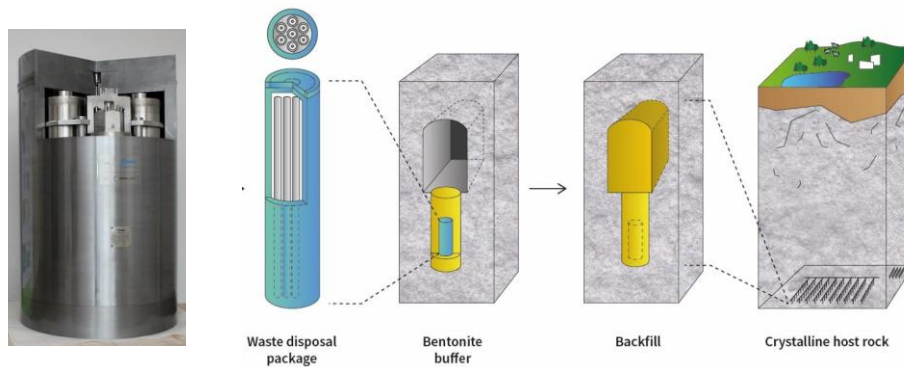


CZ deep geological repository project

- Inventory 14 500T of SNF, 23 500m³ of HLW
- Combined facility – SNF+other waste
- Depth 500 m in crystalline host rock, multibarrier concept
- Underground part (approx. 3-5km²), surface area (15 ha)
- Rock – bentonite sealing – steel-based canister (concrete canister)



Disposal system (SNF)



Modified KBS-3 system, carbon and stainless steel canister, Ca-Mg buffer and backfill, 500 m crystalline host rock

10.02.2026

5

Safety functions and requirements for geosphere (selected)

Ensure the removal of residual heat

G1 Ensure heat dissipation through the rock environment

Isolate radioactive waste from the environment (=biosphere)

G2 Isolate DGR from surface water circulation

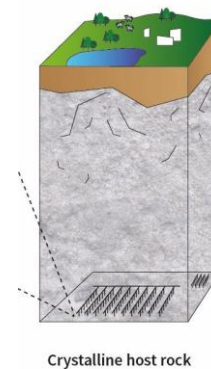
G3 Locate DGR in an area with low probability of seismo-tectonic hazard

G5 Locate DGR in an area with low predictable climate change

....

Keep radioactive substances within containment systems (canisters)

G10: Provide an environment conducive to acceptable erosion of the buffer and backfill in disposal boreholes and tunnels



10.02.2026

6

Safety functions and requirements for geosphere (selected)

Limit the migration of radioactive substances into the environment

G13: Limit radionuclide migration by transport path length to larger water-bearing structures

G14: Limit radionuclide migration by low groundwater velocity in fractures

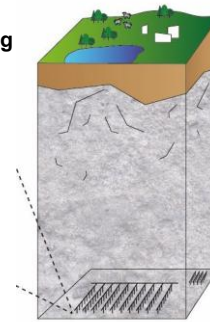
G15: Limit radionuclide migration by diffusion into the rock matrix

G16: Limit radionuclide migration by sorption in the rock matrix and fracture infillings

G17: Limit radionuclide migration due to sorption onto colloids

G18: Reduce radionuclide concentrations through dispersion and dilution

G19: Reduce radionuclide concentrations within a single drainage area by distributing major transport pathways into multiple drainage areas



Crystalline host rock

10.02.2026

7

Regulatory framework

- Atomic law 263/2016, Decree Siting the Nuclear Installation No. 378/2016

Assessed characteristics of the site for all nuclear installation (§ 3)
eg. natural characteristics and phenomena (e.g. faulting, seismicity, floods, groundwater circulation etc)

Siting the Nuclear Installation No. 378/2016:

prohibit the siting of the deep geological repository:

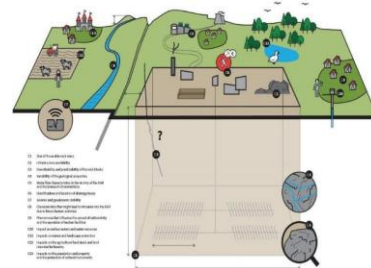
- rock environment a greater irradiation than as specified for the dose optimization limit (0.25 mSv per calendar year)
- impossibility to create complex three-dimensional model of the geological structure, hydrogeological or geomechanical and geochemical models
- presence of sources of geothermal energy.



Regulatory framework

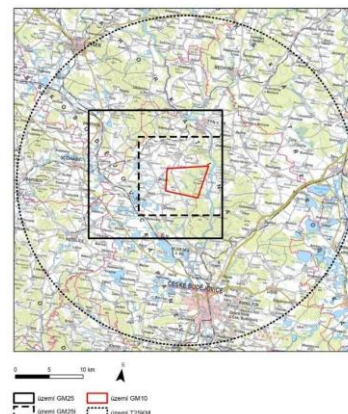
(2) The assessment shall also evaluate:

- a) the depth and dimension of the suitable rock massif for siting of a deep geological repository and the distance of geological boundaries and tectonic failures, which can serve as transport ways of radioactive substance;
- b) the structure-geological properties of the rock environment, in which a deep geological repository is located, including brittle and ductile tectonics;
- d) the suitability of the mechanical properties of rocks to ensure long-term stability of the natural barrier of a deep geological repository;
- e) petrographic and mineralogical composition of the rock environment;
- f) the occurrence of the heterogeneous rock environment with petrographically and mechanically different types of rocks, which are affected by hydrothermal and any other secondary metamorphoses;
- g) the describability and predictability of the geological structure, groundwater circulation, and physical, mechanical and geochemical properties of the rock environment of site for a deep geological repository.
- n) thermal properties of the rock environment, including thermal gradient;
-

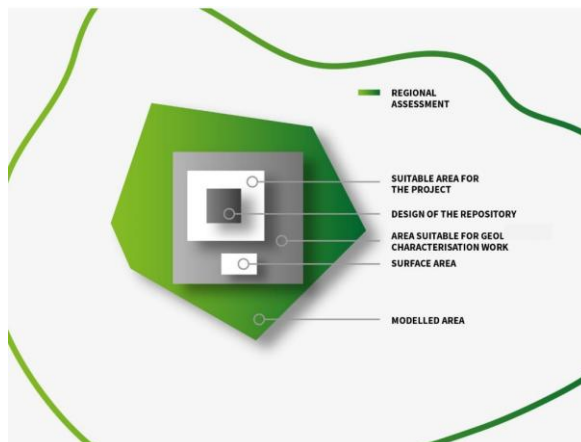


Exploration targets

- obtain comprehensive information to enhance the understanding of the geological composition and evolution of the rock environment at four DGR sites, covering the near-surface zone and repository depth.
- collect and analyze data necessary for the development of geoscientific (SDM) models
- acquire geoscientific key site-specific parameters for design of the facility, including underground disposal facilities and surface and subsurface infrastructure.
- generate a comprehensive geological data base for selection of the final and backup DGR sites.
- provide the necessary data for the establishment of a protected zone designated for special interventions in the Earth's crust.



Scales of geological description



10.02.2026

11

Exploration philosophy



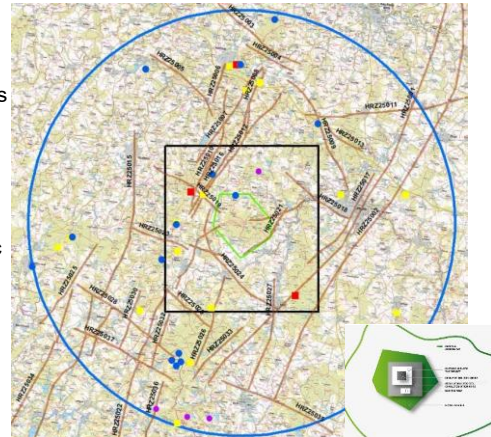
10.02.2026

12

25 km region

Aim: verification of legislative requirements

- the occurrence of slow surface deformations, including faults that are not geologically evident but may be reactivated
- the presence of linear morphological features
- the occurrence of sharp lithological boundaries indicators of mechanical deformation of rocks along tectonic zones
- the presence of clay minerals, and water saturation
- the occurrence of instrumentally recorded or historically documented earthquakes
- other evidence of fault zones at the nuclear facility site



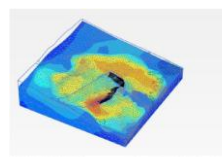
10.02.2026

13

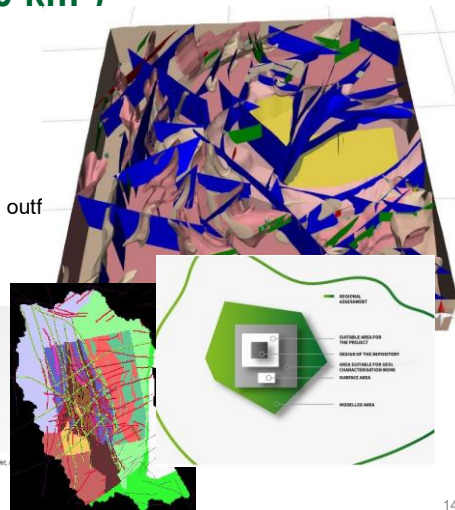
Region of modelled area (cca 150 km²)

Aim: construct site descriptive models

- All geological boundaries
- Brittle tectonic pattern (up to fault scale scale 1-10 km)
- Hydrogeological pattern (hydrology, outflow, climatic, spring outflow chemistry, well heads)
- Extent of main geological units
- Morphological pattern
- Geological evolution



Obr. 52: Horizontální deformace na povrchu ústří S, předpokládá na 30 let.



10.02.2026

14

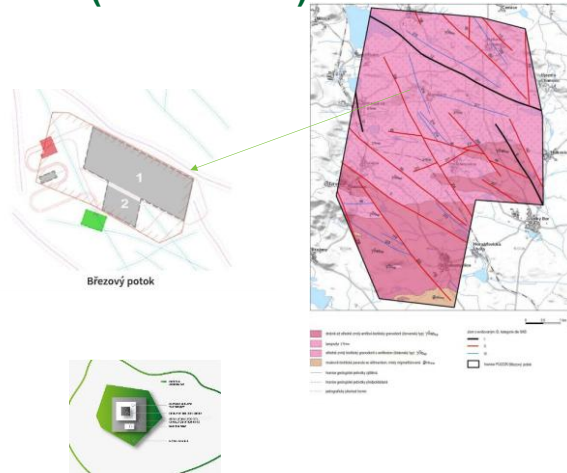
Region of detailed exploration (cca 25 km²)

Aim define rock volume suitable for:

- SNF repository
- Other waste repository
- Underground encapsulation plant
- Surface facility

Objectives:

- Detailed fault pattern of all scales (X00m -1 km, 10, 10+Km)
- Detailed lithological pattern and contacts
- Site specific mechanical properties
- Site stability and morphology
- Detailed groundwater chemistry evolution



10.02.2026

15

Geology of the CZ DGR potential sites, site selection process



Geological pattern

Bohemian massif

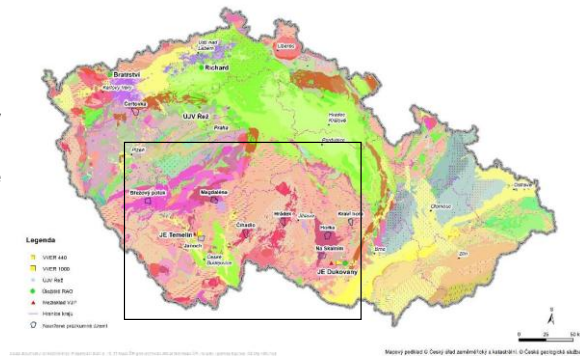
- Saxothuringian (large nappe units)
- Moldanubian (variscan orogenic root)
- Teplá-Barrandian (deformed sedimentary sequence proterozoic to devon age)
- Moravo-Silesian (separate microcontinent, large nappes units)

Platform sedimentary cover

- cretaceous to tertiary

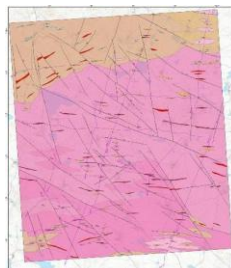
Potential DGR sites:

- Moldanubian zone
- magmatic to metamorphic
- variscan age



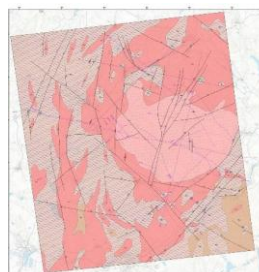
17

Březový potok



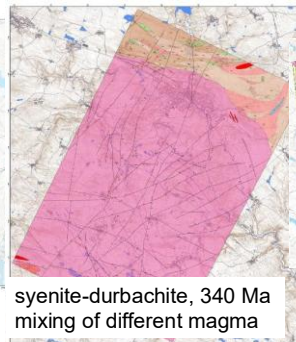
granodiorite
354 Ma, magmatic arc

Hrádek



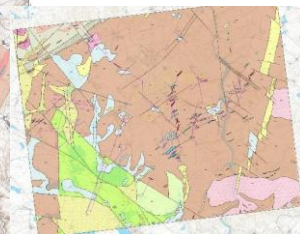
S-granite, 325 Ma
decompressional melting

Horka

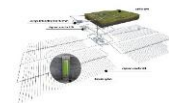


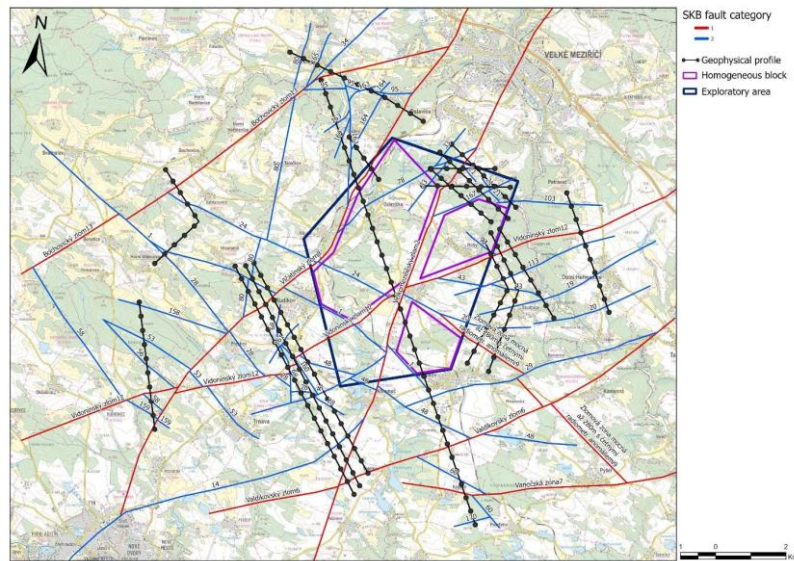
syenite-durbachite, 340 Ma
mixing of different magma

Janoch



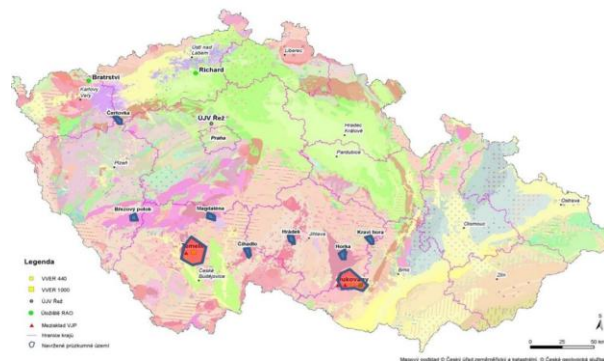
paragneiss, 340 Ma
highly metamorphosed





DGR Site selection process

- 1990: 32 regions (regional screening, geological, hydrogeological and tectonic requirements)
- 1998: 13 sites (geological requirements)
- 2003: 6 sites (crystalline host rocks)
- 2011: additional Kraví Hora site (7 sites)
- 2015: 2 sites near NPPs (9 sites)
- 2020: 4 potential sites (multicriterial evaluation based on multicriterial evaluation)



10.02.2026

20

2020: 4 potential sites (multicriterial evaluation based on multicriterial evaluation)

- Two stages of evaluation
- Exclusion and key criteria
- Evaluation using grades and weightings
- Integration of a variety of data and approaches
- Evaluation was conducted by independent organisations
- Evaluation was based on 26 exclusion criteria and 13 key criteria subdivided into 38 indicators



10.02.2026

21

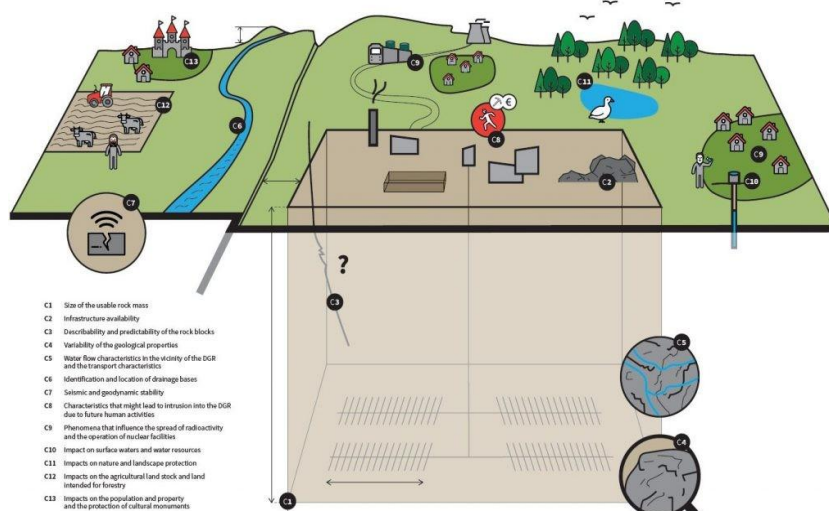
Key criteria

- The siting characteristics of the individual localities must be compared in terms of the current stage of development of the DGR
- Characteristics that can be estimated based on current knowledge and that do not display mutual correlation
- Divided into partial indicators that represent the properties of specific sites
- Technical feasibility (C1, C2), Long term and operational safety (C3-C9), environmental assessment (C10-C13)
- 13 key criteria, 38 indicators
- see https://surao.gov.cz/wp-content/uploads/2022/12/TZ423_2019_eng.pdf



10.02.2026

22



10.02.2026

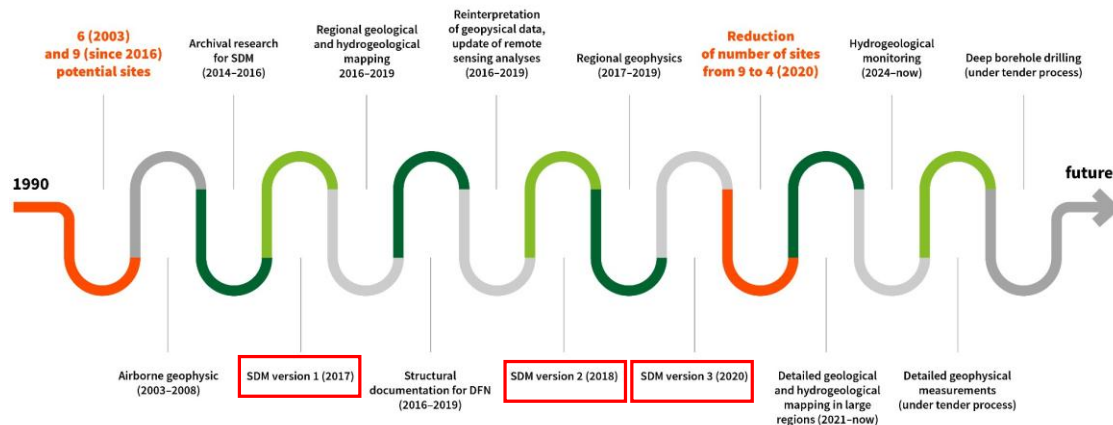
23



Geological exploration methods and results

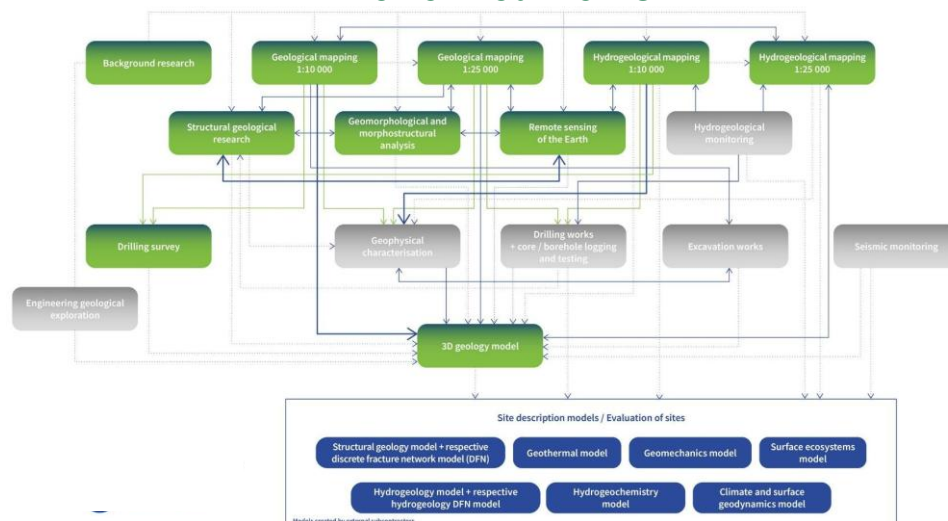


Exploration milestones



25

Performed works



Archival search

Aim:

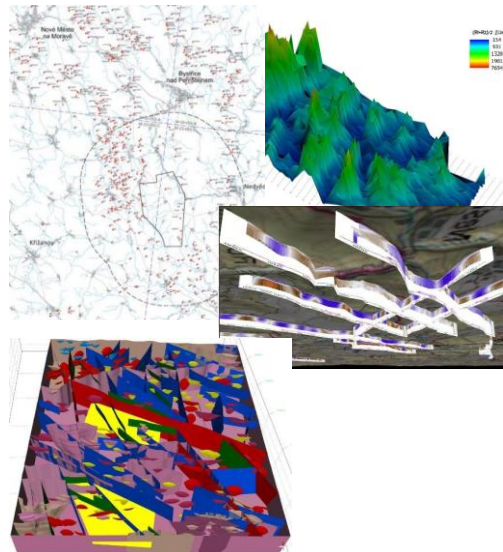
- collect old data for further verification
- identify preliminary critical geological volumes
- construct preliminary geological and other models

Possibilities:

Preliminary assesment of sites, define exploration targets, save time, setting the data flow, establishing the team

Limitations:

Data quality, coverage, different meaning of geological features



Geological mapping

Aim:

- collect focused field data
- verification of known geological and tectonic pattern
- verification of indications aquired from other methods
- samples (geochemistry, petrology, geomechanic etc)

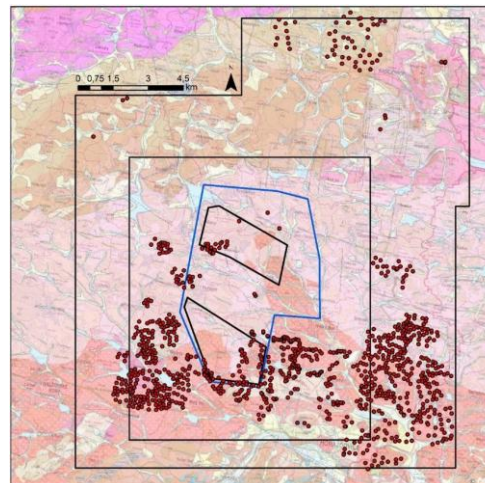
Scales

1:10 000 – exploration area

(including geophysics, trenching, pitting)

1:25 000 – modelled area

(limited geophysical measurements, geological walks)



Geological mapping

Methodology:

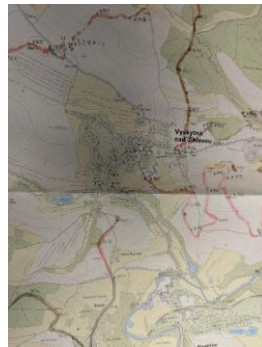
- observation point
- geological walk documentation
- sampling
- field verification of indications
- map compilation

Possibilities:

Essential method, validation of from other methods
indications, field interpretation

Limitations:

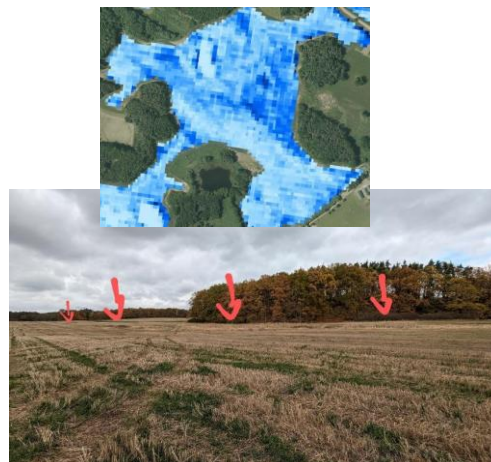
Outcropping, extent of quaternary sediments, difficult in
complex geology



Fault indications



Remote sensing verification



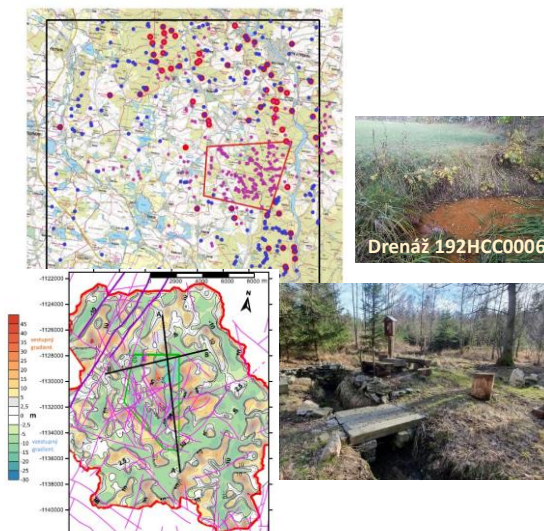
Hydrogeological mapping

Aim:

- identification of preferential paths for groundwater flow such as faults, fault zones
- analysis of the water regime and its temporal and spatial changes
- determination of hydraulic properties of the geological environment
- determination of the chemical composition of ground water within the area of hydraulic models
- verification of the occurrence of significant drainages and groundwater sources in the vicinity of regional faults in exploratory area

Methodology

- observation points
- in-situ measurements (pH, conductivity, temperature)
- verify the tectonic lineaments (possible sealing functions of faults)



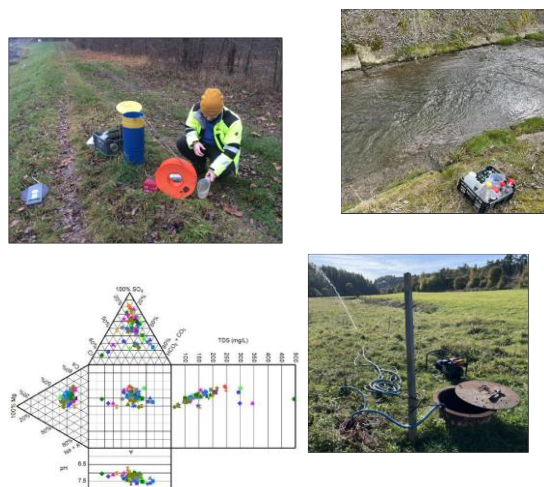
Hydrogeological monitoring

Aim:

- calculation of groundwater and surface water balance
- determination of outflow from the sites
- determination of groundwater chemistry evolution
- determination of extent of weathered zone

Support for assessment of:

- current water use
- protection of groundwater resources
- update and refinement existing 3D hydrogeological models



Hydrogeological monitoring

Methodology

- 6 boreholes/site up to 100 m deep
- climatic monitoring
- hydrologic monitoring (wells, rivers)
- continuous measurements (well heads, river outflow)
- hydrochemic monitoring
- progressive flow profiling

Possibilities:

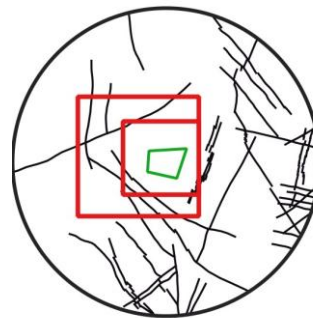
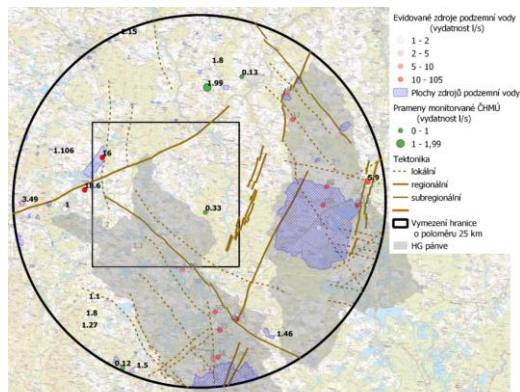
essential for hydraulic model building and validation,
interpretation of tectonic features

Limitations:

frequency, availability of object, transfer of data to
models, fracture connectivity



Regional hydrogeological and tectonic indications

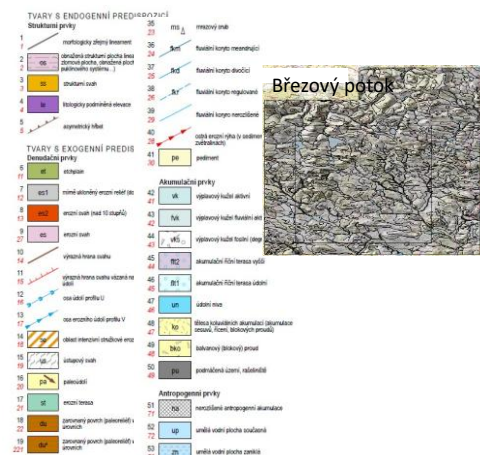


Remote sensing

Geomorphologic analyses (DEM)

Aim:

- identify morphological form
- explain the genesis, identify the processes that contributed or still contribute to its formation
determine whether its predisposition is of endogenous or exogenous origin
- assess whether its formation was a one-time or polyphase event

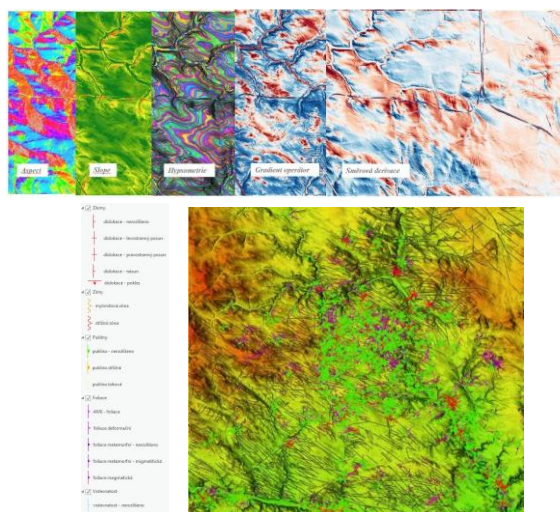


Remote sensing

Aim: Extraction of lienaments from different methods

Morphometric analyses

- 0×10 m for T25km,
 - 5×5 m for GM25,
 - 2×2 m for GM10
-
- Multispectral Satellite image analyses
 - Radar data analyses
 - Spereoscopic images



Remote sensing

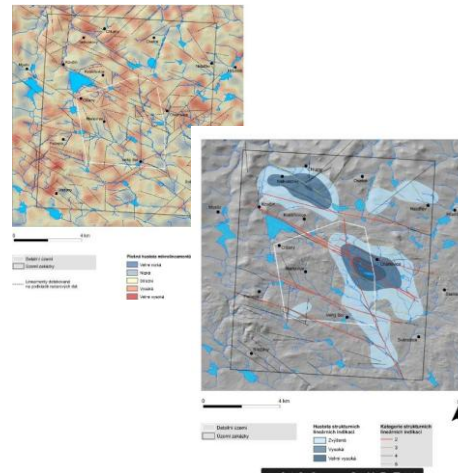
- interpretation of morphometric models
- drainage networks
- large-scale and minor morpholineaments
- planning GF operations, boreholes and mapping

Possibilities:

Fast initial method, suitable for large scale boundaries, interpretation with other methods

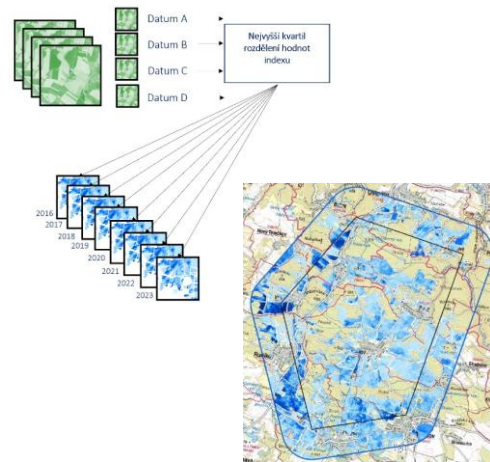
Limitations:

Small scale structures, needs for field verification, outcropping, false geological meaning



Remote sensing

- detection of groundwater-saturated zones using long-term satellite data time series
- identify microlineaments
- counting of NDWI (Normalized Difference Water Index);
- counting NDMI (Normalized Difference Moisture Index)



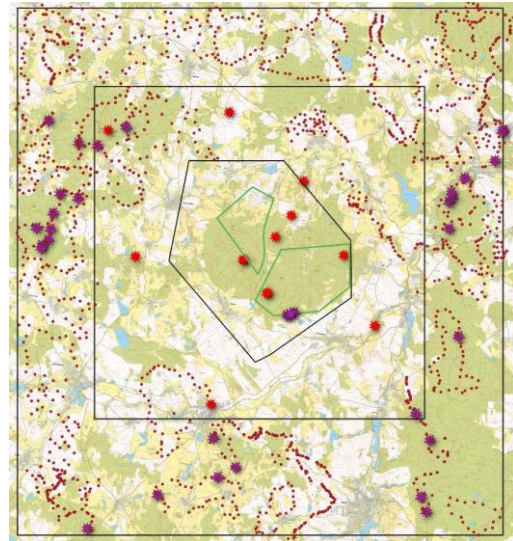
Structural documentation for DFN models

Aim: collect large database for creating of DFN model and integrate into models

Critical element of structural mapping

Methodology

- selection of suitable outcrops for documentation and parameterization
- development of photogrammetric model
- training of site geologists
- independent data collection at all sites
- survey of large rock exposures and/or quarries using UAVs
- essential for the development of computational models (e.g., hydrogeological, engineering geological)



Structural documentation for DFN models

Possibilities:

Development of DFN method, integration of data into models, development of methodology of rock description

Limitations:

Validation, approximation into depth, Conservatism, coverage, dependence on lithology



Geophysical exploration – airborne geophysics

Aim: define homogeneous rock block, main tectonic features, first field oriented data

Methods:

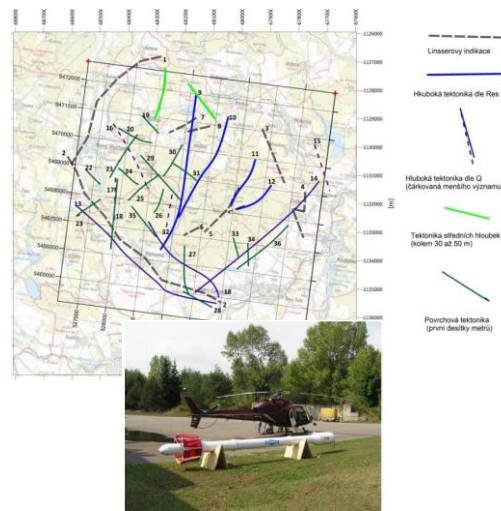
- gama spektrometry (Tc, K, U, Th)
- multichannel electromagnetics (IP1, IP4...)
- Magnetometry (RMF, RTF)
- regional gravimetry (supplementary, liner)
- cca 1841 km profiles
- later reinterpretation

Possibilities:

Quick data, large scale boundaries verification (up to 300 m deep), homogeneous rock block identification

Limitations:

Verification by other methods, not very detailed, not possible for low-scale fractures

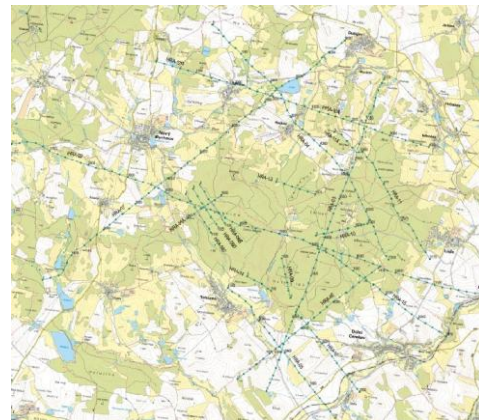


Geophysical exploration – regional measurements

Aim: verify known regional and local boundaries by combination of deep and shallow methods, test methodology for future detailed site exploration

Methodology („shallow depth“)

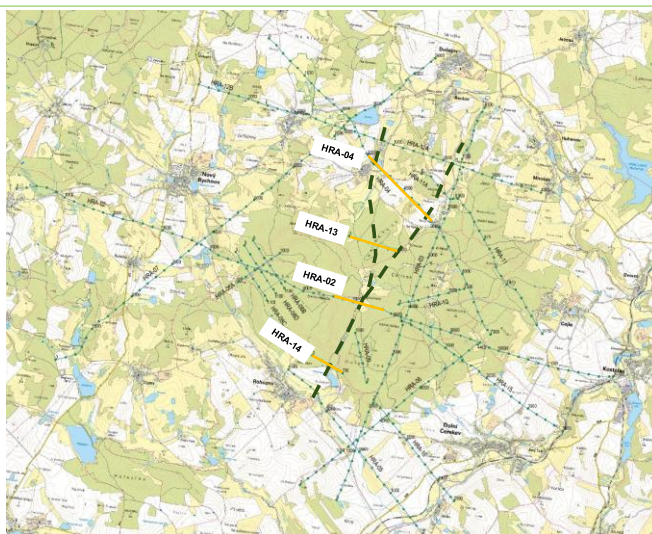
- Detailed Profile Gravimetry (DPG)
- Regional Gravimetry (PG)
- Electromagnetic Profiling (DEMP)
- Resistivity Profiling (DOP)
- Vertical Electrical Sounding (VES)
- Multielectrode Electrical Resistivity Tomography (ERT)
- Magnetometry (MAG)
- Shallow Refraction Seismic Survey (MRS)
- Reflection Seismic Survey (RXS)
- Geological and hydrogeological mapping along profiles



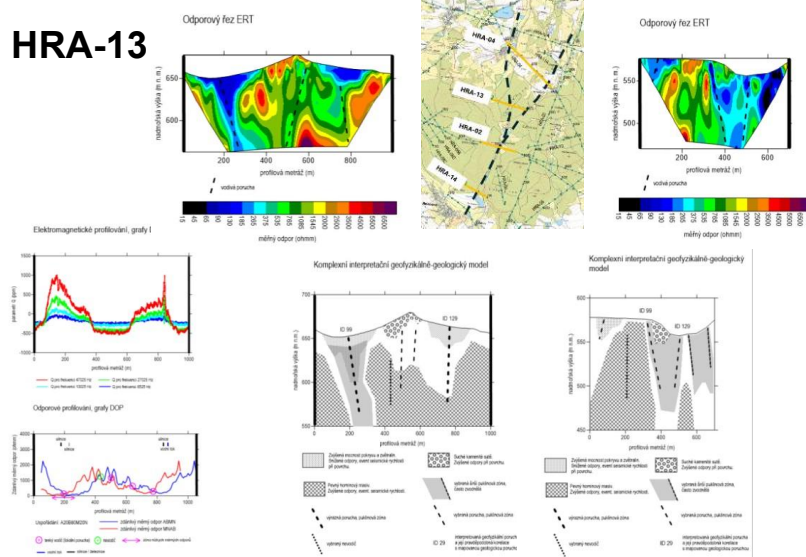
Several profiles cross-cutting studied
fault indications:

- **HRA – 02** – vib. seis.
- **HRA – 04**
- HRA – 05
- HRA – 14
- HRA-12A
- **HRA-13**
- **HRA-14**

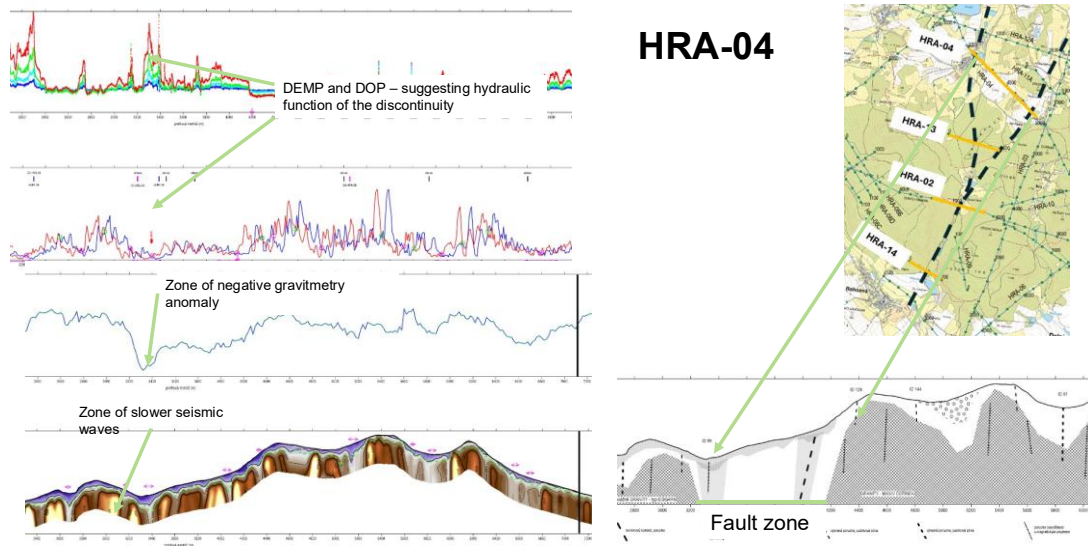
--- Indicated fault
— Geophysical profile



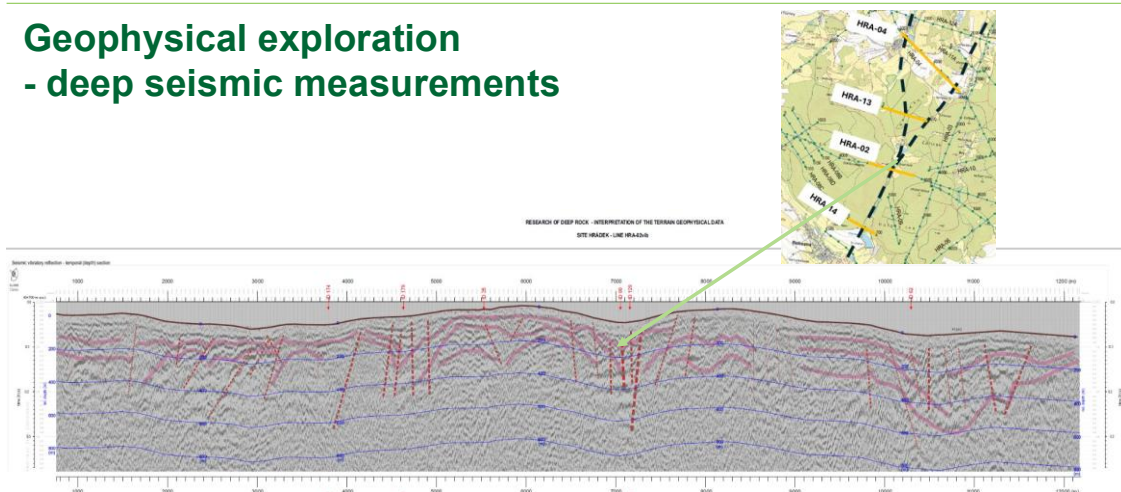
HRA-13



HRA-14



Geophysical exploration - deep seismic measurements



Geophysical exploration – deep methods

Aim: verify regional structures in depth, test potential methods for detailed exploration

Methodology

- Seismic Reflection vibration method
- CSAMT electromagnetic sounding (magnetic method with artificial source) – test on 1 site
- TEM electromagnetic sounding in time domain– test on 1 site
- Regional profiles
- Depth 500-1000 m



Geophysical exploration – deep methods

Results:

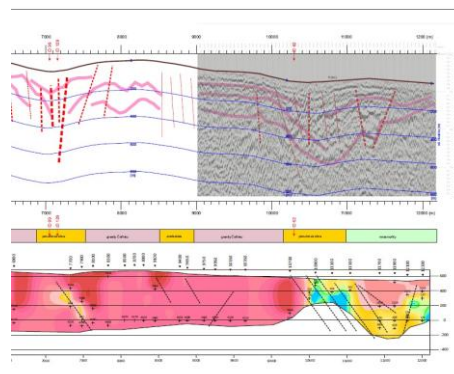
- Contact zone between crystalline basement and granitic intrusions
- Deformation and fracture zones within the granite massif
- Geological boundaries of the granite body
- Identification of quasi-homogeneous domains within the granite
- Tectonic contact zone forming the eastern boundary of the granite body, characterized by steep dip

Possibilities:

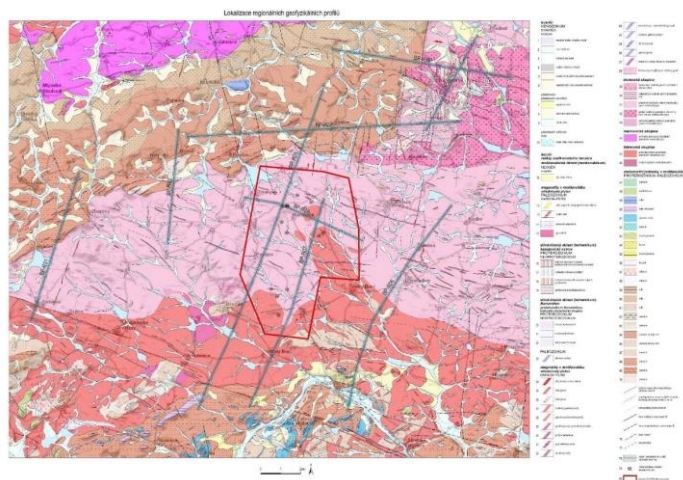
correlation with other geological methods, depth extent, rock mass properties

Limitations:

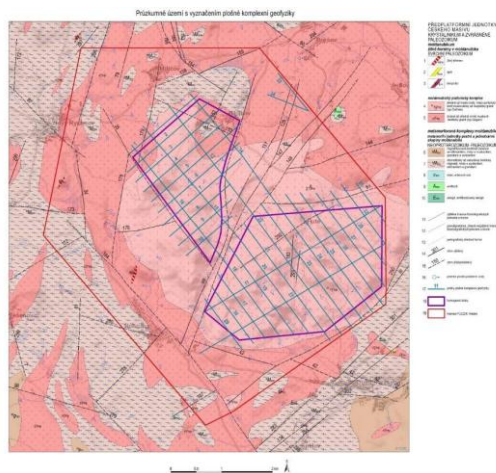
not one single method, one signal different meaning, very sensitive on interpretation



Detailed geophysical exploration (current phase)



Detailed geophysical exploration (current phase)

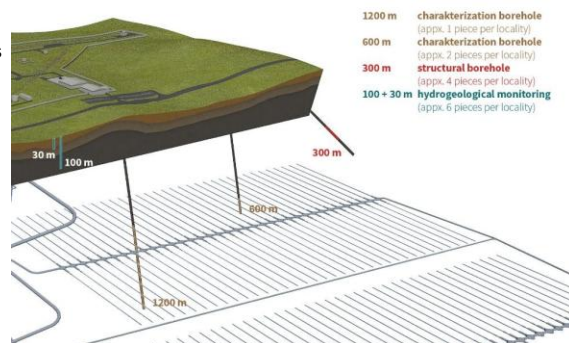


Drilling campaign

- 4 inclined boreholes, 300 m deep, targeting major faults
- 2 vertical boreholes, 600 m deep, in homogeneous parts of the host rock body (HB)
- 1 vertical borehole, 1200 m deep, in a homogeneous part of the rock block

Drilling specifications:

Wire-line method, borehole diameter HQ (96.1 mm borehole / 63.5 mm core diameter)
Core orientation along the entire borehole profile
Open-hole configuration Drilling fluid: water



10.02.2026

51

Drilling campaign

Borehole logging:

Includes: inclinometry, acoustic and optical televiewer, photometry, thermometry, physico-chemical properties of groundwater, gamma logging, and neutron-neutron logging, optionally also resistivity logging, hydraulic testing and sampling

Geotechnical testing in boreholes:

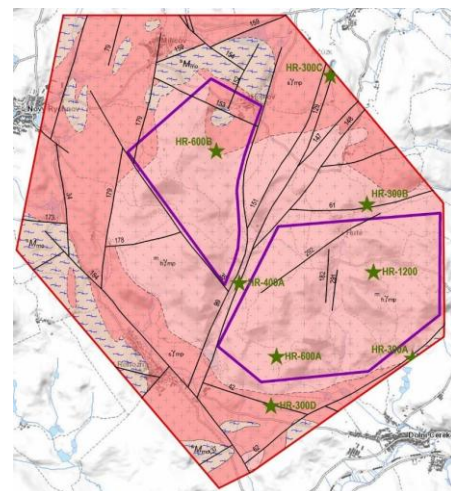
In-situ stress determination: overcoring method, borehole ovalization, breakout zone analysis, dishing

Core description:

Photographic documentation, petrological and structural logging, core scanning

Core analyses:

A wide range of petrological, mineralogical, geochemical, geotechnical, petrophysical, mechanical and transport properties, and other analytical methods



10.02.2026

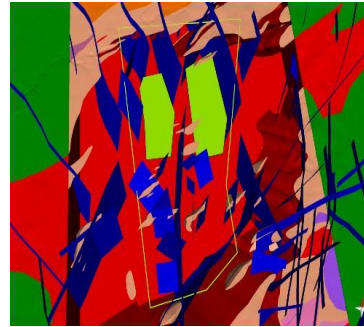
52

Data synthesis - modelling

Geological and structural-geological

All rock boundaries, fault network, depth at least 1500m

- spatial distribution of lithological units, weathering zones, and quaternary (platform) cover
- extent, orientation, and properties of major fault zones,
- deterministic interpretation of the geometry of regional and local fault systems,
- stochastic modelling of the distribution and orientation of subordinate discontinuities.



10.02.2026

53

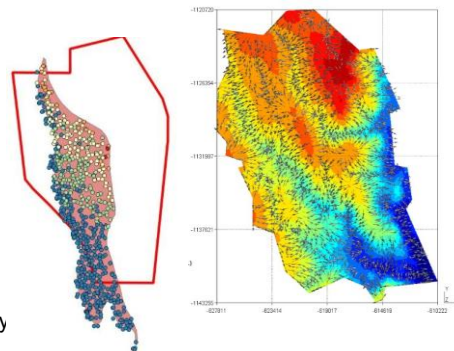
Data synthesis - modelling

Hydrogeological model

- hydraulic conductivity, permeability, transmissivity, storativity
- concentration of dissolved substances in groundwater
- hydraulic head, compressibility of water and the rock mass
- distribution of precipitation, infiltration and groundwater recharge/discharge
- distribution of groundwater pressure conditions
- distribution of groundwater quality, age, and temperature
- topography, climate, and hydrological setting defining recharge zones within the site

Outputs

- distribution of hydrostatic pressure and groundwater flow velocity
- distribution of groundwater temperature and dissolved solute concentrations



10.02.2026

54

Data synthesis - modelling

Transport

Radionuclide transport time, length, delay

Seismic

Probabilistic and neo-deterministic seismic risk calculation

Stability

Erosion, vertical movements, climatic

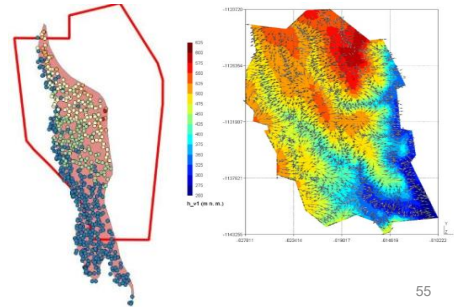
Hydrogeochemical

distribution of dissolved constituents in groundwater, stable and radioactive isotopes, redox-sensitive trace elements, organic compounds, colloids, pH, and Eh, groundwater evolution

Thermal

Thermal dimensioning for repository footprint

10.02.2026



55

Data synthesis - modelling

Safety model

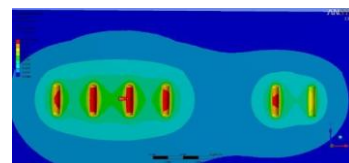
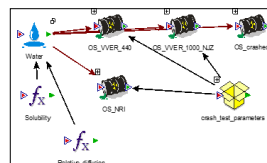
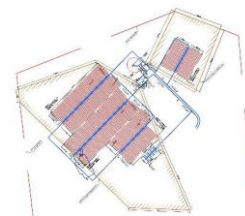
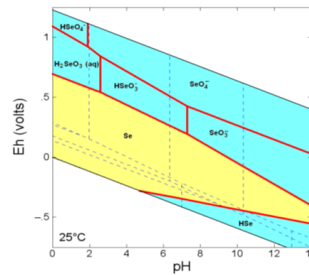
Safety assesment as a basis for future decision (dose estimation)

Biosphere model

Description of initial state of the surface ecosystem

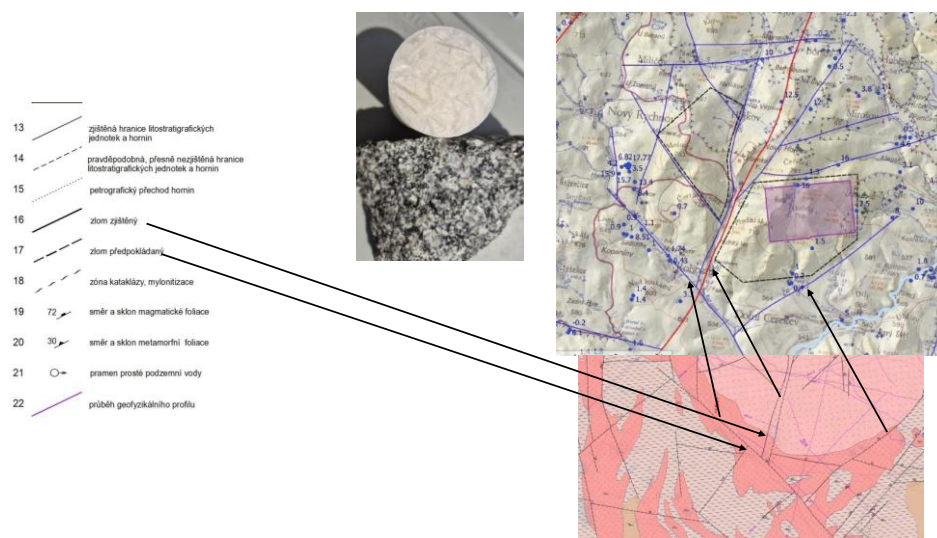
Project solution and cost estimation for each site

Preliminary study of possible disposal design



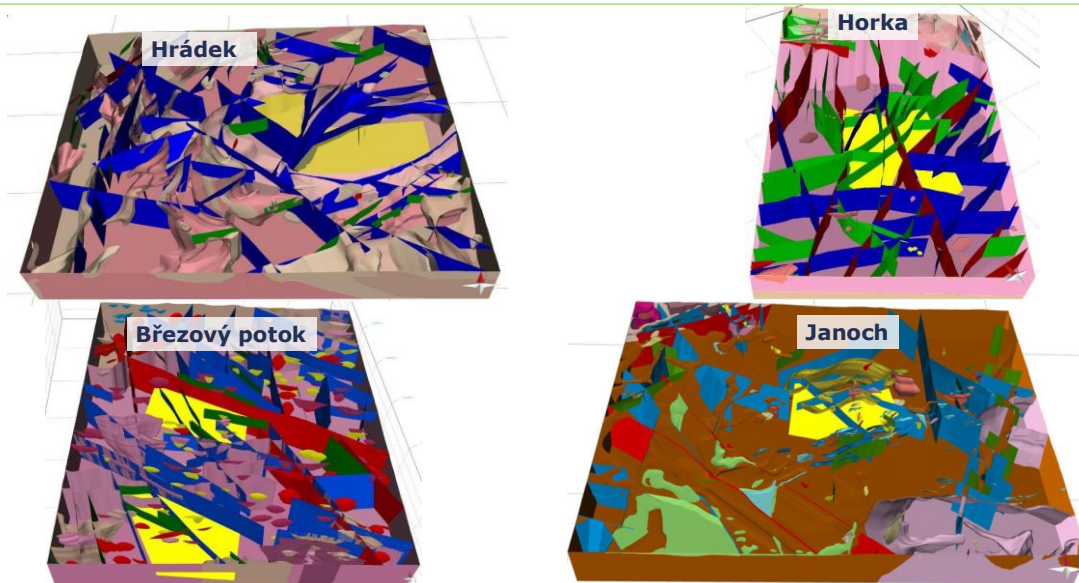
10.02.2026

56



Conclusions

- Preliminary selection of locality with good descibability and probability of geological pattern (most boring geology of the world)
- Multidiciplinary approach is required
- Large scale lineaments and boundaries (from 10 km) are easy to define
- Small scale boundaries (X00 m) needed validation or remain as model uncertainty
- Different meaning of lienaments (eg. fault or discontonuity with hydraulic function)
- Field analyses and work is needed to be done
- Careful description of the rock properties together with hydrogeological characteristics
- Verification for DGR purposes is needed



Thank you for your attention

vondrovic@surao.gov.cz

A.2.5 Betrachtung des Kristallins im Schweizer Standortauswahlverfahren (Zuidema)

Nationaler Workshop 'Kristallingestein als Wirtsgestein
für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle'
Hannover, 24./25. Juni 2025

Endlager im Kristallin in der Schweiz unter Berücksichtigung der Erfahrungen anderswo Ein Überblick

Piet Zuidema - Zuidema Consult GmbH
(vorher: Mitglied der GL Nagra / Schweiz, Leiter Technik & Wissenschaft)

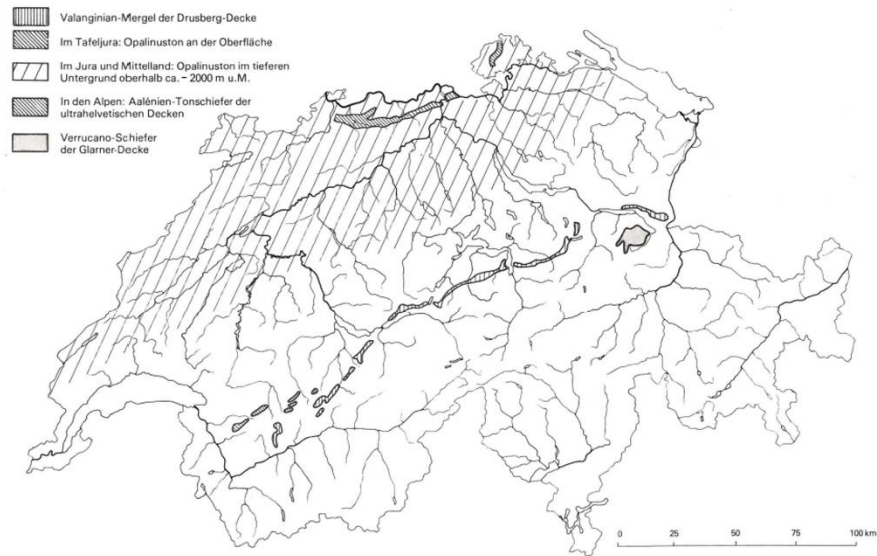
Nukleare Entsorgung Schweiz 1978

- abgebrannte Brennelemente (BE)
→ Wiederaufarbeitung (WA)
- anfänglich: Rücklieferung der Abfälle
offen → keine Arbeiten zu HAA-Lager
- Änderung: Rücklieferung der Abfälle
vorsehen → Vorbereitung
Entsorgungsprogramm (1978)
- Entscheid (BB AtG): schrittweises
Vorgehen → erster Schritt: 'Projekt
Gewähr 1985' (Entsorgungsnachweis)
*'Wie kann die Entsorgung in der
Schweiz gelöst werden, aufzuzeigen
anhand modellhafter Projekte,
basierend auf realen Daten'*
- Konzept, inkl. erste Übersicht zu
Standortmöglichkeiten



Mögliche Wirtgesteine: Tongesteine (Opalinuston, ...)

Abb. 7 Hauptverbreitung ausgewählter geologischer Endlagerformationen: Tongesteine



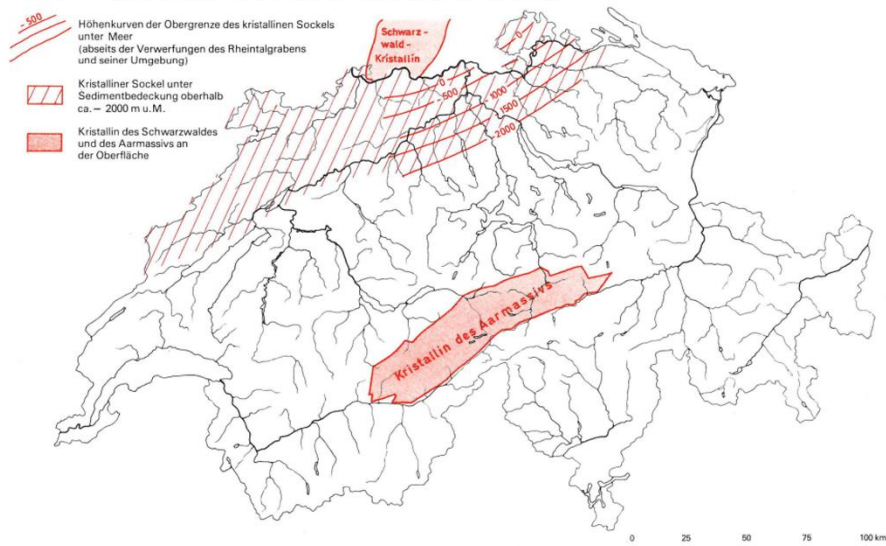
3

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Mögliche Wirtgesteine: Kristallin

Abb. 9 Hauptverbreitung ausgewählter geologischer Endlagerformationen: Kristallin

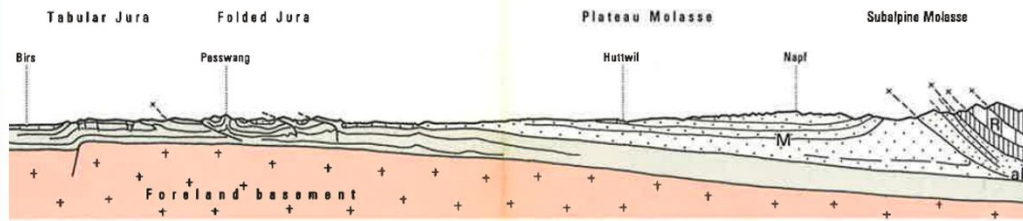


4

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Geologie der Schweiz: Verständnis (Trümpy 1980)



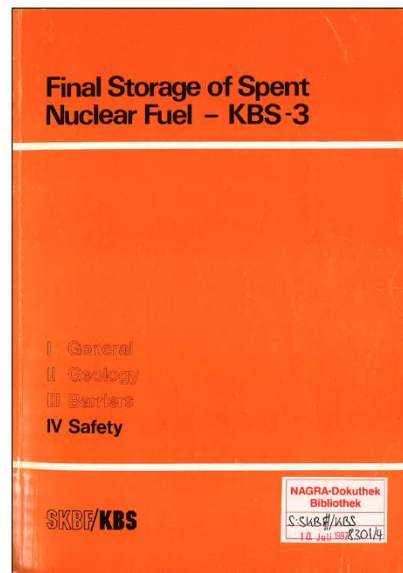
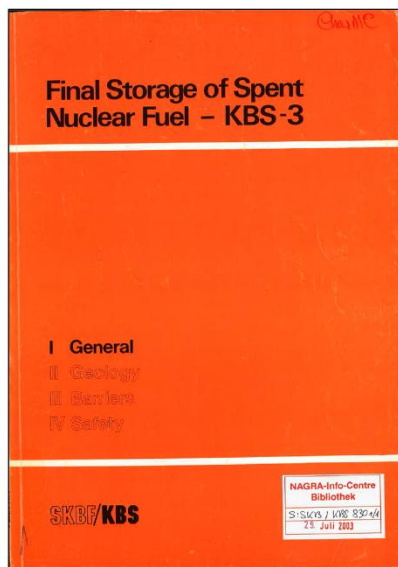
5

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Schweden: der Vorreiter ... (Projekt KBS-3)

... mit vielen nützlichen Hinweisen

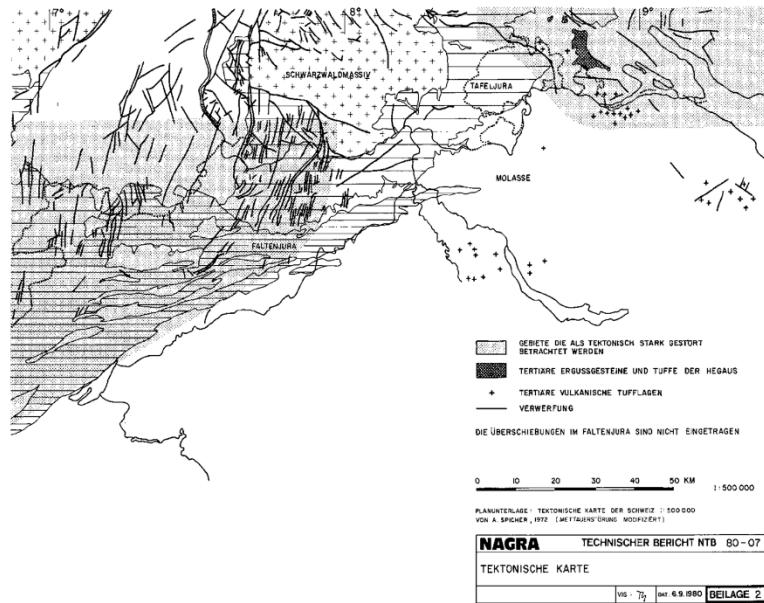


6

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Tektonische Situation (Nord)Schweiz (1980)

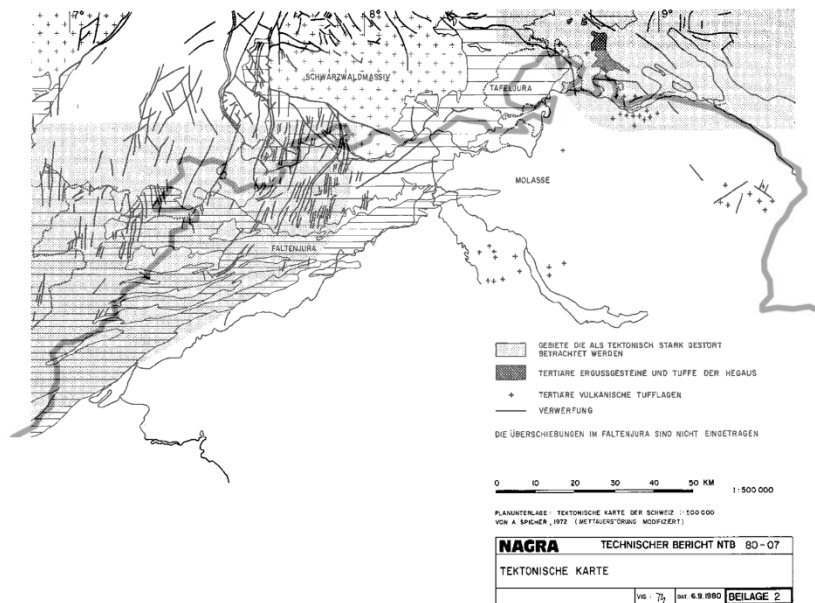


7

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Tektonische Situation (Nord)Schweiz (1980)



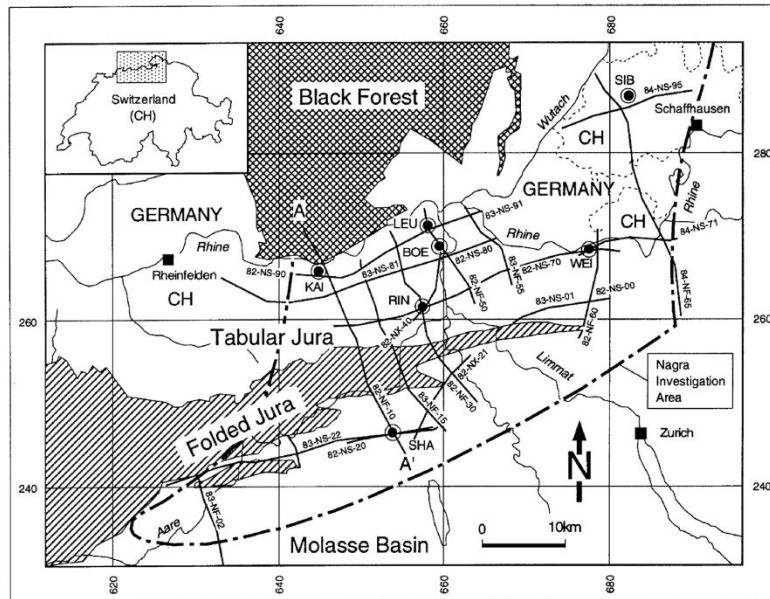
8

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

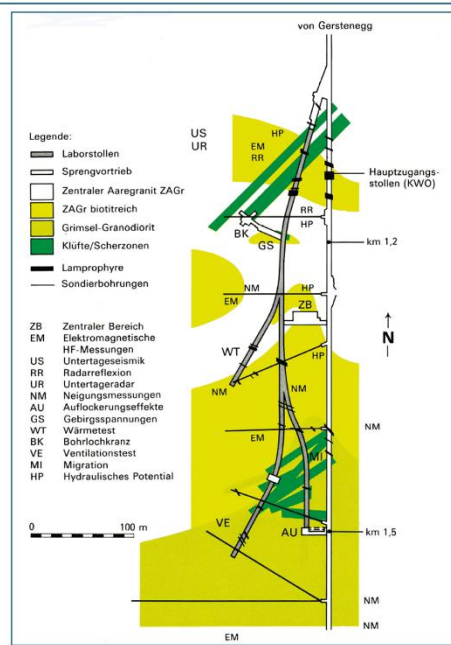
Regionales Untersuchungsprogramm

12 Bohrungen geplant (7 Bohrungen realisiert), Reflexions- & Refraktionsseismik



Felslabor Grimsel (1984)

... mit zahlreichen Experimenten
mit grosser internationaler
Beteiligung



Bohrungen: Details

Sondierbohrung:	BOETTSTEIN	WEIACH	RINIEN	SCHAFISHEIM	KAISTEN	LEUGGERN	SIBLINGEN
Bohrung Beginn bis Ende	10.82 - 6.83	1.83 - 11.83	7.83 - 1.84	11.83 - 6.84	2.84 - 6.84	7.84 - 5.85	9.88 -
Höhe m ü.M.	347,5	368,7	385,1	421,2	320,4	358,8	574,4
Koordinaten km x y	659,3 268,6	676,7 268,6	656,6 261,8	653,6 246,8	644,6 265,6	657,6 271,2	680,1 286,7
Endtiefe m	1501	2482	1801	2006	1306	1689	
Durchteufte Geologie	m t	m t	m t	m t	m t	m t	m t
Quartär	18 0	37 0	25 0	244 0	45 0	48 0	
Tertiär	—	149 37	—	332 244	—	—	
Malm	—	294 186	185 25	267 576	—	—	
Dogger	—	186 480	240 210	237 843	—	—	
Lias	—	38 666	39 450	25 1080	—	—	
Keuper	104 18	110 704	127 489	125 1105	—	—	
Muschelkalk	185 122	170 814	178 616	248 1230	49 45	159 48	
Buntsandstein	8 307	5 984	22 794	12 1478	31 94	16 207	
Perm	—	461 989	985 816	—	172 125	—	
Karbon	—	570 1450	—	—	—	—	
Grundgebirge	>186 315 Granit	>462 2020 Gneis	—	>516 1490 Syenit	>1009 297 Gneis	>1466 223 Gneis Granit	

m : Mächtigkeit (m)
t : Tiefe (m), Oberkante
Kernmarsch

b)

NTB 88-25

11 Zu/240625 GRS_Kristallin_Zuidema

Bohrungen: Details

Sondierbohrung:	BOETTSTEIN	WEIACH	RINIEN	SCHAFISHEIM	KAISTEN	LEUGGERN	SIBLINGEN
Bohrung Beginn bis Ende	10.82 - 6.83	1.83 - 11.83	7.83 - 1.84	11.83 - 6.84	2.84 - 6.84	7.84 - 5.85	9.88 -
Höhe m ü.M.	347,5	368,7	385,1	421,2	320,4	358,8	574,4
Koordinaten km x y	659,3 268,6	676,7 268,6	656,6 261,8	653,6 246,8	644,6 265,6	657,6 271,2	680,1 286,7
Endtiefe m	1501	2482	1801	2006	1306	1689	
Durchteufte Geologie	m t	m t	m t	m t	m t	m t	m t
Quartär	18 0	37 0	25 0	244 0	45 0	48 0	
Tertiär	—	149 37	—	332 244	—	—	
Malm	—	294 186	185 25	267 576	—	—	
Dogger	—	186 480	240 210	237 843	—	—	
Lias	—	38 666	39 450	25 1080	—	—	
Keuper	104 18	110 704	127 489	125 1105	—	—	
Muschelkalk	185 122	170 814	178 616	248 1230	49 45	159 48	
Buntsandstein	8 307	5 984	22 794	12 1478	31 94	16 207	
Perm	—	461 989	985 816	—	172 125	—	
Karbon	—	570 1450	—	—	—	—	
Grundgebirge	>186 315 Granit	>462 2020 Gneis	—	>516 1490 Syenit	>1009 297 Gneis	>1466 223 Gneis Granit	

m : Mächtigkeit (m)
t : Tiefe (m), Oberkante
Kernmarsch

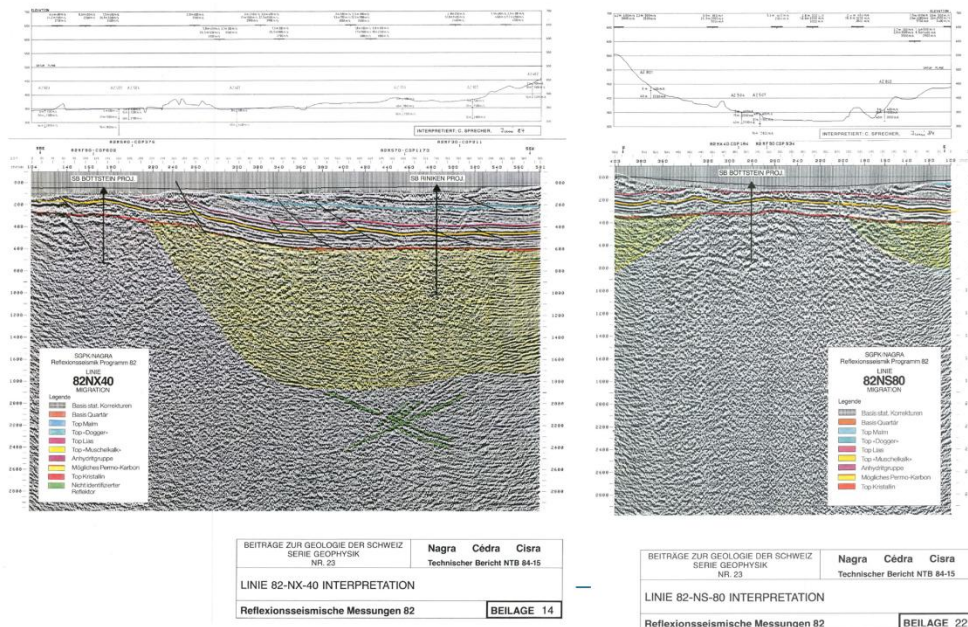
b)

NTB 88-25

12 Zu/240625 GRS_Kristallin_Zuidema

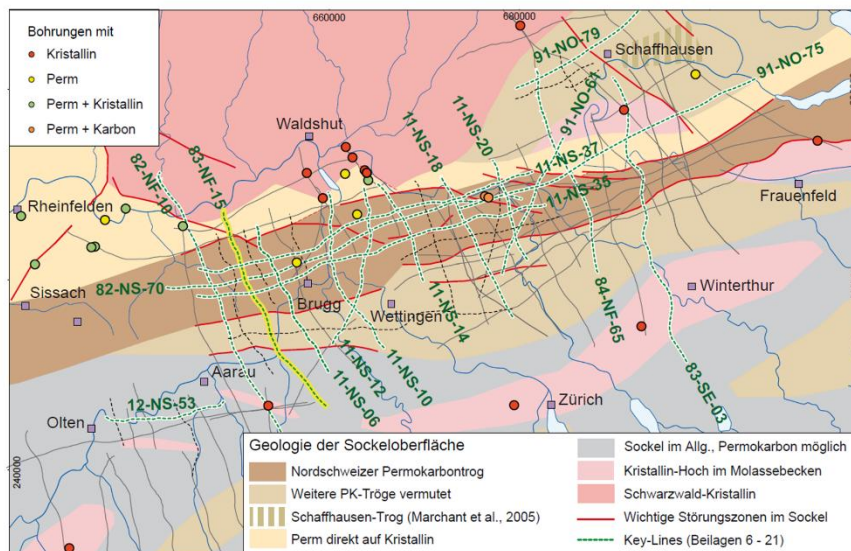
Reflektions-Seismik & Bohrungen: da ist etwas ...

... beschränkte Auflösung Seismik im Kristallin (Einfluss Sedimentüberdeckung)



Eine Überraschung: grosse Permokarbon-Tröge

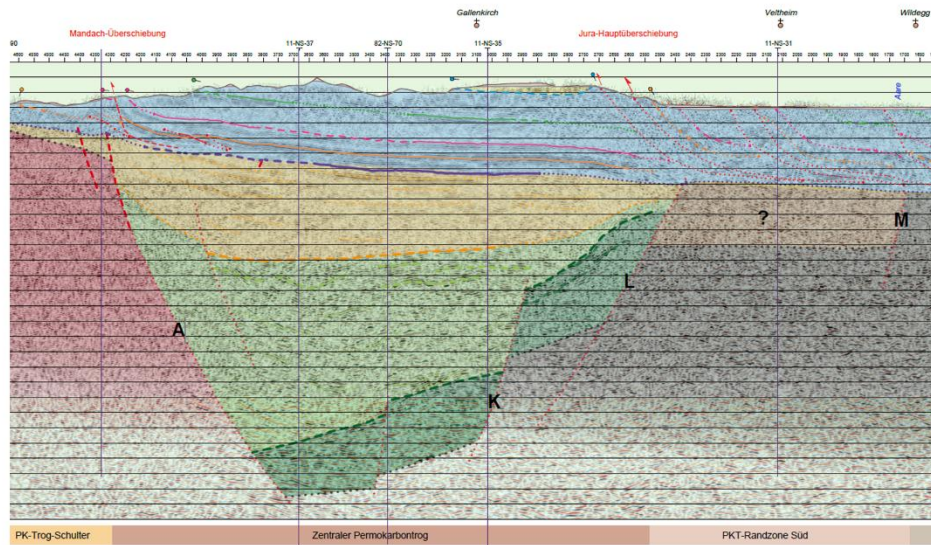
neuere Interpretation



Naef & Madritsch (2014)

_Kristallin_Zuidema

Permokarbon-Tröge (neuere Interpretation)



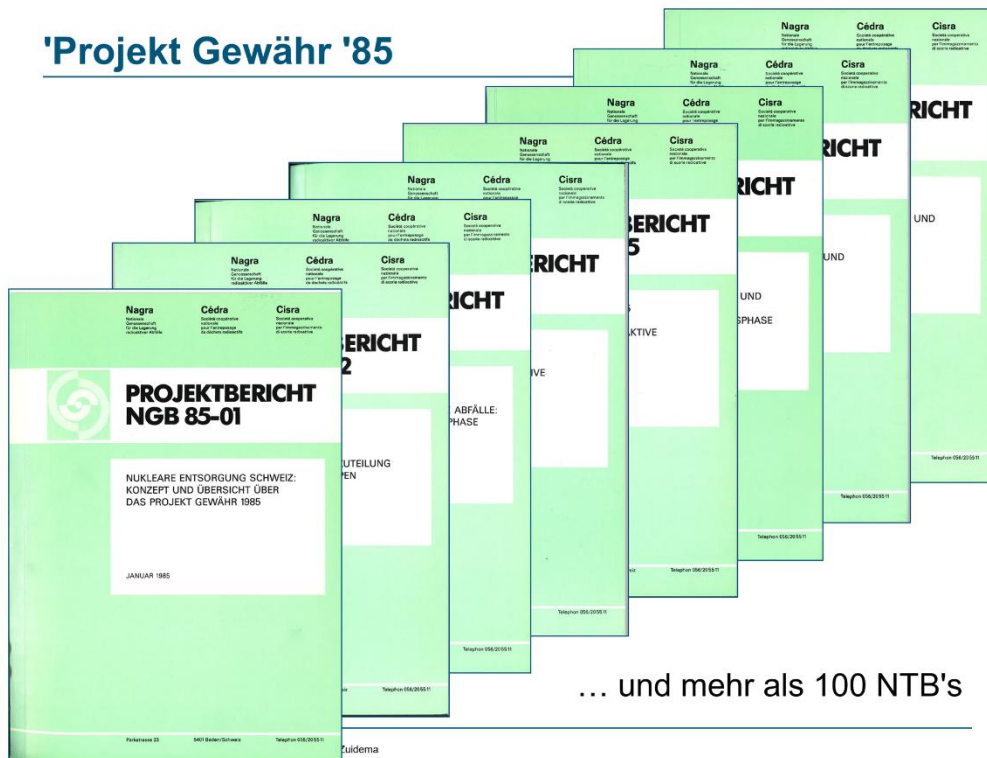
Naef & Madritsch (2014)

15

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

'Projekt Gewähr '85



... und mehr als 100 NTB's

NGB 85-04 & NGB 85-05: Sicherheitsberichte (PG'85)

NAGRA NGB 85-05

- 8-4 -

Radionuklidtransport Kristallin (verglaste HAA)

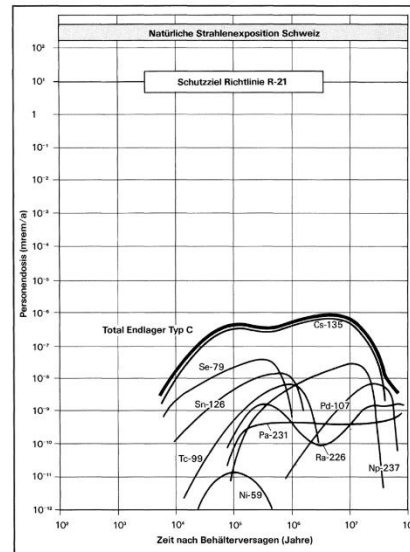


Fig. 8-1: Jährliche Personendosis in Funktion der Zeit für konservative Diffusionskonstante in der Kakiritzzone und Basisfallparameter des Biosphärentransportes

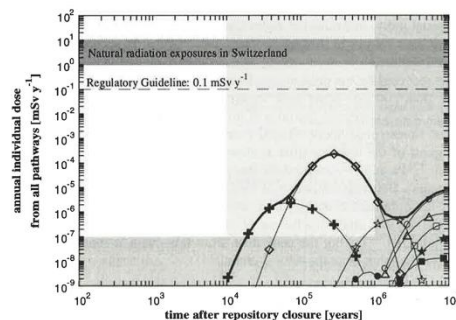
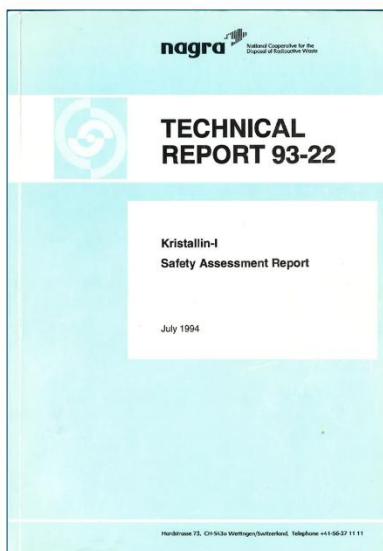
17

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

NTB 93-22: Sicherheitsanalyse ('Schlussauswertung')

Radionuklidtransport (Kristallin-I) – verglaste HAA



(a) Reference Case



Note: (a): dataset SA_60ALA, (b): dataset SA_LA; the nomenclature for datasets is discussed in Appendix 4.

Figure 6.2.1: Time development of the annual individual doses in the Reference Case

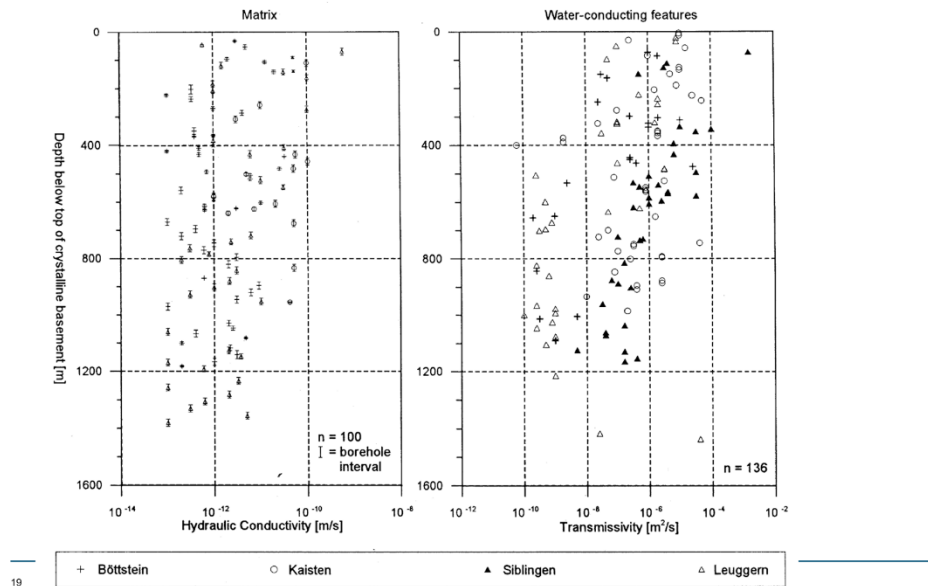
18

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

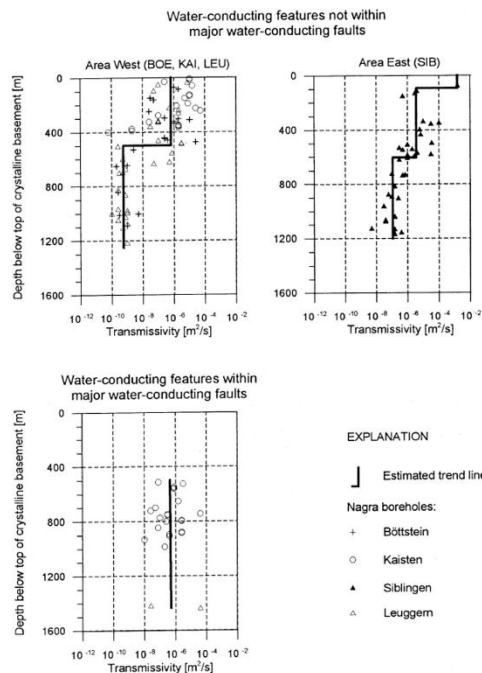
Hydraulische Tests Bohrungen: Resultate (NTB 93-01)

lokalisierter Fluss ('Matrix' Durchlässigkeit, Transmissivität 'Klüfte/Störungen')



Modellvorstellung ...

- grössere wasserführende Störungszonen (Bild unten)
- wasserführende Systeme in Region West bzw. Ost



(NTB 93-01)

Fig. 8-5: Transmissivity of water-conducting features versus depth below top of crystalline basement (VOBORNY et al. 1993a); the values are classified into three groups based on geographic and structural criteria.

Kristallines Grundgebirge

Konzeptuelles Modell

... mit folgenden Elementen

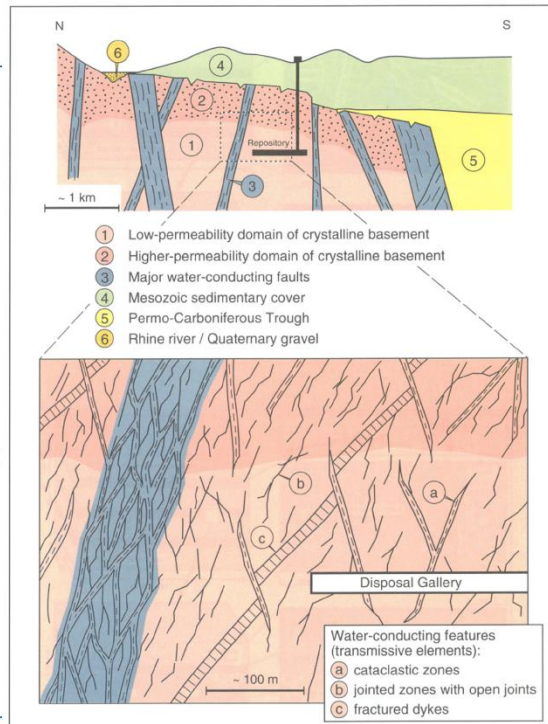
- Bereich mit höherer Durchlässigkeit
- Bereich mit tieferer Durchlässigkeit (mit Lager) mit
 - kataklastischen Zonen
 - geklüftete Bereiche mit offenen Klüften
 - geklüftete Ganggesteine
- mit Lagerkammern ausgewichen: grössere wasserführende Störungszonen

(NTB 93-01)

21

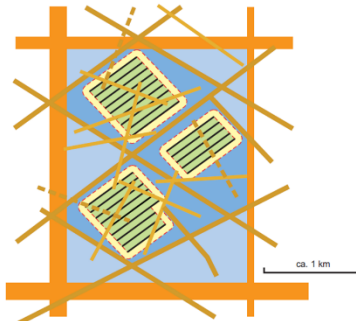
Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema



Klassifizierung geologische Elemente

- gebietsbegrenzend
- anordnungsbestimmend (Lagerfelder)
- einlagerungsbestimmend (geomechanische 'Schwachstelle' → lokale Schädigung Gebirge → keine Behälter)
- Elemente beim Nuklidtransport zu berücksichtigen



Signatur	Beschreibung	Bedeutung
	gebietsbegrenzende geologische Elemente	gebietsbegrenzend
	anordnungsbestimmende geologische Elemente	bestimmt Anordnung der Lagerkammern
	einlagerungsbestimmende geologische Elemente	bestimmt Einlagerung innerhalb Lagerkammern
	Kleinere geologische Elemente	In Sicherheitsanalyse berücksichtigt
	Lagerkammern	--
	Lagerkammerbereich	--
	Lagerfeld	--
	nutzbare Lagerzone	--
	nicht nutzbare Lagerzone	--

NTB 14-01

22

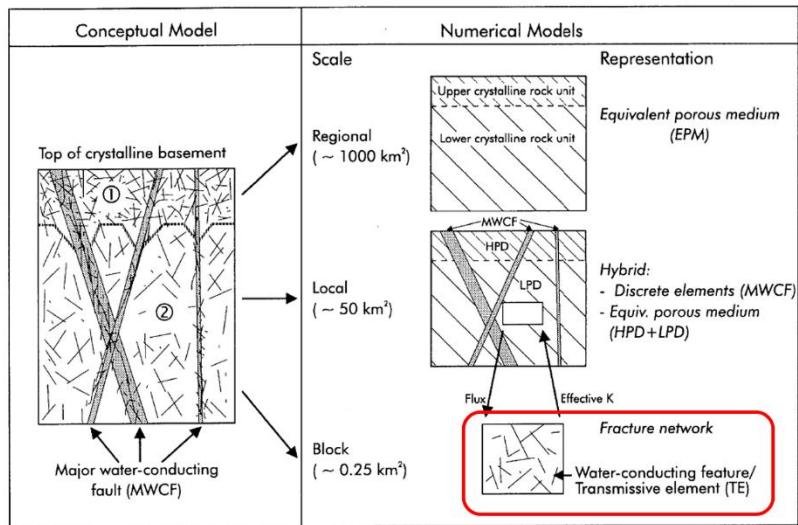
Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Fig. 2.2-1: Klassifizierung von geologischen Elementen im Wirtgestein bzw. einschusswirksamen Gebirgsbereich im Hinblick auf die Anordnung der Lagerkammern und auf die Einlagerung von Endlagerbehältern.

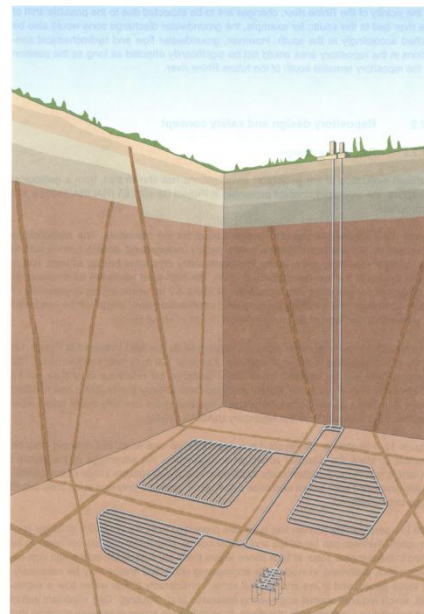
Konzeptuelles Modell für Modellierung (Kristallin-I)

(NTB 93-01)

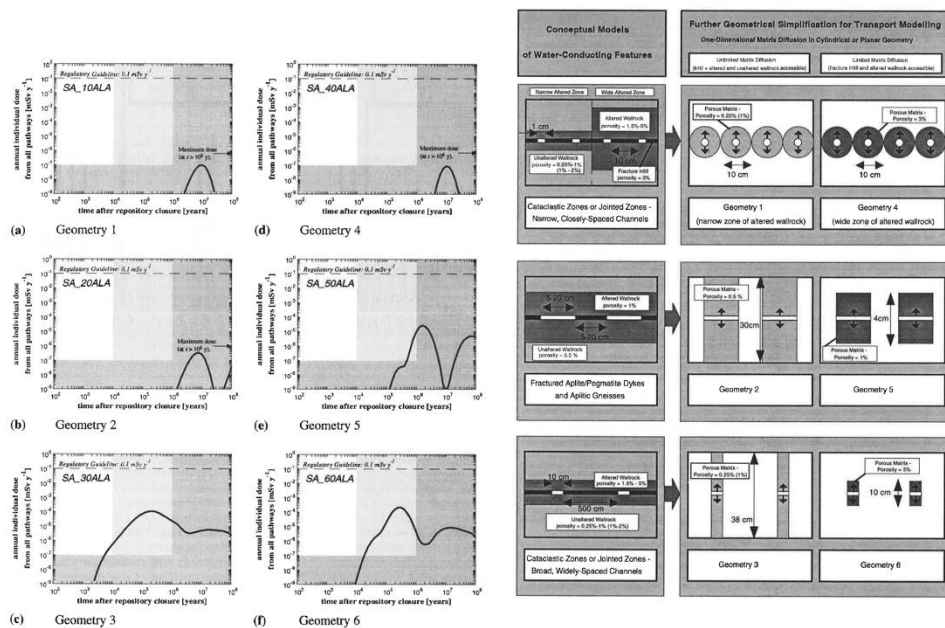


- ① Upper crystalline rock domain; designated as higher-permeability domain (HPD) in area West
 ② Lower crystalline rock domain; designated as low-permeability domain (LPD) in area West

Lagerkonzept Kristallin

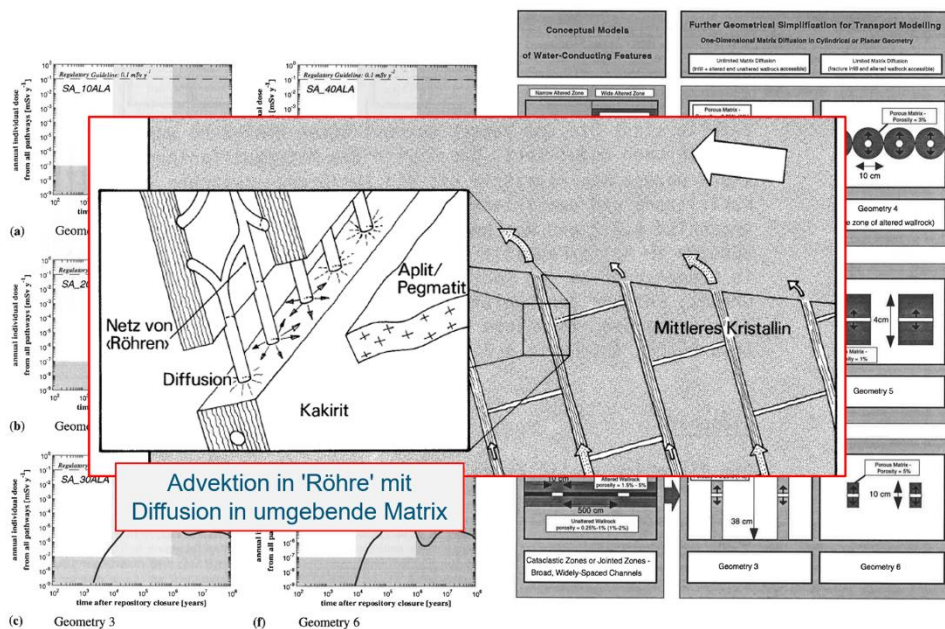


Berechnete Dosen (für verglaste HAA – HAA WA)



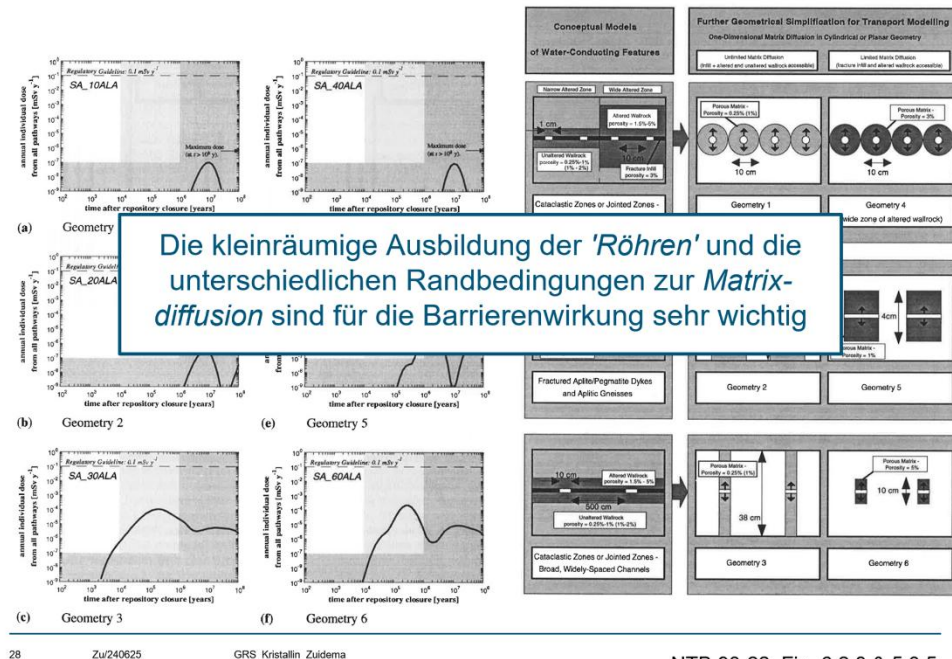
NTB 93-22, Fig. 6.2.8 & 5.3.5

Berechnete Dosen (für verglaste HAA – HAA WA)



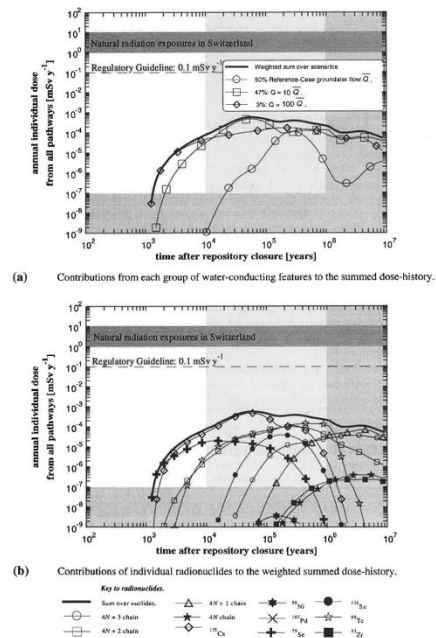
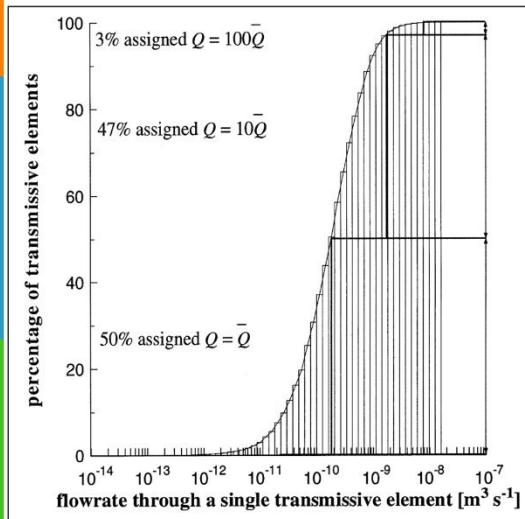
NTB 93-22, Fig. 6.2.8 & 5.3.5

Berechnete Dosen (für verglaste HAA – HAA WA)



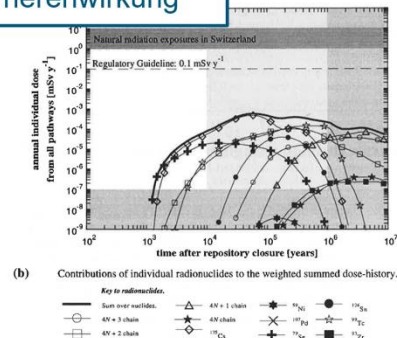
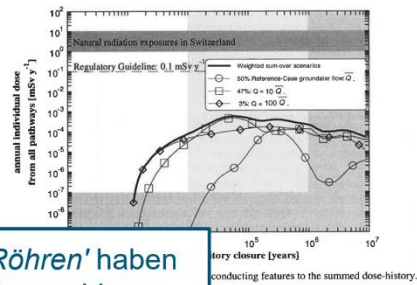
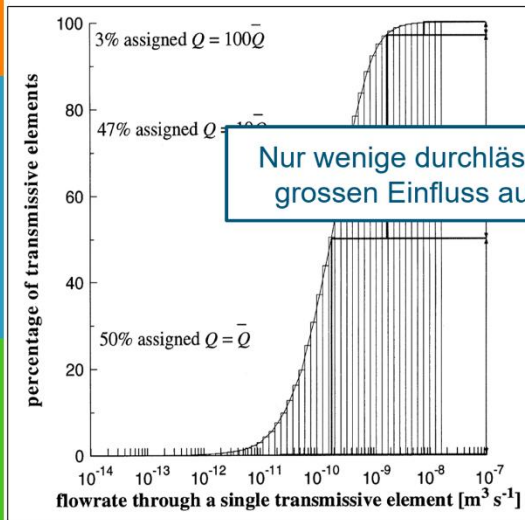
Einfluss Heterogenität Wasserfluss (für HAA-WA)

vereinfachte Betrachtung – Aufteilung Gesamtfluss in drei 'Bereiche'



Einfluss Heterogenität Wasserfluss (für HAA-WA)

vereinfachte Betrachtung – Aufteilung
Gesamtfluss in drei 'Bereiche'



30

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

NTB 93-22, Fig. 6.2.13 & 6.2.14

Re-evaluation der Standortmöglichkeiten (2008)

Sicheres Lager im Kristallin ist machbar, hat
aber klare Nachteile gegenüber Opalinuston

Prüfung der Mindestanforderungen zur Identifikation potenziell möglicher Wirtsgesteine HAA									
Gesteinsart bzw. Gesteinsfolge (Reihenfolge der Sedimentgesteine stratigraphisch)	Verbreitung	Indikatoren					Bemerkungen		
		Hydraulische Durchlässigkeit	Homogenität des Gesteinsaufbaus	Verbreitung	Verbreitung	Verbreitung			
Kalksteine verschiedenen Alters	östl. Tafelja / östliche SZ						Wegen allg. hoch hydraul. Durchlässigkeit nicht näher untersuchen		
Sandsteine verschiedenen Alters	östl. Tafelja / östliche SZ						Wegen allg. hoch hydraul. Durchlässigkeit nicht näher untersuchen		
Exposithaltonen der Tria	östl. Tafelja / östliche SZ								
Opalinuston	östl. Tafelja / östliche SZ								
Tongesteinsabfolge 'Brauner Dugger'	Tafelja								
Efflinger Schichten	östl. Tafelja / östliche SZ								
USM (Marnes Barioles s. str.)	westliches Molassebecken								
OSM (Basizone und Bodensee-Schüttung)	östliches Molassebecken								
Quartäre Sedimentgesteine	Molassebecken								
Kristalline Gesteine (wenig deformierte Blöcke)	Nordschweiz								

Legende:
Potenziell mögliches Wirtsgestein bzw. einschläusswinkamer Gebirgsbereich
Gesteinsart als Wirtsgestein ausgeschlossen
SZ: Subjassische Zone

Gesteinsart bzw. Gesteinsfolge (Reihenfolge der Sedimentgesteine stratigraphisch)	Verbreitung	Indikatoren		
		Hydraulische Durchlässigkeit	Homogenität des Gesteinsaufbaus	Verbreitung
Opalinuston	östlicher Tafelja / östliche Subjassische Zone			
Tongesteinsabfolge 'Brauner Dugger'	östlicher Tafelja			
Efflinger Schichten	östlicher Tafelja / östliche Subjassische Zone			
USM (Marnes Barioles s. str.)	westliches Molassebecken			
OSM (Basizone und Bodensee-Schüttung)	östliches Molassebecken			
Kristalline Gesteine (wenig deformierte Blöcke)	Nordschweiz			

Legende:
bevorzugtes Wirtsgestein
potenziell mögliches Wirtsgestein
verschärfte Anforderung mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt

Technischer Bericht 08-04

Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager

Geologische Grundlagen

Textband

Oktober 2008

In Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Anstalt für Umwelt und Naturwissenschaften (EAWAG) in Dübendorf

www.nagra.ch

... begrenztes Platzangebot

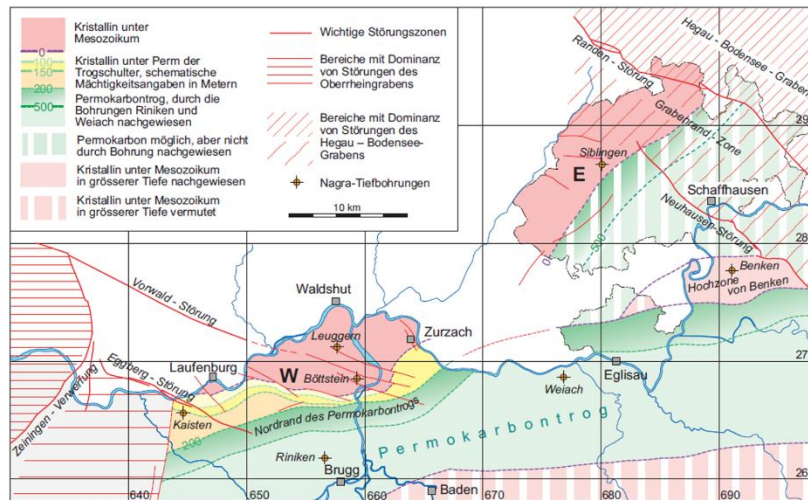


Fig. 4.3-50: Geologisch-tektonische Verhältnisse im Grundgebirge unter der Basis des Mesozoikums (aus Nagra 2005).

31

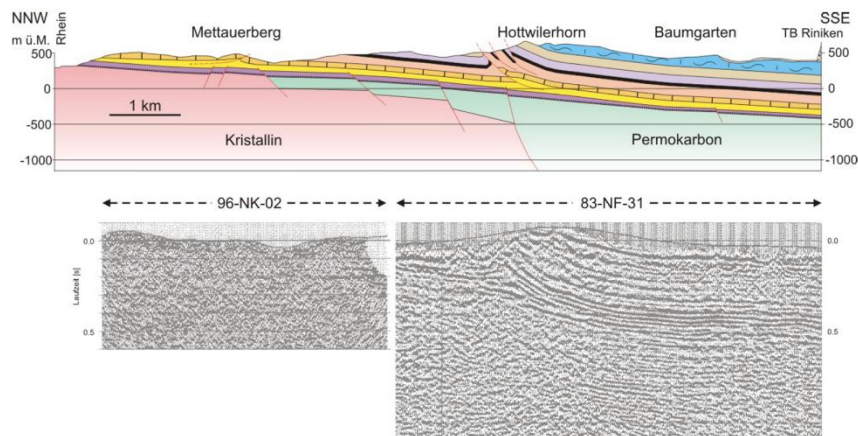
Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Kristallines Grundgebirge: Explorierbarkeit (Seismik)

Zuverlässige Abbildung interner kleiner Strukturen ist mit Seismik nicht machbar (Bedeutung Einfluss der mächtigen Sedimentbedeckung)

Aber: Sedimentbedeckung bildet gute Abschirmung vor Oberflächenprozessen (z.B. Infiltration sub-glaziales Wasser)



32

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Schlussfolgerungen: HAA-Lager im Kristallin (CH)

- Ausdehnung und Tiefe der Permokarbontröge viel grösser als ursprünglich erwartet (→ stark reduzierte Standortmöglichkeiten)
- Wasserführende Systeme und ihre Eigenschaften sind sehr komplex ('channeling'); Details haben grossen Einfluss auf RN-Rückhaltung
- beschränkte Möglichkeiten zur Erkundung von der Oberfläche (Sedimentbedeckung, Heterogenität Kristallin, seismische Kontraste)
- Erfahrungen in Finnland und Schweden zeigen, dass die Erfassung kleinräumiger Heterogenität auch ohne Sedimentbedeckung schwierig ist; Informationen auch aus untertägigen Bauten sind notwendig
- Aber: sicheres Lager ist grundsätzlich auch im Kristallin möglich
- Das parallel zum Abschluss 'Kristallin' begonnene Sedimentprogramm zeigt für die Schweiz aber klare Vorteile für den Opalinuston

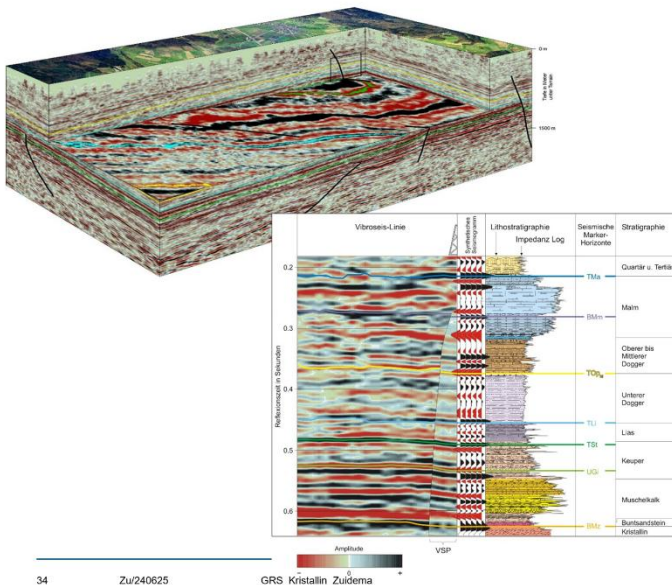
34

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Felduntersuchungen (Zürcher Weinland – Benken)

3D-Seismik (1996/97), Bohrung Benken (1998/99): Basis für Entsorgungsnachweis (2002)

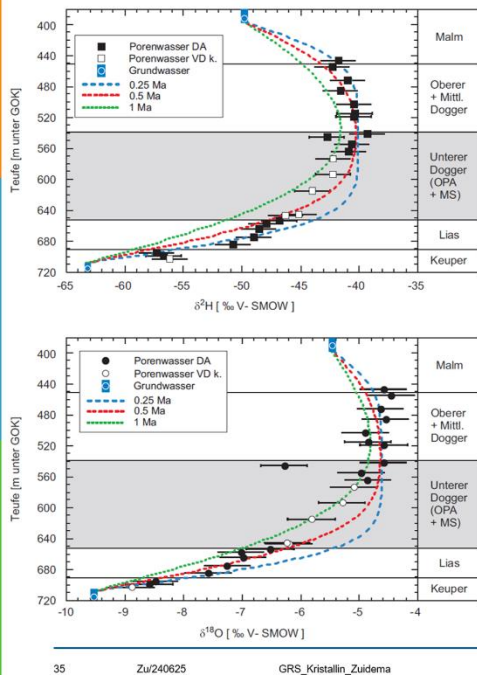


34

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Unabhängige Hinweise auf Diffusion: Isotopenprofile



- Form der Profile: zeigen Art und Rate der **Transportprozesse**
- Daten: Beispiel **Bohrung Benken**
- Zwei in der **Natur vorkommende Isotope**: ^2H , ^{18}O
- Modellierung:
 - **Anfang**: gleiche Konzentration in allen Schichten
 - **Änderung Wasserzusammensetzung** in Malm und Keuper vor ca. 1 Million Jahren (Varianten)
 - "Best Fit": **nur Diffusion** (keine Advektion)
- '... im Opalinuston und den Rahmengesteinen ist **Diffusion der dominante RN-Transportprozess**'

Entsorgungsnachweis 2002 (NTB 02-03)

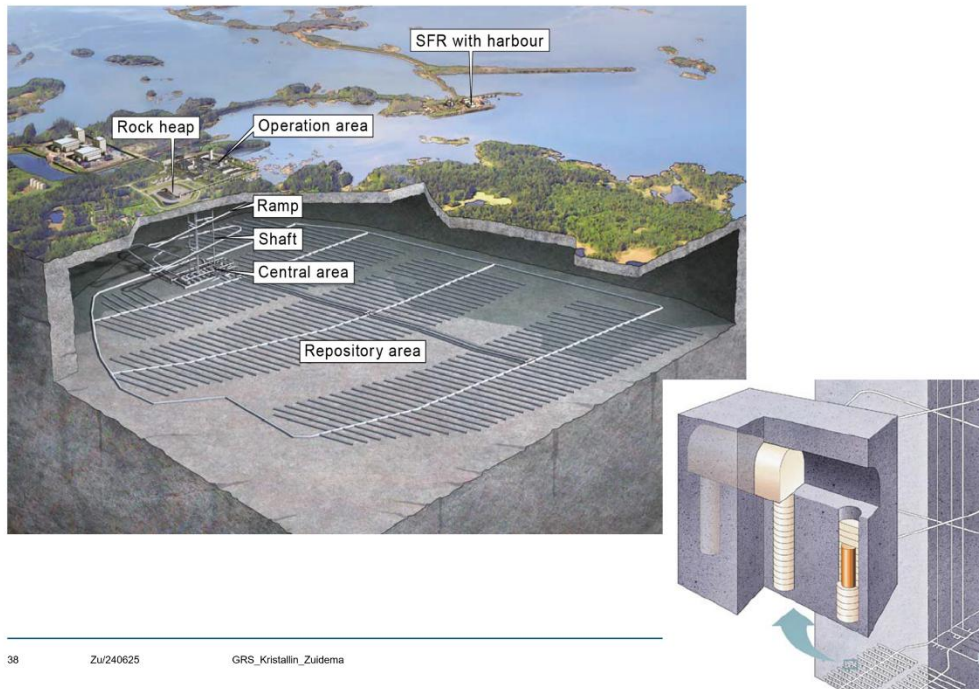
Entsorgungsnachweis Opalinuston

- Opalinuston ist sehr wirksame Transportbarriere
- Bedeutender Beitrag der Rahmengesteine zur Barrierenwirkung
- Unabhängige Evidenzen zum Diffusions-dominierten Transport
- Wirkungsvolles Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons
- Opalinuston alleine bietet sehr hohe Sicherheit (Wirtgestein als Hauptbarriere)
- geotechnisches Gebirgsverhalten deutlich günstiger als ursprünglich erwartet (zu Beginn des Nagra-Programms)
- Gute Explorier- und Charakterisierbarkeit des Opalinustons (Homogenität, klares seismisches Abbild, Extrapolier- / Interpolierbarkeit der Bohrbefunde)
- In der Schweiz hat der Opalinuston klare Vorteile gegenüber dem Kristallin

37 Zu/240625 GRS_Kristallin_Zuidema

Entsorgungsnachweis 2002

Endlager im Kristallin (SKB, Forsmark)



38

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Kristallin-Programm: wichtige Kontakte & Erfahrungen

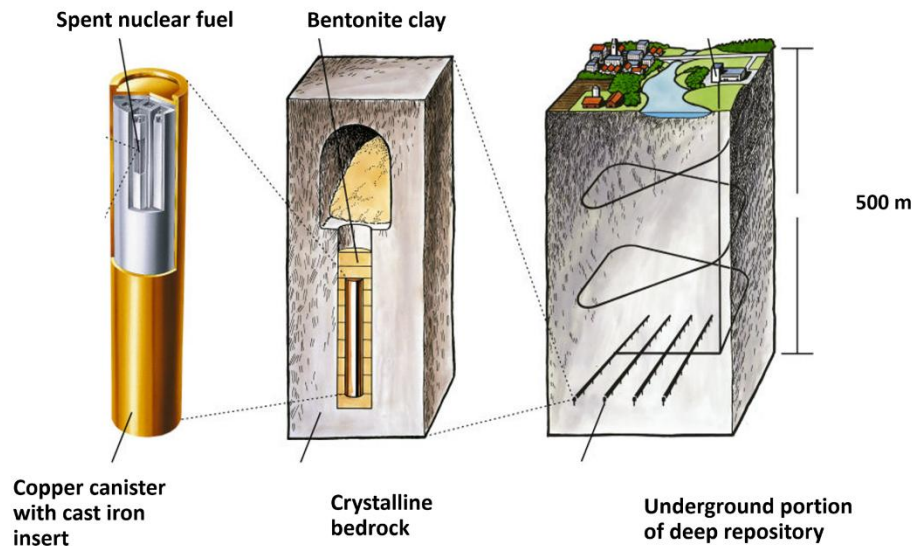
... viel Innovation von bleibendem Wert durch weitergeführte Zusammenarbeit



S_Kristallin_Zuidema

Sicherheitskonzept für Endlager im Kristallin

Einschluss durch Kupfermantel und Innenbehälter (Beispiel: Schweden, Finnland)



39

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Klimaphasen: periodische Vergletscherungen

Vergletscherung

- Maximale Vergletscherung: hohe Wasserdrucke
- Einfluss Gebirgsspannungen: Erdbeben → Scherbewegungen
- Einfluss auf Wasserspiegel Meer: periodisch Meerwasserinfiltration (Wasserchemie)
- Abschmelzen Gletscher: Infiltration Schmelzwasser (Wasserchemie)

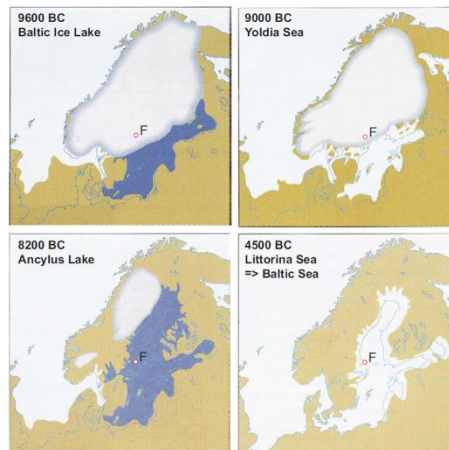


Figure 4-20. Map of Fennoscandia with some important stages during the Holocene interglacial period. Four main stages characterise the development of the aquatic systems in the Baltic basin since the latest deglaciation: the *Baltic Ice Lake* (13 000–9500 BC), the *Yoldia Sea* (9500–8800 BC), the *Ancylus Lake* (8800–7500 BC) and the *Littorina Sea* 7500 BC–present). Fresh water is symbolised with dark blue and marine/brackish water with pale blue. The Forsmark area (notated 'F') was probably at or close to the rim of the retreating ice sheet during the Yoldia Sea stage (Figure 11-22 in the *Site description Forsmark*).

40

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

SKB TR 21-01, p. 132

Klimaphasen: periodische Vergletscherungen

Vergletscherung

- Maximale Vergletscherung: hohe Wasserdrucke
- Einfluss Gebirgsspannungen: Erdbeben → Scherbewegungen
- Einfluss auf Wasser: periodisch Meer (Wasserchemie)
- Abschmelzen Gletscher: Infiltration Schmelzwasser (Wasserchemie)

In Finnland und Schweden bestehen anspruchsvolle Umweltbedingungen



Figure 4-20. Map of Fennoscandia with some important stages during the Holocene interglacial period. Four main stages characterise the development of the aquatic systems in the Baltic basin since the latest deglaciation: the Baltic Ice Lake (13 000–9 500 BC), the Yoldia Sea (9 500–8 800 BC), the Ancylus Lake (8 800–7 500 BC) and the Littorina Sea 7 500 BC–present. Fresh water is symbolised with dark blue and marine/brackish water with pale blue. The Forsmark area (notated 'F') was probably at or close to the rim of the retreating ice sheet during the Yoldia Sea stage (Figure 11-22 in the Site description Forsmark).

Sicherheitskonzept (Bild Posiva) ...

... zeigt auf, wie genügende Sicherheit erreicht wird, inkl. Zuordnung der Sicherheitsfunktionen auf verschiedene Barrieren-Elemente

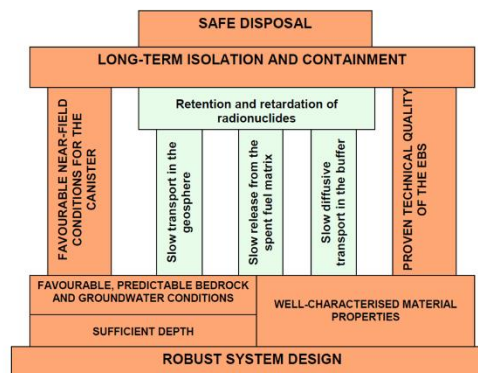


Figure 3. Outline of the safety concept. Orange blocks indicate the primary safety features and properties of the disposal system. Green blocks indicate secondary safety features that become important in the event of a radionuclide release from a canister.

Sicherheitskonzept (Bild Posiva) ...

... zeigt auf, wie genügende Sicherheit erreicht wird, inkl. Zuordnung der Sicherheitsfunktionen auf verschiedene Barrieren-Elemente

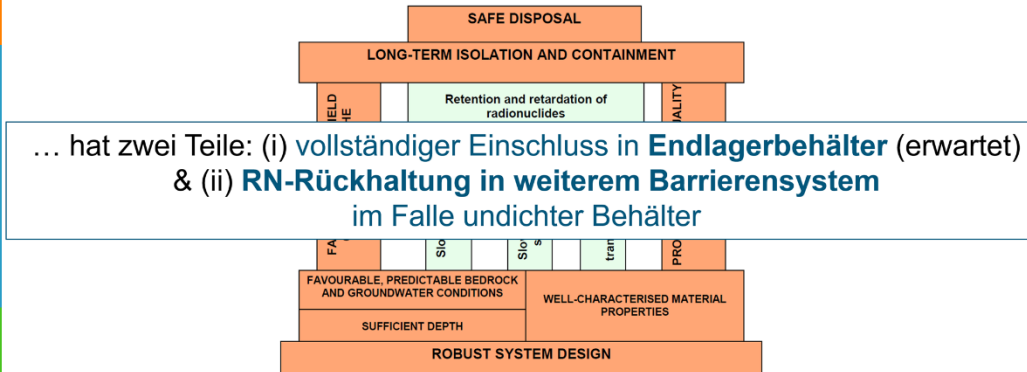


Figure 3. Outline of the safety concept. Orange blocks indicate the primary safety features and properties of the disposal system. Green blocks indicate secondary safety features that become important in the event of a radionuclide release from a canister.

43

Zu240625

GRS_Kristallin_Zuidema

POSIVA 2012-03

Seismisches Abbild Untergrund (SKB TR 08-05)

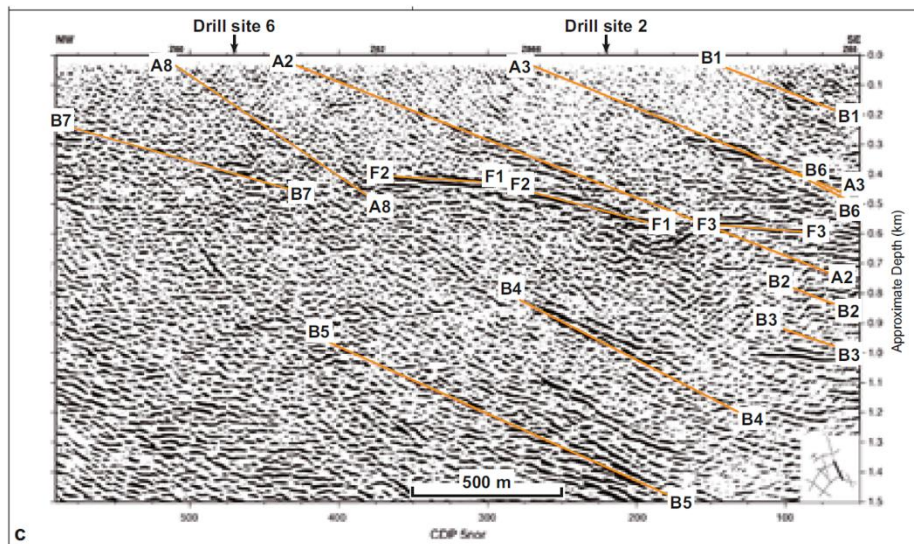


Figure 5-21. a) Correlation of stacks along the intersection of profiles 3 and 5.1 in the south-eastern part of the candidate area. b) Correlation of stacks along the intersection of profiles 1 and 4 in the north-western part of the candidate area. c) Migrated section of the reprocessed northern part of profile 5 down to 0.5 seconds (c. 1.5 km depth). The majority of the reflectors have been identified (e.g. F1) and are shown

Seismisches Abbild Untergrund (SKB TR 08-05)

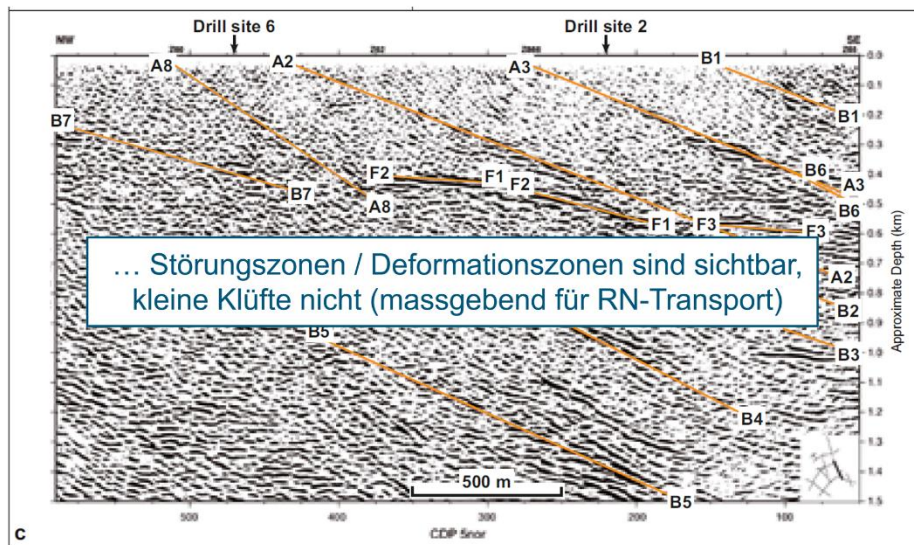
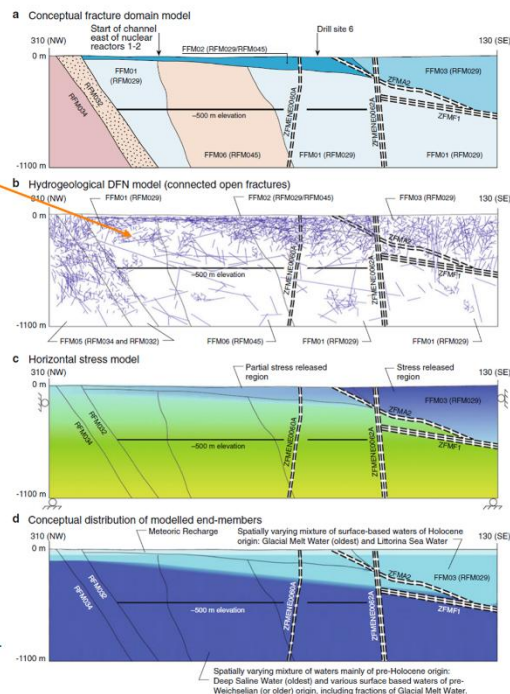


Figure 5-21. a) Correlation of stacks along the intersection of profiles 3 and 5.1 in the south-eastern part of the candidate area. b) Correlation of stacks along the intersection of profiles 1 and 4 in the north-western part of the candidate area. c) Migrated section of the reprocessed northern part of profile 5 down to 0.5 seconds (c. 1.5 km depth). The majority of the reflectors have been identified (e.g. F1) and are shown

Situation im Kristallin (Beispiel: Schweden)

- grösserräumige Geometrie, inkl. Störungszonen (zu meiden mit Lagerkammern)
- kleinere Diskontinuitäten
- Zustandsparameter, z.B.:
 - Spannungen
 - in-situ Hydrochemie



Johan Andersson, Kristina Skagius, Anders Winberg, Tobias Lindborg, Anders Ström (2013): Site-descriptive modelling for a final repository for spent nuclear fuel in Sweden

Geologische Untersuchungen Olkiluoto (SF)

Situation in Skandinavien ist anders als in der Nordschweiz:
Untersuchungen von Oberfläche möglich



Bohrungen



Trenching (2D Kartierung von (Diskontinuitäten))

47

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Geologische Kartierung (Skandinavien)



48

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Kartierung Klüfte (SKB R-07-46)

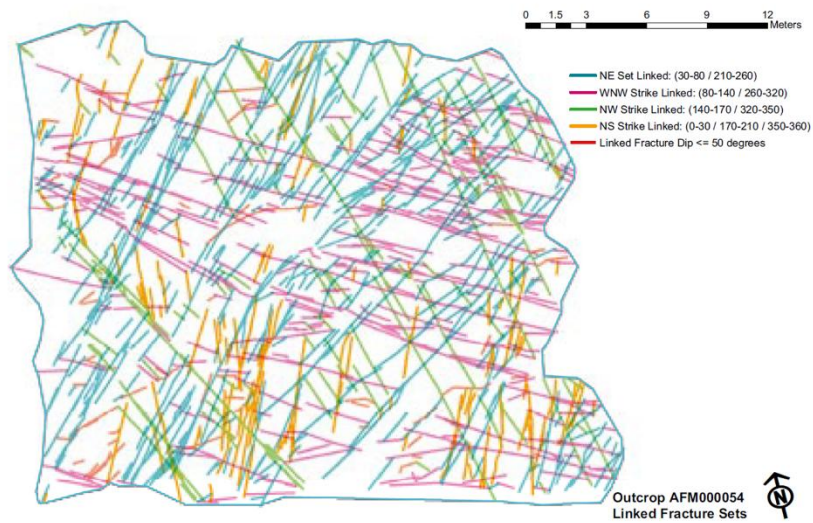


Figure 4-12. Fracture sets (linked) identified through trace data analysis, Outcrop AFM000054.

49

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Kluftnetzwerke: Modell (SKB TR-08-05)

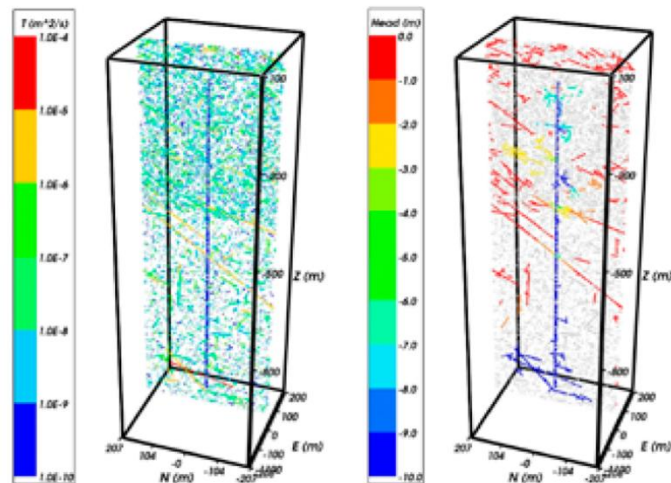


Figure 8-38. Vertical cross-section through one realisation of the hydrogeological DFN model of fracture domain FFM01 with different fracture intensity above and below 400 m depth. Left: All open fractures coloured by transmissivity. The 1 km generic vertical borehole is coloured blue in the middle of the figure. Right: The connected open fractures coloured by drawdown with unconnected fractures coloured grey.

50

Kluftnetzwerke: Modell (SKB R-17-11)

3-D Darstellung: Geometrie (vereinfachte Rechtecke) & Wasserfluss → Drucke

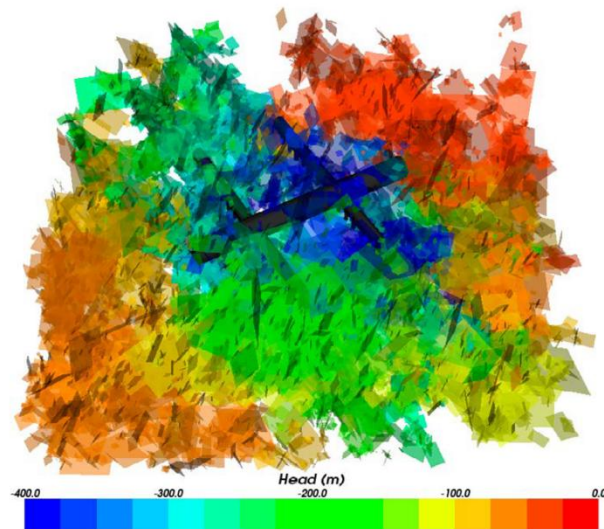


Figure 2-13. Head in the fractures near the engineered openings in a portion of the HypoSite model. Blue

51

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Kluftnetzwerke: Modell (SKB R-17-11)

... Modellierung Kluftnetzwerk im **Bereich der Lagertunnel (beim Bau)**

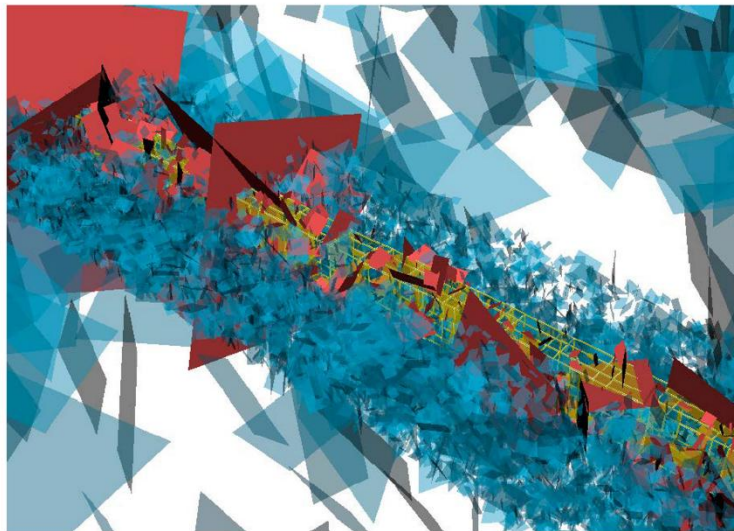


Figure 2-2. An unconditioned realisation of the fractures in a region around a tunnel, with the fractures

52

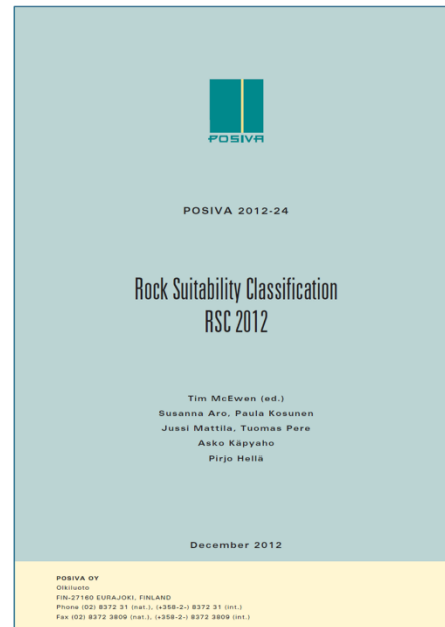
Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Rock suitability classification ...

Während Bau und Erweiterung des Endlagers

- ... detaillierte untertägige Charakterisierung zur **Meidung ungünstiger Situationen** bezüglich:
 - hydraulischer Eigenschaften
 - geochemischer Bedingungen
 - mechanischer Stabilität
- ... Analysen zu **verschiedenen Zeitpunkten und auf verschiedenen Skalen**
 - gesamtes Lager → **Lagerfelder** (Meidung Deformationszonen)
 - Eignung **Lagertunnels**
 - Eignung **Einlagerungsbohrungen**



54

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Aktivitäten & Ziele in den verschiedenen Phasen

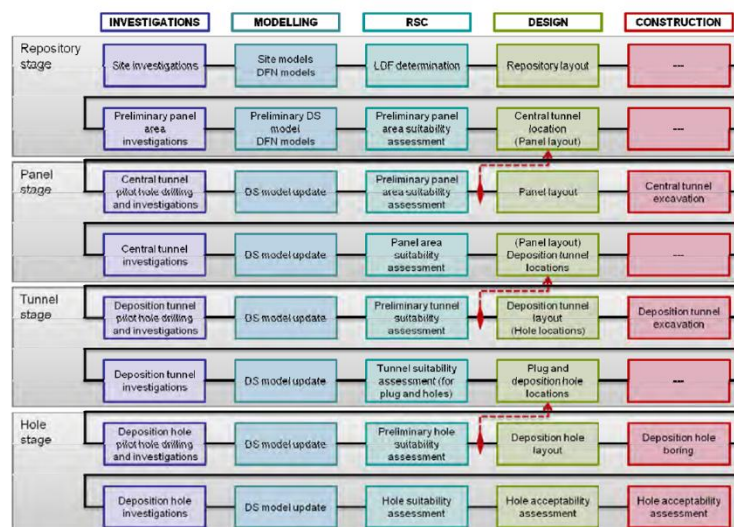
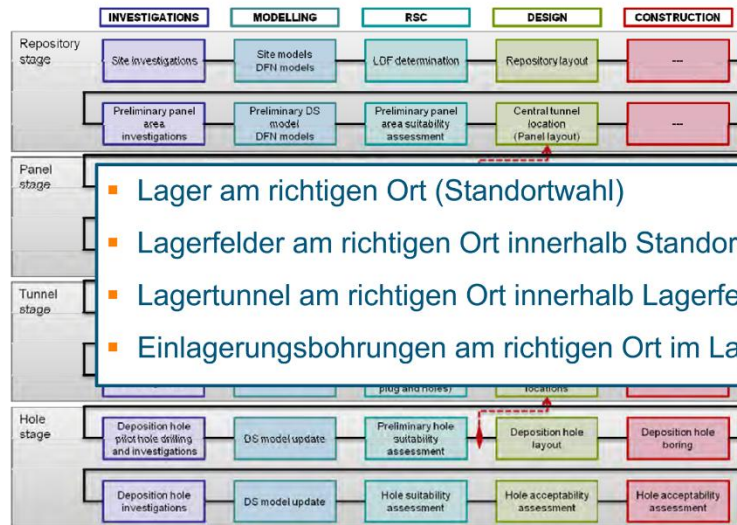


Figure 7-2. A general outline of the repository construction process and the flow of investigation, modelling, RSC system, design and construction activities. The red diamonds represent main decision-making points preceding the construction of new repository rooms, and the red arrows indicate return to the previous design step (the selection of a new location for a tunnel or hole) in the case of a negative decision. POSIVA 2012-24

55

Aktivitäten & Ziele in den verschiedenen Phasen



- Lager am richtigen Ort (Standortwahl)
- Lagerfelder am richtigen Ort innerhalb Standorts
- Lagertunnel am richtigen Ort innerhalb Lagerfeld
- Einlagerungsbohrungen am richtigen Ort im Lagertunnel

Figure 7-2. A general outline of the repository construction process and the flow of investigation, modelling, RSC system, design and construction activities. The red diamonds represent main decision-making points preceding the construction of new repository rooms, and the red arrows indicate return to the previous design step (the selection of a new location for a tunnel or hole) in the case of a negative decision.

POSIVA 2012-24

Verschiedene Phasen des Testens ...

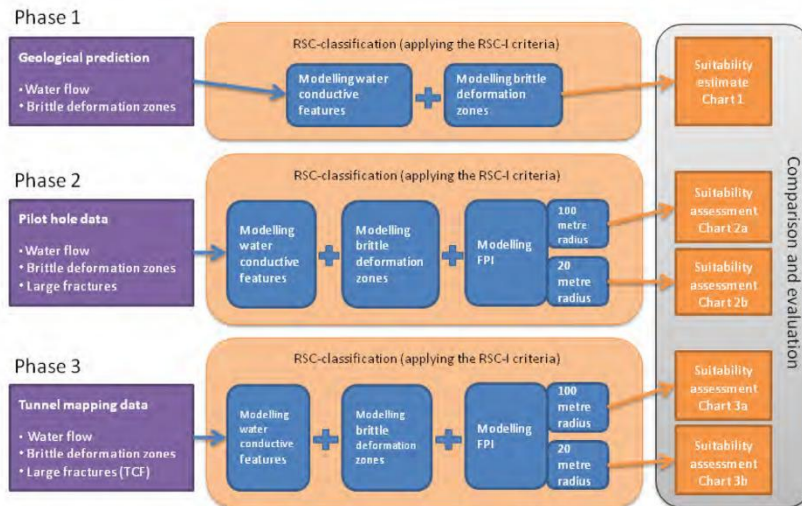


Figure 4-1. Flow chart giving an overview of the test procedure. Rectangles denote data: lilac - starting data, orange - resulting data. Rounded rectangles denote action. See text for further explanation. From Kosunen et al. (2012).

Verschiedene Phasen des Testens ...

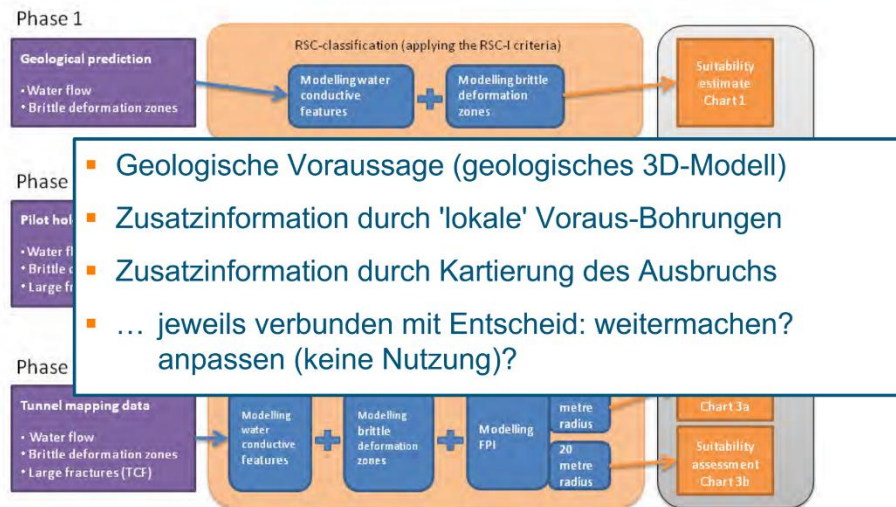


Figure 4-1. Flow chart giving an overview of the test procedure. Rectangles denote data: lilac - starting data, orange - resulting data. Rounded rectangles denote action. See text for further explanation. From Kosunen et al. (2012).

Freisetzungspfade (SKB TR 08-05)

... über Kluftnetzwerk aus dem Lager ('disposal holes')

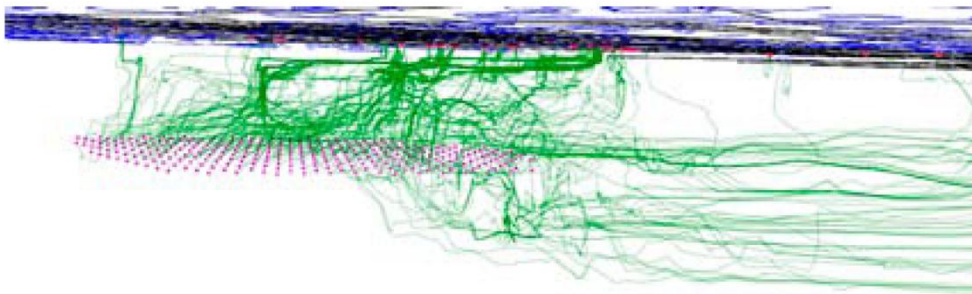
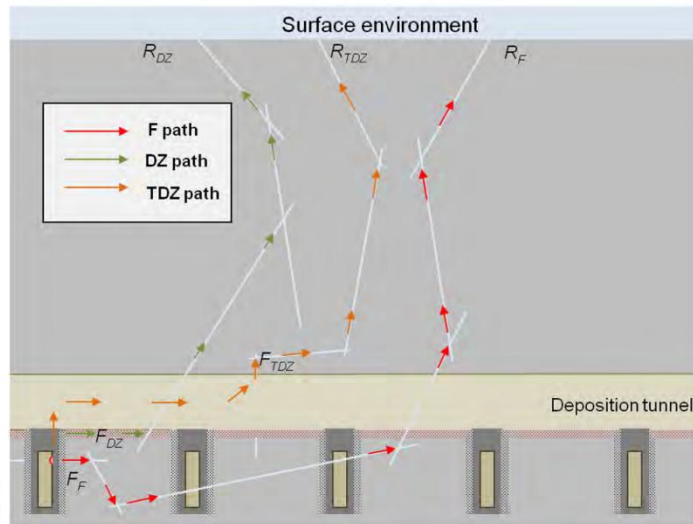


Figure 8-59. A perspective view through the subsurface towards the north-west showing the impact of the high horizontal transmissivity of the shallow bedrock aquifer on the particle tracking shown in Figure 8-58.

Geologische Barriere: Einfluss der Heterogenität ...

... führt zu Transportpfaden mit unterschiedlicher Rückhaltung

(Beispiel KBS-3V)



Posiva 2012-09 (Fig. 4-4)

59

Zu/240625

GRS_Kristalli

Schnelle und langsame Freisetzungspfade

... basierend auf Kluftnetzwerk-Modellen (kumulative Verteilung)

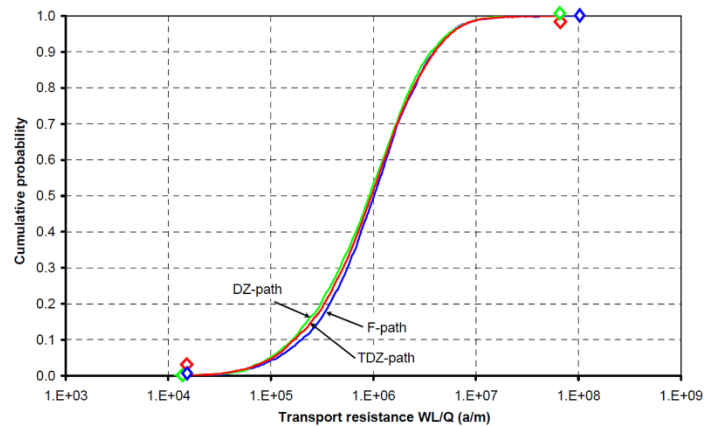


Figure 4-13. Cumulative distribution functions of WL/Q for the F-, DZ- and TDZ-paths in ps_r0_5000 .

Posiva 12-09

60

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Schnelle und langsame Freisetzungspfade

... basierend auf Kluftnetzwerk-Modellen (kumulative Verteilung)

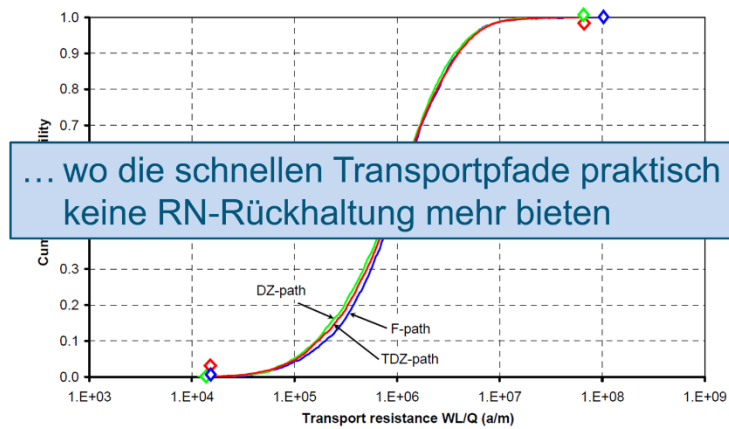


Figure 4-13. Cumulative distribution functions of WL/Q for the F-, DZ- and TDZ-paths in ps_r0_5000 .

Posiva 12-09

61

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Einfluss 'channelling'

Sensitivität des Einflusses von 'channelling' und Matrixdiffusion

(Porenraum der Gesteinsmatrix)

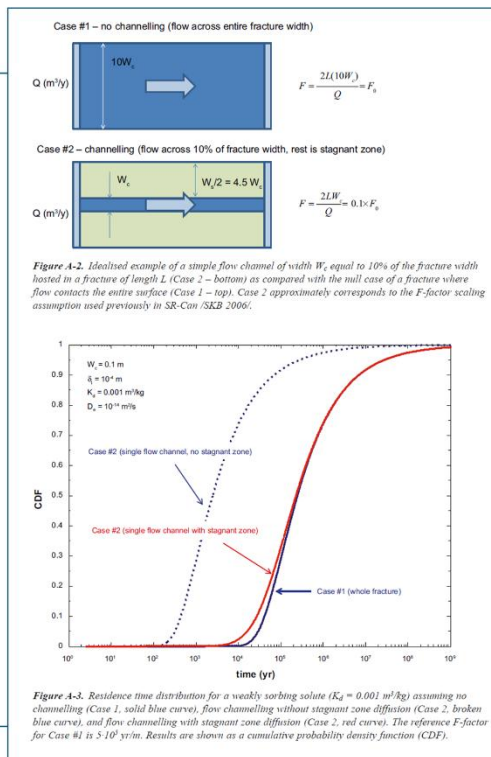
P.S.: Matrixdiffusion → 'parkieren' von Radionukliden im stagnierenden Porenwasser der Gesteinsmatrix (inkl. Sorption)

SKB TR-10-50

62

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema



Bei Undichtheit eines Behälters (pinhole¹⁾) ...

Nahfeldfreisetzung

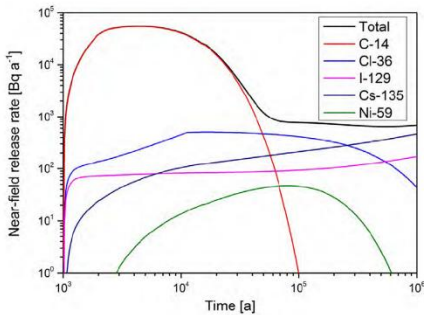


Figure 7-1. Evolution of the total radionuclide release rate from the repository near field to the geosphere, summed over the F-, DZ- and TDZ-paths, and the evolution of release rates of C-14, Cl-36, I-129, Cs-135 and Ni-59, which are the five radionuclides making the greatest contributions to the total.

Freisetzung aus Geologie
(für sehr ungünstigen Freisetzungspfad)

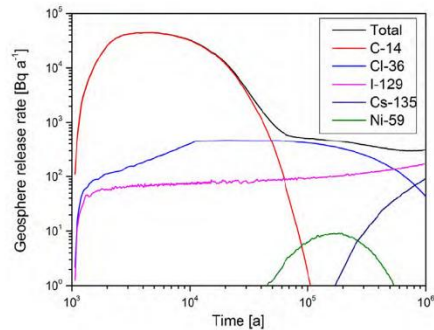


Figure 7-3. Evolution of the total radionuclide release rate from the geosphere to the surface environment, summed over the F-, DZ- and TDZ-paths, and the evolution of release rates of C-14, Cl-36, I-129, Cs-135 and Ni-59, which are the five radionuclides making the greatest contributions to the total. Note: the oscillations in the curve for I-129 arise from the numerical solution technique used by MARFA, whereby particles

¹⁾ ein kleines Loch wirkt als Transportbarriere (IRF kaum sichtbar)

Posiva 2012-09

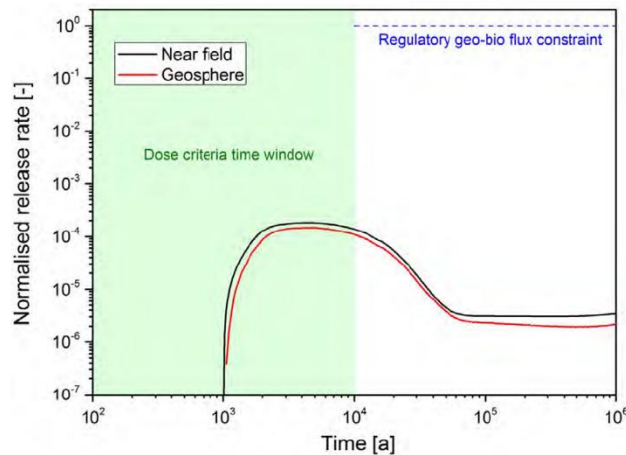
63

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Bei Undichtheit eines Behälters (pinhole¹⁾) ...

beschränkte Wirkung der geologischen Barriere (für sehr ungünstigen Freisetzungspfad)



Posiva 2012-09

Figure 7-5. Evolution of the near-field and geosphere release rates, with the release rates for each radionuclide normalised with respect to the regulatory nuclide-specific constraints for radioactive releases to the environment.

64

Zu/240625

Behälter mit Cu-Mantel: Einschluss für 1 Mio. Jahre



65

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema

Schlussfolgerungen

- Sicheres Lager im Kristallin ist möglich – KBS-3 Konzept erlaubt es, an vielen Orten (in Schweden / Finnland) ein sicheres Lager zu bauen
- Sicherheitskonzept KBS-3: Einschluss Brennelemente in langlebigen Behältern wegen 'fast channels'
- Aber: 'Behälter'-Versagen nicht vollständig ausgeschlossen; aber: kleine Zahl betroffener Behälter – dazu: Prüfung der Eignung der Lagerbauwerke (rock suitability classification) bei ihrem Bau
- Schweden / Finnland: anspruchsvolle Umweltbedingungen (Gletscher, Meer)
- Weiter: non-destructive testing (NDT) der Endlagerbehälter ist nicht einfach ...
- Kristallin im Deutschen Standortwahlverfahren – meine Interpretation
 - Chancen auf beste Sicherheit: ?
 - Explorierbarkeit / Charakterisierbarkeit: Zuverlässigkeit der Aussagen: ?
 - vollständige geologische Information erst beim Bau der Einlagerungsbauwerke (Informationen aus rock suitability classification): ?
- P.S.: die Herausforderungen im Kristallin sind inhärent; weitere Forschung dazu wird wenig ändern

66

Zu/240625

GRS_Kristallin_Zuidema



**Besten Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**

piet.zuidema@zuidema-consult.ch

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-911727-42-6