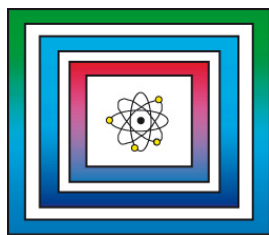


Standortauswahl

9S2019090000; 9S2019100000

Methodik zur Erarbeitung
von Abfolgen von
Erkundungsmethoden
mit Vorschlägen für die
übertägige Erkundung im
Standortauswahlverfahren



Ergebnisbericht

Hannover, Dezember 2022

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND
ROHSTOFFE HANNOVER

Standortauswahl

Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen
Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung
(GeoMePS);

Zusammenstellung und Bewertung von geophysikalischen
Methoden zur übertägigen Erkundung (ZuBeMERk)

Methodik zur Erarbeitung von Abfolgen von Erkundungsmethoden
mit Vorschlägen für die übertägige Erkundung im
Standortauswahlverfahren

Ergebnisbericht

Autoren und Autorinnen:	Richter, Lisa, Dr. Dlugosch, Raphael, Dr. Beilecke, Thies, Dr. Kneuker, Tilo, Dr. Pollok, Lukas Schubarth-Engelschall, Nicole Semroch, Ralf
Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Auftragsnummer:	9S2019090000, 9S2019100000
Datum:	21.12.2022
Geschäftszeichen:	B3.2/B50161-17/2022-0002/001
Gesamtblattzahl:	79

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste
Abteilungsleitung B 3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	4
Abstract	5
1 Einleitung	6
1.1 Bisherige Arbeiten und Zielstellung	7
1.2 Hinweise für die Nutzung von GeM-DB-Inhalten	9
2 Methodik zur automatischen Erstellung von generischen, wirtsgesteins- spezifischen Abfolgen von Erkundungsmethoden	10
2.1 Einleitung zur Methodik	10
2.2 Elemente und Aufbau des Algorithmus	10
2.2.1 Input: Parameter, Informationen und Annahmen	12
2.2.2 Berechnung des Mehrwerts einer Methode für die Erkundung	13
2.2.3 Output: Abfolge geeigneter Erkundungsmethoden und Gegenüber- stellung verschiedener „Auswerte-Varianten“	15
3 Ergebnisse und Interpretation	17
3.1 Recherche ausgewählter übertägiger Erkundungsprogramme	17
3.2 Automatisch erstellte generische, wirtsgesteinspezifische Abfolgen von Erkundungsmethoden	18
3.2.1 Auswahl der Inputparameter	18
3.2.1.1 Auswahl und Wichtung der Erkundungsziele	19
3.2.1.2 Wertungspunkte: Bewertung der Eignung	19
3.2.2 Kristallingestein	19
3.2.3 Steinsalz in stratiformer Lagerung	22
3.2.4 Steinsalz in steiler Lagerung	25
3.2.5 Tongestein	28
4 Schlussfolgerungen, Vorschläge und Hinweise	31
5 Zusammenfassung und Ausblick	33

Seite

Literaturverzeichnis	35
Abkürzungsverzeichnis	39
Abbildungsverzeichnis	40
Anhangverzeichnis	42

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren und Autorinnen:	Richter, Lisa, Dr. Dlugosch, Raphael, Dr. Beilecke, Thies, Dr. Kneuker, Tilo, Dr. Pollok, Lukas Schubarth-Engelschall, Nicole Semroch, Ralf
Titel:	Methodik zur Erarbeitung von Abfolgen von Erkundungsmethoden mit Vorschlägen für die übertägige Erkundung im Standortauswahlverfahren
Schlagwörter:	Erkundungsziele, Geowissenschaftliche Erkundungsmethoden, GeM- DB, Methodendatenbank, Standortauswahlverfahren, übertägige Erkundung

Im Rahmen der Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle wurden in den von der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) beauftragten Arbeitspaketen GeoMePS und ZuBeMERk (1) Erkundungsziele für die übertägige Standorterkundung abgeleitet, (2) dafür geeignete Erkundungsmethoden identifiziert, in der Datenbank GeM-DB zusammengestellt und verknüpft, sowie (3) übertägige Erkundungsprogramme für Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle innerhalb und außerhalb Deutschlands recherchiert und ausgewertet. Der vorliegende Bericht beschreibt die Vorgehensweise, wie aus den Datenbank-Inhalten und Erkenntnissen der übertägigen Erkundungsprogramme wirtsgesteinsspezifische Abfolgen von Erkundungsmethoden sowie generelle Vorschläge und Hinweise für die übertägige Erkundung von Standortregionen in Deutschland erarbeitet werden können.

Abstract

Authors:	Richter, Lisa, Dr. Dlugosch, Raphael, Dr. Beilecke, Thies, Dr. Kneuker, Tilo, Dr. Pollok, Lukas Schubarth-Engelschall, Nicole Semroch, Ralf
Title:	Methodology for the development of sequences of exploration methods and suggestions for surface exploration in the site selection procedure
Subject terms:	Exploration objectives, geoscientific exploration methods, GeM-DB, database of geophysical and geoscientific methods, site selection procedure, surface exploration

In the context of the site selection process for a repository for high-level radioactive waste, the Federal Company for Radioactive Waste Disposal (BGE) commissioned the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) with two work packages – GeoMePS and ZuBeMERk. The task comprised (1) deduction of exploration objectives for surface site exploration, (2) identification of suitable exploration and investigation methods, the compilation and link of exploration objectives and methods within the database GeM-DB, and (3) the research and analysis of surface exploration programs for repository sites for high-level radioactive waste inside and outside of Germany. This report describes the methodology for generating host rock-specific sequences of exploration methods as well as general proposals and suggestions for the surface exploration of siting regions in Germany from the database contents and findings of the surface exploration programs.

1 Einleitung

Mit Abschluss der Phase I des Standortauswahlverfahrens übermittelt die BGE Vorschläge für die übertägig zu erkundenden Standortregionen an das BASE. Zusammen mit diesen Vorschlägen sollen von der BGE standortbezogene Erkundungsprogramme vorgelegt werden (gemäß § 14 StandAG 2017).

In diesem Zusammenhang hat die BGE als Vorhabenträgerin die BGR mit der Zusammenstellung von übertägig, aus der Luft und in Bohrungen einsetzbaren geowissenschaftlichen und geophysikalischen Erkundungsmethoden beauftragt. Die Arbeiten erfolgen in zwei von der BGE übertragenen Arbeitspaketen:

- GeoMePS: „Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung“ und
- ZuBeMERk: „Zusammenstellung und Bewertung von geophysikalischen Methoden zur übertägigen Erkundung“.

Die BGE entwirft ein Konzept für die Erarbeitung standortbezogener Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung (BGE 2022a). Dabei ist zunächst die Erstellung von wirtsgesteinsspezifischen Erkundungsprogrammen geplant, gefolgt von der Erarbeitung beispielhafter standortbezogener Erkundungsprogramme (BGE 2022a). Als Grundlage für die übertägige Erkundung dienen die aus den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) abgeleiteten Erkundungsbedarfe (BGE 2022b). Erkundungsbedarfe stellen nach BGE (2022b) Kenntnisdefizite dar, die durch Erkundungsmaßnahmen verringert oder beseitigt werden können. Sofern Erkundungsbedarfe hinsichtlich der Nichterfüllung der Ausschlusskriterien und der Erfüllung der Mindestanforderungen vorliegen, erhalten diese die höchste Priorität. Bestehen Erkundungsbedarfe, die hinsichtlich der Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems relevant sind, so kommt diesen eine hohe Priorität zu. Erkundungsbedarfe werden sich zudem aus den Anforderungen der in Phase II durchzuführenden weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (wvSU) ergeben.

Ein wesentliches Ziel der BGR Arbeitspakete GeoMePS und ZuBeMERk ist es, aus der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB und dem Wissen aus analysierten Erkundungsprogrammen, (1) Abfolgen von Erkundungsmethoden und (2) generelle Vorschläge und Hinweise für die übertägige Erkundung zu erarbeiten. Die Abfolgen von Erkundungsmethoden können als Grundlage für die durch die BGE zu planenden Erkundungsprogramme nach den im StandAG definierten Anforderungen an einen Standort (§§ 22 – 24) verstanden werden. Die generellen Vorschläge und Hinweise hingegen basieren u. A. auf den Erkenntnissen der analysierten übertägigen Erkundungsprogramme.

1.1 **Bisherige Arbeiten und Zielstellung**

Im ersten Schritt der Bearbeitung beider Arbeitspakete wurden Erkundungsziele für die übertägige Erkundung gemäß § 16 StandAG abgeleitet (Abb. 1) (Kneucker et al. 2020). Im zweiten Schritt wurden anhand der abgeleiteten Erkundungsziele geeignete Erkundungsmethoden identifiziert und essentielle Metadaten zu den Erkundungsmethoden zusammengestellt (z. B.: Allgemeine Methodenbeschreibung, Messgrößen, Eindringtiefe, siehe BGR (2022)). Als Erkundungsmethode wird in diesem Zusammenhang z. B. auch die Anwendung eines Messgeräts oder ein Verfahren zur Ermittlung eines konkreten Parameters (z. B. Dichte, Gesteinsdurchlässigkeit oder Mineralbestand) verstanden (Kneucker et al. 2021). Zur Zusammenstellung und Recherchemöglichkeit von Erkundungszielen und -methoden wurde in diesem zweiten Schritt auch die Datenbankanwendung „GeM-DB“ entwickelt (siehe Beilecke et al. 2021; Semroch et al. 2022).

Ein Kernelement von GeM-DB ist die Verknüpfung von Erkundungszielen und Erkundungsmethoden durch eine wirtsgesteinsspezifische Bewertung der Eignung der jeweiligen Erkundungsmethoden für die Erkundungsziele in die Kategorien „sehr gut“, „gut“, „weniger gut“ geeignet oder „keine Eignung“. Diese Einteilung kann in den meisten Fällen so verstanden werden, dass eine Erkundungsmethode als „sehr gut“ geeignet bewertet ist, wenn das Erkundungsziel direkt bestimmt werden kann oder die Erkundungsmethode essentielle Beiträge zu komplexen Erkundungszielen liefert. Wenn eine Erkundungsmethode das Erkundungsziel nur indirekt ermitteln kann oder es deutliche Einschränkungen bei der Anwendung gibt, dann ist die Erkundungsmethode als „gut“ geeignet bewertet. Gründe für eine „weniger gute“ Eignung für ein bestimmtes Erkundungsziel sind, wenn (1) die Erkundungsmethode bspw. nur einen ergänzenden Beitrag zu einem Erkundungsziel liefern kann, (2) alternative und deutlich besser geeignete Erkundungsmethode vorhanden sind oder (3) es sehr deutliche Einschränkungen (bspw. Auflösungsvermögen, Eindringtiefe, notwendige Annahmen) bei der Anwendung gibt. Im Rahmen der Methoden-Bewertung in GeM-DB spielen standortspezifische Gegebenheiten keine Rolle und es wird von optimalen Bedingungen für den Einsatz der jeweiligen Erkundungsmethode ausgegangen. Die wirtsgesteins- und erkundungszielspezifische Eignung der Erkundungsmethode kann daher auch als „Erkundungspotenzial“ oder „Potenzial für den Erkenntnisgewinn“ verstanden werden. Einschränkungen für die jeweiligen Erkundungsmethoden (z. B. durch eine Überdeckung des Wirtsgesteins) sind in den Metadaten genauer spezifiziert und textlich erläutert.

Im dritten Schritt der Bearbeitung wurden bisherige Programme der übertägigen Erkundung für einen Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle innerhalb und außerhalb Deutschlands hinsichtlich eingesetzter Erkundungsmethoden, deren zeitliche Reihenfolgen und ggf. erkundete Ziele analysiert und ausgewertet (siehe Kapitel 3.1). Die Ergebnisse dienten durch

den Abgleich der vorhandenen Erkundungsmethoden und Verknüpfungen in GeM-DB u. a. zur erweiterten Qualitätssicherung. Eines der zentralen Ziele der Arbeitspakete GeoMePS und ZuBeMERk ist die Auswertung der Methodendatenbank GeM-DB im Hinblick auf die Erarbeitung von Abfolgen von Erkundungsmethoden für die übertägige Erkundung von verschiedenen Wirtsgesteinen. Die Abfolgen von Erkundungsmethoden ergeben sich aus den Eignungen der Methoden für die ausgewählten Erkundungsziele und stellen Listen von Erkundungsmethoden dar, welche nicht zwingend als zeitliche Abfolgen zu verstehen sind. Neben einer freien Recherche unter möglicher Hinzunahme von Abfragefiltern bietet es sich an, in der Datenbank gezielt mit einheitlicher Methodik und damit „automatisch“ zu recherchieren, um eine subjektive Sichtweise oder Methodenauswahl weitgehend zu vermeiden. Ein mögliches Vorgehen, wie aus den GeM-DB-Inhalten und Informationen der ausgewerteten übertägigen Erkundungsprogramme, Abfolgen von Erkundungsmethoden für die übertägige Erkundung „automatisch“ generiert werden können, wird im Weiteren erläutert.

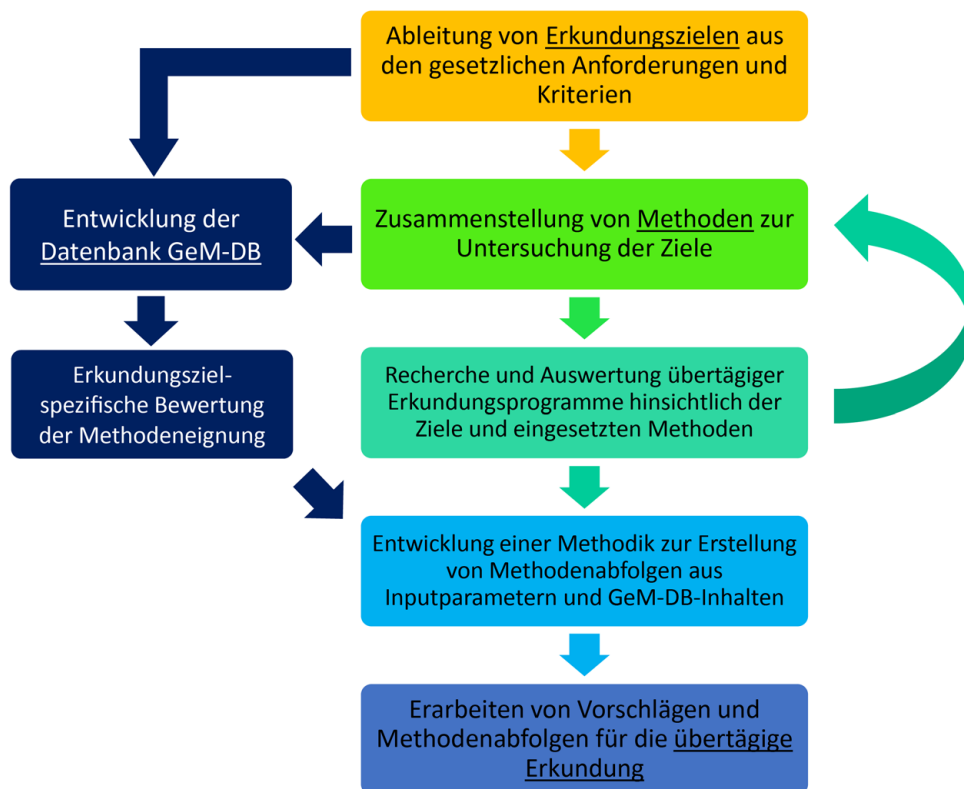


Abb. 1: Wesentliche Arbeitsschritte im Rahmen der Entwicklung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB sowie der sich daraus ergebenden Vorschläge und Methodenabfolgen für die übertägige Erkundung.

1.2 **Hinweise für die Nutzung von GeM-DB-Inhalten**

Die einzelnen Schritte der Arbeitspakete, von der Erkundungszieledefinition über die Zusammenstellung der Erkundungsmethoden, dem technischen Aufbau der Datenbank bis hin zur automatischen Ableitung von Abfolgen von Erkundungsmethoden für die übertägige Erkundung, erforderten eine komplexe Bearbeitung unter Hinzuziehung diversen Fachwissens. Die verarbeiteten Datenbankinhalte, entwickelten Algorithmen und dargestellten Ergebnisse stellen die in den Arbeitspaketen GeoMePS und ZuBeMERk gesammelte Fachexpertise dar. Folgende Punkte sollten daher bei der Nutzung von GeM-DB-Inhalten beachtet werden:

1. Die Datenbank GeM-DB legt den Fokus auf eine kondensierte Darstellung der Vielzahl an geowissenschaftlichen und geophysikalischen Erkundungsmethoden. Die Darstellung der einzelnen Erkundungsmethoden innerhalb der Datenbank kann und soll kein Disziplinen- und Methoden-übergreifendes Lehrbuch ersetzen. Die primäre Zielgruppe der Arbeiten sind Fachleute mit (geo-)wissenschaftlichem Hintergrund. Zur weiteren fachlichen Vertiefung wird in der Datenbank auf die jeweiligen methodisch spezialisierten Fachbücher und Publikationen verwiesen.
2. Die Arbeiten in ZuBeMERk, GeoMePS und in der GeM-DB wurden grundsätzlich ortsunspezifisch mit generischem Charakter durchgeführt. Die GeM-DB soll z. B. vorrangig für die generische Ableitung von Vorschlägen für wirtsgesteinsspezifische Abfolgen von Erkundungsmethoden genutzt werden können. Es ist nicht vorgesehen, dass mit der GeM-DB eine direkte Ableitung von Messauslagen oder Bohrpunkten, von Kosten oder Dauer einer übertägigen Erkundung oder die Erarbeitung detaillierter Erkundungsprogramme stattfindet.
3. Die Eignungen der Erkundungsmethoden für die jeweiligen verknüpften Erkundungsziele in GeM-DB sind für optimale Bedingungen angegeben. Technische, regionale und ortsspezifische Gegebenheiten können mit Einschränkungen der Eignung verbunden sein. Wesentliche Einschränkungen sind in den Metadaten zu den Erkundungsmethoden oder in den Verknüpfungen zu den Erkundungszielen hinterlegt (siehe BGR 2022), werden aufgrund des generischen Charakters der Datenbank jedoch nicht abdeckend behandelt.

2 Methodik zur automatischen Erstellung von generischen, wirtsgesteinsspezifischen Abfolgen von Erkundungsmethoden

2.1 Einleitung zur Methodik

Als Beitrag zu den von der BGE zu planenden wirtsgesteinsspezifischen Erkundungsprogrammen für die übertägige Erkundung von Standortregionen in Phase II des Standortauswahlverfahrens wurde ein zweckmäßiger, iterativer Algorithmus zur objektiven Zusammenstellung von Erkundungsmethoden entwickelt und mit der Methodendatenbank GeM-DB verknüpft. Der Algorithmus benötigt zum einen gewisse Inputparameter, -daten und Annahmen und nutzt zum anderen das Kernelement der Datenbank, die bewerteten und wirtsgesteinsspezifischen Verknüpfungen der Methodeignungen mit den Erkundungszielen. Der Algorithmus vereinfacht die komplexen Anforderungen und Zusammenhänge bei der Erstellung eines Erkundungsprogramms erheblich und liefert im Ergebnis eine Abfolge von Erkundungsmethoden, die mit geowissenschaftlichem Sachverstand gezielt geprüft und angepasst werden kann. Dafür ist unter anderem ein Verständnis der Elemente, des Aufbaus und der Funktionsweise des Algorithmus notwendig, die im Folgenden detailliert beschrieben werden (Kapitel 2.2).

2.2 Elemente und Aufbau des Algorithmus

Der Algorithmus erstellt aus den GeM-DB-Inhalten eine Abfolge von geeigneten Erkundungsmethoden für ausgewählte Erkundungsziele (siehe Abb. 2). Nach der Vorgabe notwendiger Inputparameter (Erkundungs- und Optimierungsziele) sowie weiterer Filtermöglichkeiten bei der Methodenauswahl (siehe Kapitel 2.2.3), sucht der Algorithmus iterativ, d. h. schrittweise, die „beste“ der noch nicht gelisteten Erkundungsmethoden und fügt sie einer Abfolge von geeigneten Erkundungsmethoden hinzu. Dabei wird für jeden Iterationsschritt der verbleibende Bedarf und der sich durch jede weitere Erkundungsmethode ergebende zusätzliche Mehrwert, basierend auf den für jedes Erkundungsziel spezifischen Methodenbewertung (siehe Kapitel 2.2.2), numerisch repräsentiert und berechnet. Die weiteren Details zum erforderlichen Input, der durchgeführter Berechnung und dem Output werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

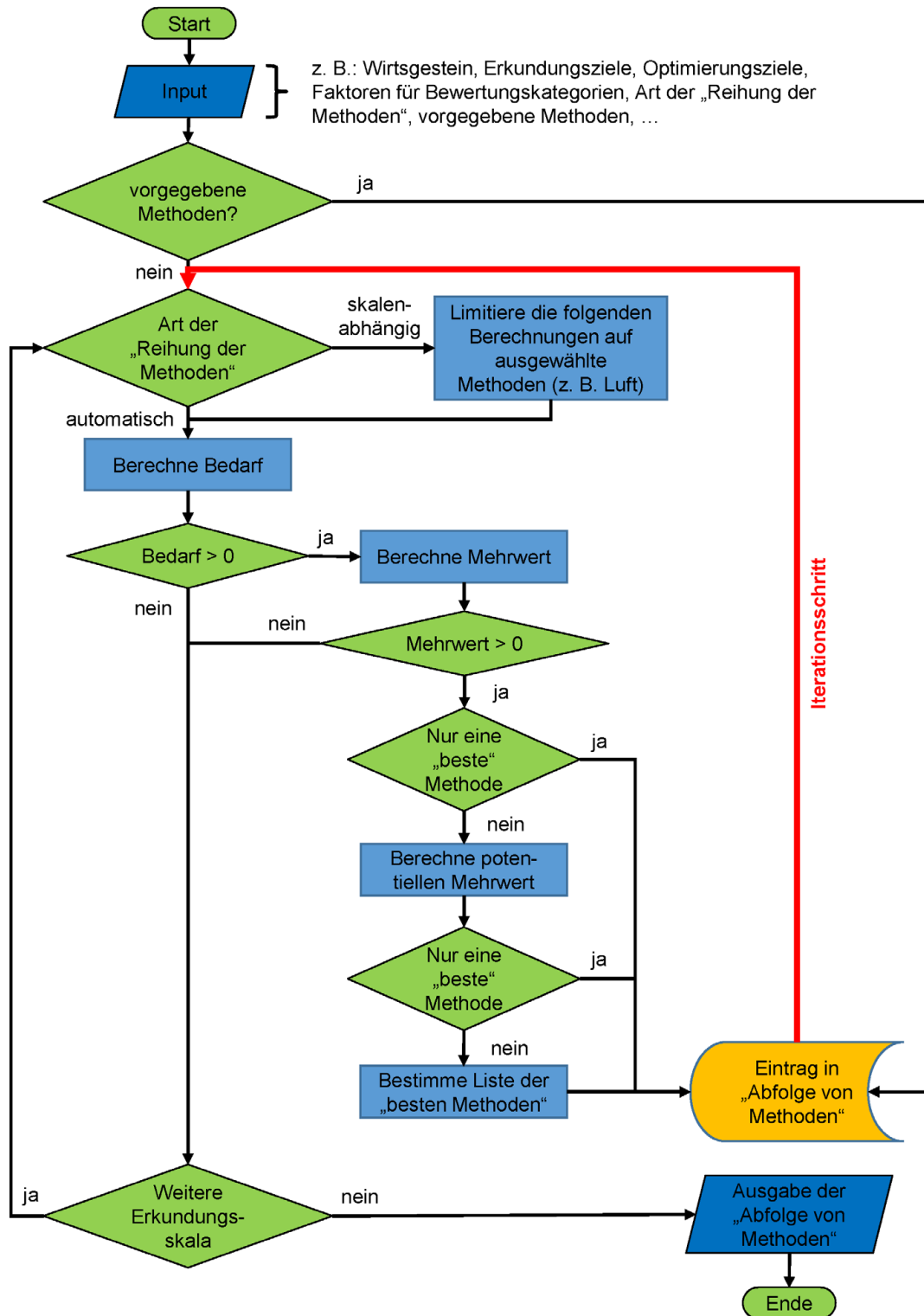


Abb. 2: Ablaufskizze des iterativen Optimierungsprozesses zur automatischen Erstellung einer „Abfolge von (Erkundungs-)Methoden“ mit Hilfe des entwickelten Algorithmus.

2.2.1 Input: Parameter, Informationen und Annahmen

Auswahl der Erkundungsziele: Die Erkundungsziele (Kneucker et al. 2020) stellen eine essentielle Grundlage für die Erstellung einer Abfolge von Erkundungsmethoden dar. Sie sind entsprechend der in der Datenbank vorhandenen Liste frei wählbar und können sich bspw. aus den Erkundungsbedarfen als Ergebnis der rvSU ergeben.

Wertungspunkte (Methodeneignung und Erkundungsziele): Ein grundlegender Aspekt bei der automatischen Erstellung von Abfolgen von Erkundungsmethoden aus GeM-DB ist die Definition von Wertungspunkten (WP). Sie sind notwendig, um Berechnungen vornehmen zu können und sind ein abstraktes Maß, das die gewünschte Erkundungsintensität eines Erkundungsziels definiert, bzw. das Erkundungspotenzial der einzelnen Erkundungsmethoden für das Erkundungsziel bei einem gegebenen Wirtsgestein aufzeigt. Das Erkundungspotenzial einer Erkundungsmethode, in GeM-DB abgebildet durch die wirtsgesteins- und erkundungszielspezifische „Eignung der Methode“ für ein Erkundungsziel, wird mit frei wählbaren Wertungspunkten belegt (z. B. „sehr gut“ \triangleq 5 WP, „gut“ \triangleq 2 WP, und „weniger gut“ \triangleq 0 WP).

Festlegen der Optimierungsziele: Die gewünschte Erkundungsintensität jedes Erkundungsziels, d. h. mit wie vielen Erkundungsmethoden bzw. mit welcher Methoden-Eignung ein Erkundungsziel erkundet werden soll, stellt das Ziel der Optimierung durch den Algorithmus (Optimierungsziel) dar und ist ebenfalls frei wählbar. Dieses Optimierungsziel wird für jedes Erkundungsziel als eine Anzahl an Wertungspunkten definiert (Abb. 3). Damit wird bspw. der Bedarf für ein Erkundungsziel mit einem Optimierungsziel von 10 WP durch die Anwendung zweier „sehr gut“ geeigneter Erkundungsmethoden (z. B. 5 WP + 5 WP = 10 WP) erfüllt.

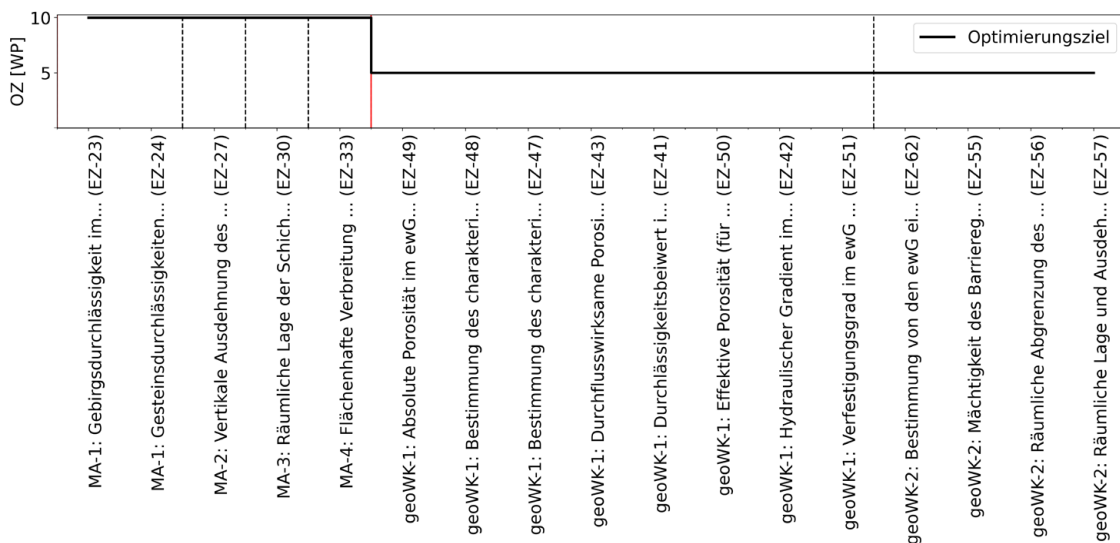


Abb. 3: Definition der Optimierungsziele (OZ) (schwarze horizontale Linie) für einige beispielhaft gewählte Erkundungsziele. Exemplarisch wurden alle Erkundungsziele aus den MA auf 10 WP und jene aus den geoWK auf 5 WP gesetzt. Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele siehe Tab. 39.

Vorgabe und Ausschluss von Erkundungsmethoden: Ein weiterer Inputparameter bei der automatischen Erstellung einer Abfolge von Erkundungsmethoden stellt die feste Vorgabe oder der Ausschluss von Erkundungsmethoden dar. Beides kann aus fachlichen Gründen sinnvoll sein, z. B. um Methodenkombinationen abzubilden oder wenn ortsspezifische Gründe gegen einen Einsatz von Erkundungsmethoden sprechen. Die vorgegebenen Erkundungsmethoden werden dann vor der automatisch erstellten Abfolge implementiert und ihre Wertungspunkte bei der Berechnung des verbleibenden Bedarfs berücksichtigt.

2.2.2 Berechnung des Mehrwerts einer Methode für die Erkundung

Der Mehrwert und der potentielle Mehrwert einer Erkundungsmethode für die Erkundung ist ein numerisches Maß basierend auf der erkundungszielspezifischen Methodenbewertung. Der Mehrwert wird bei der Erstellung der Abfolge von Erkundungsmethoden für jeden Iterationsschritt neu berechnet. Die Erkundungsmethode mit dem größten Mehrwert wird durch den Algorithmus im aktuellen Iterationsschritt als „beste“ Methode ausgewählt und der Abfolge von Erkundungsmethoden hinzugefügt (siehe Abb. 2). Falls mehrere „beste Methoden“ existieren, die in einem Iterationsschritt den identischen Mehrwert liefern, werden die Erkundungsmethoden mit dem größten potentiellen Mehrwert hinzugefügt. Gibt es auch nach dieser Abwägung mehrere „beste Methoden“, werden all diese Erkundungsmethoden mit identischem potentiellen Mehrwert der Abfolge von Erkundungsmethoden hinzugefügt. Im letzteren Fall würde der Bedarf für einzelne Erkundungsziele möglicherweise übererfüllt. Danach folgt ein neuer Iterationsschritt, in welchem eine weitere Erkundungsmethode mit dem größten verbleibenden Mehrwert gesucht wird (siehe Abb. 2). Bei Erkundungszielen,

die in der Datenbank GeM-DB nicht für eines der drei Wirtsgesteine definiert sind, nutzt der Algorithmus alternativ die Eignung für „Diverses Gestein“ (oftmals gleichbedeutend mit dem an das Wirtsgestein angrenzende bzw. überdeckende sowie unterlagernde Gestein).

Der potentielle Mehrwert (pMW) einer Erkundungsmethode entspricht der Summe all seiner Wertungspunkte über alle Erkundungsziele (EZ) (siehe Formel 1), wohingegen beim Mehrwert (MW) (siehe Formel 2) nur Wertungspunkte für Erkundungsziele berücksichtigt werden, für die im aktuellen Iterationsschritt noch ein Bedarf (B) besteht (siehe Formel 3).

$$pMW = \sum_{i=EZ} WP_i \tag{1}$$

$$MW = \sum_{i=EZ} WP_i (B_i > 0) \tag{2}$$

$$B_i = OZ_i - \sum_{j=AM} WP_{ij} \tag{3}$$

Der erkundungszielspezifische Bedarf (B_i) an Wertungspunkten berechnet sich aus dem initial definierten Optimierungsziel des Erkundungsziels (OZ_i) minus der Summe der erkundungszielspezifischen Wertungspunkte (WP_{ij}) aller Erkundungsmethoden, die bereits Teil der Abfolge von Erkundungsmethoden (AM) sind. Wurde bspw. für ein Erkundungsziel ein Optimierungsziel von 12 WP definiert und weisen nach dem Abschluss von einigen Iterationsschritten bereits zwei Erkundungsmethoden der Abfolge von Erkundungsmethoden für dieses Erkundungsziel eine Bewertung von je 5 WP (z. B. „Sehr gut“ geeignet) auf, so besteht für das Erkundungsziel noch ein Bedarf von 2 WP, welcher sowohl durch eine „sehr gute“ (z. B. 5 WP) als auch eine „gute“ (z. B. 2 WP) Erkundungsmethode erfüllt werden kann.

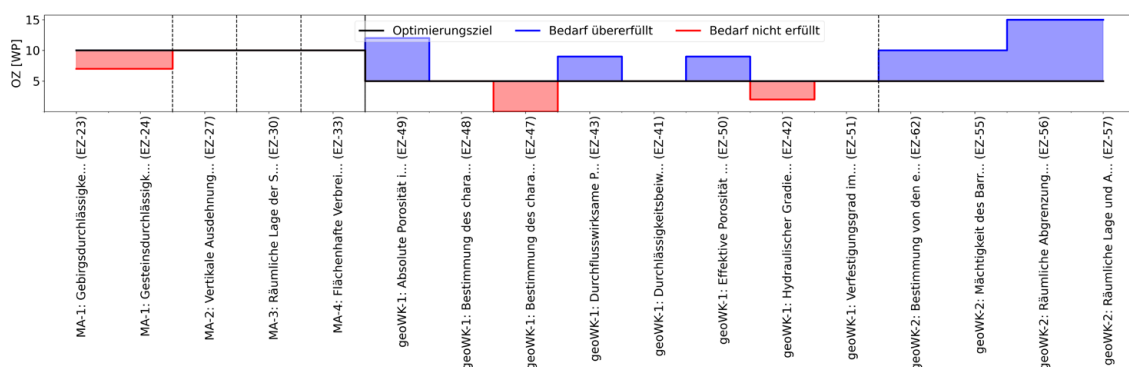


Abb. 4: Beispielhafte Abbildung der Optimierungsziele (schwarze horizontale Linie) und der final verbleibende Bedarf nach dem Abschluss der Erstellung der Abfolge von Erkundungsmethoden. Übererfüllte Bedarfe (blaue Flächen) und nicht erfüllte Bedarfe (rote Flächen). Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele siehe Tab. 39.

2.2.3 Output: Abfolge geeigneter Erkundungsmethoden und Gegenüberstellung verschiedener „Auswerte-Varianten“

Automatische Reihung der Methoden: In der einfachsten Auswerte-Variante der automatischen Erstellung einer Abfolge von Erkundungsmethoden wird die Reihenfolge primär durch den Mehrwert der Erkundungsmethode bestimmt (Abb. 5a). Der in GeM-DB hinterlegte Eintrag „Art der Messmethode“ (Luft, Oberfläche, Bohrloch und Labor) dient an dieser Stelle als Indikator für die Größenordnung der Erkundung bzw. die „(Erkundungs-)Skala“ einer Erkundungsmethode (Anhang 6) und wird in Abb. 5 als farbiger Kreis symbolisiert. Erkundungsmethoden mit dem Parameter „Art der Messmethode“ „Labor“ wurden dabei der Erkundungsskala „Bohrloch“ zugeordnet, da die meisten Erkundungsziele das Wirtsgestein als Ziel haben, welches in der Regel erst durch Bohrungen repräsentativ beprobt werden kann. Da in GeM-DB vereinzelte Erkundungsmethoden Mehrfachnennungen bei dem Parameter „Art der Messmethode“ erhalten haben, sind diese in Abb. 5 durch mehrere, unterschiedlich große Farbkreise gekennzeichnet (z. B. (Litho-)Faziesanalyse).

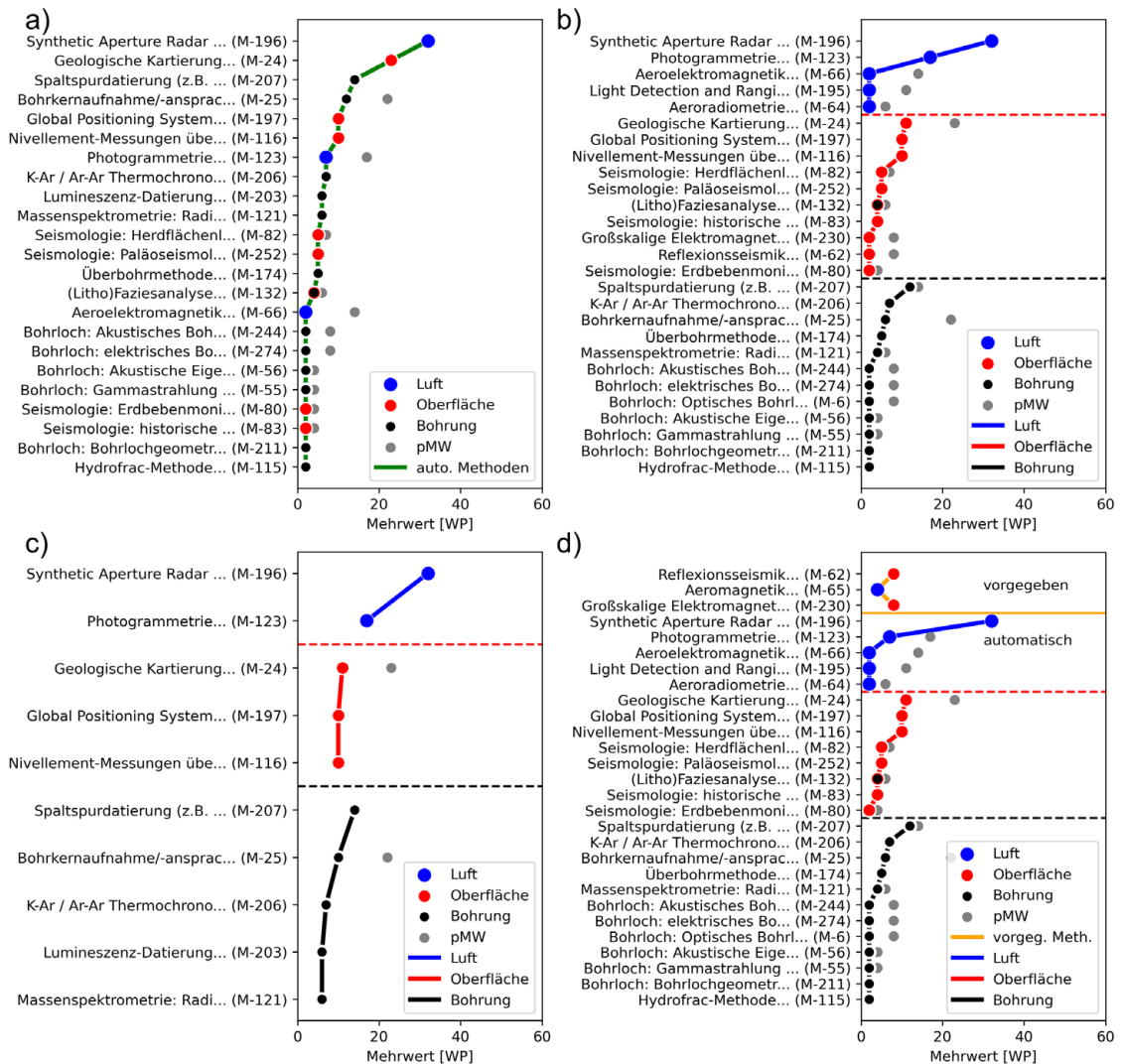


Abb. 5: Gegenüberstellung verschiedener „Auswerte-Varianten“ zur automatischen Erstellung einer Abfolge von Erkundungsmethoden (von oben nach unten). Automatische Reihung gemäß Mehrwert (a), skalabhängige Reihung der Methoden (b), skalabhängige Reihung der Methoden mit einem minimalen Mehrwert von 5 WP (c) und Vorgabe von Erkundungsmethoden vor der automatischen Reihung weiterer Methoden (d). Mit grauen Punkten ist der potenzielle Mehrwert für die jeweiligen Methoden dargestellt. Vollständige Bezeichnung der Methoden siehe Tab. 38.

Skalenabhängige Reihung der Methoden: Ein alternatives Vorgehen bei der Erstellung einer Abfolge von Erkundungsmethoden ist die sukzessive Verfeinerung der Erkundungsskala (bspw. Luft, Oberfläche, Bohrloch, Labor). Dieses in den Erkundungsprogrammen anderer Länder genutzte sukzessive Vorgehen (siehe Kapitel 3.1) kann auch bei der automatischen Erstellung einer Abfolge von Erkundungsmethoden vorgegeben werden (Abb. 5b). Dabei wird durch den Algorithmus z. B. zunächst unter allen luftgestützten Erkundungsmethoden so lange nach geeigneten Methoden gesucht, bis keine Methode einen Mehrwert > 0 aufweist. Erst danach werden Erkundungsmethoden anderer Einsatzorte (z. B. an der Oberfläche,

gefolgt von Bohrloch) gesucht. Sowohl der Umfang, die Reihenfolge der Erkundungsskalen (z. B. Oberfläche, Bohrloch), als auch der Schwellenwert des Mehrwerts, ab welchem ein Wechsel in die nächste Erkundungsskala erfolgt (z. B. $MW < 3$; Abb. 5c), können frei vorgegeben werden. Erkundungsmethoden, für die mehrere Erkundungsskalen in GeM-DB hinterlegt sind, werden durch den Algorithmus bevorzugt der zuerst abgefragten Erkundungsskala hinzugefügt. Eine mehrfache Berücksichtigung einer Erkundungsmethode in mehreren Erkundungsskalen ist im aktuellen Algorithmus nicht vorgesehen.

Vorgabe und Ausschluss von Erkundungsmethoden: Die feste Vorgabe von Methoden (Kapitel 2.2.1) ist in Abb. 5d beispielhaft dargestellt und ein möglicher Ausschluss von Methoden anhand eines Beispiels in Kapitel 3.2.5 diskutiert.

3 Ergebnisse und Interpretation

3.1 Recherche ausgewählter übertägiger Erkundungsprogramme

Im Rahmen von GeoMePS und ZuBeMErk wurden übertägige Erkundungsprogramme für einen (potentiellen) Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle innerhalb und außerhalb Deutschlands ausgewertet. Ziel war es, das allgemeine Vorgehen verschiedener Länder sowie angewandte Erkundungsmethoden, deren Reihenfolge (siehe Anhang 1) und die Ziele der jeweiligen Erkundungsprogramme zu analysieren. Zu diesem Zweck wurden übertägige Erkundungsprogramme der drei Wirtsgesteine Kristallingestein, Steinsalz (in steiler und stratiformer Lagerung) und Tongestein aus insgesamt sechs Ländern (Deutschland, Finnland, Frankreich, Schweden, Schweiz und USA) analysiert. Durch diese Arbeiten konnten folgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden:

1. *Unterteilung der übertägigen Erkundung:* Ein Ergebnis der Auswertungen der Erkundungsprogramme ist, dass die übertägige Erkundung der Wirtsgesteine Kristallingestein, Tongestein und Steinsalz in stratiformer Lagerung mehrstufig erfolgte. Die „frühe“ übertägige Erkundungsphase bzw. Stufe wurde in Finnland als *Preliminary site investigation* (McEwen & Äikäs 2000), in Frankreich als *Preliminary surveys* (Virlogeux 1998; Andra 2019) bzw. *Preliminary investigation phase* (Andra 2019), in Schweden als *Initial site investigation* (SKB 2000a, 2000b), in der Schweiz als *regionales Erkundungsprogramm bzw. Etappe 1 – 2* (NAGRA 2000, 2002, 2010) und in den USA als *Preliminary site selection* (Powers et al. 1978a, 1978b; Weart 1983) bezeichnet. Die angewandten Erkundungsmethoden und Reihenfolgen dieser „frühen“ Stufen der übertägigen Erkundung, im Folgenden übergreifend als *initial* bezeichnet, sind in den Tab. 1 – Tab. 6 in Anhang 1 zusammengefasst. Ein Ziel der

Initial site investigation in Schweden bspw. war die Suche nach einem vorrangigen Standort (*priority site*) innerhalb einer *candidate area* ($\geq 10 \text{ km}^2$) (SKB 2001), welche vergleichbar mit einer Standortregion im deutschen Standortauswahlverfahren ist.

2. *Angewandte Erkundungsmethoden, deren Reihenfolge und Ziele*: Ein weiteres Ergebnis der Recherche ist eine tabellarische Zusammenstellung der angewandten Erkundungsmethoden und deren Reihenfolge (Tab. 1 – Tab. 8, Anhang 1). Da die Erkundungsziele gemäß Kneucker et al. (2020) aus den §§ 22 – 24 StandAG abgeleitet sind und daher den deutschen Kriterien und Anforderungen an einen Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle entsprechen, können die Ziele aus den recherchierten Erkundungsprogrammen nicht immer 1:1 in Erkundungsziele gemäß Kneucker et al. (2020) übertragen werden. Daher wurden diese Ziele sinngemäß auf der Ebene der Kriterien- und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG „übersetzt“ (siehe Tab. 9 – Tab. 12, Tab. 19, Tab. 26, Tab. 32 und Tab. 33, Anhang 2 – 5). Als Beispiel ist hier das Ziel „Regionale Strukturen“ bzw. „*Regional structures*“ zu nennen, welches Aspekte der Ausschlusskriterien „Großräumige Vertikalbewegung“ und „Aktive Störungszonen“ sowie der Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ umfasst.

3.2 Automatisch erstellte generische, wirtsgesteinsspezifische Abfolgen von Erkundungsmethoden

Ein weiterer Teil beider Arbeitspakete ist die Erstellung generischer, wirtsgesteinsspezifischer Abfolgen von Erkundungsmethoden. Dafür dient der entwickelte und in Kapitel 2 beschriebene Algorithmus, für welchen im Vorfeld Inputparameter für jedes Wirtsgestein festgelegt werden müssen. Diese Inputparameter sind im Folgenden beispielhaft gewählt und können final an fachliche und ortsspezifische Randbedingungen angepasst werden.

3.2.1 Auswahl der Inputparameter

Für die folgenden beispielhaften Abfolgen von Erkundungsmethoden wurde ein Optimierungsziel von 10 Wertungspunkten, Faktoren von 5 WP, 2 WP und 0 WP für die Bewertungskategorien „sehr gut“, „gut“ und „weniger gut“ sowie eine skalenabhängige Reihung der Methoden gewählt. Gemäß dieser skalenabhängigen Reihung beginnt die Erkundung aus der Luft, gefolgt von Oberflächen-Methoden und endet mit direkt im Bohrloch bzw. an Bohrkernmaterial einsetzbaren (Labor-)Methoden.

3.2.1.1 Auswahl und Wichtung der Erkundungsziele

Die Auswahl der Erkundungsziele für den Algorithmus hängt maßgeblich von der Zielstellung der Erkundung ab und richtet sich nach den ermittelten Erkundungsbedarfen als Ergebnisse der von der BGE durchgeführten rvSU. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung liegen die Erkundungsbedarfe als Ergebnisse der rvSU noch nicht vor. Daher werden im Folgenden potentielle Erkundungsbedarfe beispielhaft und wirtsgesteinsspezifisch skizziert. In diese Überlegungen sind teilweise Informationen aus den ausgewerteten übertägigen Erkundungsprogrammen (Kapitel 3.1) eingeflossen. In den Erkundungsprogrammen sind z. T. erkundete Ziele bzw. „Kategorien“ von Zielen benannt, die hier vereinheitlicht wurden und auf welche im Folgenden Bezug genommen wird. Die getroffene Auswahl der Erkundungsziele und der skizzierte potentielle Erkundungsbedarf ist beispielhaft zu verstehen und basiert nicht auf ortsspezifischen Daten oder Vorab-Information der in Bearbeitung befindlichen rvSU.

Die Wichtung der Erkundungsziele mit Hilfe von Optimierungszielen wurde in den folgenden Beispielen Kristallingestein (Kapitel 3.2.2), Tongestein (Kapitel 3.2.3) und Steinsalz (Kapitel 3.2.4) auf 10 WP festgelegt. Somit erhält jedes Erkundungsziel die gleiche Wichtung. Eine höhere Wichtung erhöht die Erkundungsintensität eines Erkundungsziels und könnte für ausgewählte, geowissenschaftlich komplexe Erkundungsziele sinnvoll sein.

3.2.1.2 Wertungspunkte: Bewertung der Eignung

Als bewertungsspezifischer Faktor für die Eignung einer Erkundungsmethode wurde in den folgenden Beispielen „sehr gut“ \triangleq 5 WP, „gut“ \triangleq 2 WP, und „weniger gut“ \triangleq 0 WP gewählt. Damit wird bspw. der Bedarf für ein Erkundungsziel mit einem Optimierungsziel von 10 WP durch die Anwendung zweier „sehr gut“ geeigneter Erkundungsmethoden (5 WP + 5 WP = 10 WP) erfüllt. Zudem wird eine Erkundungsmethode, die den Bedarf von zwei Erkundungszielen „sehr gut“ erfüllt mit einer Erkundungsmethode gleichgesetzt, die den Bedarf von fünf Erkundungszielen mit „gut“ erfüllt. Eignungen für ein Erkundungsziel, die mit „weniger gut“ geeignet bewertet wurden, sind in den folgenden Abfragen nicht berücksichtigt, könnten jedoch grundsätzlich mit einer Wahl des bewertungsspezifischen Faktors größer als 0 WP einbezogen werden.

3.2.2 Kristallingestein

Für das Wirtsgestein Kristallin wurde im Folgenden eine Abfolge von Erkundungsmethoden erstellt, deren fiktives Ziel sich an einigen entscheidenden Zielen und Parametern der initialen übertägigen Erkundungsprogramme der Länder Finnland, Schweden, Schweiz und Frankreich orientiert (siehe Tab. 9 – Tab. 12 in Anhang 2). Die Auswertung der Erkundungsprogramme zeigt, dass in den frühen Phasen der übertägigen Erkundung dieser Länder der Fokus

auf den Kategorien (a) „*Räumliche Abgrenzung homogener, (gering-permeabler) Blöcke*“, (b) „*Permeable Störungszonen, Klüfte und Strukturen hinsichtlich Gebirgsdurchlässigkeit und advektivem Stofftransport*“ und (c) „*Grundwasserbewegung, Hydrochemie und des hydraulischen Potentials*“ lag (siehe Tab. 13 – Tab. 16 in Anhang 2). Diese Kategorien von Zielen und Parametern finden sich im deutschen Standortauswahlverfahren in den Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG (2017) AK-2; MA-1 bis MA-3 und geoWK-1 bis geoWK-3 sowie geoWK-10 wieder und lassen sich im Detail durch eine Anzahl von Erkundungszielen abdecken, die in Tab. 13 – Tab. 16 in Anhang 2 zusammengefasst sind.

In Abb. 6 wird deutlich, dass für einige Erkundungsziele der Kategorie (a), wie bspw. die „Vertikale Ausdehnung des betreffenden Gebirgsbereichs“ (EZ-28) oder die „Tektonische Überprägung/Schieferung im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)“ (EZ-74), das vorgegebene Optimierungsziel nicht allein durch Luft- und Oberflächenmethoden erreichbar ist. Zum Erreichen des Optimierungsziels ist der Einsatz von Bohrungen und bspw. die Methode Bohrkernaufnahme/-ansprache bzw. weiterführende Erkundungsmethoden (Bspw. Auflicht- und Durchlichtmikroskopie) erforderlich. Zudem muss darauf hingewiesen werden, dass Fernerkundungsmethoden (Hyperspektrale und Multispektrale Verfahren) und die Geologische Kartierung nur bei entsprechenden Aufschlussbedingungen des Gesteins angewandt werden können (siehe Abb. 6, Bsp. EZ-9). Für das Erreichen des Optimierungsziels für die Erkundungsziele „Gebirgsdurchlässigkeit im ewG“ (EZ-23; Kategorie b) und „Hydraulischer Gradient im ewG“ (EZ-42; Kategorie c) sind vor allem in Bohrungen einsetzbare Erkundungsmethoden, wie Packertests, Pumpversuche oder Gebirgsporendruck-Messungen erforderlich (siehe Abb. 6). Die Erkundungsziele der Hydrochemie (siehe Abb. 7) entsprechen einzelnen Parametern bzw. Messgrößen, welche vor allem an Fluidproben mittels portabler Messgeräte bzw. mit Hilfe von Bohrlochsonden bestimmt werden können.

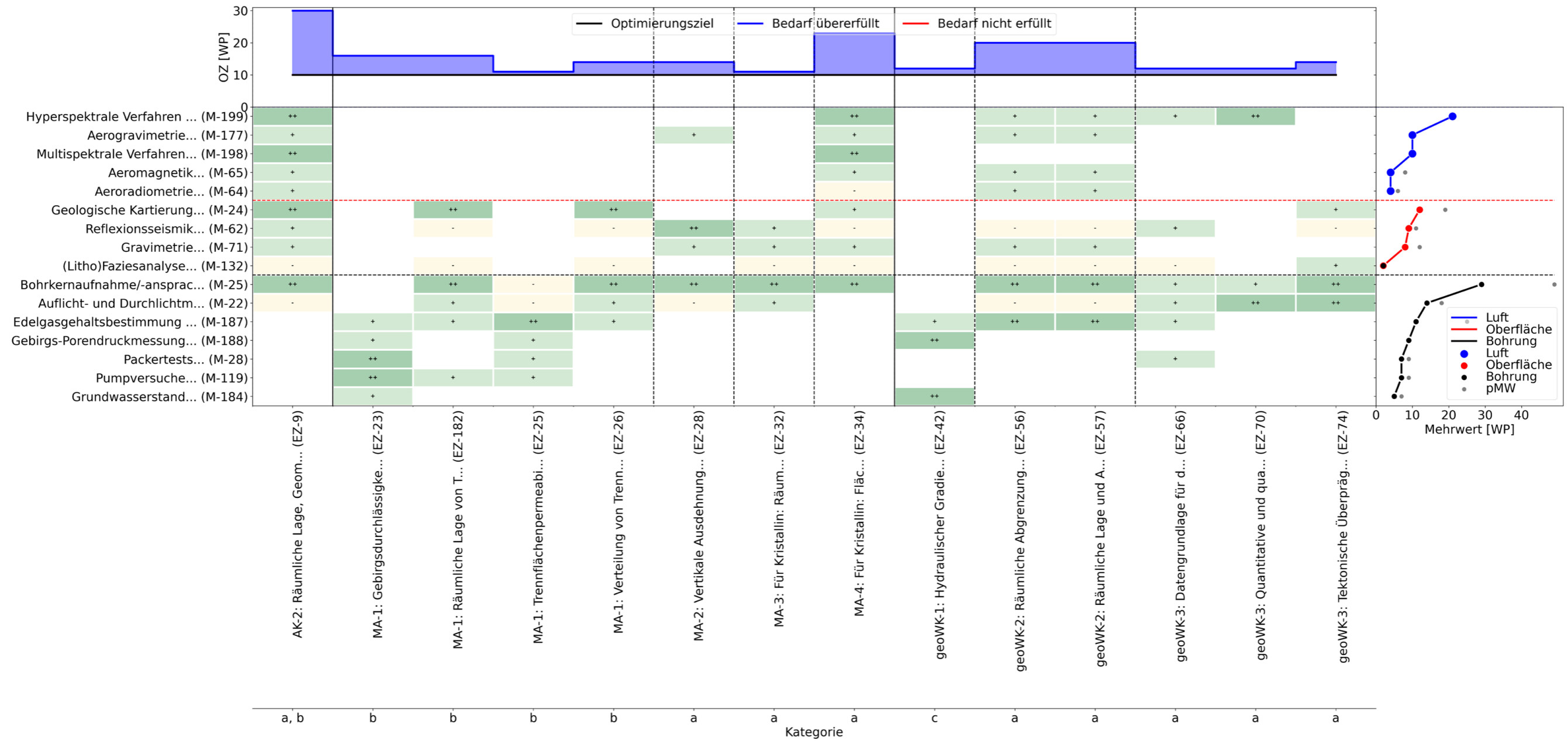


Abb. 6: Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Kristallin generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) und einer skalenabhängigen Reihung der Methoden. Die Erkundungsziele und Erkundungsmethoden zur Hydrochemie (geoWK-10) sind separat in Abb. 7 dargestellt. Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.

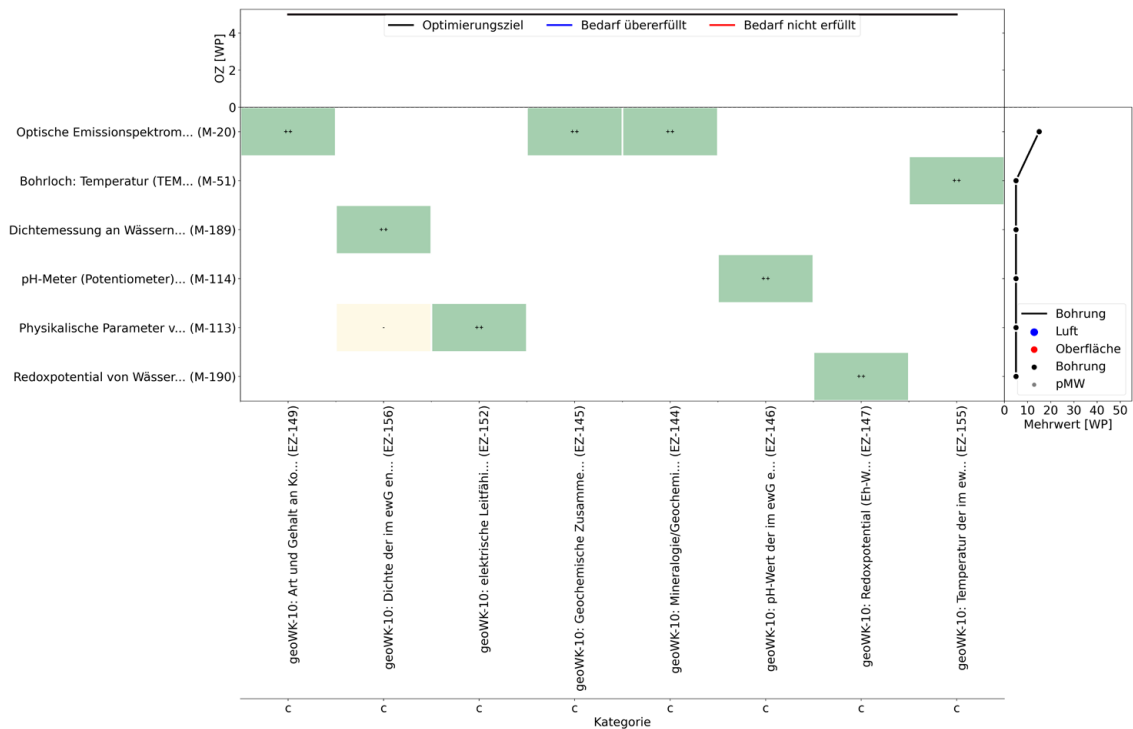


Abb. 7: Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Kristallin generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) für einzelne Erkundungsziele zur Hydrochemie (geoWK-10). Separate Abfrage dieser Erkundungsziele aufgrund fehlender Synergien/Mehrwerte mit Erkundungsmethoden in Abb. 6. Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.

Grundsätzlich ist für das Wirtsgestein Kristallin zwischen Gebieten mit aufgeschlossenem Wirtsgestein und solchen, bei denen das Kristallin mit einem anderen Gesteinstyp überdeckt ist, zu differenzieren. Entsprechende Einschränkungen und Hinweise, die bei der Anwendung der Erkundungsmethoden und einer differenzierten Bewertung der Eignung für einzelne Erkundungsziele zu beachten sind, sind in GeM-DB textlich hinterlegt.

3.2.3 Steinsalz in stratiformer Lagerung

Eine Abfolge von Erkundungsmethoden für Steinsalz in stratiformer Lagerung wurde in Anlehnung an die frühe Erkundungsphase der WIPP site (*Waste isolation pilot plant*), USA (siehe Tab. 5 in Anhang 1) zusammengestellt. Diese Abfolge dient zum Erkunden der Ziele-Kategorien (a) „Lösungerscheinungen und Hohlräume in den Barrieregesteinen und im Deckgebirge“, (b) „Grundwasserstand, -fluss, -bewegung und -charakteristik“, (c) „Grundwasserherkunft und -verweilzeit“, (d) „Räumliche Verbreitung, Variation und Tiefe und Lagerungsverhältnisse / Deformation des Wirtsgesteins“ und (e) „Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar“, welche sich an der frühen Erkundungsphase der WIPP site (siehe Tab. 20 – Tab. 24 in Anhang 3), sowie an BGR-Erfahrungen aus der

übertägigen Erkundung von Salzstrukturen orientieren. Die Ziele und Parameter finden sich im deutschen Standortauswahlverfahren in den Kriterien und Anforderungen AK-1, AK-6, MA-2 bis MA-4, geoWK-2 bis geoWK-8 und geoWK-11 gemäß §§ 22 – 24 StandAG (2017) wieder. Das Erkundungsziel „Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung von atektonischen bzw. aseismischen Strukturen“ (EZ-175) wurde in Kneucker et al. (2020) aus AK-1 „Großräumige Vertikalbewegungen“ abgeleitet. An dieser Stelle wurde das Erkundungsziel jedoch zur Kategorie (a) zugeordnet, da atektonische bzw. aseismische Strukturen Indikatoren für Lösungserscheinungen im Untergrund sein können.

In Abb. 8 ist erkennbar, dass sich Auswirkungen von „*Lösungserscheinungen und Hohlräume in den Barrieregesteinen und im Deckgebirge*“ an der Erdoberfläche, bspw. die „Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung von atektonischen bzw. aseismischen Strukturen“ (EZ-175), durch luftgestützte Messmethoden sehr gut erkunden lassen. Für andere Erkundungsziele der Kategorie (a), wie bspw. die „Subrosionsrate“ (EZ-40) oder die „Tiefenlage des rezenten Salzspiegels“ (EZ-167), ist das Optimierungsziel nur durch Kombinationen von Oberflächen- und Bohrlochmethoden bzw. Bohrkernuntersuchungen und weiterführenden Labormethoden erreichbar. Für die abgeleiteten Erkundungsziele aus geoWK-4 – „Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse“ – gibt es für die Erkundungsziele 75 und 76 lediglich „gut“ bewertete Erkundungsmethoden, welche in Kombination das Optimierungsziel erfüllen. Für das Erkundungsziel „Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit in den letzten 10 Millionen Jahren“ (EZ-77) ist in GeM-DB für das Wirtsgestein Steinsalz keine Erkundungsmethode enthalten (siehe Kapitel 4).

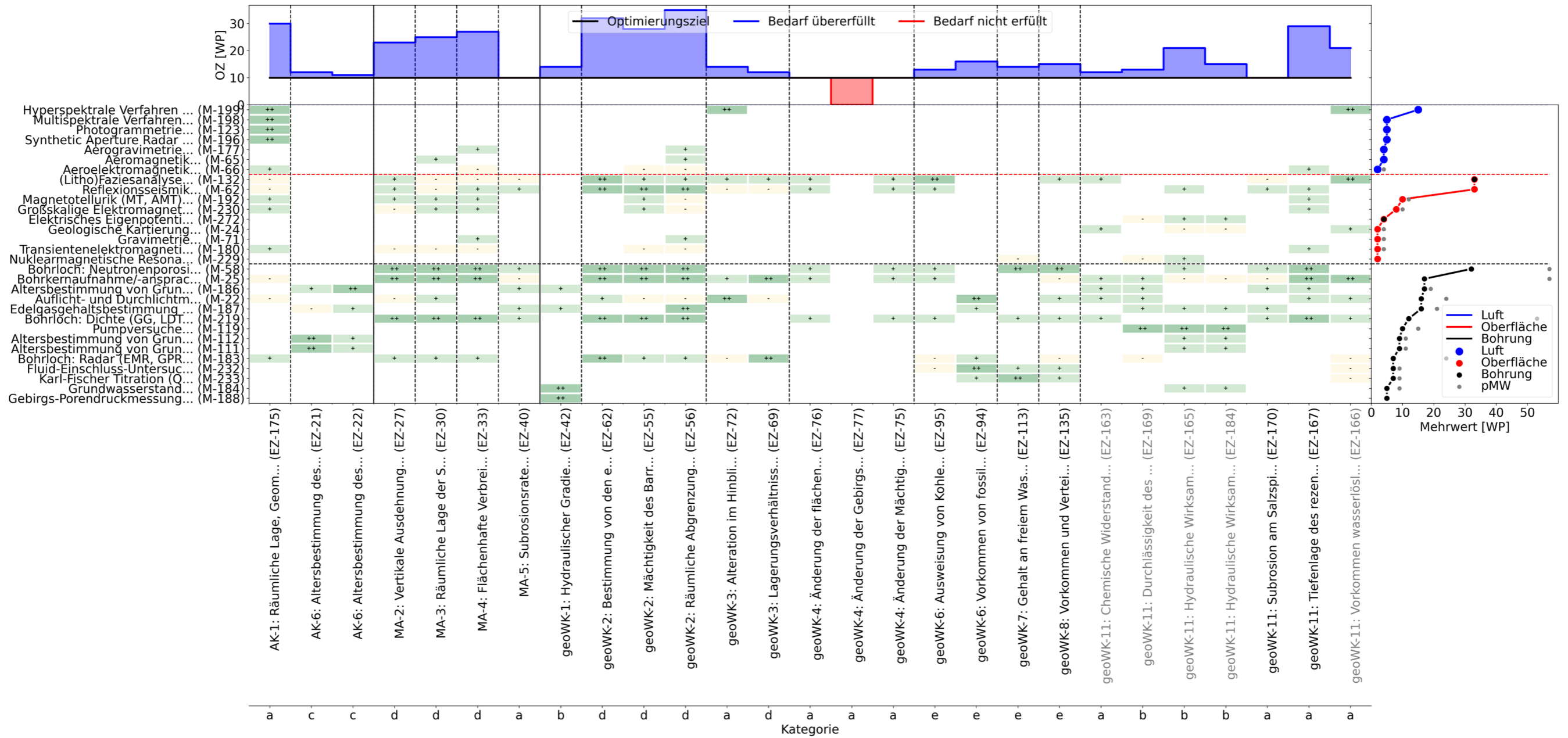


Abb. 8: Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) und einer skalenabhängigen Reihung der Methoden. Erkundungsziele in grau sind nicht für das Wirtsgestein, sondern für das Deckgebirge definiert (siehe Kapitel 2.2.1). Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.

Das Optimierungsziel für die Erkundungsziele bezüglich „*Grundwasserstand, -fluss, -bewegung und -charakteristik*“ (Kategorie b) sind z. T. durch Oberflächenmethoden, jedoch vor allem durch Bohrloch- und Labormethoden (bspw. Grundwasserstandsmessungen, Pumpversuche und Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser) erreichbar (Abb. 8). Für das Bestimmen der „*Grundwasserherkunft und -verweilzeit*“ (Kategorie d) kommen, je nach Fragestellung und Anwendbarkeit, verschiedene Methoden zur Altersdatierung von Grundwasser in Frage (siehe Bemerkungen und Einschränkungen zu den Methodeneinträgen in GeM-DB). Erkundungsziele der Grundwassercharakteristik entsprechen einzelnen Parametern bzw. Messgrößen, welche vor allem mittels portabler Messgeräte an Fluidproben bzw. mit Hilfe von Bohrlochsonden bestimmt werden können (siehe Abb. 7).

In Abb. 8 wird ersichtlich, dass das Optimierungsziel für die jeweiligen Erkundungsziele der Kategorie (d) „*Räumliche Verbreitung, Variation und Tiefe und Lagerungsverhältnisse / Deformation des Wirtsgesteins*“ überwiegend durch Kombinationen aus Oberflächen- und Bohrlochmethoden (bspw. Reflexionsseismik, Bohrloch: Dichte und Bohrkernaufnahme/-ansprache) erreicht wird.

Für das Erkunden von „*Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar*“ (Erkundungsziele der Kategorie e) sind neben der (Litho-)Faziesanalyse und Reflexionsseismik ausschließlich Bohrloch- und Labormethoden (bspw. Bohrloch: Neutronenporosität und Auflicht- und Durchlichtmikroskopie) zur Erreichung des Optimierungsziels geeignet (siehe Abb. 8).

3.2.4 Steinsalz in steiler Lagerung

In Abb. 9 ist das Ergebnis der Abfrage der GeM-DB-Inhalte mit den in Kapitel 3.2.1 genannten Inputparametern für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung dargestellt. Die Auswahl der Erkundungsziele orientiert sich an den vier Ziele-Kategorien aus dem Kapitel „Übertägige Erkundung von Salzformationen“ der übertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben (Hammer & Sönke 2009; siehe Tab. 27 – Tab. 30 in Anhang 4), sowie an BGR-Erfahrungen aus der übertägigen Erkundung anderer Salzstrukturen.

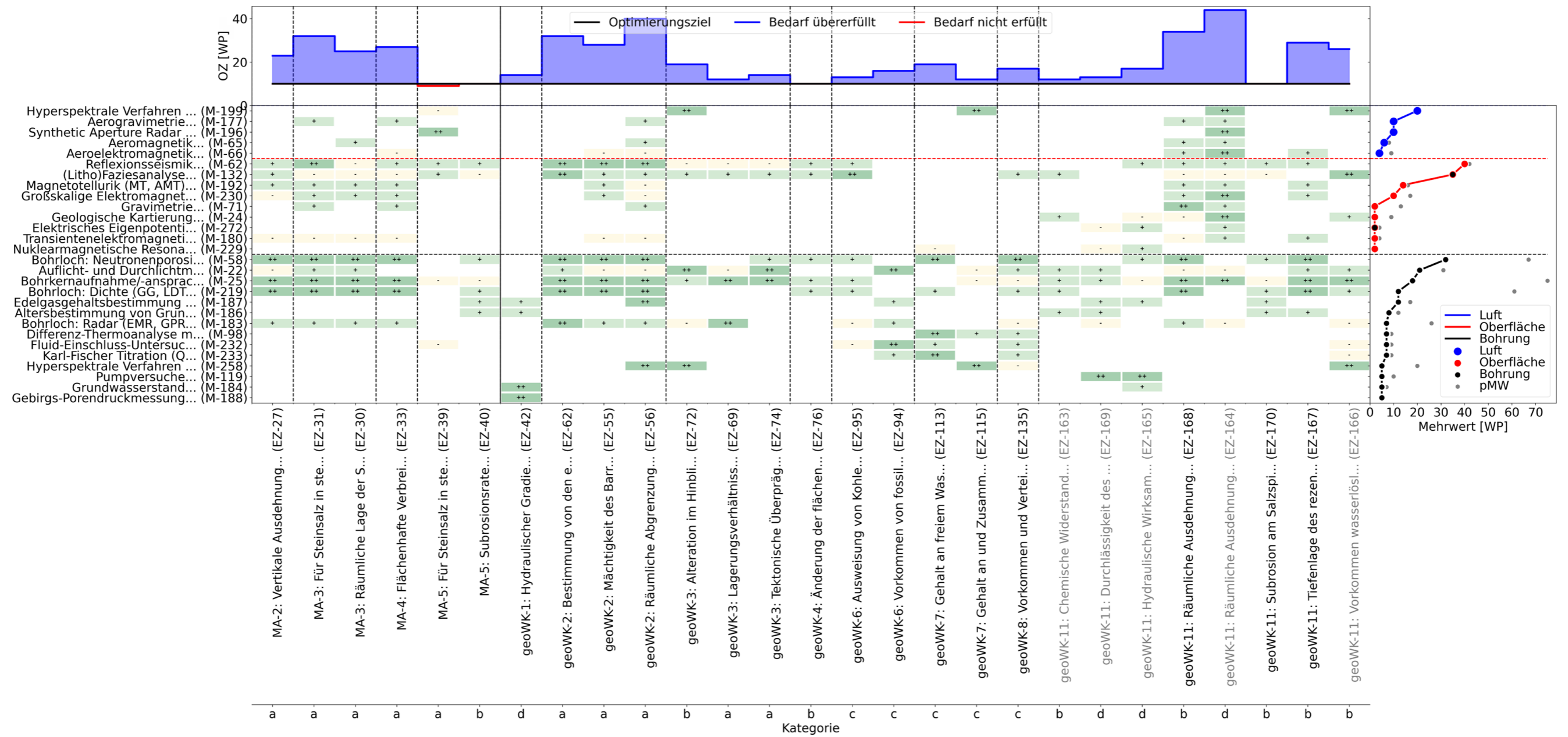


Abb. 9: Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) und einer skalenabhängigen Reihung der Methoden. Erkundungsziele in grau sind nicht für das Wirtsgestein, sondern für das Deckgebirge definiert (siehe Kapitel 2.2.1). Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.

Aus Abb.9 wird deutlich, dass für das Erreichen des Optimierungsziels zur Erkundung des „*Strukturgeologischen Baus, Abgrenzung der Salzstruktur, Internbau, Lagerungsverhältnisse und tektonische Entwicklung (Salzaufstieg) der Salzstruktur*“ (Ziele-Kategorie a) vor allem die Reflexionsseismik zusammen mit geophysikalischen Potentialverfahren sowie Bohrlochmethoden (inkl. Bohrkernaufnahme/-ansprache) geeignet sind. Für das Erkundungsziel „Aktivität von Salzstrukturen“ (EZ-39) bleibt das hier voreingestellte Optimierungsziel von 10 WP trotz skalenübergreifender Methodenkombinationen unerfüllt.

Erkundungsziele bzgl. „*Subrosion und Lösungserscheinungen*“ (Kategorie b), wie bspw. die „Räumliche Ausdehnung des Hutgesteins“ (EZ-168), „Subrosionsrate“ (EZ-40) oder die „Chemische Widerstandsfähigkeit (Löslichkeit)“ (EZ-163), lassen sich nur durch eine Kombination von Oberflächen-, Bohrloch-, und Labormethoden ausreichend erkunden (Erfüllen des Optimierungsziels).

Für die Erkundungsziele der Kategorie (c) „*Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar*“ kann das Optimierungsziel, ähnlich wie für das Beispiel zu Steinsalz in stratiformer Lagerung (Kapitel 3.2.3), nur durch eine Kombination von vor allem Bohrloch- und Labormethoden (bspw. Bohrloch: Neutronenporosität und Fluid-Einschluss-Untersuchungen) erreicht werden.

Die Ziele-Kategorie „*Grundwasserstand, -fluss, und -bewegung*“ ist durch die Erkundungsziele „Hydraulischer Gradient im ewG“ (EZ-42), „Hydraulische Wirksamkeit von Karststrukturen sowie glazialen Rinnen“ (EZ-165), „Durchlässigkeit des Hutgesteins“ (EZ-169) und „Räumliche Ausdehnung von Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen sowie glaziale Rinnen“ (EZ-164) abgebildet (Abb. 9 und Tab. 30 in Anhang 4). Der hydraulische Gradient (EZ-42) kann nur durch zwei im Bohrloch- bzw. an vorhandenen Messstellen einsetzbaren Erkundungsmethoden, Grundwasserstandsmessungen und Gebirgs-Porendruckmessung, direkt abgeleitet werden, wobei die beiden Methoden komplementäre Einsatzvoraussetzungen haben und weniger im kompakten Steinsalz des ewG, sondern eher in aufgelockerten Randbereichen bzw. in angrenzenden Schichten einsetzbar sind. Zum Erreichen des Optimierungsziels für „Hydraulische Wirksamkeit von Karststrukturen sowie glazialen Rinnen“ (EZ-165) (Abb. 9) sind eine Vielzahl von Oberflächen-, Bohrloch- und im Bohrlocheinsetzbaren Methoden bzw. die Informationen aus diesen Methoden erforderlich (bspw. Elektrisches Eigenpotential, Bohrloch: Neutronenporosität, Grundwasserstandsmessung, Pumpversuche). Die „Durchlässigkeit des Hutgesteins“ (EZ-169) ist durch die Methode Pumpversuche direkt bestimmbar, zum Erreichen des Optimierungsziels wäre allerdings eine Kombination mit weiteren Methoden, wie bspw. Bohrkernaufnahme/-ansprache und Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser nötig. Für das Erkundungsziel „Räumliche Ausdehnung von Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen sowie glaziale Rinnen“ (EZ-164) kann das Optimierungsziel allein durch luftgestützte Messmethoden

(bspw. Synthetic Aperture Radar und Aeroelektromagnetik) oder auch eine Vielzahl von Oberflächenmethoden, wie bspw. Großskalige Elektromagnetik und Geologische Kartierung, erreicht werden (Abb. 9). Zur Verbesserung der Tiefenauflösung bzw. der Extrapolation der geologischen Information in die Tiefe können ergänzende Messungen am Bohrkern oder im Bohrloch sinnvoll sein. Das Bestimmen der Grundwassercharakteristik, also bspw. von Dichte, elektrischer Leitfähigkeit oder pH-Wert des Grundwassers, kann an Fluidproben mittels portabler Messgeräte bzw. mit Hilfe von Bohrlochsonden erfolgen (siehe Abb. 7).

3.2.5 Tongestein

Im Folgenden wurde eine Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Tongestein erstellt, mit den fiktiven Erkundungszielen der drei Kategorien (a) „*Mächtigkeit, Konfiguration und Teufe der Gesteinsschichten*“, (b) „*Gebirgsdurchlässigkeit & Transport von Grundwasser*“ und (c) „*Homogenität bzw. Variabilität des Wirtsgesteins (im Hinblick auf mikrostrukturelle, mineralogische, geochemische und mechanische Parameter)*“ (siehe Tab. 34 – Tab. 36 in Anhang 5). Diese Kategorien stellen eine zusammengefasste Auswahl erkundeter Ziele und Parameter dar, die in der initialen übertägigen Tongestein-Erkundung der Länder Schweiz und Frankreich von Bedeutung waren (siehe Tab. 32 – Tab. 33 in Anhang 5). Die Ziele und Parameter finden sich im deutschen Standortauswahlverfahren in den Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG (2017), MA-1 bis MA-4 und geoWK-1 bis geoWK-3 wieder und lassen sich im Detail durch eine Anzahl von Erkundungszielen abdecken (siehe Tab. 34 – Tab. 36 in Anhang 5).

Die Abfolge der Erkundungsmethoden (Abb. 10 und Tab. 37 in Anhang 5) umfasst Oberflächen-, Bohrloch- und Labormethoden. Luftgestützte Messmethoden sind zum Erkunden der ausgewählten Erkundungsziele aufgrund der zu erwartenden Beckenkonfiguration und der damit zusammenhängenden kontinuierlichen Tiefenlage des Wirtsgesteins nicht gut geeignet. Deshalb wird auf ihre Darstellung in Abb. 10 verzichtet (siehe Kapitel 2.2.1). Für das Erreichen des Optimierungsziels für die Erkundungsziele der Kategorie (a) „*Mächtigkeit, Konfiguration und Teufe der Gesteinsschichten*“ zeigt sich eine Kombination aus Reflexionsseismik, elektromagnetischen Verfahren (Magnetotellurik und Großskalige Elektromagnetik mit aktiver Anregung) und ausgewählten Bohrloch-Methoden (hier insbesondere Messungen von Dichte, Neutronenporosität, spezifischem elektrischem Widerstand, akustischen Eigenschaften) als sinnvoll. Aus Abb. 10 wird ersichtlich, dass für die Erkundungsziele der Kategorie (b) „*Gebirgsdurchlässigkeit & Transport von Grundwasser*“ ausschließlich Bohrloch- und Labormethoden geeignet sind. Diese umfassen klassische hydrogeologische Methoden wie Packertests und Tracerversuche, Permeabilitätsversuche im Labor oder auch geochemische Methoden wie Sorptions- und Diffusionsuntersuchungen am Bohrkernmaterial und die Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwässern. Die „*Homogenität bzw. Variabilität des Wirtsgesteins*“

(Kategorie d) lässt sich durch eine Vielzahl von Erkundungsmethoden erfassen (d. h. es besteht ein hohes Erkundungspotenzial). Aus fachlicher Sicht ist das einzusetzende Methodeninventar jedoch stark abhängig vom zu erkundenden Maßstab. Ein Beispiel dafür stellt das Erkundungsziel „Variationsbreite von Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ (EZ-66) dar. Das Erreichen des vergebenen Optimierungsziels wäre prinzipiell bereits durch eine Kombination von Reflexionsseismik und Bohrloch-Methoden möglich (siehe Abb. 10). Aussagen zur „Variationsbreite von Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ durch diese Erkundungsmethoden sind allerdings lediglich im Dekameter- bis Metermaßstab möglich und erlauben z. B. das Auffinden von glazialen Rinnen oder größeren Ablagerungsstrukturen. Für Aussagen zum Erkundungsziel im dm – cm-Bereich, in dem das Auftreten von Sandlinsen und Konkretionen im Tongestein typischerweise liegt, ist der Einsatz von Labormethoden (bspw. Röntgenbeugungsanalyse, Auflicht- und Durchlichtmikroskopie, Hyperspektrale Verfahren (Nahbereich)) mit z. T. hoher räumlicher Auflösung notwendig.

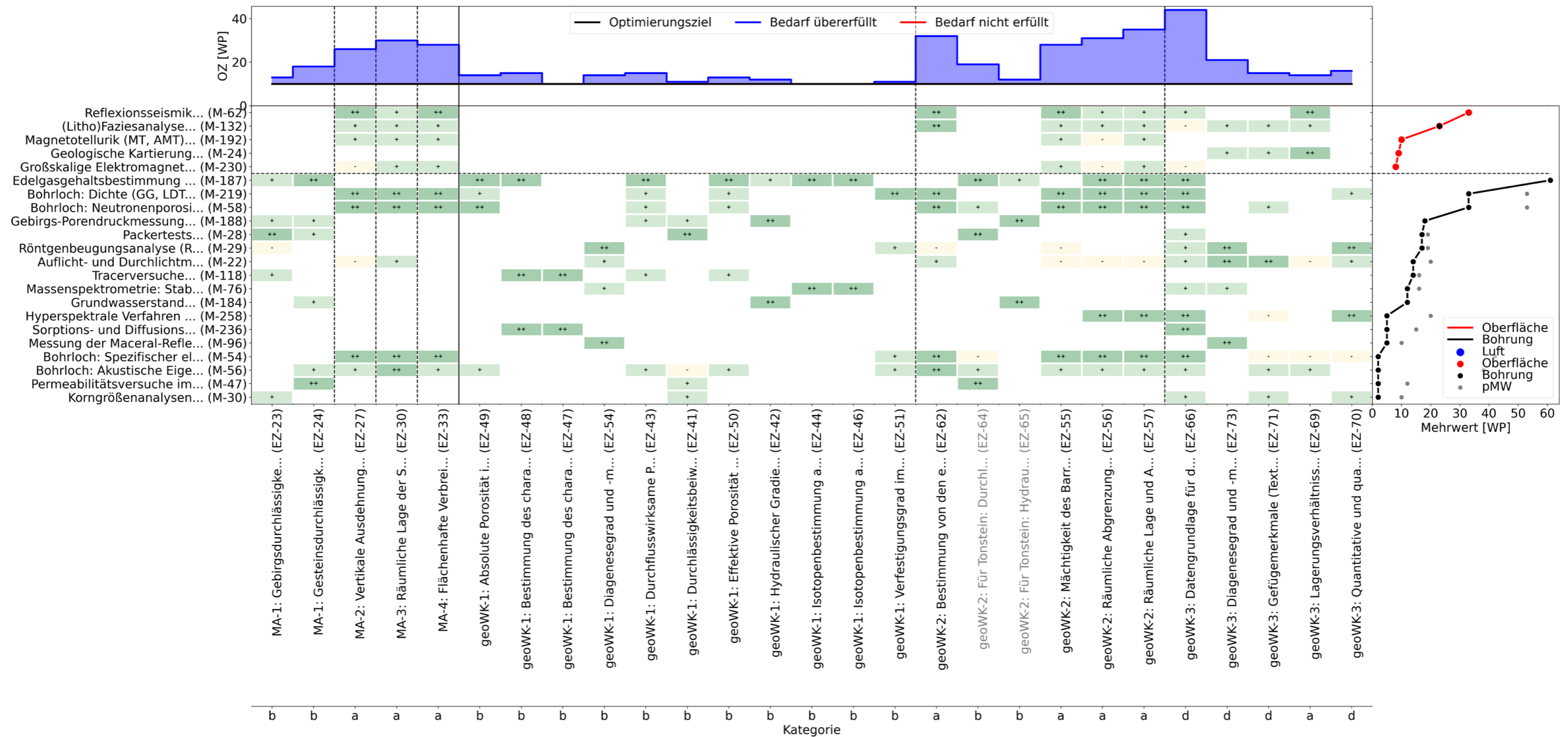


Abb. 10: Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Tongstein, generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) und einer skalenabhängigen Reihung der Methoden. Erkundungsziele in grau sind nicht für das Wirtsgestein, sondern für die an das Wirtsgestein angrenzende Gesteinskörper definiert (siehe Kapitel 2.2.1). Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.

4 Schlussfolgerungen, Vorschläge und Hinweise

Folgende Schlussfolgerungen können aus den Ergebnissen der Arbeiten in den Arbeitspaketen GeoMePS und ZuBeMERk gezogen und daraus generelle Vorschläge und Hinweise für die übertägige Erkundung eines Endlagerstandortes für hochradioaktive Abfälle in Deutschland formuliert werden:

1. *Nutzen von Erkundungszielen gemäß Kneucker et al. (2020) und Nutzen der Verknüpfungen der Eignungen der Erkundungsmethoden mit Erkundungszielen in GeM-DB:* Die Verknüpfungen von Erkundungsmethoden mit Erkundungszielen in GeM-DB, die Möglichkeit zum Abfragen dieser Inhalte und das Erstellen generischer, wirtsgesteinspezifischer Abfolgen von Erkundungsmethoden, z. B. mittels eines Algorithmus, kann als Grundlage für die von der BGE zu planenden Erkundungsprogramme dienen.
2. *Aufzeigen von möglichem Entwicklungs-Bedarf in Hinblick auf die Erkundung einzelner Erkundungsziele:* Am Beispiel von Steinsalz in stratiformer Lagerung (Kapitel 3.2.3, Abb. 8) zeigt sich, dass es für einzelne Erkundungsziele, bspw. die „Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit in den letzten 10 Millionen Jahren“ abgeleitet aus dem geoWK-4 „Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse“ keine geeignete Erkundungsmethoden in GeM-DB gibt, woraus sich ein geringes Potenzial für einen Erkenntnisgewinn durch eine Erkundung ableiten würde (BGE 2022b). An dieser Stelle besteht ggf. Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Untersuchung dieser Fragestellung. Die Erfassung dieses Erkundungsziels erfordert eine umfassende Analyse diverser geologischer Parameter und könnte durch eine weitere Differenzierung des Erkundungsziels in einzelne Aspekte erfüllt werden.
3. *Gestufte übertägige Erkundung:* In einer *initialen* übertägigen Erkundung könnte der Erkundungsbedarf mit der höchsten Priorität, also Abprüfen von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (siehe BGE 2022b), gedeckt werden. Dazu könnten Abbruchkriterien formuliert werden, bei denen die Erkundung bei offensichtlicher Nichteignung der Standortregion gestoppt wird. Diese Abbruchkriterien sollten klar definiert und an ortsspezifische Daten mit möglichst wenig Interpretationsspielraum geknüpft sein.
4. *Berücksichtigen von Erfahrungen aus der übertägigen Erkundung von Kristallingestein:* In der übertägigen Erkundung von Kristallingestein, bspw. in Schweden (SKB 2001), spielten neben geologischen oder gesteinsmechanischen Zielgrößen auch hydrogeologische und hydrologische Parameter, wie z. B. Durchfluss in Fließgewässern, Abflusszonen oder (die Größe der) Wassereinzugsgebiete eine Rolle. Diese hydro(geo)logischen Zielgrößen finden sich zum aktuellen Stand nicht explizit in den gesetzlichen Grundlagen des Standortauswahlverfahrens.

rens wieder (StandAG 2017; EndlSiAnfV 2020; EndlSiUntV 2020). Dennoch könnten sie im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen (z. B. § 7 „Dosiswerte im Bewertungszeitraum EndlSiAnfV (2020)“) bzw. für den Fall eines Endlagersystems Typ 2 (sicherer Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren (BGE 2022b)) im kristallinen Wirtsgestein relevant werden. Bei der Erkundung von Kristallingestein fokussierten bzw. fokussieren sich andere Länder (bspw. Finnland, Frankreich, Schweden, Tschechische Republik) auf Kristallingestein ohne sedimentäre Überdeckung. Die Schweiz bspw. hat bis 1998 das kristalline Grundgebirge unter mächtiger sedimentärer Überdeckung in der Nordschweiz erkundet, bevor Kristallin als „Reserve-Option“ zurückgestellt wurde (HSK 2005). Die HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen; heute: Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)) kam für das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz zu dem Entschluss, dass es „schwierig sein [wird], die Sicherheit eines Lagers an einem konkreten Standort belastbar nachzuweisen“, aufgrund der „schwer prognostizierbaren heterogenen Struktur“ (HSK 2004). In Bereichen ausgewiesener Kristallin-Teilgebiete in Deutschland, z. B. Moldanubikum, ist die geologische Situation vergleichbar mit dem kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. In diesem Zusammenhang wird vorgeschlagen zu prüfen, inwieweit die Erfahrungen der übertägigen Erkundung des Kristallins der Nordschweiz und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen bei einer Erkundungsplanung in Deutschland berücksichtigt werden können.

5. *Berücksichtigen von Erfahrungen aus der übertägigen Erkundung von Steinsalz:* Aus verschiedenen Gründen (geeignete Vorkommen, Nutzungspotentiale, etc.) ziehen wenige Länder (vor allem USA, Deutschland, Niederlande, Polen) Steinsalz als Wirtsgestein für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betracht, weshalb die meisten Erfahrungen aus der übertägigen Erkundung aus diesen Ländern vorliegen (USA: WIPP site, Deutschland: Asse, Morsleben, Gorleben). Obwohl die WIPP site in den USA zur Entsorgung von Transuran-Abfällen geplant war, zielte die frühe Standorterkundung auf eine Option zur Entsorgung hochaktiver Abfälle ab (Weart 1983). Die Auswertung der Erkundungsprogramme ergab, dass vor allem für Steinsalz aufgrund der Wasserlöslichkeit ein umfassendes Verständnis der entsprechend wirksamen Lösungs- und Ablaugungsprozesse von großer Bedeutung ist (Powers et al. 1978a, 1978b). Daher sind hydrogeologische, meteorologische und hydrochemische Parameter und deren Interpretation für das gesamte System wichtig und sollten nicht nur für den ewG oder das Wirtsgestein, sondern das gesamte System erhoben werden. Auch bei der Interpretation von Grundwasseraltern sollte die Wechselwirkung zwischen Wässern aus verschiedenen Lithologien berücksichtigt werden (Neukum et al. 2020 und darin enthaltene Literatur). Durch eine

Betrachtung des hydro(geo)logischen Gesamtsystems kann bspw. die Herkunft und Genese (Fließwege, Gesteins-Wasser-Interaktion etc.) von Grundwasser besser verstanden werden.

6. *Berücksichtigen von Erfahrungen aus der übertägigen Erkundung von Tongestein:* In der übertägigen Erkundung von Tongestein in Frankreich und der Schweiz lag der Fokus auf Reflexionsseismik, Bohrlochmethoden sowie Methoden zu weiterführenden Untersuchungen an im Bohrloch gewonnenem Probenmaterial (Andra 2019; NAGRA 2000, 2002, 2010). Die Ergebnisse in Kapitel 3.2.5 zeigen, dass neben der Reflexionsseismik auch andere Oberflächenmethoden zur Erkundung von Zielen hinsichtlich Mächtigkeit, Konfiguration und Teufe der Gesteinsschichten im Tongestein gut geeignet sind (Abb. 10).
7. *Bedeutung eines Monitoringkonzeptes:* Für das Charakterisieren von geologischen Prozessen oder seltenen Ereignissen sind Aufzeichnungen über lange Zeiträume wichtig. Die Auswertung der übertägigen Erkundungsprogramme ergab, dass bereits in einer frühen Erkundungsphase (a) hydro(geo)logische (z. B. Grundwasserstände, Messung physikalischer und chemischer Parametern von Wässern) und (b) geodynamische Messungen (z. B. Global Positioning System zum Nachweis von vertikalen und horizontalen Bodenbewegungen sowie seismologische Untersuchungen zur Ableitung der rezenten seismischen Aktivität) durchgeführt wurden. Je nach Standort kann dafür vollständig oder teilweise auf bereits vorhandene Daten aus nationalen oder regionalen Netzen von Messstationen zurückgegriffen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeitspakete GeoMePS und ZuBeMERk wurden Erkundungsziele abgeleitet (Kneuker et al., 2020), Erkundungsmethoden identifiziert und diese in der Datenbank GeM-DB zusammengestellt und verknüpft. Die Verknüpfungen beruhen auf der wirtsgesteinsspezifischen Bewertung der Methodeneignung für die einzelnen Erkundungsziele. Zudem wurden übertägige Erkundungsprogramme für Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle innerhalb und außerhalb Deutschlands recherchiert und ausgewertet.

Im vorliegenden Bericht ist die Methodik beschrieben, wie die Datenbank-Inhalte und die Erkenntnisse aus den übertägigen Erkundungsprogrammen unter Anwendung eines zweckmäßigen, iterativen Algorithmus abgefragt werden und daraus wirtsgesteinsspezifische Abfolgen von Erkundungsmethoden für eine übertägige Erkundung generiert werden können. Anhand beispielhafter Inputparameter für den Algorithmus wurden für die Wirtsgesteine Kristallingestein, Steinsalz in stratiformer Lagerung, Steinsalz in steiler Lagerung und

Tongestein Beispiele von Abfolgen von Erkundungsmethoden für eine mögliche initiale, frühe übertägige Erkundung dargestellt und kurz diskutiert.

Aus den Erkenntnissen der beispielhaften wirtsgesteinsspezifischen Abfolgen von Erkundungsmethoden, den Verknüpfungen von Datenbank-Inhalten sowie den Auswertungen übertägiger Erkundungsprogramme können Schlussfolgerungen und generelle Vorschläge für die übertägige Erkundung von Standortregionen zur Ermittlung der darin liegenden potenziell geeigneten Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle in Deutschland gezogen werden.

Künftige Schwerpunkte für die anschließende Projektphase in ZuBeMERk und GeoMePS sind:

1. Die Ableitung und Aufnahme weiterer Erkundungsziele und ggf. Erkundungsmethoden, die sich aus den Arbeiten der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ergeben;
2. Unterstützende Arbeiten für die Planung der übertägigen Erkundung, wie z. B. weitere Detail-Analysen von übertägigen Erkundungsprogrammen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten können in neue, detailliertere Vorschläge übertägiger beispielhafter Erkundungskonzepte einfließen;
3. Die Implementierung weiterer methodenspezifischer Attribute sowie sich daraus ergebende Filtermöglichkeiten und Algorithmen zur automatischen Auswertung von GeM-DB-Inhalten. Ziel ist die Weiterentwicklung des methodischen Ansatzes zur automatischen Erstellung von Abfolgen von Erkundungsmethoden unter Berücksichtigung der Teufe, Mächtigkeit und ggf. Lagerungsverhältnisse in Hinblick auf die übertägige Erkundung.

Literaturverzeichnis

- Andra (2006): Dossier 2005 Argile – Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation Meuse/Haute-Marne site – Synthesis December 2005. INIS-FR--19-1357; France.
- Andra (2019): Synthesis of 20 years Research, Development and Demonstration in Andra's Underground Research Laboratory in Bure for Cigeo Project – France Technical Document. INIS-FR--19-1365; France.
- Beilecke, T., Kneuker, T., Semroch, R., Dlugosch, R., Pollok, L. & Schubarth-Engelschall, N. (2021): Nutzung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, B3.2/B50161-16/2021-0002/001. Zwischenbericht; Hannover, Deutschland.
- BGE (2022a): Basiskonzept zur Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung gemäß § 14 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, SG01101/2-3/8-2022#2; Peine, Deutschland.
- BGE (2022b): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (Stand 28.03.2022). BGE, Zwischenbericht, SG02303/97-2/2-2022#10; Peine, Deutschland.
- BGR (2022): Geowissenschaftliche Methodendatenbank GeM-DB – Übersicht aller Erkundungsmethoden (Stand Dezember, 2022). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Kurzbericht; Hannover, Deutschland.
- EndlSiAnfV (2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094).
- EndlSiUntV (2020): Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).

- Hammer, J. & Sönke, J. (2009): Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Archivstück, 2. Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA); Hannover, Deutschland.
- HSK (2004): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA. HSK 23/73; Würenlingen, Schweiz.
- HSK (2005): Entsorgungsnachweis: Etappe auf einem langen Weg – Historischer Abriss der bisherigen Entscheidungen und Tätigkeiten im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle in der Schweiz. HSK-AN-5262; Villigen, Schweiz.
- Kneuker, T., Bartels, A., Bebiolka, A., Beilecke, T., Bense, F., Beushausen, M., Frenzel, B., Jähne-Klingberg, F., Lang, J., Lippmann-Pipke, J., May, F., Mertineit, M., Noack, V., Pollok, L., Reinhold, K., Rummel, L., Schubarth-Engelschall, N., Schumacher, S., Stück, H. & Weber, J. R. (2020): Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung gemäß § 16 StandAG. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, B3.2/B50161-17/2020-0001/001. Zwischenbericht; Hannover, Deutschland.
- Kneuker, T., Beilecke, T., Pollok, L., Schubarth-Engelschall, N., Semroch, R. & Dlugosch, R. (2021): Datenbankbasierte Zusammenstellung geowissenschaftlicher Erkundungsmethoden für die übertägige Standorterkundung gemäß §16 StandAG. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, B3.2/B50161-17/2021-0001/001. Zwischenbericht; Hannover, Deutschland.
- McEwen, T. & Äikäs, T. (2000): The site selection process for a spent fuel repository in Finland – summary report. Posiva Oy, summary report, POSIVA 2000-15. Posiva-Report; Helsinki, Finland.
- NAGRA (2000): Sondierbohrung Benken – Untersuchungsbericht. NTB 00-01. Untersuchungsbericht; Wettingen, Schweiz.
- NAGRA (2002): Project Opalinus Clay – Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). NTR 02-05. Safety Report; Wettingen, Switzerland.

- NAGRA (2010): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2. NTB 10-01. Technischer Bericht; Wettingen, Schweiz.
- Neukum, C., Seibert, S., Post, V. E. A., Koeniger, P., Bäuml, R., Desens, A. & Houben, G. J. (2020): Ausschlusskriterium Grundwasseralters. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abschlussbericht 9S2019070000; Hannover, Deutschland.
- Powers, D. W., Lambert, S. J., Shaffer, S. E. & Hill, L. R. (1978a): Geological characterization report, Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) site, Southeastern New Mexico. Sandia National Laboratories, SAND-78-1596, Bd. 1. Sandia-Report; Albuquerque, United States.
- Powers, D. W., Lambert, S. J., Shaffer, S. E. & Hill, L. R. (1978b): Geological characterization report: Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) site, Southeastern New Mexico. Sandia National Laboratories, SAND-78-1596, Bd. 2. Sandia-Report; Albuquerque, United States.
- Semroch, R., Dlugosch, R., Beilecke, T., Kneucker, T., Pollok, L., Richter, L. & Schubarth-Engelschall, N. (2022): Nutzung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Ergebnisbericht; Hannover, Deutschland.
- SKB (2000a): Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository. SKB, SKB-TR-00-20. Technical Report; Stockholm, Sweden.
- SKB (2000b): Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase. SKB, SKB-TR-01-03. Technical Reports; Stockholm, Sweden.
- SKB (2001): Site investigations Investigation methods and general execution programme. SKB, SKB-TR-01-29. Technical Report; Stockholm, Sweden.
- StandAG (2017): Gesetz zur Aufsuchung und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. S. 1074) das zuletzt durch Artikel 12 Absatz 16 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist.

- Thury, M., Gautschi, A., Mueller, W. H., Vomvoris, S., Mazurek, M., Naef, H., Pearson, F. J. & Wilson, W. (1994): Geology and hydrogeology of the crystalline basement of Northern Switzerland Synthesis of regional investigations 1981-1993 within the Nagra radioactive waste disposal programme. NTB 93-01. Technical Reports; Wettingen, Schweiz.
- Virlogeux, D. (1998): An outline of 1994-1996 geological studies for underground laboratory siting in the Charroux-Civray sediment-capped granitic massif-(southern Vienne-Poitou-France). 3. Aespoe international seminar, Oskarshamn, Sweden. 71-78; Stockholm, Sweden (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.).
- Weart, W. D. (1983): Summary evaluation of the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) site suitability. Sandia National Laboratories, SAND-83-0450. Sandia-Report; Albuquerque, United States.
- Weart, W. D. (1996): Summary of scientific investigations for the Waste Isolation Pilot Plant. Sandia National Laboratories, SAND--96-0326C. Sandia-Report; Albuquerque, United States.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AK	Ausschlusskriterium gemäß StandAG (2017)
AM	Abfolge von Erkundungsmethoden
B	Parameter „Bedarf“ bei der „automatischen“ Erstellung von Abfolgen von Erkundungsmethoden
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
ENSI	Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat
EZ	Erkundungsziel nach BGR-Bericht (Kneucker et al. 2020)
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
GeM-DB	<u>G</u> ewissenschaftlichen <u>M</u> ethodendatenbank der BGR
GeoMePS	Zusammenstellung und Bewertung von <u>g</u> ewissenschaftlichen <u>M</u> ethoden und <u>P</u> rogrammen für die übertägige <u>S</u> tanorterkundung
geoWK	Geowissenschaftliches Abwägungskriterium gemäß StandAG (2017); im BGR-Bericht (Kneucker et al. 2020) als AwK bezeichnet.
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Schweiz (jetzt ENSI)
MA	Mindestanforderung gemäß StandAG (2017)
MW	Mehrwert einer Methode bei der Erstellung von Abfolgen von Erkundungsmethoden
OZ	Parameter „Optimierungsziel“ beschreibt die Erkundungsintensität eines Erkundungsziels bei der „automatischen“ Erstellung von Abfolgen von Erkundungsmethoden
pMW	Potentieller Mehrwert einer Erkundungsmethode bei der Erstellung von Abfolgen von Erkundungsmethoden
rvSU	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen gemäß StandAG (2017)
StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz) (StandAG 2017)
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant
WP	Parameter „Wertungspunkt“ bei der „automatischen“ Erstellung von Abfolgen von Erkundungsmethoden
wvSU	Weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen gemäß StandAG (2017)
ZuBeMERk	<u>Z</u> usammenstellung und <u>B</u> ewertung von geophysikalischen <u>M</u> ethoden zur übertägigen <u>E</u> rkundung

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Wesentliche Arbeitsschritte im Rahmen der Entwicklung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB sowie der sich daraus ergebenden Vorschläge und Methodenabfolgen für die übertägige Erkundung.	8
Abb. 2: Ablaufskizze des iterativen Optimierungsprozesses zur automatischen Erstellung einer „Abfolge von (Erkundungs-)Methoden“ mit Hilfe des entwickelten Algorithmus.	11
Abb. 3: Definition der Optimierungsziele (OZ) (schwarze horizontale Linie) für einige beispielhaft gewählte Erkundungsziele. Exemplarisch wurden alle Erkundungsziele aus den MA auf 10 WP und jene aus den geoWK auf 5 WP gesetzt. Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele siehe Tab. 39.	13
Abb. 4: Beispielhafte Abbildung der Optimierungsziele (schwarze horizontale Linie) und der final verbleibende Bedarf nach dem Abschluss der Erstellung der Abfolge von Erkundungsmethoden. Übererfüllte Bedarfe (blaue Flächen) und nicht erfüllte Bedarfe (rote Flächen). Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele siehe Tab. 39.	14
Abb. 5: Gegenüberstellung verschiedener „Auswerte-Varianten“ zur automatischen Erstellung einer Abfolge von Erkundungsmethoden (von oben nach unten). Automatische Reihung gemäß Mehrwert (a), skalenabhängige Reihung der Methoden (b), skalenabhängige Reihung der Methoden mit einem minimalen Mehrwert von 5 WP (c) und Vorgabe von Erkundungsmethoden vor der automatischen Reihung weiterer Methoden (d). Mit grauen Punkten ist der potenzielle Mehrwert für die jeweiligen Methoden dargestellt. Vollständige Bezeichnung der Methoden siehe Tab. 38.	16
Abb. 6: Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Kristallin generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) und einer skalenabhängigen Reihung der Methoden. Die Erkundungsziele und Erkundungsmethoden zur Hydrochemie (geoWK-10) sind separat in Abb. 7 dargestellt. Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.	21
Abb. 7: Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Kristallin generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) für einzelne Erkundungsziele zur Hydrochemie (geoWK-10). Separate Abfrage dieser Erkundungsziele aufgrund fehlender Synergien/Mehrwerte mit Erkundungsmethoden in Abb. 6. Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.	22

Seite

Abb. 8:	Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) und einer skalenabhängigen Reihung der Methoden. Erkundungsziele in grau sind nicht für das Wirtsgestein, sondern für das Deckgebirge definiert (siehe Kapitel 2.2.1). Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.	24
Abb. 9:	Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) und einer skalenabhängigen Reihung der Methoden. Erkundungsziele in grau sind nicht für das Wirtsgestein, sondern für das Deckgebirge definiert (siehe Kapitel 2.2.1). Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.	26
Abb. 10:	Beispielhafte Abfolge von Erkundungsmethoden für das Wirtsgestein Tongestein, generiert mittels Anwendung des Algorithmus bei entsprechenden Inputparametern (siehe Kapitel 3.2.1) und einer skalenabhängigen Reihung der Methoden. Erkundungsziele in grau sind nicht für das Wirtsgestein, sondern für die an das Wirtsgestein angrenzende Gesteinskörper definiert (siehe Kapitel 2.2.1). Vollständige Bezeichnung der Erkundungsziele und Methoden siehe Tab. 38 und Tab. 39.	30

Anhangverzeichnis	Seite
Anhang 1:.....	48
Zusammenfassung der Recherchen initialer Erkundungsphasen ausgewählter übertägiger Erkundungsprogramme für Kristallingestein, Steinsalz und Ton- gestein	
Tab. 1: Übertägige Erkundung Finnland, Kristallingestein, <i>Preliminary site investigation</i> (1987 – 1992).	48
Tab. 2: Übertägige Erkundung Frankreich, Sediment-überdecktes Kristallin, <i>Preliminary survey</i> (1994 – 1996).....	49
Tab. 3: Übertägige Erkundung Schweden, Kristallingestein, <i>Initial site investigation</i> (2002 – 2006).....	50
Tab. 4: Übertägige Erkundung Schweiz, Sediment-überdecktes Kristallingestein, <i>Regionales Erkundungsprogramm in der nördlichen Schweiz und vorgeschlagene standortspezifische Erkundung Kristallin Nordschweiz</i> (1981 – 1996).....	51
Tab. 5: Übertägige Erkundung USA (WIPP), Steinsalz (stratiforme Lagerung), <i>Preliminary site selection</i> (1974 – 1978).	53
Tab. 6: Übertägige Erkundung von Salzformationen (generisch) und übertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben (Steinsalz in steiler Lagerung).....	54
Tab. 7: Frankreich, Tongestein, <i>Preliminary surveys and preliminary borehole drilling phase</i> (1994 – 1996).....	55
Tab. 8: Schweiz, Tongestein, <i>Preliminary surveying phase</i> (1988 – 2004 und 2011 – 2018).	56
Anhang 2:.....	59
Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter, Identifizierung typischer Erkundungsziele und mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für Kristallingestein	
Anhang 2.1: Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter für die initialen Erkundungsphasen von Kristallingestein.....	59
Tab. 9: Finnland, Kristallingestein, <i>Preliminary site investigation</i> (1987 – 1992).	59
Tab. 10: Frankreich, Sediment-überdecktes Kristallin, <i>Preliminary survey (1994 – 1996)</i>	59

Seite

Tab. 11:	Schweden, Kristallingestein, <i>Initial site investigation</i> (2002 – 2006).	59
Tab. 12:	Schweiz, Sediment-überdecktes Kristallingestein, <i>Regionales Erkundungsprogramm</i> in der nördlichen Schweiz und vorgeschlagene standortspezifische Erkundung Kristallin Nordschweiz (1981 – 1996).	60
Anhang 2.2: Identifizierung typischer Erkundungsziele für die initialen Erkundungsphasen von Kristallingestein.....		60
Tab. 13:	Identifizierung typischer Erkundungsziele im Kristallingestein (ohne Überdeckung) für die Kategorie (a) „ <i>Räumliche Abgrenzung homogener, (gering-permeabler) Blöcke</i> “ (siehe Tab. 9 – Tab. 12).....	60
Tab. 14:	Identifizierung typischer Erkundungsziele im Kristallingestein (ohne Überdeckung) für die Kategorie (b) „ <i>Permeable Störungszonen, Klüfte und Strukturen hinsichtlich Gebirgsdurchlässigkeit und advektivem Stofftransport</i> “ (siehe Tab. 9 – Tab. 12).....	60
Tab. 15:	Identifizierung typischer Erkundungsziele im Kristallingestein (ohne Überdeckung) für die Kategorie (c) „ <i>Grundwasserbewegung, Hydrochemie und hydraulisches Potential</i> “ (siehe Tab. 9 – Tab. 12).....	61
Tab. 16:	Identifizierung typischer Erkundungsziele für <i>geoWK-10</i> in den Wirtsgesteinen Kristallin und Steinsalz (siehe Tab. 15, Tab. 21 und Tab. 30).....	61
Anhang 2.3: Mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für eine initiale Erkundungsphase von Kristallingestein.....		62
Tab. 17:	Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele im Kristallingestein (ohne Überdeckung) (Tab. 13 – Tab. 15). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.	62
Tab. 18:	Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele in <i>geoWK-10</i> (Tab. 16). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.	62

Seite

Anhang 3:.....	63
Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter, Identifizierung typischer Erkundungsziele und mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für Steinsalz in stratiformer Lagerung	
Anhang 3.1: Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter für die initiale Erkundungsphase von Steinsalz in stratiformer Lagerung.....	63
Tab. 19: USA (WIPP), Steinsalz (stratiforme Lagerung), <i>Preliminary site selection</i>	63
Anhang 3.2: Identifizierung typischer Erkundungsziele für die initiale Erkundungsphase von Steinsalz in stratiformer Lagerung.....	63
Tab. 20: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (a) „ <i>Lösungserscheinungen und Hohlräume in den Barrieregesteinen und im Deckgebirge</i> “ (siehe Tab. 19).....	63
Tab. 21: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (b) „ <i>Grundwasserstand, -fluss, -bewegung und -charakteristik</i> “ (siehe Tab. 19).....	64
Tab. 22: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (c) „ <i>Grundwasserherkunft und -verweilzeit</i> “ (siehe Tab. 19).....	64
Tab. 23: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (d) „ <i>Räumliche Verbreitung, Variation und Tiefe und Lagerungsverhältnisse / Deformation des Wirtsgesteins</i> “ (siehe Tab. 19).....	64
Tab. 24: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (e) „ <i>Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar</i> “ (siehe Tab.19).....	64
Anhang 3.3: Mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für eine initiale Erkun- dungsphase von Steinsalz in stratiformer Lagerung.....	65
Tab. 25: Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele im Steinsalz in stratiformer Lagerung (Tab. 20 – Tab. 24). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.....	65

Seite

Anhang 4:.....	66
Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter, Identifizierung typischer Erkundungsziele und mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für Steinsalz in steiler Lagerung	
Anhang 4.1: Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter für die initiale Erkundungsphase von Steinsalz in steiler Lagerung	66
Tab. 26: Übertägige Erkundung von Salzformationen (generisch) und Übertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben.	66
Anhang 4.2: Identifizierung typischer Erkundungsziele für die initiale Erkundungsphase von Steinsalz in steiler Lagerung.....	66
Tab. 27: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (steile Lagerung) für den die Kategorie (a) „ <i>Strukturgeol. Bau, Abgrenzung der Salzstruktur, Internbau, Lagerungsverhältnisse und tektonische Entwicklung (Salzaufstieg) der Salzstruktur</i> “ (siehe Tab. 26).....	66
Tab. 28: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (steile Lagerung) für die Kategorie (b) „ <i>Subrosion, Lösungserscheinungen, Umbildungen (Alteration / Rekristallisation)</i> “ (siehe Tab. 26).....	67
Tab. 29: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (steile Lagerung) für die Kategorie (c) „ <i>Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar</i> “ (siehe Tab. 26).....	67
Tab. 30: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (steile Lagerung) für die Kategorie (d) „ <i>Grundwasserstand, -fluss, -bewegung und -charakteristik</i> “ (siehe Tab. 26).....	67
Anhang 4.3: Mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für eine initiale Erkun- dungsphase von Steinsalz in steiler Lagerung	68
Tab. 31: Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele im Steinsalz in steiler Lagerung (Tab. 27 – Tab. 30). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.	68

Seite

Anhang 5:.....	69
Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter, Identifizierung typischer Erkundungsziele und mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für Tongestein	
Anhang 5.1: Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter für die initialen Erkundungsphasen von Tongestein.....	69
Tab. 32: Frankreich, Tongestein, <i>Preliminary survey and borehole drilling phase</i> (1994 – 1996).	69
Tab. 33: Schweiz, Tongestein, <i>Preliminary surveying phase</i> (Regionales Erkun- dungsprogramm Sedimente: 1988 – 2004 und Etappe 2: 2011 – 2018).	69
Anhang 5.2: Identifizierung typischer Erkundungsziele für die initialen Erkun- dungsphasen von Tongestein.....	70
Tab. 34: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Tongestein für die Kategorie (a) „ <i>Mächtigkeit, Konfiguration, Teufe der Gesteinsschichten</i> “ (siehe Tab. 32 – Tab. 33).	70
Tab. 35: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Tongestein für die Kategorie (b) „ <i>Gebirgsdurchlässigkeit & Transport von Grundwasser</i> “ (siehe Tab. 32 – Tab. 33).	70
Tab. 36: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Tongestein für die Kategorie (c) „ <i>Homogenität bzw. Variabilität des Wirtsgesteins</i> <i>(mikrostrukturell, mineralogisch, geochemisch und mechanisch)</i> “ (siehe Tab. 32 – Tab. 33).	71
Anhang 5.3: Mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für eine initiale Erkun- dungsphase von Tongestein.....	71
Tab. 37: Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele im Tongestein (Tab. 34 – Tab. 36). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.	71

Seite

Anhang 6:.....72

Listen aller Erkundungsmethoden und Erkundungsziele in GeM-DB

Tab. 38: Liste aller Erkundungsmethoden in GeM-DB (Stand Dezember 2022)
mit Methoden-ID (M-ID) und Erkundungsskala.....72

Tab. 39: Liste aller Erkundungsziele in GeM-DB (Stand Dezember 2022)
mit Erkundungsziele-ID (EZ-ID) und Zuordnung zu Kriterien und
Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG.....75

Anhang 1:

Zusammenfassung der Recherchen initialer Erkundungsphasen ausgewählter übertägiger Erkundungsprogramme für Kristallingestein, Steinsalz und Tongestein

Tab. 1: Übertägige Erkundung Finnland, Kristallingestein, *Preliminary site investigation* (1987 – 1992).

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungszeiträume
Luft	Aeromagnetik	1
Luft	Aerogravimetrie	1
Luft	Aeromagnetik	1; X
Luft	Aeroradiometrie	1
Luft	Photogrammetrie	1
Oberfläche	Elektromagnetische Mehrspulenverfahren	X
Oberfläche	Geoelektrik	X
Oberfläche	Gravimetrie	X
Oberfläche	Geologische Kartierung	1; 3; X
Oberfläche	Grundwasserneubildung	1; 3; X
Oberfläche	Georadar (EMR, GPR)	1; 4; X
Oberfläche	Refraktionsseismik	3; X
Bohrung	Atomabsorptionsspektrometrie (AAS)	X
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	X
Bohrung	Bohrloch: Geochemische Charakterisierung	X
Bohrung	Elektrisches Eigenpotential	X
Bohrung	Magnetische Remanenz (Labor)	X
Bohrung	Packertests	X
Bohrung	Porositäts- und Dichtebestimmung (Heliumpyknometer)	X
Bohrung	Redoxpotential von Wässern	X
Bohrung	Röntgenbeugungsanalyse (RDA / XRD)	X
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie	1; 3; 4; X
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Kohlenstoff-14	1; 3; 4; X
Bohrung	Grundwasserstandsmessung	1; 3; 4; X
Bohrung	Ionen-Chromatographie (IC)	1; 3; 4; X
Bohrung	Massenspektrometrie: Quantifizierung von Spurenelementen	1; 3; 4; X
Bohrung	Massenspektrometrie: Radiometrische Datierung	1; 3; 4; X
Bohrung	Massenspektrometrie: Stabile Isotope	1; 3; 4; X
Bohrung	Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)	1; 3; 4; X
Bohrung	pH-Meter (Potentiometer)	1; 3; 4; X
Bohrung	Physikalische Parameter von Wässern	1; 3; 4; X
Bohrung	Redoxpotential von Wässern	1; 3; 4; X

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungszeiträume
Bohrung	Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen-Analysen an Grundwasser	1; 3; 4; X
Oberfläche; Bohrung	(Litho-)Faziesanalyse	2
Bohrung	Auflicht- und Durchlicht-Mikroskopie	2; X
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	2; 3; X
Bohrung	Bohrloch: Akustische Eigenschaften	2
Bohrung	Bohrloch: Bohrlochgeometrie	2; X
Bohrung	Bohrloch: Dichte	2; X
Bohrung	Bohrloch: Gammastrahlung	2; 3; X
Bohrung	Bohrloch: Mag. Suszeptibilität	2; X
Bohrung	Bohrloch: Neutronenporosität	2; X
Bohrung	Bohrloch: Radar (EMR, GPR)	2; 3; X
Bohrung	Bohrloch: Seismik	2; 3; 4; X
Bohrung	Bohrloch: Spez. elektr. Widerstand	2; 3; X
Bohrung	Bohrloch: Spülungseigenschaften	2; 3; X
Bohrung	Bohrloch: Temperatur	2; X
Bohrung	Elektrischer Widerstand (Labor)	2; X
Bohrung	Magnetische Suszeptibilität (Labor)	2; X
Bohrung	Pumpversuche	2; 3; 4; X
Bohrung	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, XRF)	2; X
Bohrung	Thermische Eigenschaften (Labor)	2
Bohrung	Ultraschall (Labor)	2; X
Bohrung	Bohrloch: Flussmessung	3; 4; X
Bohrung	E-Modul-Testss	3; X
Bohrung	Tracerversuche	3
Bohrung	Triaxiale Festigkeitsversuche	3; X
Bohrung	Uniaxiale Festigkeitsversuche	3; X
Bohrung	Zugversuche	3; X
Bohrung	Hydrofrac-Methode	4; X

Quellen: McEwen & Äikäs (2000). Erkundungszeiträume: 1) Phase 1 (ca. 1987 – 1988), 2) Phase 2 (ca. 1988 – 1989), 3) Phase 3 (ca. 1989 – 1991), 4) Phase 4 (ca. 1990 – 1992), X) Phase unbekannt oder phasenübergreifend eingesetzt. Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben. * Erkundungsmethoden wurden z. T. sinngemäß übersetzt bzw. interpretiert.

Tab. 2: Übertägige Erkundung Frankreich, Sediment-überdecktes Kristallin, *Preliminary survey* (1994 – 1996).

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Luft	Aeromagnetik	1
Oberfläche	Geologische Kartierung	1
Oberfläche	Gravimetrie	1
Bohrung	Grundwasserstandsmessung	1
Oberfläche	Reflexionsseismik	1
Oberfläche	Refraktionsseismik	1

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Bohrung	Bohrloch: Akustisches Bohrlochfernsehen	2
Bohrung	Bohrloch: Spez. elektr. Widerstand	2
Bohrung	Bohrloch: Temperatur	2
Bohrung	Gebirgs-Porendruckmessung	2
Bohrung	Grundwasserstandsmessung	2
Bohrung	Packertests	2
Bohrung	Pumpversuche	2
Bohrung	Sorptions- und Diffusionsuntersuchungen am Bohrkernmaterial	2
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie	3
Bohrung	Aufnahme von Bruchstrukturen	3
Bohrung	Ionen-Chromatographie (IC)	3
Bohrung	Massenspektrometrie: Radiometrische Datierung	3
Bohrung	Massenspektrometrie: Stabile Isotope	3
Bohrung	Optische Emissionspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)	3
Bohrung	Physikalische Parameter von Wässern	3
Bohrung	Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen-Analysen an Grundwasser	3
Bohrung	Auflicht- und Durchlicht-Mikroskopie	4
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	4
Bohrung	Permeabilitäts-Versuche im Labor	4
Bohrung	Rasterelektronen-Mikroskopie	4
Bohrung	Röntgenbeugungsanalyse (RDA / XRD)	4

Quelle: Virlogeux (1998). Erkundungsschritte: 1) Surface, 2) Borehole, 3) Groundwater, 4) Drill core. Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben.
* Erkundungsmethoden wurden z. T. sinngemäß übersetzt bzw. interpretiert.

Tab. 3: Übertägige Erkundung Schweden, Kristallingestein, *Initial site investigation* (2002 – 2006).

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Oberfläche	Geologische Kartierung	1
Luft	Aeroelektromagnetik	2
Luft	Aeromagnetik	2
Luft	Aeroradiometrie	2
Luft	Light Detection and Ranging (LiDAR, ALS)	2
Oberfläche	Elektromagnetische Mehrspulenverfahren	3
Oberfläche	Geoelektrik	3
Oberfläche	Georadar (EMR, GPR)	3
Oberfläche	Gravimetrie	3
Oberfläche	Magnetik	3
Oberfläche	Refraktionsseismik	3
Oberfläche	Transientenelektromagnetik (TEM, TDEM)	3

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Oberfläche	Reflexionsseismik	3; 6
Oberfläche	Grundwasserstandsmessung	4
Oberfläche	Physikalische Parameter von Wässern	4
Oberfläche	GPS / GNSS	5
Oberfläche	Seismologie: Erdbebenmonitoring	5
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	6
Bohrung	Bohrloch: Akustische Eigenschaften	6
Bohrung	Bohrloch: Dipmeter	6
Bohrung	Bohrloch: Gammastrahlung	6
Bohrung	Bohrloch: Geochemische Charakterisierung	6
Bohrung	Bohrloch: Mag. Suszeptibilität	6
Bohrung	Bohrloch: Radar (EMR, GPR)	6
Bohrung	Bohrloch: Seismik	6
Bohrung	Bohrloch: Spez. elektr. Widerstand	6
Bohrung	Bohrloch: Spülungseigenschaften	6
Bohrung	Bohrloch: Temperatur	6
Bohrung	Grundwasserstandsmessung	6
Bohrung	Hydrofrac-Methode	6
Bohrung	Packertests	6
Bohrung	Überbohrmethode	6

Quellen: SKB (2000a, 2000b). Erkundungsschritte: 1) Geology, 2) Airborne and remote methods, 3) Geophysical ground methods, 4) Hydrology, 5) Monitoring of active movement, 6) Drill hole and drill core investigations. Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben.
* Erkundungsmethoden wurden z. T. sinngemäß übersetzt bzw. interpretiert.

Tab. 4: Übertägige Erkundung Schweiz, Sediment-überdecktes Kristallingestein, *Regionales Erkundungsprogramm in der nördlichen Schweiz und vorgeschlagene standortspezifische Erkundung Kristallin Nordschweiz (1981 – 1996).*

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungszeiträume
Luft	Aeromagnetik	1
Luft	Multispektrale Verfahren	1
Luft	Photogrammetrie	1
Oberfläche	Geologische Kartierung	1
Oberfläche	GPS / GNSS	1
Oberfläche	Gravimetrie	1
Oberfläche	Magnetotellurik (MT, AMT)	1
Oberfläche	Nivellement-Messungen über Tage	1
Oberfläche	Reflexionsseismik	1; 2
Oberfläche	Seismologie: Erdbebenmonitoring	1
Oberfläche	Seismologie: Gefährdungsberechnung	1
Oberfläche	Seismologie: Herdflächenlösungen	1
Oberfläche	Seismologie: historische Seismologie	1
Oberfläche	Seismologie: Relokalisierung	1

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungszeiträume
Oberfläche	Seismologie: Tomographie	1
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie	1
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Kohlenstoff-14	1
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Tritium bzw. mit Tritium-Helium	1
Bohrung	Aufnahme von Bruchstrukturen	1
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	1; 2
Bohrung	Bohrloch: Akustisches Bohrlochfernsehen	1; 2
Bohrung	Bohrloch: Bohrlochgeometrie	1
Bohrung	Bohrloch: Flussmessung	1
Bohrung	Bohrloch: Gammastrahlung	1; 2
Bohrung	Bohrloch: Gravimetrie	1
Bohrung	Bohrloch: Neutronenporosität	1; 2
Bohrung	Bohrloch: Seismik	1; 2
Bohrung	Bohrloch: Spez. elektr. Widerstand	1
Bohrung	Bohrloch: Spülungseigenschaften	1; 2
Bohrung	Bohrloch: Temperatur	1; 2
Bohrung	Dichtemessung an Wässern	1
Bohrung	Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser	1
Bohrung	E-Modul-Tests	1
Bohrung	Gas-Chromatographie (C10-C40)	1
Bohrung	Gas-Chromatographie (GC)	1
Bohrung	Grundwasserstandsmessung	1
Bohrung	Hydrofrac-Methode	1
Bohrung	Ionen-Chromatographie (IC)	1
Bohrung	Massenspektrometrie: Stabile Isotope	1
Bohrung	Packertests	1; 2
Bohrung	pH-Meter (Potentiometer)	1
Bohrung	Physikalische Parameter von Wässern	1; 2
Bohrung	Pumpversuche	1; 2
Bohrung	Quellversuch	1
Bohrung	Redoxpotential von Wässern	1
Bohrung	Sauerstoff- / Clark-Elektrode	1
Bohrung	Thermische Eigenschaften (Labor)	1
Bohrung	Tracerversuche	1
Bohrung	Triaxiale Festigkeitsversuche	1
Bohrung	Triaxiale Kriechversuche	1
Bohrung	Überbohrmethode	1
Bohrung	Überwachung Bohrvorgang	1
Bohrung	Uniaxiale Kriechversuche	1
Bohrung	Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen-Analysen an Grundwasser	1

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungszeiträume
Bohrung	Zugversuche	1
Bohrung	Bohrloch: Dichte	2
Bohrung	Bohrloch: elektrisches Bohrlochfernsehen (FMI, FMS, EMI)	2
Bohrung	Chemische Parameter von Wässern	2
Bohrung	Gebirgs-Porendruckmessung	2

Quelle: Thury et al. (1994). Erkundungszeiträume: 1) 1981 – 1993; 2) 1994 – 1996. Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben. * Erkundungsmethoden wurden z. T. sinngemäß übersetzt bzw. interpretiert.

Tab. 5: Übertägige Erkundung USA (WIPP), Steinsalz (stratiforme Lagerung), *Preliminary site selection* (1974 – 1978).

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Luft	Aeromagnetik	X
Oberfläche	Geologische Kartierung	X
Oberfläche	Geoelektrik	X
Oberfläche	Gravimetrie	X
Oberfläche	Magnetotellurik (MT, AMT)	X
Oberfläche	Reflexionsseismik	X
Oberfläche	Refraktionsseismik	X
Oberfläche	Seismologie: Erdbebenmonitoring	X
Oberfläche	Seismologie: Standortcharakterisierung	X
Oberfläche	Durchfluss- und Abflussbestimmung in Fließgewässern	X
Oberfläche	Grundwasserneubildung	X
Oberfläche	Grundwasserstandsmessung	X
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	X
Bohrung	Bohrloch: Akustische Eigenschaften	X
Bohrung	Bohrloch: Akustisches Bohrlochfernsehen	X
Bohrung	Bohrloch: Dichte	X
Bohrung	Bohrloch: Dipmeter	X
Bohrung	Bohrloch: Gammastrahlung	X
Bohrung	Bohrloch: Radar (EMR, GPR)	X
Bohrung	Tracerversuche	X
Bohrung	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, XRF)	X
Bohrung	Auflicht- und Durchlicht-Mikroskopie	X
Bohrung	(Litho-)Faziesanalyse	X
Bohrung	Porositäts- und Dichtebestimmung (Heliumpyknometer)	X
Bohrung	Uniaxiale Festigkeitsversuche	X
Bohrung	Zugversuche	X
Bohrung	Röntgenbeugungsanalyse (RDA / XRD)	X

Quellen: Weart (1983); Powers et al. (1978a, 1978b). Erkundungsschritte: X) keine zeitliche Unterteilung. Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben. * Erkundungsmethoden wurden z. T. sinngemäß übersetzt bzw. interpretiert.

- Anhang 1 -

Tab. 6: Übertägige Erkundung von Salzformationen (generisch) und übertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben (Steinsalz in steiler Lagerung).

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Oberfläche	Geoelektrik	1
Oberfläche	Gravimetrie	1
Oberfläche	Magnetik	1
Oberfläche	Reflexionsseismik	1
Oberfläche	Durchfluss- und Abflussbestimmung in Fließgewässern	2
Oberfläche	Grundwasserneubildung	2
Bohrung	Bohrloch: Akustische Eigenschaften	2
Bohrung	Bohrloch: Bohrlochgeometrie	2
Bohrung	Bohrloch: Dichte	2
Bohrung	Bohrloch: Gammastrahlung	2
Bohrung	Bohrloch: Geochemische Charakterisierung	2
Bohrung	Bohrloch: Neutronenporosität	2
Bohrung	Bohrloch: Optisches Bohrlochfernsehen	2
Bohrung	Bohrloch: Radar (EMR, GPR)	2
Bohrung	Bohrloch: Seismik	2
Bohrung	Bohrloch: Spez. elektr. Widerstand	2
Bohrung	Bohrloch: Temperatur	2
Bohrung	Elektrisches Eigenpotential	2
Bohrung	Grundwasserstandsmessung	2
Bohrung	Pumpversuche	2
Bohrung	Slug- und Bail-Versuche	2
Oberfläche	Bodenkartierung	3
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	3
Bohrung	(Litho-)Faziesanalyse	3
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie	4
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Kohlenstoff-14	4
Bohrung	Auflicht- und Durchlicht-Mikroskopie	4
Bohrung	Chemische Parameter von Wässern	4
Bohrung	Computertomographie (CT)	4
Bohrung	Dilatanztests	4
Bohrung	Elektronenstrahlmikrosonde	4
Bohrung	Ionen-Chromatographie (IC)	4
Bohrung	Massenspektrometrie: Stabile Isotope	4
Bohrung	Optische Emissionspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)	4
Bohrung	Permeabilitäts-Versuche im Labor	4
Bohrung	pH-Meter (Potentiometer)	4
Bohrung	Porositäts- und Dichtebestimmung (Heliumpyknometer)	4
Bohrung	Rasterelektronen-Mikroskopie	4
Bohrung	Redoxpotential von Wässern	4
Bohrung	Röntgenbeugungsanalyse (RDA / XRD)	4

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Bohrung	Sorptions- und Diffusionsuntersuchungen am Bohrkernmaterial	4
Bohrung	Thermische Eigenschaften (Labor)	4
Bohrung	Triaxiale Festigkeitsversuche	4
Bohrung	Ultraschall (Labor)	4
Bohrung	Uniaxiale Festigkeitsversuche	4

Quelle: Hammer & Sönke (2009) und darin enthaltene Referenzen. Erkundungsschritte: 1) Geophysik (Oberfläche), 2) Bohrloch, 3) Bohrkern, 4) Labor. Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben. * Erkundungsmethoden wurden z. T. sinngemäß übersetzt bzw. interpretiert.

Tab. 7: Frankreich, Tongestein, *Preliminary surveys and preliminary borehole drilling phase (1994 – 1996)*.

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Oberfläche	Seismologie: historische Seismologie	0
Oberfläche	Geologische Kartierung	1
Bohrung	Chemische Parameter von Wässern	2
Oberfläche	Grundwasserstandsmessung	2
Bohrung	Packertests	2
Oberfläche	Pumpversuche	2
Oberfläche	Reflexionsseismik	0; 3
Bohrung	Bohrloch: Akustische Eigenschaften	4
Bohrung	Bohrloch: Dichte	4
Bohrung	Bohrloch: Gammastrahlung	4
Bohrung	Bohrloch: Neutronenporosität	4
Bohrung	Bohrloch: Seismik	4
Bohrung	Bohrloch: Spez. elektr. Widerstand	4
Bohrung	Bohrloch: Spülungseigenschaften	4
Bohrung	Chemische Parameter von Wässern	4
Bohrung	Gebirgs-Porendruckmessung	4
Bohrung	Grundwasserstandsmessung	4
Bohrung	Packertests	4
Bohrung	Pumpversuche	4
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	5
Bohrung	Computertomographie (CT)	5
Bohrung	Dilatanztests	5
Bohrung	E-Modul-Tests	5
Bohrung	Permeabilitäts-Versuche im Labor	5
Bohrung	Porositäts- und Dichtebestimmung (Heliumpyknometer)	5
Bohrung	Rasterelektronen-Mikroskopie	5
Bohrung	Röntgenbeugungsanalyse (RDA / XRD)	5
Bohrung	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, XRF)	5
Bohrung	Thermische Eigenschaften (Labor)	5
Bohrung	Triaxiale Festigkeitsversuche	5

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungsschritte
Bohrung	Triaxiale Kriechversuche	5
Bohrung	Uniaxiale Festigkeitsversuche	5
Bohrung	Uniaxiale Kriechversuche	5
Bohrung	XRF-Kernscanner (XRF-CS)	5
Bohrung	Zugversuche	5

Quellen: Andra (2019). Erkundungsschritte: 0) Auswertung existierender Daten, 1) Geologie, 2) Hydrologie/Hydrogeologie (Brunnen & existierende Bohrungen), 3) Geophysik, 4) Bohrloch, 5) Bohrkern. Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben. * Erkundungsmethoden wurden z. T. sinngemäß übersetzt bzw. interpretiert.

Tab. 8: Schweiz, Tongestein, *Preliminary surveying phase* (1988 – 2004 und 2011 – 2018).

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungszeiträume
Oberfläche	Reflexionsseismik	1
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie	1
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Tritium bzw. mit Tritium-Helium	1
Bohrung	Auflicht- und Durchlicht-Mikroskopie	1
Bohrung	Aufnahme von Bruchstrukturen	1
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	1
Bohrung	Bohrloch: Akustische Eigenschaften	1
Bohrung	Bohrloch: Akustisches Bohrlochfernsehen	1
Bohrung	Bohrloch: Bohrlochgeometrie	1
Bohrung	Bohrloch: Dichte	1
Bohrung	Bohrloch: elektrisches Bohrlochfernsehen (FMI, FMS, EMI)	1
Bohrung	Bohrloch: Gammastrahlung	1
Bohrung	Bohrloch: Geochemische Charakterisierung	1
Bohrung	Bohrloch: Neutronenporosität	1
Bohrung	Bohrloch: Nuklearmagnetische Resonanz	1
Bohrung	Bohrloch: Optisches Bohrlochfernsehen	1
Bohrung	Bohrloch: Seismik	1
Bohrung	Bohrloch: Spez. elektr. Widerstand	1
Bohrung	Bohrloch: Spülungseigenschaften	1
Bohrung	Bohrloch: Temperatur	1
Bohrung	Chemische Parameter von Wässern	1
Bohrung	Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser	1
Bohrung	Elektrisches Eigenpotential	1
Bohrung	Elementaranalyse von Kohlenstoff	1
Bohrung	Elementaranalyse von Schwefel	1
Bohrung	Fluid-Einschluss-Untersuchungen	1
Bohrung	Gas-Chromatographie (GC)	1
Bohrung	Gas-Tracertests	1

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungszeiträume
Bohrung	Grundwasserstandsmessung	1
Bohrung	Hydrofrac-Methode	1
Bohrung	Ionen-Chromatographie (IC)	1
Bohrung	Kationen-Austauschkapazität, austauschbare Kationen	1
Bohrung	Massenspektrometrie: Quantifizierung von Spurenelementen	1
Bohrung	Massenspektrometrie: Radiometrische Datierung	1
Bohrung	Massenspektrometrie: Stabile Isotope	1
Bohrung	Multisensor-Corelogger (MSCL)	1
Bohrung	Optische Emissionspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)	1
Bohrung	Packertests	1
Bohrung	pH-Meter (Potentiometer)	1
Bohrung	Physikalische Parameter von Wässern	1
Bohrung	Porositäts- und Dichtebestimmung (Heliumpyknometer)	1
Bohrung	Quellversuch	1
Bohrung	Redoxpotential von Wässern	1
Bohrung	Röntgenbeugungsanalyse (RDA / XRD)	1
Bohrung	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, XRF)	1
Bohrung	Therm. Dilatometer (Labor)	1
Bohrung	Thermische Eigenschaften (Labor)	1
Bohrung	Triaxiale Festigkeitsversuche	1
Bohrung	Triaxiale Kriechversuche	1
Bohrung	Überwachung Bohrvorgang	1
Bohrung	Ultraschall (Labor)	1
Bohrung	Uniaxiale Festigkeitsversuche	1
Bohrung	Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen-Analysen an Grundwasser	1
Bohrung	Zugversuche	1
Oberfläche	Reflexionsseismik	2
Oberfläche	Geologische Kartierung	2
Luft	Light Detection and Ranging (LiDAR, ALS)	3
Luft	Photogrammetrie	3
Oberfläche	Aufnahme von Bruchstrukturen	3
Oberfläche	Geologische Kartierung	3
Oberfläche	GPS / GNSS	3
Oberfläche	Gravimetrie	3
Oberfläche	Nivellement-Messungen über Tage	3
Oberfläche	Reflexionsseismik	3
Oberfläche	Seismologie: Herdflächenlösungen	3
Oberfläche	Seismologie: Paläoseismologie	3
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie	3
Bohrung	Bohrkernaufnahme / -ansprache	3

- Anhang 1 -

Erkundungsskala	Erkundungsmethode*	Erkundungszeiträume
Bohrung	Bohrloch: Akustisches Bohrlochfernsehen	3
Bohrung	Bohrloch: Bohrlochgeometrie	3
Bohrung	Bohrloch: Temperatur	3
Bohrung	Ionen-Chromatographie (IC)	3
Bohrung	Kationen-Austauschkapazität, austauschbare Kationen	3
Bohrung	Massenspektrometrie: Stabile Isotope	3
Bohrung	Porositäts- und Dichtebestimmung (Heliumpyknometer)	3
Bohrung	Sorptions- und Diffusionsuntersuchungen am Bohrkernmaterial	3
Bohrung	Überwachung Bohrvorgang	3

Quellen: NAGRA (2000, 2002, 2010). Erkundungszeiträume: 1) regionales Erkundungsprogramm (1988 – 2004), 2) Etappe 1 (2008 – 2011), 2) Etappe 2 (2011 – 2018). Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben. * Erkundungsmethoden wurden z. T. sinngemäß übersetzt bzw. interpretiert.

Anhang 2:

Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter, Identifizierung typischer Erkundungsziele und mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für Kristallingestein

Anhang 2.1: Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter für die initialen Erkundungsphasen von Kristallingestein

Tab. 9: Finnland, Kristallingestein, *Preliminary site investigation* (1987 – 1992).

Kat.	Erkundete Ziele und Parameter	Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG		
		AK	MA	geoWK
a	Räumliche Verbreitung und Begrenzung des homogenen Wirtsgesteins	2	2; 4	2; 3
b	Permeable Störungen/ Klüfte und Strukturen	2	1	1; 3; 6
c	Grundwasserverhältnisse und -fluss / hydrologisches Transportpotenzial / Advektiver Stofftransport	-	-	1; 10

Quelle: McEwen & Äikäs (2000).

Tab. 10: Frankreich, Sediment-überdecktes Kristallin, *Preliminary survey* (1994 – 1996).

Kat.	Erkundete Ziele und Parameter	Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG		
		AK	MA	geoWK
a	Räumliche Verbreitung und Tiefe des Wirtsgesteins	-	2; 3; 4	2; 3
b	Permeable Störungen, Klüfte und Strukturen	2	1	3; 6
c	Grundwasserbewegung	-	1	1; 11
d	Grundwassercharakterisierung	6	-	10

Quelle: Virlogeux (1998).

Tab. 11: Schweden, Kristallingestein, *Initial site investigation* (2002 – 2006).

Kat.	Erkundete Ziele und Parameter	Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG		
		AK	MA	geoWK
a	Räumliche Verbreitung des Wirtsgesteins	-	2; 4	2; 3
b	Permeable Störungen, Klüfte und Strukturen	2	1	3; 6
c	Grundwassercharakterisierung und -transport	-	-	1; 10

Quellen: SKB (2000a, 2000b).

- Anhang 2 -

Tab. 12: Schweiz, Sediment-überdecktes Kristallingestein, *Regionales Erkundungsprogramm* in der nördlichen Schweiz und vorgeschlagene standortspezifische Erkundung Kristallin Nordschweiz (1981 – 1996).

Kat.	Erkundete Ziele und Parameter	Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG		
		AK	MA	geoWK
a	Räumliche Abgrenzung gering-permeabler Kristallin-Blöcke	2	1; 2; 3; 4	2; 3
b	Permeable Störungszonen und Klüfte (Durchlässigkeit / advektiver Stofftransport)	2	1	1; 3; 6
c	Hydraulisches Potenzial und Hydrochemie des Grundwassers	-	-	10; 11

Quelle: Thury et al. (1994).

Anhang 2.2: Identifizierung typischer Erkundungsziele für die initialen Erkundungsphasen von Kristallingestein

Tab. 13: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Kristallingestein (ohne Überdeckung) für die Kategorie (a) „*Räumliche Abgrenzung homogener, (gering-permeabler) Blöcke*“ (siehe Tab. 9 – Tab. 12).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
AK-2	9	Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung einer Störung/Störungszone
MA-2	28	Vertikale Ausdehnung des betreffenden Gebirgsbereichs
MA-3	32	Räumliche Lage der Basisfläche des betreffenden Gesteinskörpers
MA-4	34	Flächenhafte Verbreitung des Einlagerungsbereichs
geoWK-2	56	Räumliche Abgrenzung des Barrieregesteins
geoWK-2	57	Räumliche Lage und Ausdehnung der barrierewirksamen Gesteine bzw. Gesteinsformationen
geoWK-3	70	Quantitative und qualitative Mineralzusammensetzung des Gesteinstyps im Hinblick auf die Gesteinsfazies
geoWK-3	66	Datengrundlage für die Bewertung der Variationsbreite von Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich
geoWK-3	74	Tektonische Überprägung/Schieferung im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)

Tab. 14: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Kristallingestein (ohne Überdeckung) für die Kategorie (b) „*Permeable Störungszonen, Klüfte und Strukturen hinsichtlich Gebirgsdurchlässigkeit und advektivem Stofftransport*“ (siehe Tab. 9 – Tab. 12).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
AK-2	9	Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung einer Störung/Störungszone
MA-1	23	Gebirgsdurchlässigkeit im ewG
MA-1	25	Trennflächenpermeabilitäten
MA-1	26	Verteilung von Trennflächen

- Anhang 2 -

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
MA-1	182	Räumliche Lage von Trennflächen

Tab. 15: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Kristallingestein (ohne Überdeckung) für die Kategorie (c) „Grundwasserbewegung, Hydrochemie und hydraulisches Potential“ (siehe Tab. 9 – Tab. 12).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
geoWK-1	42	Hydraulischer Gradient im ewG
geoWK-10	-	Siehe Tab. 16

Tab. 16: Identifizierung typischer Erkundungsziele für *geoWK-10* in den Wirtsgesteinen Kristallin und Steinsalz (siehe Tab. 15, Tab. 21 und Tab. 30).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
geoWK-10	144	Mineralogie/Geochemie der Mineralphasen des ewG („Gesteinszusammensetzungen“)
geoWK-10	145	Geochemische Zusammensetzung der im ewG enthaltenen Grundwässer
geoWK-10	146	pH-Wert der im ewG enthaltenen Grundwässer
geoWK-10	147	Redoxpotential (Eh-Wert) der im ewG enthaltenen Grundwässer
geoWK-10	149	Art und Gehalt an Komplexbildnern der im ewG enthaltenen Grundwässer
geoWK-10	152	elektrische Leitfähigkeit der im ewG enthaltenen Grundwässer
geoWK-10	155	Temperatur der im ewG enthaltenen Grundwässer
geoWK-10	156	Dichte der im ewG enthaltenen Grundwässer

- Anhang 2 -

Anhang 2.3: Mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für eine initiale Erkundungsphase von Kristallingestein

Tab. 17: Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele im Kristallingestein (ohne Überdeckung) (Tab. 13 – Tab. 15). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.

Erkundungsskala	Erkundungsmethode
Luft	Hyperspektrale Verfahren (Fernbereich)
Luft	Aerogravimetrie
Luft	Multispektrale Verfahren
Luft	Aeromagnetik
Luft	Aeroradiometrie
Oberfläche	Geologische Kartierung
Oberfläche	Reflexionsseismik
Oberfläche	Gravimetrie
Oberfläche	(Litho-)Faziesanalyse
Bohrung	Bohrkernaufnahme/-ansprache
Bohrung	Auflicht- und Durchlichtmikroskopie
Bohrung	Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser
Bohrung	Gebirgs-Porendruckmessung
Bohrung	Packertests
Bohrung	Pumpversuche
Bohrung	Grundwasserstandsmessung

Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben.

Tab. 18: Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele in geoWK-10 (Tab. 16). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.

Erkundungsskala	Erkundungsmethode
Bohrung	Optische Emissionspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)
Bohrung	Bohrloch: Temperatur (TEMP)
Bohrung	Dichtemessung an Wässern
Bohrung	pH-Meter (Potentiometer)
Bohrung	Physikalische Parameter von Wässern (elektr. LF, Temperatur)
Bohrung	Redoxpotential von Wässern

Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben.

Anhang 3:

Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter, Identifizierung typischer Erkundungsziele und mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für Steinsalz in stratiformer Lagerung

Anhang 3.1: Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter für die initiale Erkundungsphase von Steinsalz in stratiformer Lagerung

Tab. 19: USA (WIPP), Steinsalz (stratiforme Lagerung), *Preliminary site selection*.

Kat.	Erkundete Ziele und Parameter	Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG		
		AK	MA	geoWK
a	Lösungserscheinungen und Hohlräume in den Barrieregesteinen und im Deckgebirge	(1)	5	3; 11
b	Grundwasserstand, -fluss und -transport	-	(1)	11
c	Grundwassercharakteristiken, -herkunft und -verweilzeit	(6)	-	10
d	Räumliche Verbreitung, Variation und Tiefe und Lagerungsverhältnisse des Wirtsgesteins	(1)	2; 3; 4	2; 3
e	Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar	-	-	6; 7; 8

Bemerkung: Kriterien in Klammerausdrücken: Zuordnung des Kriteriums bzw. der Anforderung trifft bedingt zu; Quellen: Weart (1983, 1996); Powers et al. (1978a).

Anhang 3.2: Identifizierung typischer Erkundungsziele für die initiale Erkundungsphase von Steinsalz in stratiformer Lagerung

Tab. 20: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (a) „Lösungserscheinungen und Hohlräume in den Barrieregesteinen und im Deckgebirge“ (siehe Tab. 19).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
(AK-1)	175	Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung von atektonischen bzw. aseismischen Strukturen
MA-5	40	Subrosionsrate
geoWK-3	72	Alteration im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
geoWK-4	76	Änderung der flächenhaften bzw. räumlichen Ausdehnung des ewG in den letzten 10 Millionen Jahren
geoWK-4	77	Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit in den letzten 10 Millionen Jahren
geoWK-4	75	Änderung der Mächtigkeit des ewG in den letzten 10 Millionen Jahren
geoWK-11	163	Chemische Widerstandsfähigkeit (Löslichkeit)
geoWK-11	166	Vorkommen wasserlöslicher Gesteinstypen
geoWK-11	167	Tiefenlage des rezenten Salzspiegels (für Steinsalz)
geoWK-11	170	Subrosion am Salzspiegel: Rezente Subrosionsrate (für Steinsalz)

Bemerkung: Kriterien in Klammer: Zuordnung des Kriteriums oder Erkundungsziels trifft bedingt zu.

- Anhang 3 -

Tab. 21: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (b) „Grundwasserstand, -fluss, -bewegung und -charakteristik“ (siehe Tab. 19).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
geoWK-1	42	Hydraulischer Gradient im ewG
geoWK-10	-	Siehe Tab. 16
geoWK-11	165	Hydraulische Wirksamkeit von Karststrukturen sowie glazialen Rinnen
geoWK-11	184	Hydraulische Wirksamkeit von Störungen und Scheitelgräben
geoWK-11	169	Durchlässigkeit des Hutgesteins (für Steinsalz)

Tab. 22: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (c) „Grundwasserherkunft und -verweilzeit“ (siehe Tab. 19).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
(AK-6)	21	Altersbestimmung des Grundwassers im ewG bzw. Einlagerungsbereich
(AK-6)	22	Altersbestimmung des Grundwassers im Gesamtsystem aus Barrieregestein, Deckgebirge und Nebengestein

Bemerkung: Kriterien in Klammer: Zuordnung des Kriteriums oder Erkundungsziels trifft bedingt zu.

Tab. 23: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (d) „Räumliche Verbreitung, Variation und Tiefe und Lagerungsverhältnisse / Deformation des Wirtsgesteins“ (siehe Tab. 19).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
MA-2	27	Vertikale Ausdehnung des ewG
MA-3	30	Räumliche Lage der Schichtgrenzen zwischen Barrieregestein und über- und unterlagerndem Gestein
MA-4	33	Flächenhafte Verbreitung des ewG
geoWK-2	55	Mächtigkeit des Barrieregesteins
geoWK-2	56	Räumliche Abgrenzung des Barrieregesteins
geoWK-2	62	Bestimmung von den ewG einschließenden Schichtgrenzen
geoWK-3	69	Lagerungsverhältnisse der Gesteinseinheiten

Tab. 24: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (stratiforme Lagerung) für die Kategorie (e) „Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar“ (siehe Tab. 19).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
geoWK-6	94	Vorkommen von fossilen Fluideinschlüssen
geoWK-6	95	Ausweisung von Kohlenwasserstoffvorkommen im Liegenden des ewG
geoWK-7	113	Gehalt an freiem Wasser im ewG
geoWK-8	135	Vorkommen und Verteilung von Fluiden und Kohlenwasserstoffen

- Anhang 3 -

Anhang 3.3: Mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für eine initiale Erkundungsphase von Steinsalz in stratiformer Lagerung

Tab. 25: Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele im Steinsalz in stratiformer Lagerung (Tab. 20 – Tab. 24). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.

Erkundungsskala	Erkundungsmethode
Luft	Hyperspektrale Verfahren (Fernbereich)
Luft	Multispektrale Verfahren
Luft	Photogrammetrie
Luft	Synthetic Aperture Radar (SAR)
Luft	Aerogravimetrie
Luft	Aeromagnetik
Luft	Aeroelektromagnetik
Oberfläche	(Litho-)Faziesanalyse
Oberfläche	Reflexionsseismik
Oberfläche	Magnetotellurik (MT, AMT)
Oberfläche	Großskalige Elektromagnetik mit aktiver Anregung (CSEM, CSAMT)
Oberfläche	Elektrisches Eigenpotential (SP)
Oberfläche	Geologische Kartierung
Oberfläche	Gravimetrie
Oberfläche	Transientenelektromagnetik (TEM, TDEM)
Oberfläche	Nuklearmagnetische Resonanz von der Oberfläche
Bohrung	Bohrloch: Neutronenporosität (NN, INN)
Bohrung	Bohrkernaufnahme/-ansprache
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie (Cl-36, SO4- (S-34, O18))
Bohrung	Auflicht- und Durchlichtmikroskopie
Bohrung	Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser
Bohrung	Bohrloch: Dichte (GG, LDT)
Bohrung	Pumpversuche
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Kohlenstoff-14
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Tritium bzw. mit Tritium-Helium
Bohrung	Bohrloch: Radar (EMR, GPR)
Bohrung	Fluid-Einschluss-Untersuchungen
Bohrung	Karl-Fischer Titration (Quantifizierung des Wassergehaltes)
Bohrung	Grundwasserstandsmessung
Bohrung	Gebirgs-Porendruckmessung

Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben.

Anhang 4:

Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter, Identifizierung typischer Erkundungsziele und mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für Steinsalz in steiler Lagerung

Anhang 4.1: Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter für die initiale Erkundungsphase von Steinsalz in steiler Lagerung

Tab. 26: Übertägige Erkundung von Salzformationen (generisch) und Übertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben.

Kat.	Erkundete Ziele und Parameter	Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG		
		AK	MA	geoWK
a	Strukturgeol. Bau, Abgrenzung der Salzstruktur, Internbau, Lagerungsverhältnisse und tektonische Entwicklung (Salzaufstieg) der Salzstruktur	-	2; 3; 4; 5	2; 3; 6; (11)
b	Subrosion, Lösungserscheinungen, Umbildungen (Alteration/Rekristallisation), langfristige Stabilität	-	5	1; 4; 11
c	Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar	-	-	6; 7; (8)
d	Grundwasserstand, -fluss, -bewegung und -charakteristik	(6)	1	1; 10; 11

Bemerkung: Kriterien in Klammer: Zuordnung des Kriteriums trifft bedingt zu; Quellen: Hammer & Sönnke (2009) und darin enthaltene Literatur.

Anhang 4.2: Identifizierung typischer Erkundungsziele für die initiale Erkundungsphase von Steinsalz in steiler Lagerung

Tab. 27: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (steile Lagerung) für den die Kategorie (a) „Strukturgeol. Bau, Abgrenzung der Salzstruktur, Internbau, Lagerungsverhältnisse und tektonische Entwicklung (Salzaufstieg) der Salzstruktur“ (siehe Tab. 26).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
MA-2	27	Vertikale Ausdehnung des ewG
MA-3	30	Räumliche Lage der Schichtgrenzen zwischen Barrieregestein und über- und unterlagerndem Gestein
MA-3	31	Für Steinsalz in steiler Lagerung: Räumliche Lage der Oberfläche des den ewG aufnehmenden Steinsalzes
MA-4	33	Flächenhafte Verbreitung des ewG
MA-5	39	Für Steinsalz in steiler Lagerung: Aktivität von Salzstrukturen
geoWK-2	55	Mächtigkeit des Barrieregesteins
geoWK-2	56	Räumliche Abgrenzung des Barrieregesteins
geoWK-2	62	Bestimmung von den ewG einschließenden Schichtgrenzen
geoWK-3	69	Lagerungsverhältnisse der Gesteinseinheiten
geoWK-3	74	Tektonische Überprägung / Schieferung im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)

- Anhang 4 -

Tab. 28: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (steile Lagerung) für die Kategorie (b) „*Subrosion, Lösungserscheinungen, Umbildungen (Alteration / Rekristallisation)*“ (siehe Tab. 26).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
MA-5	40	Subrosionsrate
geoWK-3	72	Alteration im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
geoWK-4	76	Änderung der flächenhaften bzw. räumlichen Ausdehnung des ewG in den letzten 10 Millionen Jahren
geoWK-11	163	Chemische Widerstandsfähigkeit (Löslichkeit)
geoWK-11	166	Vorkommen wasserlöslicher Gesteinstypen
geoWK-11	167	Tiefenlage des rezenten Salzspiegels (für Steinsalz)
geoWK-11	168	Räumliche Ausdehnung des Hutgesteins (für Steinsalz)
geoWK-11	170	Subrosion am Salzspiegel: Rezente Subrosionsrate (für Steinsalz)

Tab. 29: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (steile Lagerung) für die Kategorie (c) „*Vorkommen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen) im Salinar*“ (siehe Tab. 26).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
geoWK-6	94	Vorkommen von fossilen Fluideinschlüssen
geoWK-6	95	Ausweisung von Kohlenwasserstoffvorkommen im Liegenden des ewG
geoWK-7	113	Gehalt an freiem Wasser im ewG
geoWK-7	115	Gehalt an und Zusammensetzung von organischem Material
geoWK-8	135	Vorkommen und Verteilung von Fluiden und Kohlenwasserstoffen

Tab. 30: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Steinsalz (steile Lagerung) für die Kategorie (d) „*Grundwasserstand, -fluss, -bewegung und -charakteristik*“ (siehe Tab. 26).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
geoWK-1	42	Hydraulischer Gradient im ewG
geoWK-10	-	Siehe Tab. 16
geoWK-11	165	Hydraulische Wirksamkeit von Karststrukturen sowie glazialen Rinnen
geoWK-11	169	Durchlässigkeit des Hutgesteins (für Steinsalz)
geoWK-11	164	Räumliche Ausdehnung von Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen sowie glaziale Rinnen

- Anhang 4 -

Anhang 4.3: Mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für eine initiale Erkundungsphase von Steinsalz in steiler Lagerung

Tab. 31: Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele im Steinsalz in steiler Lagerung (Tab. 27 – Tab. 30). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.

Erkundungsskala	Erkundungsmethode
Luft	Hyperspektrale Verfahren (Fernbereich)
Luft	Aerogravimetrie
Luft	Synthetic Aperture Radar (SAR)
Luft	Aeromagnetik
Luft	Aeroelektromagnetik
Oberfläche	Reflexionsseismik
Oberfläche	(Litho-)Faziesanalyse
Oberfläche	Magnetotellurik (MT, AMT)
Oberfläche	Großskalige Elektromagnetik mit aktiver Anregung (CSEM, CSAMT)
Oberfläche	Gravimetrie
Oberfläche	Geologische Kartierung
Oberfläche	Elektrisches Eigenpotential (SP)
Oberfläche	Transientenelektromagnetik (TEM, TDEM)
Oberfläche	Nuklearmagnetische Resonanz von der Oberfläche
Bohrung	Bohrloch: Neutronenporosität (NN, INN)
Bohrung	Auflicht- und Durchlichtmikroskopie
Bohrung	Bohrkernaufnahme/-ansprache
Bohrung	Bohrloch: Dichte (GG, LDT)
Bohrung	Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser
Bohrung	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie (Cl-36, SO4- (S-34, O18))
Bohrung	Bohrloch: Radar (EMR, GPR)
Bohrung	Differenz-Thermoanalyse mit Massenspektrometer
Bohrung	Fluid-Einschluss-Untersuchungen
Bohrung	Karl-Fischer Titration (Quantifizierung des Wassergehaltes)
Bohrung	Hyperspektrale Verfahren (Nahbereich)
Bohrung	Pumpversuche
Bohrung	Grundwasserstandsmessung
Bohrung	Gebirgs-Porendruckmessung

Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben.

Anhang 5:

Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter, Identifizierung typischer Erkundungsziele und mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für Tongestein

Anhang 5.1: Recherche entscheidender erkundeter Ziele und Parameter für die initialen Erkundungsphasen von Tongestein

Tab. 32: Frankreich, Tongestein, *Preliminary survey and borehole drilling phase* (1994 – 1996).

Kat.	Erkundete Ziele und Parameter	Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG		
		AK	MA	geoWK
a	Räumliche Ausdehnung, Schichtung und Geometrie des Wirtsgesteins	-	2;3; (4)	2; 3
b	Advektiver und diffusiver Stofftransport: Durchlässigkeit, Kluftleitfähigkeit, Diageneseegrad, Porosität / Permeabilität und des Wirtsgesteins und Hydraulisches Potential des WG und der angrenzende Schichten	-	1	1; 2; 6
c	Homogenität bzw. Variabilität des Wirtsgesteins (Mikrostrukturell, mineralogisch, geochemisch und mechanisch)	-	-	3; (5)

Bemerkung: Kriterien in Klammer: Zuordnung des Kriteriums bzw. der Anforderung trifft bedingt zu; Quellen: Andra (2006, 2019).

Tab. 33: Schweiz, Tongestein, *Preliminary surveying phase* (Regionales Erkundungsprogramm Sedimente: 1988 – 2004 und Etappe 2: 2011 – 2018).

Kat.	Erkundete Ziele und Parameter	Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG		
		AK	MA	geoWK
a	Tiefenlage, Mächtigkeit, Schichtorientierung (Räumliche Ausdehnung, Begrenzung und Geometrie WG)	-	2; 3; 4	2; 3
b	Störungen, Klüfte und Strukturen (Rinnen)	2	1; 5	3; 6; 11
c	Variabilität der Lithofazies, Eigenschaften des WG	-	-	3
d	Gebirgsspannung	-	-	5
e	Gesteinspermeabilität und -durchlässigkeit, hydraulische Potentiale	-	1	1; 6; 11
f	Hydrochemie und Isotopenverhältnisse der Tiefengrundwässer	(6)	-	10

Bemerkung: Zuordnung des Kriteriums trifft bedingt zu; Quellen: NAGRA (2000, 2010).

- Anhang 5 -

Anhang 5.2: Identifizierung typischer Erkundungsziele für die initialen Erkundungsphasen von Tongestein

Tab. 34: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Tongestein für die Kategorie (a) „Mächtigkeit, Konfiguration, Teufe der Gesteinsschichten“ (siehe Tab. 32 – Tab. 33).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
MA-2	27	Vertikale Ausdehnung des ewG
MA-3	30	Räumliche Lage der Schichtgrenzen zwischen Barrieregestein und über- und unterlagerndem Gestein
MA-4	33	Flächenhafte Verbreitung des ewG
geoWK-2	62	Bestimmung von den ewG einschließenden Schichtgrenzen
geoWK-2	55	Mächtigkeit des Barrieregesteins
geoWK-2	56	Räumliche Abgrenzung des Barrieregesteins
geoWK-2	57	Räumliche Lage und Ausdehnung der barrierewirksamen Gesteine bzw. Gesteinsformationen
geoWK-3	69	Lagerungsverhältnisse der Gesteinseinheiten

Tab. 35: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Tongestein für die Kategorie (b) „Gebirgsdurchlässigkeit & Transport von Grundwasser“ (siehe Tab. 32 – Tab. 33).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
MA-1	24	Gesteinsdurchlässigkeiten
MA-1	23	Gebirgsdurchlässigkeit im ewG
geoWK-1	49	Absolute Porosität im ewG (für Tonstein)
geoWK-1	50	Effektive Porosität (für Tonstein)
geoWK-1	43	Durchflusswirksame Porosität im ewG
geoWK-1	41	Durchlässigkeitsbeiwert im ewG
geoWK-1	42	Hydraulischer Gradient im ewG
geoWK-1	51	Verfestigungsgrad im ewG
geoWK-1	47	Bestimmung des charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten des Gesteinstyps für tritiertes Wasser (HTO) bei 25°C
geoWK-1	48	Bestimmung des charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten aus alternativen Methoden
geoWK-1	44, 46	Isotopenbestimmung an den angetroffenen Grundwässern
geoWK-1	54	Diagenesegrad und -merkmale
geoWK-2	64	Für Tonstein: Durchlässigkeitsbeiwert der an das Barrieregestein angrenzenden Gesteinskörper oder -typen
geoWK-2	65	Für Tonstein: Hydraulischer Gradient in den Gesteinskörpern, die an Barrieregestein angrenzen

- Anhang 5 -

Tab. 36: Identifizierung typischer Erkundungsziele im Tongestein für die Kategorie (c) „Homogenität bzw. Variabilität des Wirtsgesteins (mikrostrukturell, mineralogisch, geochemisch und mechanisch)“ (siehe Tab. 32 – Tab. 33).

Kriterium	EZ-ID	Beschreibung
geoWK-3	73	Diagenesegrad und -merkmale im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
geoWK-3	70	Quantitative und qualitative Mineralzusammensetzung des Gesteinstyps im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
geoWK-3	71	Gefügemerkmale (Textur/Struktur) im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
geoWK-3	66	Datengrundlage für die Bewertung der Variationsbreite von Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich

Anhang 5.3: Mögliche Abfolge von Erkundungsmethoden für eine initiale Erkundungsphase von Tongestein

Tab. 37: Mögliche Abfolge von Methoden zur Erkundung der ausgewählten Erkundungsziele im Tongestein (Tab. 34 – Tab. 36). Liste der Erkundungsmethoden und deren Eingruppierung in eine Erkundungsskala.

Erkundungsskala	Erkundungsmethode
Oberfläche	Reflexionsseismik
Oberfläche	(Litho-)Faziesanalyse
Oberfläche	Magnetotellurik (MT, AMT)
Oberfläche	Geologische Kartierung
Oberfläche	Großskalige Elektromagnetik mit aktiver Anregung (CSEM, CSAMT)
Bohrung	Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser
Bohrung	Bohrloch: Dichte (GG, LDT)
Bohrung	Bohrloch: Neutronenporosität (NN, INN)
Bohrung	Gebirgs-Porendruckmessung
Bohrung	Packertests
Bohrung	Röntgenbeugungsanalyse (RDA / XRD)
Bohrung	Auflicht- und Durchlichtmikroskopie
Bohrung	Tracerversuche
Bohrung	Massenspektrometrie: Stabile Isotope
Bohrung	Grundwasserstandsmessung
Bohrung	Hyperspektrale Verfahren (Nahbereich)
Bohrung	Sorptions- und Diffusionsuntersuchungen am Bohrkernmaterial
Bohrung	Messung der Maceral-Reflexion (Vitrinit) am Auflichtmikroskop
Bohrung	Bohrloch: Spezifischer elektrischer Widerstand (EL, ML, FEL, DLL, MLL, IL)
Bohrung	Bohrloch: Akustische Eigenschaften (AL, Sonic)
Bohrung	Permeabilitätsversuche im Labor
Bohrung	Korngrößenanalysen

Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben.

Anhang 6:

Listen aller Erkundungsmethoden und Erkundungsziele in GeM-DB

Tab. 38: Liste aller Erkundungsmethoden in GeM-DB (Stand Dezember 2022) mit Methoden-ID (M-ID) und Erkundungsskala.

M-ID	Erkundungsmethode	Erkundungsskala
6	Bohrloch: Optisches Bohrlochfernsehen (OPT, OPTV, OBI)	Bohrung
16	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, XRF)	Bohrung
17	Kationenaustauschkapazität, austauschbare Kationen	Bohrung
18	Massenspektrometrie: Quantifizierung von Spurenelementen	Bohrung
19	Elementaranalyse von Kohlenstoff (organischer und karbonatischer Kohlenstoff)	Bohrung
20	Optische Emissionspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)	Bohrung
21	Elektronenstrahlmikrosonde	Bohrung
22	Auflicht- und Durchlichtmikroskopie	Bohrung
23	Rasterelektronenmikroskopie (REM, SEM)	Bohrung
24	Geologische Kartierung	Oberfläche
25	Bohrkernaufnahme/-ansprache	Bohrung
28	Packertests	Bohrung
29	Röntgenbeugungsanalyse (RDA / XRD)	Bohrung
30	Korngrößenanalysen	Bohrung
31	Computertomographie (CT)	Bohrung
40	Uniaxiale Kriechversuche	Bohrung
41	Triaxiale Kriechversuche	Bohrung
42	E-Modul-Tests	Bohrung
43	Dilatanztests	Bohrung
44	Druckdiffusions-Tests	Bohrung
45	Uniaxiale Festigkeitsversuche	Bohrung
46	Triaxiale Festigkeitsversuche	Bohrung
47	Permeabilitätsversuche im Labor	Bohrung
48	Zugversuche	Bohrung
51	Bohrloch: Temperatur (TEMP)	Bohrung
54	Bohrloch: Spezifischer elektrischer Widerstand (EL, ML, FEL, DLL, MLL, IL)	Bohrung
55	Bohrloch: Gammastrahlung (GR, GRS)	Bohrung
56	Bohrloch: Akustische Eigenschaften (AL, Sonic)	Bohrung
58	Bohrloch: Neutronenporosität (NN, INN)	Bohrung
59	Bohrloch: Nuklearmagnetische Resonanz (NMR)	Bohrung
60	Bohrloch: Dipmeter (DIP)	Bohrung
62	Reflexionsseismik	Oberfläche
63	Refraktionsseismik	Oberfläche
64	Aeroradiometrie	Luft
65	Aeromagnetik	Luft
66	Aeroelektromagnetik	Luft
68	Bohrloch: Seismik	Bohrung
70	Magnetik	Oberfläche
71	Gravimetrie	Oberfläche
72	Geoelektrik	Oberfläche

- Anhang 6 -

M-ID	Erkundungsmethode	Erkundungsskala
73	Georadar (EMR, GPR)	Oberfläche
76	Massenspektrometrie: Stabile Isotope	Bohrung
77	Elementaranalyse von Schwefel	Bohrung
78	Seismologie: Arrayseismologie	Oberfläche
80	Seismologie: Erdbebenmonitoring	Oberfläche
81	Seismologie: Gefährdungsberechnung	Oberfläche
82	Seismologie: Herdflächenlösungen	Oberfläche
83	Seismologie: historische Seismologie	Oberfläche
84	Seismologie: Interferometrie	Oberfläche
86	Seismologie: Relokalisierung	Oberfläche
87	Seismologie: Rotationsseismologie	Oberfläche
90	Seismologie: Standortcharakterisierung	Oberfläche
91	Seismologie: statistische Seismologie	Oberfläche
92	Seismologie: Tomographie	Oberfläche
95	Infrarotspektroskopie (IR)	Bohrung
96	Messung der Maceral-Reflexion (Vitrinit) am Aufrichtmikroskop	Bohrung
97	Pyrolytische Charakterisierung des organischen Materials (Rock-Eval)	Bohrung
98	Differenz-Thermoanalyse mit Massenspektrometer	Bohrung
99	Porositäts- und Dichtebestimmung (Heliumpyknometer)	Bohrung
100	Oberflächenanalyse mittels Gasadsorptionsgerät (BET)	Bohrung
101	Schwermineralanalyse (HMA)	Bohrung
102	Ionenchromatographie (IC)	Bohrung
103	Raman-Spektroskopie	Bohrung
104	Gaschromatographie (GC) zur Quantifizierung extrahierbarer Kohlenwasserstoffe (C10-C40)	Bohrung
105	Multisensor-Corelogger (MSCL)	Bohrung
106	XRF-Kernscanner (XRF-CS)	Bohrung
107	Biostratigraphische Ansprache (Makro- und Mikrofossilien)	Bohrung
108	Spülprobenanalyse	Bohrung
109	Kathodolumineszenz-Mikroskopie	Bohrung
111	Altersbestimmung von Grundwasser mit Tritium bzw. mit Tritium-Helium	Bohrung
112	Altersbestimmung von Grundwasser mit Kohlenstoff-14	Bohrung
113	Physikalische Parameter von Wässern (elektr. LF, Temperatur)	Bohrung
114	pH-Meter (Potentiometer)	Bohrung
115	Hydrofrac-Methode	Bohrung
116	Nivellement-Messungen über Tage	Oberfläche
117	Wasserstoff- und Sauerstoffisotopenanalysen an Grundwasser	Bohrung
118	Tracerversuche	Bohrung
119	Pumpversuche	Bohrung
120	Slug- und Bail-Versuche	Bohrung
121	Massenspektrometrie: Radiometrische Datierung	Bohrung
123	Photogrammetrie	Luft
132	(Litho-)Faziesanalyse	Oberfläche, Bohrung
164	Atomabsorptionsspektrometrie (AAS)	Bohrung
165	Carbonate clumped-isotope thermometer	Bohrung

- Anhang 6 -

M-ID	Erkundungsmethode	Erkundungsskala
167	Electron Backscatter Diffraction (EBSD)	Bohrung
168	Synchrotron- und Neutronendiffraktometrie	Bohrung
169	Röntgen-Strukturgoniometrie	Bohrung
171	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	Bohrung
173	Dilatometer (Bohrloch)	Bohrung
174	Überbohrmethode	Bohrung
176	Spannungsmonitoring	Bohrung
177	Aerogravimetrie	Luft
178	Aeroradar (EMR, GPR)	Luft
179	Magnetische Suszeptibilität (Labor)	Bohrung
180	Transientenelektromagnetik (TEM, TDEM)	Oberfläche
182	Bohrloch: Gravimetrie	Bohrung
183	Bohrloch: Radar (EMR, GPR)	Bohrung
184	Grundwasserstandsmessung	Bohrung
185	Einschwingversuche	Bohrung
186	Altersbestimmung von Grundwasser mit Chlor- und Sulfatisotopie (Cl-36, SO4- (S-34, O18))	Bohrung
187	Edelgasgehaltsbestimmung in Grund- und Porenwasser	Bohrung
188	Gebirgs-Porendruckmessung	Bohrung
189	Dichtemessung an Wässern	Bohrung
190	Redoxpotential von Wässern	Bohrung
192	Magnetotellurik (MT, AMT)	Oberfläche
193	Gas-Tracertests	Bohrung
195	Light Detection and Ranging (LiDAR, ALS)	Luft
196	Synthetic Aperture Radar (SAR)	Luft
197	Global Positioning System	Oberfläche
198	Multispektrale Verfahren	Luft
199	Hyperspektrale Verfahren (Fernbereich)	Luft
201	Elektronenspin-Resonanz-Datierung	Bohrung
202	Kosmogene Nuklid-Datierung	Bohrung
203	Lumineszenz-Datierung	Bohrung
205	U-Th/He Thermochronologie	Bohrung
206	K-Ar / Ar-Ar Thermochronologie	Bohrung
207	Spaltspurdatering (z. B. Zirkon, Apatit)	Bohrung
211	Bohrloch: Bohrlochgeometrie (BA, CAL, DEV)	Bohrung
215	Bohrloch: Spülungseigenschaften (MIL, SAL)	Bohrung
216	Bohrloch: Magnetische Suszeptibilität (SUSZ)	Bohrung
219	Bohrloch: Dichte (GG, LDT)	Bohrung
221	Bohrloch: Geochemische Charakterisierung (NG, EBS)	Bohrung
226	Bohrloch: Flussmessung (FLOW)	Bohrung
229	Nuklearmagnetische Resonanz von der Oberfläche	Oberfläche
230	Großskalige Elektromagnetik mit aktiver Anregung (CSEM, CSAMT)	Oberfläche
231	Atomemissionsspektrometrie (AES)	Bohrung
232	Fluid-Einschluss-Untersuchungen	Bohrung
233	Karl-Fischer Titration (Quantifizierung des Wassergehaltes)	Bohrung

- Anhang 6 -

M-ID	Erkundungsmethode	Erkundungsskala
236	Sorptions- und Diffusionsuntersuchungen am Bohrkernmaterial	Bohrung
244	Bohrloch: Akustisches Bohrlochfernsehen (ABF / ABI / BHTV / CIBL)	Bohrung
246	Graphitrohrfen-Atomabsorptionsspektrometrie (GF-AAS)	Bohrung
248	Thermische Eigenschaften (Labor)	Bohrung
249	Thermisches Dilatometer (Labor)	Bohrung
252	Seismologie: Paläoseismologie	Oberfläche
254	Sauerstoff- / Clark-Elektrode	Bohrung
255	Wasseraufnahmeversuch nach Enslin-Neff	Bohrung
256	Gas-Chromatographie (GC)	Bohrung
257	Bestimmung der Temperaturabhängigkeit des Porenfluiddrucks	Bohrung
258	Hyperspektrale Verfahren (Nahbereich)	Bohrung
261	Elektromagnetische Mehrspulenverfahren (Slingram, MAXMIN, FDEM)	Oberfläche
263	Elektrischer Widerstand (Labor)	Bohrung
265	Ultraschall (Labor)	Bohrung
272	Elektrisches Eigenpotential (SP)	Oberfläche, Bohrung
273	Quellversuch für Tonstein	Bohrung
274	Bohrloch: elektrisches Bohrlochfernsehen (FMI, FMS, EMI)	Bohrung

Bemerkung: Die Erkundungsskala Bohrung umfasst Messungen im Bohrloch sowie weiterführende Methoden an gewonnenen Proben.

Tab. 39: Liste aller Erkundungsziele in GeM-DB (Stand Dezember 2022) mit Erkundungsziele-ID (EZ-ID) und Zuordnung zu Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 – 24 StandAG.

EZ-ID	Kriterium	Erkundungsziel
2	AK-1	Beträge und Geschwindigkeiten vergangener Hebungen und Senkungen
3	AK-1	Differenzielle Hebung/Senkung
7	AK-1	Großräumige Datierung von tertiären und quartären Schichtaltern
176	AK-1	Paläoseismische Aktivität
8	AK-1	Quantitative Ermittlung der Denudation
1	AK-1	Rate der rezenten Hebung/Senkung an der Oberfläche
4	AK-1	Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung einer Störung/Störungszone
175	AK-1	Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung von atektonischen bzw. aseismischen Strukturen
6	AK-1	Rezente seismische Aktivität
5	AK-1	Versatz über die Zeit entlang von Störungen/Störungszonen
13	AK-2	Aktivität der Störung/Störungszone in der Vergangenheit (Ausmaß, Zeitraum, Häufigkeit)
11	AK-2	Alter der jüngsten Bewegungsphase einer Störungszone
9	AK-2	Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung einer Störung/Störungszone
12	AK-2	Rezentes, natürliches Spannungsfeld im Umfeld der Störung
10	AK-2	Versatz entlang einer Störung
16	AK-3	Bestimmung der Spannungsverhältnisse
15	AK-3	Gebirgsdurchlässigkeit
14	AK-3	Identifikation von Bereichen bergbaulicher Tätigkeit inklusive Altbohrungen
17	AK-4	Seismische Aktivität
177	AK-5	Alter der identifizierten, känozoischen magmatischen Bildungen

- Anhang 6 -

EZ-ID	Kriterium	Erkundungsziel
19	AK-5	Gefüge der identifizierten, känozoischen magmatischen Bildungen
18	AK-5	Räumliche Verbreitung von känozoischen Eruptionszentren, Vulkaniten, vulkanischen Ablagerungen und magmatischen Intrusionen, sowie von rezenten magmatischen Fluiden und deren Austrittsstellen
178	AK-5	Zusammensetzung der identifizierten, känozoischen magmatischen Bildungen
20	AK-5	Zusammensetzung von rezenten, magmatischen Fluiden
21	AK-6	Altersbestimmung des Grundwassers im ewG bzw. Einlagerungsbereich
22	AK-6	Altersbestimmung des Grundwassers im Gesamtsystem aus Barrieregestein, Deckgebirge und Nebengestein
23	MA-1	Gebirgsdurchlässigkeit im ewG
24	MA-1	Gesteinsdurchlässigkeiten
182	MA-1	Räumliche Lage von Trennflächen
25	MA-1	Trennflächenpermeabilitäten
26	MA-1	Verteilung von Trennflächen
29	MA-2	Gebirgsdurchlässigkeit (für Kristallingestein)
28	MA-2	Vertikale Ausdehnung des betreffenden Gebirgsbereichs (für Kristallingestein)
27	MA-2	Vertikale Ausdehnung des ewG
32	MA-3	Für Kristallin: Räumliche Lage der Basisfläche des betreffenden Gesteinkörpers
31	MA-3	Für Steinsalz in steiler Lagerung: Räumliche Lage der Oberfläche des den ewG aufnehmenden Steinsalzes
30	MA-3	Räumliche Lage der Schichtgrenzen zwischen Barrieregestein und über- und unterlagerndem Gestein
33	MA-4	Flächenhafte Verbreitung des ewG
34	MA-4	Für Kristallin: Flächenhafte Verbreitung des Einlagerungsbereichs
183	MA-5	Erosions- bzw. Sedimentationsraten (in der geologischen Vergangenheit)
39	MA-5	Für Steinsalz in steiler Lagerung: Aktivität von Salzstrukturen
36	MA-5	Maximale Tiefenwirkung von Erosionsprozessen in der jüngeren geologischen Vergangenheit (Känozoikum)
35	MA-5	Rezente Erosions- bzw. Sedimentationsraten
40	MA-5	Subsionsrate
43	geoWK-1	Durchflusswirksame Porosität im ewG
41	geoWK-1	Durchlässigkeitsbeiwert im ewG
42	geoWK-1	Hydraulischer Gradient im ewG
44	geoWK-1	Isotopenbestimmung an den angetroffenen Grundwässern
45	geoWK-1	Gebirgsdurchlässigkeit im ewG
46	geoWK-1	Isotopenbestimmung an den angetroffenen Grundwässern
48	geoWK-1	Bestimmung des charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten aus alternativen Methoden
47	geoWK-1	Bestimmung des charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten des Gesteinstyps für triertes Wasser (HTO) bei 25°C
49	geoWK-1	Absolute Porosität im ewG (für Tonstein)
50	geoWK-1	Effektive Porosität (für Tonstein)
54	geoWK-1	Diageneseegrad und -merkmale
52	geoWK-1	Gesteinsfestigkeit (Zugfestigkeit)
53	geoWK-1	Maximale Versenkungstiefe (für Tonstein)
51	geoWK-1	Verfestigungsgrad im ewG (für Tonstein)
55	geoWK-2	Mächtigkeit des Barrieregesteins
56	geoWK-2	Räumliche Abgrenzung des Barrieregesteins

- Anhang 6 -

EZ-ID	Kriterium	Erkundungsziel
57	geoWK-2	Räumliche Lage und Ausdehnung der barrierewirksamen Gesteine bzw. Gesteinsformationen
60	geoWK-2	Räumliche Variation der chemischen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen
59	geoWK-2	Räumliche Variation der gebirgsmechanischen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen
58	geoWK-2	Räumliche Variation der hydrogeologischen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen
61	geoWK-2	Räumliche Variation der petrologischen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen
62	geoWK-2	Bestimmung von den ewG einschließenden Schichtgrenzen
63	geoWK-2	Flächenhafte Verbreitung der Barrieregesteine bei einer durchgehenden Mächtigkeit von mindestens 100 m
64	geoWK-2	Für Tonstein: Durchlässigkeitsbeiwert der an das Barrieregestein angrenzenden Gesteinskörper oder -typen
65	geoWK-2	Für Tonstein: Hydraulischer Gradient in den Gesteinskörpern, die an Barrieregestein angrenzen
66	geoWK-3	Datengrundlage für die Bewertung der Variationsbreite von Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich
67	geoWK-3	Datengrundlage für die Bewertung der räumlichen Verteilung (Mächtigkeit, Teufe und Verbreitung) der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften
68	geoWK-3	Geometrie und Ausdehnung von Störungen/Störungszonen und ihrer räumlichen Lage
69	geoWK-3	Lagerungsverhältnisse der Gesteinseinheiten
72	geoWK-3	Alteration im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
73	geoWK-3	Diageneseegrad und -merkmale im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
71	geoWK-3	Gefügemerkmale (Textur/Struktur) im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
70	geoWK-3	Quantitative und qualitative Mineralzusammensetzung des Gesteinstyps im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
74	geoWK-3	Tektonische Überprägung/Schieferung im Hinblick auf die Gesteinsfazies (Gesteinsausbildung)
75	geoWK-4	Änderung der Mächtigkeit des ewG in den letzten 10 Millionen Jahren
76	geoWK-4	Änderung der flächenhaften bzw. räumlichen Ausdehnung des ewG in den letzten 10 Millionen Jahren
79	geoWK-4	Altersbestimmung des Grundwassers im ewG
77	geoWK-4	Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit in den letzten 10 Millionen Jahren
78	geoWK-4	In-situ Porendruck im Endlagerbereich
82	geoWK-5	Dilatanzgrenze
85	geoWK-5	Druckdiffusionskoeffizient
81	geoWK-5	E-Modul, Schermodul, Kompressionsmodul
89	geoWK-5	Gebirgstemperatur im ewG
80	geoWK-5	Gesteinsfestigkeit (Scher- und Zugfestigkeit)
87	geoWK-5	In-situ Spannungsregime
84	geoWK-5	Kriechverhalten
83	geoWK-5	Plastisches Verhalten des Gesteins
90	geoWK-5	Porenfluiddruck
179	geoWK-5	Riss-/Kluftart
88	geoWK-5	Riss-/Kluftdichte
86	geoWK-5	Wasseraufnahmekapazität (für Tonstein)
91	geoWK-6	Gebirgsdurchlässigkeit (Transmissivität)
92	geoWK-6	Gesteinsdurchlässigkeit (Durchlässigkeitsbeiwert)
95	geoWK-6	Ausweisung von Kohlenwasserstoffvorkommen im Liegenden des ewG
94	geoWK-6	Vorkommen von fossilen Fluideinschlüssen
93	geoWK-6	Vorkommen wasserlöslicher Gesteine in den Gebirgsformationen

- Anhang 6 -

EZ-ID	Kriterium	Erkundungsziel
174	geoWK-6	Bruchgrenze
96	geoWK-6	Duktilität und Sprödigkeit des Gesteins
97	geoWK-6	Kriechverhalten
101	geoWK-6	Art der Zementation (für Tonstein)
185	geoWK-6	Auffinden geschlossener Risse/Klüfte
102	geoWK-6	Auffinden offener Risse/Klüfte
110	geoWK-6	Auffinden verheiliter Risse/Klüfte
106	geoWK-6	Dichte der im ewG enthaltenen Grundwässer
98	geoWK-6	Dilatanzgrenze
105	geoWK-6	Gebirgstemperatur im ewG
103	geoWK-6	Geochemische Zusammensetzung des Porenfluids
104	geoWK-6	Mineralogie/Geochemie der Gesteine des ewG
107	geoWK-6	ph-Wert der im ewG enthaltenen Grundwässer
100	geoWK-6	Quellfähigkeit (für Tonstein)
108	geoWK-6	Redoxpotential (Eh-Wert) der im ewG enthaltenen Grundwässer
111	geoWK-6	Stoffliche Charakterisierung möglicher Kluffbeläge
180	geoWK-6	Stoffliche Charakterisierung von Lösungen oder Gasen
99	geoWK-6	Verfestigungsgrad im ewG (für Tonstein)
112	geoWK-7	Gebirgsdurchlässigkeit im ewG
113	geoWK-7	Gehalt an freiem Wasser im ewG
115	geoWK-7	Gehalt an und Zusammensetzung von organischem Material
114	geoWK-7	Identifikation von Mikroorganismen und Bestimmung ihrer mikrobiellen Aktivität
124	geoWK-8	Dilatanzgrenze
127	geoWK-8	Duktilität und Sprödigkeit des Gesteins
126	geoWK-8	E-Modul, Schermodul, Kompressionsmodul
119	geoWK-8	Gehalt von temperaturkritischen Mineralen im Gestein und ggf. in Kluffmineralisationen
121	geoWK-8	Gesteinsdichte
125	geoWK-8	Gesteinsfestigkeit (Scher- und Zugfestigkeit)
134	geoWK-8	Identifikation von Mikroorganismen und Bestimmung ihrer Aktivität unter Temperatureinfluss
120	geoWK-8	Maximale Temperatur, die das Gestein seit seiner Entstehung erfahren hat (für Tonstein)
123	geoWK-8	Rezentes, natürliches Spannungsfeld
122	geoWK-8	Rezentes, natürliches Temperaturfeld
117	geoWK-8	Spezifische Wärmekapazität
118	geoWK-8	Spezifische Wärmeleitfähigkeit
129	geoWK-8	Temperaturabhängigkeit des Druckdiffusionskoeffizienten
128	geoWK-8	Temperaturabhängigkeit des Kriechverhaltens
130	geoWK-8	Temperaturabhängigkeit des Lösungsgleichgewichts
133	geoWK-8	Temperaturabhängigkeit des Porenfluiddrucks
131	geoWK-8	Temperaturabhängigkeit des Quellverhaltens von Tongesteinen
132	geoWK-8	Temperaturabhängigkeit des Sorptionskoeffizienten
116	geoWK-8	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
181	geoWK-8	Verteilung von temperaturkritischen Mineralen im Gestein und ggf. in Kluffmineralisationen
135	geoWK-8	Vorkommen und Verteilung von Fluiden und Kohlenwasserstoffen
142	geoWK-9	Gebirgstemperatur im ewG
137	geoWK-9	Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche
138	geoWK-9	Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere

- Anhang 6 -

EZ-ID	Kriterium	Erkundungsziel
139	geoWK-9	Öffnungsweiten der Gesteinsporen
140	geoWK-9	pH-Wert des im ewG enthaltenen Grundwassers
141	geoWK-9	Redoxpotential des im ewG enthaltenen Grundwassers
143	geoWK-9	Sorptionskoeffizienten (Kd-Wert) der Gesteine des ewG
136	geoWK-9	Sorptionskoeffizienten (Kd-Wert) der Gesteine des ewG
153	geoWK-10	Alkalinität der im ewG enthaltenen Grundwässer
148	geoWK-10	Art und Gehalt an Kolloiden der im ewG enthaltenen Grundwässer
149	geoWK-10	Art und Gehalt an Komplexbildnern der im ewG enthaltenen Grundwässer
156	geoWK-10	Dichte der im ewG enthaltenen Grundwässer
152	geoWK-10	elektrische Leitfähigkeit der im ewG enthaltenen Grundwässer
145	geoWK-10	Geochemische Zusammensetzung der im ewG enthaltenen Grundwässer
150	geoWK-10	Karbonatgehalt der im ewG enthaltenen Grundwässer
144	geoWK-10	Mineralogie/Geochemie der Mineralphasen des ewG („Gesteinszusammensetzungen“)
146	geoWK-10	pH-Wert der im ewG enthaltenen Grundwässer
154	geoWK-10	Porenfluiddruck
147	geoWK-10	Redoxpotential (Eh-Wert) der im ewG enthaltenen Grundwässer
151	geoWK-10	Sauerstoffsättigung der im ewG enthaltenen Grundwässer
155	geoWK-10	Temperatur der im ewG enthaltenen Grundwässer
157	geoWK-11	Gebirgsdurchlässigkeiten der Deckgebirgsschichten und ihre räumliche Variabilität
158	geoWK-11	Räumliche Ausdehnung von grundwasserhemmenden Gesteinen im Deckgebirge
163	geoWK-11	Chemische Widerstandsfähigkeit (Löslichkeit)
160	geoWK-11	Gesteinsfestigkeit (Scher- und Zugfestigkeit)
162	geoWK-11	Homogenität des Gesteins
159	geoWK-11	Räumliche Ausdehnung von erosionshemmenden Gesteinen im Deckgebirge
161	geoWK-11	Trennflächengefüge (Ausprägung, Trennflächendichte, Orientierung)
169	geoWK-11	Durchlässigkeit des Hutgesteins (für Steinsalz)
165	geoWK-11	Hydraulische Wirksamkeit von Karststrukturen sowie glazialen Rinnen
184	geoWK-11	Hydraulische Wirksamkeit von Störungen und Scheitelgräben
168	geoWK-11	Räumliche Ausdehnung des Hutgesteins (für Steinsalz)
164	geoWK-11	Räumliche Ausdehnung von Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen sowie glaziale Rinnen
170	geoWK-11	Subrosion am Salzspiegel: Rezente Subrosionsrate (für Steinsalz)
167	geoWK-11	Tiefenlage des rezenten Salzspiegels (für Steinsalz)
166	geoWK-11	Vorkommen wasserlöslicher Gesteinstypen