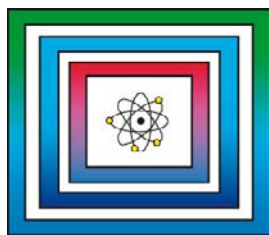


Standortauswahl

9S2019090000; 9S2019100000

Datenbankbasierte
Zusammenstellung
geowissenschaftlicher
Erkundungsmethoden für die
übertägige Standorterkundung
gemäß §16 StandAG



Zwischenbericht

Hannover, Januar 2021

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND
ROHSTOFFE HANNOVER

Standortauswahl

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

Datenbankbasierte Zusammenstellung geowissenschaftlicher
Erkundungsmethoden für die übertägige Standorterkundung
gemäß §16 StandAG

Zwischenbericht

Autoren:	Kneuker, Tilo Beilecke, Thies, Dr. Pollok, Lukas Schubarth-Engelschall, Nicole Semroch, Ralf Dlugosch, Raphael, Dr.
Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Auftragsnummer:	9S2019090000; 9S2019100000
Datum:	25.01.2021
Geschäftszeichen:	B3.2/B50161-17/2021-0001/001
Gesamtblattzahl:	51

Im Auftrag:

gez. G. Enste

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

	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	4
1 Fachautoren	5
2 Einleitung	5
2.1 Rahmenbedingungen	5
2.2 Nutzen der Datenbank	7
3 Zusammenführen von Erkundungszielen und Erkundungsmethoden in einer zweckorientierten Datenbank	11
3.1 Ermittlung der Erkundungsziele	11
3.2 Aufbau einer zweckorientierten Datenbank	13
3.3 Zusammenstellung der zu berücksichtigenden Erkundungsmethoden	16
3.3.1 Fernerkundung	17
3.3.2 Geochemie	17
3.3.3 Geologie	18
3.3.4 Geomechanik	18
3.3.5 Geophysik	19
3.3.6 Hydrogeologie und Geohydraulik	19
3.3.7 Mineralogie	20
3.4 Attribute der jeweiligen Methoden	20
3.4.1 Allgemeine, kurze Beschreibung der Messmethode	23
3.4.2 Art der Messmethode	23
3.4.3 Art der Messung	24
3.4.4 Messgrößen und ermittelte Zielgrößen	24
3.4.5 Eindringtiefe	24
3.4.6 Laterale und vertikale Auflösung	25
3.4.7 Messunsicherheit	25
3.4.8 Kostenaufwand	26
3.4.9 Zeitaufwand	26
3.4.10 Messequipment	27
3.4.11 Auswerteaufwand	27
3.4.12 Marktverfügbarkeit	28
3.4.13 Eignung für die drei Wirtsgesteinstypen	28
3.5 Verknüpfung von Methoden mit Erkundungszielen	29
4 Genehmigungsvoraussetzungen	31

Seite

5	Zusammenfassung und Ausblick	32
	Literaturverzeichnis	33
	Abkürzungsverzeichnis	35
	Tabellenverzeichnis	37
	Abbildungsverzeichnis	38
	Anhangverzeichnis	39

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Kneucker, Tilo Beilecke, Thies, Dr. Pollok, Lukas Schubarth-Engelschall, Nicole Semroch, Ralf Dlugosch, Raphael, Dr.
Titel:	Datenbankbasierte Zusammenstellung geowissenschaftlicher Erkundungsmethoden für die übertägige Standorterkundung gemäß §16 StandAG
Schlagwörter:	Erkundungsziele, geowissenschaftliche Erkundungsmethoden, Methodendatenbank; Standortauswahlgesetz, übertägige Standorterkundung

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) hat als Vorhabenträgerin am 28. September 2020 zum Abschluss des Schritts 1 der Phase I des im Standortauswahlgesetz (StandAG) festgelegten Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland den Zwischenbericht Teilgebiete veröffentlicht. In Phase II des Verfahrens sind Erkundungsmaßnahmen von über Tage in den noch zu identifizierenden Standortregionen der Teilgebiete vorgesehen, um die standortbezogenen geowissenschaftlichen Daten zu ermitteln, die gemäß §16 StandAG für die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Anforderungen und Kriterien und zur Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erforderlich sind. In diesem Kontext hat die BGE die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Ende 2019 beauftragt, Erkundungsziele gemäß StandAG zu erarbeiten, hierfür den aktuellen Stand der Technik zu übertägig und in Bohrungen einsetzbaren geowissenschaftlichen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden zusammenzustellen und diese in einer neu zu konzipierenden, recherchierbaren und erweiterbaren Datenbank bereitzustellen. Der vorliegende Bericht steckt den fachlichen Rahmen für die in der entwickelten Methodendatenbank (GeM-DB) zusammengestellten Methoden ab. Es wird die Vorgehensweise der Zusammenführung von Erkundungszielen und Erkundungsmethoden in die maßgefertigte Datenbankstruktur erläutert. Daneben werden Möglichkeiten der Nutzung der Datenbank aufgezeigt. Da die enthaltenen Methodeneinträge für Nutzer der Datenbank direkt aus der Datenbank extrahiert werden können, wird in diesem Bericht eine Methode exemplarisch detailliert dargestellt. Die Zusammenstellung der geophysikalischen und anderer geowissenschaftlichen Methoden für die übertägige Erkundung inkl. der Verknüpfung mit Erkundungszielen nach StandAG in Form einer recherchierbaren Datenbank schafft eine Grundlage für die im weiteren Verlauf der Arbeiten zu erstellenden Empfehlungen für zukünftige Erkundungsprogramme.

1 Fachautoren

Die Einträge zu der in dem vorliegenden Bericht beschriebenen Datenbankanwendung GeM-DB entstanden unter Mitwirkung der folgenden Kolleginnen und Kollegen (alphabetisch sortiert):

Bartels, Alexander, Dr.; Bebiolka, Anke Christina; Beilecke, Thies, Dr.; Bense, Frithjof, Dr.; Beushausen, Matthias; Bornemann, André, Dr. habil.; Buschmann, Ulrich; Costabel, Stephan, Dr.; Dlugosch, Raphael, Dr.; Donner, Stefanie, Dr.; Engels, Martin, Dr.; Erbacher, Jochen, Hon.-Prof. Dr.; Frenzel, Britta; Furche, Markus, Dr.; Gaebler, Peter, Dr.; Gräsle, Werner, Dr.; Gundelach, Volker, Dr.; Hartmann, Gernot; Henneberg, Mareike; Hesser, Jürgen, Dr.-Ing.; Heyde, Ingo, Dr.; Hobiger, Manuel, Dr.; Hupe, Patrick, Dr.; Ibs-von Seht, Malte, Dr.; Igel, Jan, Dr.; Jähne-Klingberg, Fabian; Kapinos, Gerhard, Dr.; Kaufhold, Stephan, Dr.; Kneuker, Tilo; Lang, Jörg, Dr.; Laurich, Ben, Dr.; Lippmann-Pipke, Johanna, Dr.; May, Franz, Dr.; Mertineit, Michael; Musmann, Patrick, Dr.; Noack, Vera, Dr.; Ostertag-Henning, Christian, Dr.; Peimann, Joachim; Pollok, Lukas; Pusch, Maximilian; Reinhold, Klaus; Rummel, Lisa, Dr.; Salat, Christina, Dr.; Saßnowski, Alja, Dr.; Schennen, Stephan; Schnabel, Michael, Dr.; Schramm, Michael, Dr.; Schubarth-Engelschall, Nicole; Schumacher, Sandra, Dr.; Semroch, Ralf; Siemon, Bernhard, Dr.; Stück, Heidrun, Dr.; Wagener, Nicolas Jakob; Weber, Jan Richard, Dr.-Ing.

2 Einleitung

2.1 Rahmenbedingungen

Das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) legt die Vorgehensweise fest, mit der ein Standort für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen zu ermitteln ist (StandAG 2017). Die Vorhabenträgerin dieses Verfahrens, die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), hat zum Abschluss des Schritts 1 der Phase I am 28. September 2020 den Zwischenbericht Teilgebiete veröffentlicht, in dem nach Anwendung der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien 90 Teilgebiete in Deutschland ausgewiesen wurden, welche günstige geologische Voraussetzungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen (BGE 2020). Im zweiten Schritt der Phase I des Auswahlverfahrens werden aus Teilgebieten Standortregionen ermittelt, die in Phase II des Verfahrens übertägig erkundet werden (Abb. 1).

Nach § 14 Abs. 1 StandAG sind für die Standortregionen standortbezogene Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung zu entwickeln, und zwar nach Maßgabe sowohl der Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 als auch für die Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 16 Abs. 1. Durch diese übertägige Erkundung soll gemäß § 16 Abs. 2 StandAG die Grundlage geschaffen werden, um unter „Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 günstige Standorte“ zu ermitteln.

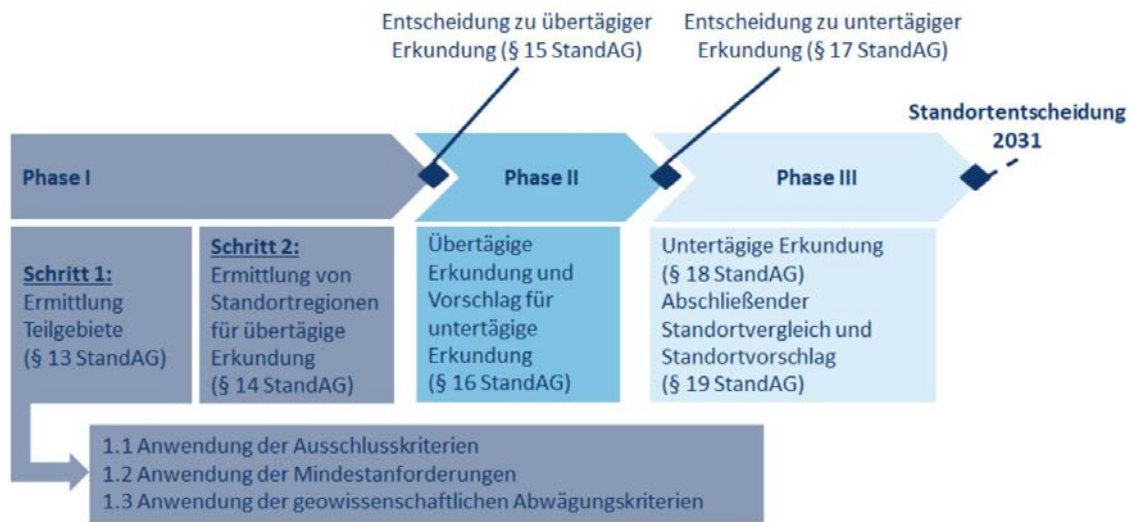


Abb. 1: Schematische Darstellung vom Ablauf des Standortauswahlverfahrens (BGE 2019)

In diesem Zusammenhang hat die BGE die BGR mit der Zusammenstellung von übertägig, aus der Luft und in Bohrungen einsetzbaren geowissenschaftlichen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden in einer Datenbank und von daraus abzuleitenden Empfehlungen für zukünftige Erkundungsprogramme beauftragt. Dies erfolgt 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“.

Methoden für die übertägige Erkundung von ermittelten günstigen Standorten sind für die Phase III des Verfahrens (Abb. 1) von Bedeutung und nicht Bestandteil des Auftrags.

Als Grundlage für die Arbeiten wurden zunächst Erkundungsziele basierend auf den Anforderungen des StandAG, vorrangig aus den Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien abgeleitet (Kneucker et al. 2020). Zudem wurden Erfahrungen der BGR in anderen Erkundungsprogrammen und Endlagerprojekten in die Erkundungszielebestimmung einbezogen.

Anhand der Erkundungsziele wurden geeignete Erkundungsmethoden zur Abklärung der Ziele ausgewählt und als Katalog in eine Methodendatenbank integriert. Die Bewertung der Eignung der jeweiligen Methode für die Ziele sowie die Beschreibung der Methoden anhand vorgegebener Attribute und Abfragen wurde in der Datenbank von Methodenexpertinnen und –experten vorgenommen. Aufgrund des fachlichen Inhalts wurde der Datenbank der Name GeM-DB (Geowissenschaftliche Methoden – Datenbank) gegeben.

Mit Hilfe von in der Datenbank integrierten Abfragen können die ausgewiesenen Untersuchungsmethoden u. a. im Hinblick auf ihre wirtsgesteinsspezifische Anwendbarkeit sowie zur Erreichung der entsprechenden Erkundungsziele zusammengestellt werden. Im Fokus der Datenbank stehen i. d. R. zerstörungsfreie bzw. minimalinvasive, übertägig und in Bohrungen einsetzbare geowissenschaftliche und geophysikalische Methoden. Sie dienen der lithologischen, strukturellen, mineralogischen, geochemischen, gesteinsmechanischen und hydrogeologischen Charakterisierung der potenziellen Wirts- / Barrieregesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein, mit dem Ziel, die gesetzlichen Kriterien und Anforderungen an einen Endlagerstandort ortsspezifisch abzuprüfen.

In diesem Bericht wird das Vorgehen zur Identifizierung der Erkundungsmethoden, die maßgebend bei der übertägigen Erkundung zur Abprüfung der gesetzlichen Kriterien und Anforderungen sind, ihre Darstellung und ihre Verknüpfung mit Erkundungszielen in der Datenbankstruktur dokumentiert. In einem ergänzenden technischen Bericht werden die Datenbankstruktur und die über eine Web-Oberfläche realisierten Zugriffsfunktionen auf die Datenbank erläutert (Beilecke et al. 2021).

2.2 Nutzen der Datenbank

Die Herangehensweise, geowissenschaftliche Methoden Disziplinen-übergreifend in einer Datenbank mit Beschreibungen ausgewählter Attribute abzubilden und sie mit einer Vielzahl an Erkundungszielen wirtsgesteinsgenau zu verknüpfen, stellt den übergeordneten Wert und ein Alleinstellungsmerkmal der Datenbank dar. Der Wert geht auch über die Nutzung der Datenbank ausschließlich im Bereich Endlagerung hinaus, denn viele der Parameter, die für die Erkundungsziele in der Standortauswahl maßgeblich sind, spielen auch in anderen geowissenschaftlichen Erkundungsprogrammen eine wichtige Rolle. Das gewählte

Vorgehen beim Aufbau der Datenbank erlaubt eine Trennung von Erkundungszielen, Messparametern (diese sind in den entsprechenden Attributfeldern berücksichtigt) und Erkundungsmethoden, welches in Veröffentlichungen zu Erkundungsprogrammen so detailliert und gleichzeitig komplex bisher nicht existiert. Somit kann die Datenbank auch weit über die Standortauswahl im Suchprozess wirken und eine Basis oder Vorlage für Planungen von Erkundungsprogrammen oder zukünftige Datenbankentwicklungen im Bereich der Geowissenschaften bilden. Gleichzeitig kann die Datenbank einen Beitrag dazu leisten, die im Auswahlverfahren erforderliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit bei der Ableitung von Erkundungsprogrammen zu gewährleisten.

In der Datenbank wurde eine Beschreibung der Methoden mittels vorgegebener Attribute umgesetzt und um einzelne Attribute bzw. Attributdetaillierungen ergänzt. Die Attribute wurden durch Methodenfachleute bedient. Aufgrund der sehr unterschiedlichen, Disziplinen-übergreifenden Methoden werden die Attribute jedoch nicht allen Methoden in gleicher Weise gerecht. Da die Datenbank erweiterbar ist, ist die Möglichkeit gegeben, weitere Attribute oder sogar Methoden und Ziele zu ergänzen, die sich im weiteren Verlauf der Bearbeitung und des Suchprozesses als sinnvoll herausstellen. Das könnte beispielsweise für Methoden zutreffen, die derzeit noch keine Anwendungsreife besitzen oder auch für Methoden, die derzeit in der Datenbank noch zusammenfassend betrachtet werden, jedoch in der Praxis besser als eigenständige Methodenspezialisierungen betrachtet werden sollten. Die längerfristige Nutzbarkeit der in den Attributen erfassten Informationen kann nur mit einer entsprechenden Pflege der Datenbank gelingen. Technisch ist es möglich, die Datenbank in Bezug auf ihre Inhalte (z. B. hinsichtlich untertägiger Erkundung) und Anwendbarkeit hin weiter zu optimieren.

Mit Hilfe der Datenbank gelingt es, das Methodenwissen einzelner Fachleute mit Fokus auf die Erkundungsziele zusammenzuführen. Daraus ergeben sich Methodenkombinationen, mit deren Hilfe Ziele bedient werden können. Es stehen im Zuge der weiteren Arbeiten in den Arbeitspaketen zudem Abgleiche mit Erkundungsprogrammen und Fallstudien an. Dabei ist die Zuordnung der umfassend aufgelisteten Erkundungsziele zu einer Methode nicht immer eindeutig in Methodenverknüpfungen umsetzbar. Auch die Disziplinen-übergreifende Kombination von Methoden für die Bearbeitung bestimmter Erkundungsziele erlaubt ggf. mehrdeutige Zuordnungen. Die aus der Datenbank und aus den Fallstudien zusammengetragenen Informationen sollen in Empfehlungen für ein Erkundungsprogramm für die übertägige Erkundung münden, so dass bis zum Ende der Laufzeiten der Arbeitspakete insbesondere die Aspekte der anzuwendenden Reihenfolge und Kombinationen von Methoden stärker beleuchtet werden können (Abb. 2).

Ein weiterer, für alle Methoden differenziert zu fassender Aspekt ist das Attribut der Messunsicherheit von Verfahren. Für Verfahren, die eine statistische Betrachtung erlauben und gesuchte Parameter direkt bestimmen, ist die Erfassung der Messunsicherheit oft relativ einfach. Bei Methoden, deren Ergebnisse viele Bearbeitungsschritte benötigen oder ggf. Modellvorstellungen für Inversionsrechnungen voraussetzen, hängt die Messunsicherheit an der Validität dieser Modelle im speziellen Anwendungsfall. Hier ist es nicht zielführend, eine pauschale Messunsicherheit anzugeben.

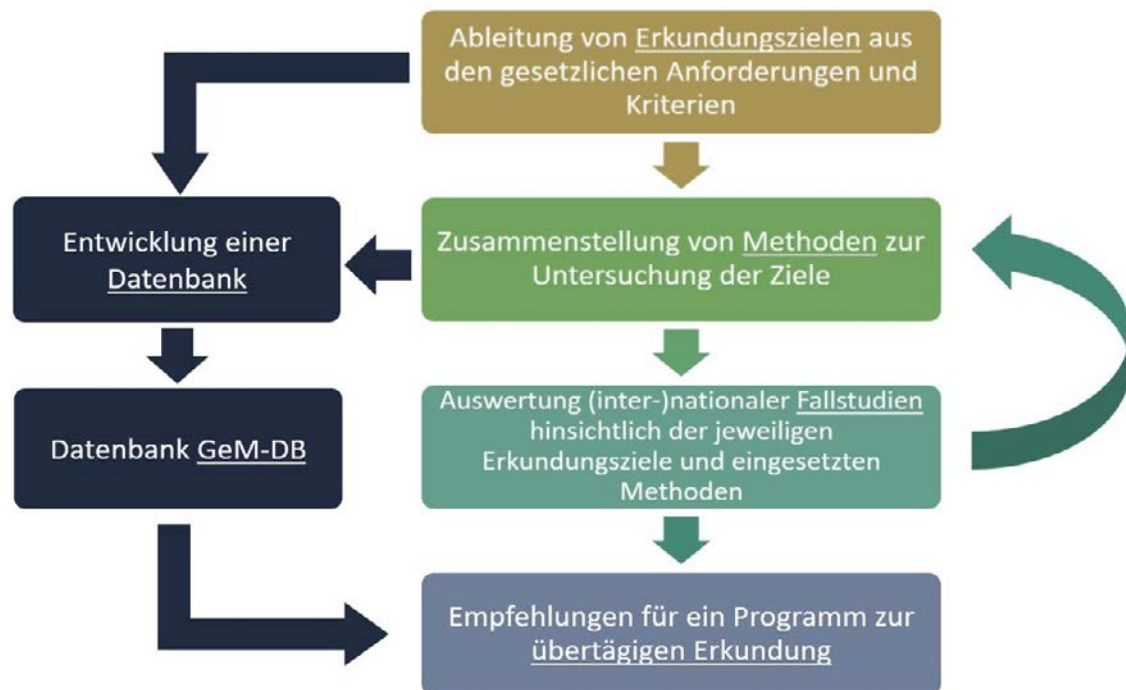


Abb. 2: Kernelemente der beiden Arbeitspakete GeoMePS und ZuBeMERk bei der Zusammenstellung und Bewertung von Methoden für die übertägige Standorterkundung, inkl. der „Rückkopplung“ mit Erkundungsprogrammen und Fallstudien.

Die Aufgabenstellung von der Erkundungszieledefinition über die Zusammenstellung der Methoden bis zum Aufbau der Datenbank erfordert eine komplexe Bearbeitung unter Hinzuziehung diversen Expertenwissens sowie eine zielorientierte Strukturierung der einzelnen Bearbeitungsschritte. Die Auswahl der Methoden und der Tiefgang ihrer Beschreibungen wurden so gewählt, wie er für den Gebrauch der Datenbank erforderlich ist. Somit ermöglichen es die abgebildeten Methoden, die für eine Standortregion auf Basis einer vorhandenen Datengrundlage offenen Fragestellungen zur Abklärung der gesetzlichen Anforderungen und Kriterien zu bearbeiten und ein entsprechendes Erkundungsprogramm zu konzipieren. Die Darstellung der einzelnen Methoden innerhalb der Datenbank kann und soll dabei kein Disziplinen- und Methoden-übergreifendes Lehrbuch ersetzen. Zur weiteren fachlichen Vertiefung wird in der Datenbank auf die jeweiligen methodisch spezialisierten Fachbücher und Publikationen verwiesen.

Bei der Auswahl und der Zusammenstellung der Methoden sollte - soweit möglich - eine Vollständigkeit hinsichtlich der Zuordnung von mindestens einer Methode zu einem Erkundungsziel erreicht werden. Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten von Methoden, der zu berücksichtigenden Vielfältigkeit der Untersuchungsobjekte (jeweilige geologische Situation, zu untersuchendes Wirts- / Barrieregestein, Teufenlage, etc.) sowie davon abhängig sinnvoller Kombinationsmöglichkeiten besteht grundsätzlich eine Vielfalt hinsichtlich der für die Erkundungsziele geeigneten Methoden. Im Verlauf der weiteren Bearbeitung kann sich die Vielfalt der Methoden und der Tiefgang ihrer Ausführungen in der Datenbank erhöhen, insbesondere nach der Auswertung von Fallstudien und weiterführender fachlicher Qualitätssicherung. Eine Erhöhung der Vielfalt an Methoden erhöht die Auswahlmöglichkeiten und Flexibilität bei der Zusammenstellung von Methoden für ein Erkundungsprogramm und ggf. bei der Suche nach geeigneten Anbietern.

Es kann für einzelne Erkundungsziele der Fall eintreten, dass die Auswahl und Vielfalt an Methoden deutlich eingeschränkt ist und weniger etablierte, alternative Untersuchungsmethoden bei der Konzeption von Erkundungsprogrammen in Betracht gezogen werden müssen.

Die Datenbank legt den Fokus auf eine kondensierte Darstellung der Vielzahl an geowissenschaftlichen und geophysikalischen Methoden. Weitergehende Informationen und Details zu den Erkundungsmethoden können über die in der Datenbank hinterlegten Literaturhinweise recherchiert werden. Deshalb können beispielsweise aus der Datenbank selbst heraus keine Messgeometrien für Erkundungsmaßnahmen abgeleitet werden. Hierzu müssen die Informationen aus der bei der jeweiligen Methode zitierten Literatur herangezogen werden.

In der praxisbezogenen Benutzung der Datenbank ist es von Interesse, für Planungen die generelle Marktverfügbarkeit und den finanziellen Rahmen von Methoden zu kennen. Es ist zu beachten, dass die Marktverfügbarkeit sowie die Kosten zum Einsatz einer Messmethode starken Schwankungen unterliegen und im Einzelfall vom Auftraggeber in dafür eigens erstellten Leistungsbeschreibungen über Vergaben abzufragen sind. Hinsichtlich der Marktverfügbarkeit sind in der Datenbank zum Berichtsstand daher Tendenzen hinterlegt, Kostenabschätzungen werden im Sinne von Spannbreiten erfasst.

Der vorliegende Bericht enthält eine kurze Beschreibung der Vorgehensweise bei der Bestimmung der Erkundungsziele (Kapitel 3.1). Es folgen Erläuterungen zur Erstellung der Methodendatenbank GeM-DB (Kapitel 3.2) sowie zur Gliederung der Erkundungsmethoden in der Datenbank (Kapitel 3.3). Anschließend wird auf die für die Methoden abgefragten Attribute eingegangen (Kapitel 3.4) und die Implementierung der Erkundungsziele in der Datenbank zur Verknüpfung mit den Methoden erläutert (Kapitel 3.5). Abschließend finden sich Hinweise zu möglichen Genehmigungsvoraussetzungen für die Anwendung von Erkundungsmethoden (Kapitel 4).

3 Zusammenführen von Erkundungszielen und Erkundungsmethoden in einer zweckorientierten Datenbank

3.1 Ermittlung der Erkundungsziele

Als Grundlage für die zu erstellende Methodendatenbank wurden zunächst Erkundungsziele basierend auf den Anforderungen des StandAG abgeleitet. Dabei waren Bandbreiten bzw. „Ausprägungen“ der jeweiligen Eigenschaften zu ermitteln, die für eine Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG, der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG in den zu erkundenden Standortregionen notwendig sind (Abb. 3). Es kam deshalb zu einer Nennung von gleichen Erkundungszielen unter verschiedenen Kriterien / Anforderungen. Die in Kneucker et al. (2020) erarbeiteten Erkundungsziele sind für die Umsetzung der Phase II des Auswahlverfahrens relevant und beziehen sich somit auf die von der Vorhabenträgerin für die übertägige Erkundung vorgeschlagenen Standortregionen. Es wurde nicht berücksichtigt, inwieweit sich bestimmte Erkundungsziele ggf. durch Datenlieferungen und vorliegende Informationen erübrigt haben könnten.

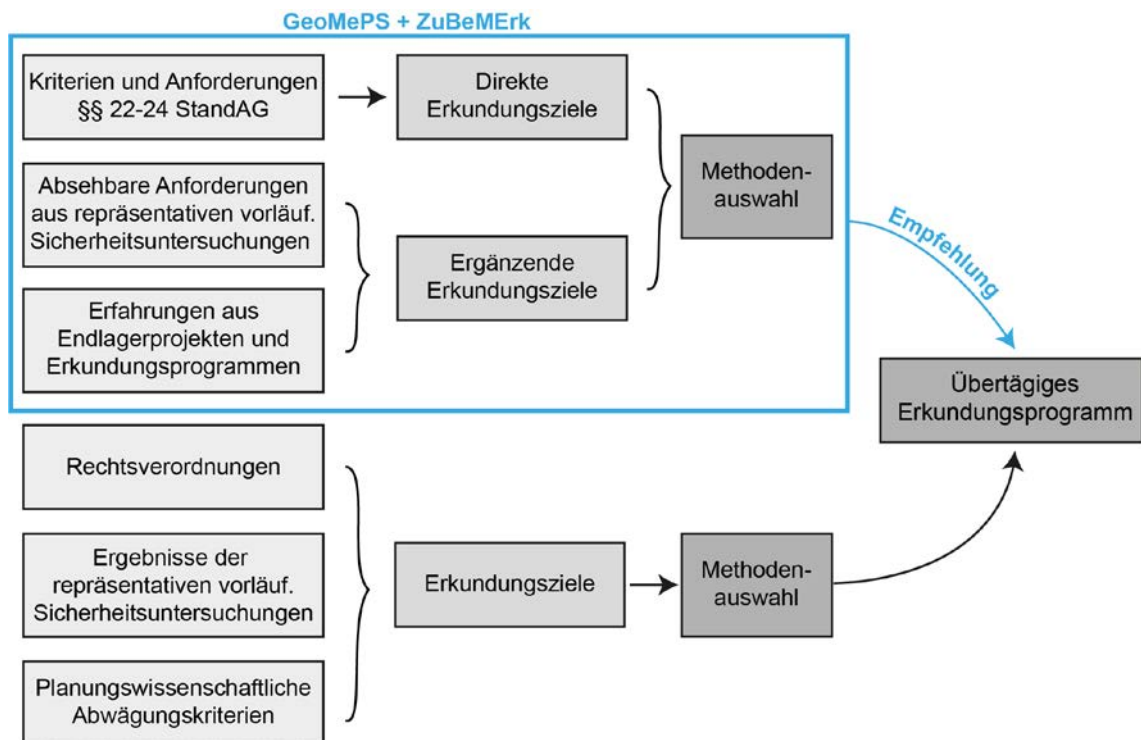


Abb. 3: Grundlagen für die übertägige Erkundung

In den Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG wird der jeweilige räumliche Geltungsbereich, für welchen die bewertungsrelevanten Eigenschaften / Indikatoren bewertet werden sollen, genannt. Mehrere der Anforderungen und Kriterien beziehen sich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Dieser kann allerdings erst festgelegt werden, wenn die technische Auslegung des Endlagers unter Berücksichtigung der jeweiligen örtlichen, geologischen Gegebenheiten vorliegt und das Gesamtsystem des Endlagers im Rahmen von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bewertet wurde. Solange dies nicht der Fall ist, wird empfohlen, die entsprechenden Anforderungen und Kriterien stattdessen auf das Barrieregestein bzw. den Einlagerungsbereich anzuwenden. Als Barrieregestein wird hier diejenige Gesteinsschicht bezeichnet, in der der ewG ausgewiesen werden soll.

Zur Ableitung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung waren zusätzlich diejenigen Sachverhalte relevant, die für die Durchführung von weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bekannt sein müssen. Da zum Zeitpunkt der Zieledefinition für die Methodendatenbank die entsprechenden Rechtsverordnungen und die darauf aufbauenden weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen noch nicht vorlagen, konnten diese Grundlagen nicht genutzt werden, um daraus weitere mögliche Erkundungsziele abzuleiten. Sie fanden keine systematische Berücksichtigung in der Zusammenstellung der Erkundungsziele. Weitere Erkundungsziele aus unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen können sich ggf. im weiteren Verlauf des Verfahrens aus speziellen Fragestellungen und gesetzlich festgelegten Anforderungen ergeben, z. B. aus der Diskussion mit der (Fach-)Öffentlichkeit in Fach- / Regionalkonferenzen, der Ableitung von Prüfkriterien, der Anwendung von planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien oder der gesetzlich geforderten Durchführung von Umweltverträglichkeitsstudien und sozio-ökonomischen Potenzialanalysen. Diese weiteren Grundlagen bleiben in der Datenbank bislang unberücksichtigt.

Die Erkundungsziele wurden in einem Zwischenbericht zu den Arbeitspaketen „GeoMePS“ und „ZuBeMERk“ dokumentiert (Kneucker et al. 2020). Im Berichtszeitraum sind über 175 Erkundungsziele identifiziert worden. Die durchgeführte Ermittlung der Erkundungsziele bezog sich im Kern auf die im StandAG genannten Anforderungen und Kriterien. Es wurden sämtliche Ausschlusskriterien (§ 22), Mindestanforderungen (§ 23) und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24) betrachtet (Abb. 3), mit dem Ergebnis der vollständigen Ableitung der sogenannten „direkten“ Erkundungsziele für die übertägige standortbezogene Erkundung im jeweils genannten räumlichen Geltungsbereich.

Auf Basis der geowissenschaftlichen Expertise wurden weitere „ergänzende“ Erkundungsziele aufgenommen, die aufgrund der gemäß StandAG geforderten repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und sich daraus ergebenden Anforderungen

absehbar sind. Des Weiteren konnten ergänzende Erkundungsziele aus Anforderungen an Langzeitsicherheitsnachweise und geowissenschaftliche Erkundungsprogramme im Rahmen bisheriger Endlagerprojekte abgeleitet werden (Abb. 3). Die ergänzenden Erkundungsziele erheben, u. a. aufgrund der Anfang 2020 noch nicht bekannten Vorgaben zur Durchführung von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die ergänzenden Erkundungsziele können sich auf Erkundungsräume beziehen, die über die gesetzlich vorgegebenen räumlichen Geltungsbereiche hinausgehen. In der Datenbank bilden direkte und ergänzende Erkundungsziele gemeinsam die Grundlage für die Verknüpfung mit Erkundungsmethoden.

Mit der Bewertung der gesetzlich vorgegebenen Anforderungen und Kriterien im Rahmen des Auswahlverfahrens nach StandAG soll ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ermittelt werden. Dabei zielt der sicherheitsgerichtete geowissenschaftliche Vergleich auf die technisch unbeeinflusste geologische Gesamtsituation der jeweiligen, hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort zu bewertenden räumlichen Bereiche. Die Anwendung der Anforderungen und Kriterien erfolgt ausschließlich auf die Eigenschaften der zu bewertenden Geosphäre, ohne Beeinflussung durch oder Wechselwirkung mit einem möglichen Endlager. Denkbare Erkundungsziele, die sich infolge von Störungen des Grundzustands der Geosphäre durch den Bau oder Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ergeben, wurden nicht betrachtet.

3.2 *Aufbau einer zweckorientierten Datenbank*

Zentraler Baustein der beiden Arbeitspakete GeoMePS und ZuBeMERk ist die Methodendatenbank GeM-DB (Geowissenschaftliche Methoden – Datenbank). In dieser Datenbank sollten übertägige, aus der Luft und in Bohrungen einsetzbare geophysikalische und andere geowissenschaftliche Untersuchungsmethoden und deren Kombinationen zusammengestellt werden, die i. d. R. zerstörungsfrei anwendbare Messungen zur lithologischen, strukturellen, gesteinsmechanischen und hydrogeologischen Charakterisierung von Wirtsgesteinsformationen ermöglichen (Abb. 4).

Die Datenbank ist so aufgebaut, dass sie prinzipiell an mögliche technische Entwicklungen kontinuierlich angepasst und um zusätzliche Erkundungsmethoden erweitert werden kann. Technische Grundlage der Datenbank ist Microsoft SQL Server 2017. Die browserbasierte Oberfläche wurde mit Hilfe einer PHP-Web-Programmierung (PHP 7.4) ohne Framework realisiert. Weitere Details zur Datenbankstruktur, ihren Inhalten sowie die Funktionen der GeM-DB finden sich in einem separaten technischen Bericht (Beilecke et al. 2021).

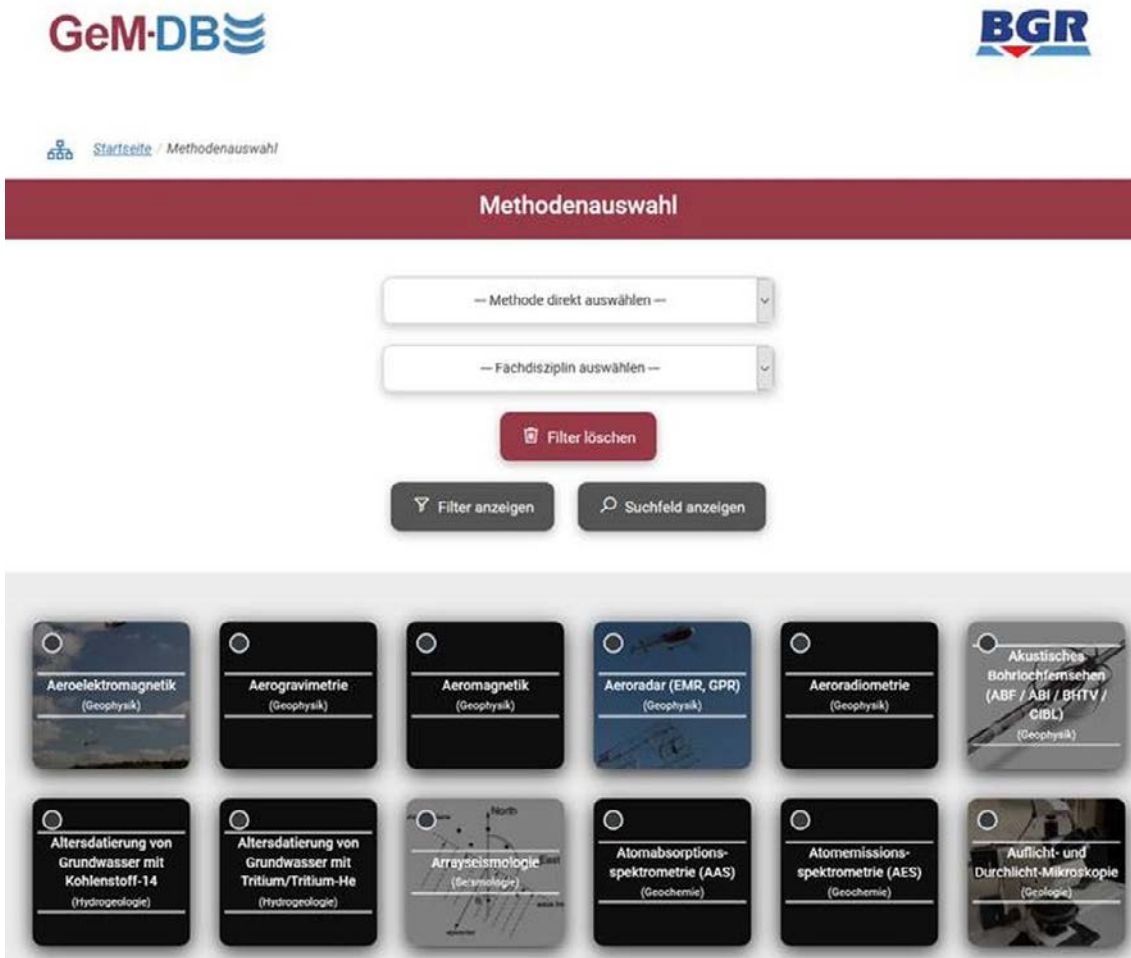


Abb. 4: Methodenauswahl in der Web-Oberfläche der Methodendatenbank GeM-DB, in der geophysikalische und andere geowissenschaftliche Untersuchungsmethoden zur übertägigen Standorterkundung zusammengestellt sind.

Erkundungsmethoden können direkt in die Datenbank eingepflegt werden. Beim Einpflegen werden Verknüpfungen zu den Erkundungszielen für jede Erkundungsmethode abgefragt. Enthalten sind zudem eine kurze, allgemeine Beschreibung und ausgewählte Eigenschaften / Attribute der Methoden.

Die Datenbank ermöglicht Abfragen nach unterschiedlichen Vorgaben. Über die resultierenden Verknüpfungen von Erkundungszielen mit Erkundungsmethoden erlaubt die Datenbank die Darstellung, welche der vielen Ziele eine jeweilige Methode bedienen kann oder umgekehrt, welche Ziele mit welchen Methoden bedient werden können. Die in der Datenbank gespeicherten Informationen und Verknüpfungen sollen die Grundlage für ein zukünftig zu erstellendes, Disziplinen-übergreifendes Erkundungsprogramm für die drei Wirtsgesteinstypen (Steinsalz, Ton- und Kristallingestein) bilden. Dieses soll hinsichtlich der einzelnen Erkundungsziele aufgestellt werden können und Fachleute unterstützen,

gezielt Methoden in den unterschiedlichen Fachdisziplinen anzufragen, um kombinierte Erkundungsmaßnahmen fachlich sinnvoll und zielorientiert zu planen. Die gewählte Struktur der Datenbank erlaubt zudem eine „scharfe“ Trennung von Erkundungszielen, Messparametern und Erkundungsmethoden. Diese Trennung war in Veröffentlichungen zu Erkundungsprogrammen bisher nicht in dieser Komplexität und diesem Detaillierungsgrad gegeben. Die Inhalte bzw. Methoden können innerhalb der Datenbankanwendung anhand von jeweils geeigneten, mit ihnen verknüpften Erkundungszielen in der Klassifizierung nach StandAG, anhand der von Kneucker et al. (2020) vorgenommenen Zielegliederung oder nach „klassischen“ geowissenschaftlichen Fachdisziplinen angezeigt werden. Inhalte können mit Hilfe von Exportfunktionen in Berichtsform im PDF-Format ausgegeben werden. Zudem können Methoden anhand einiger Attributfilter gezielt in der Datenbank identifiziert werden.

Zum Berichtsstand sind über 140 Erkundungsmethoden in der Datenbank bereits angelegt. Die Datenbank befindet sich derzeit noch in der Bearbeitung. Generell werden vorrangig etablierte, marktübliche und marktverfügbare Methoden angelegt. Es ist davon auszugehen, dass einige, für bestimmte Fragestellungen relevante Methoden noch nicht (umfänglich) erfasst wurden, z. B. weil sie technisch / wissenschaftlich noch nicht etabliert sind oder eine nur geringe Marktverfügbarkeit verfügen, aber ggf. unabdingbar zur Erreichung spezifischer Erkundungsziele sind. Gleichwohl kann nicht ausgeschlossen werden, dass in dem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren noch weitere Erkundungsziele definiert oder bestehende präzisiert werden. Bei der Zusammenstellung der Methoden wurde nicht die verfügbare Datengrundlage in den Standortregionen berücksichtigt. Je nach Datenlage und z. B. Größe der Standortregion ergeben sich ggf. unterschiedliche Anforderungen an die Quantität und Qualität der zu gewinnenden Daten, die letztlich in den jeweiligen standortspezifischen Erkundungsprogrammen zu berücksichtigen sind.

Es steht auch zu erwarten, dass z. B. in der weiteren Bearbeitung durch die Sichtung von Fallstudien weitere Methoden oder besondere Methodenspezialisierungen und -kombinationen nachgepflegt werden müssen. Eine aktuelle Liste aller identifizierten und für die Datenbank aufbereiteten Erkundungsziele und Methoden kann über eine interaktive Web-Oberfläche direkt aus der Datenbank GeM-DB extrahiert werden. Dadurch, dass die Erkundungsmethoden in der Datenbank hinterlegt sind und recherchiert werden können, ist dem vorliegenden Bericht ein Methodeneintrag exemplarisch als Anhang beigelegt.

Aufbauend auf den Methodenzusammenstellungen kann eine wirtsgesteinspezifische Analyse und vergleichende Bewertung der Methoden zur übertägigen geowissenschaftlich-geophysikalischen Standorterkundung erfolgen. Zur umfassenden Charakterisierung eines Gebiets bleibt es notwendig, geowissenschaftliche Informationen aus einer Vielzahl

von Messmethoden und Interpretations-Verfahren zu einer Standortregion ganzheitlich zu dokumentieren, sukzessiv zu verdichten und zu interpretieren, um so zu einer konsistenten Darstellung insbesondere der für die Sicherheit des Endlagers relevanten geowissenschaftlichen Gegebenheiten zu kommen.

3.3 Zusammenstellung der zu berücksichtigenden Erkundungsmethoden

Nach BGE (2020b) umfasst die übertägige Erkundung die Untersuchung des Untergrundes von der Oberfläche auf seine Eignung zur Einrichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle. In der Datenbank sollen in der Praxis verfügbare, technisch etablierte Methoden erfasst werden, die aus der Luft, an oder von der Oberfläche aus sowie in übertägigen Bohrungen zur Anwendung kommen können. Das schließt darin durchgeführte Bohrlochmessungen / -tests und die Gewinnung und Untersuchung von Kernmaterial ein. Als Grundlage für die Methodenauswahl dienen die aus dem Standortauswahlgesetz (StandAG) abgeleiteten Erkundungsziele (Kneucker et al. 2020). Untertage-Methoden werden in dieser Phase des Verfahrens nicht berücksichtigt.

Die Datenbank enthält eine große Methodenvielfalt, da es für die adäquate Bedienung spezifischer Erkundungsziele ggf. notwendig und hinsichtlich der Belastbarkeit der Ergebnisse sinnvoll ist, Messmethoden verschiedener geowissenschaftlichen Fachdisziplinen einzusetzen und zu kombinieren. Eine Erkundung mit schwerpunktmäßig „nur“ einer Fachdisziplin wird nicht möglich sein. Je vielfältiger die in der Datenbank abgebildeten Methoden sind, umso flexibler kann ein Erkundungsprogramm auf die regionsspezifischen Anforderungen und geologischen Gegebenheiten ausgerichtet werden.

Die Datenbank beschränkt sich auf Messmethoden bzw. „Messgeräte“ im eigentlichen Sinne, also Verfahren, bei denen z. B. im Aufschluss oder am Bohrkern konkrete Parameter gewonnen werden können. Auswertemethoden bzw. Auswerteverfahren wurden in der Methodenzusammenstellung nicht explizit als eigene Methoden aufgeführt. Für jede Methode können jedoch im Attributfeld „Auswertaufwand“ Informationen zu notwendigen Interpretationsmethoden bzw. -schritten der jeweiligen Messmethode hinterlegt werden. Auch bei der Darstellung der Eignung von Methoden für bestimmte Erkundungsziele besteht die Möglichkeit, Hinweise für die Notwendigkeit geeigneter Auswertemethoden zu geben.

Im Wesentlichen folgt die Sortierung der Messmethoden der „klassischen“ Gliederung nach geowissenschaftlichen Fachdisziplinen, wie z. B. Fernerkundung, Geochemie, Geohydraulik, Geologie, Geomechanik, Geophysik, Hydrogeologie und Mineralogie. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einige Fachdisziplin-übergreifende Erkundungsmethoden mehrdeutig sind, d. h. sich ggf. mehreren Fachdisziplinen zuordnen lassen; aus organisatorischen und

technischen Gründen im Rahmen der Bearbeitung wurde für diese Methoden dann eine Fachdisziplin für die Zuordnung ausgewählt. Im Folgenden werden beispielhaft Methoden aus den jeweiligen Fachdisziplinen genannt. Die vollständige Methodenzuordnung ist der digitalen Version der Methodendatenbank GeM-DB zu entnehmen.

3.3.1 Fernerkundung

Die Fernerkundung ist allgemein die Erfassung von Informationen über ein Objekt oder Phänomen ohne physischen Kontakt mit dem Objekt und steht im Gegensatz zur Beobachtung vor Ort. In den Geowissenschaften bezieht sich der Begriff „Fernerkundung“ im Allgemeinen auf die Verwendung von satelliten- oder flugzeugbasierten Sensortechnologien zur Erkennung und Klassifizierung von Objekten auf der Erde. Es kann zwischen aktiven Fernerkundungs-Methoden (wenn ein Signal von einem Flugzeug oder Satelliten ausgesendet und anschließend Reflexionen vom Sensor erfasst wird) und passiven Fernerkundungs-Methoden (wenn ein Signal, z. B. die Reflexion des Sonnenlichts, erfasst wird, das von der Erdoberfläche reflektiert und / oder emittiert wird) unterschieden werden (Martin et al. 2002). Fernerkundliche Methoden werden in zahlreichen Bereichen eingesetzt, darunter Geographie, Landvermessung und die meisten geowissenschaftlichen Disziplinen (z. B. Hydrologie, Meteorologie, Ozeanographie, Geologie).

Beispiele für in der Datenbank enthaltene Methoden aus dieser Fachdisziplin sind: Global Positioning System (GPS), Light Detection and Ranging (LiDAR), Multispektrale und Hyperspektrale Verfahren, Photogrammetrie und Synthetic Aperture Radar (SAR).

3.3.2 Geochemie

Die Geochemie ist ein Wissenschaftszweig, der die Werkzeuge und Prinzipien der Chemie nutzt, um die Mechanismen hinter wichtigen geologischen Systemen wie Erdkruste, Ozeanen aber auch im Sonnensystem zu erklären. Im Speziellen befasst sich die Geochemie mit chemischen Prozessen und der Verteilung und Zirkulation der Elemente, ihrer Isotope und Verbindungen in allen natürlichen Systemen der Erde (Martin et al. 2002). Diese Fachdisziplin an der Schnittstelle Chemie und Geologie beinhaltet Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung der Gesteine, Minerale, Böden, Wässer und Gase der Litho-, Pedo-, Hydro- und Atmosphäre sowie z. T. auch der Biosphäre (Murawski & Meyer 2004).

Beispiele für in der Datenbank gepflegte Methoden aus dieser Fachdisziplin sind: Atomemissionsspektrometrie (AES), Elektronenstrahlmikrosonde (EPMA), Elementaranalyse von Kohlenstoff und Schwefel, Gaschromatographie (GC), K-Ar / Ar-Ar Thermochronologie, Massenspektrometrie, pyrolytische Charakterisierung von organischem Material, Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Spaltspurdatierung (z. B. Zirkon, Apatit).

3.3.3 Geologie

Die Geologie ist eine Fachdisziplin der Geowissenschaften, die sich damit befasst, die Entstehung von natürlichen oder künstlichen Gesteinsaufschlüssen anhand von Lagerungsverhältnissen, Umwandlungserscheinungen sowie dem Fossilinhalt in einen zeitlich geordneten, geschichtlichen Zusammenhang zu bringen (Murawski & Meyer 2004). Die moderne Geologie überschneidet sich mit allen anderen Fachdisziplinen der Geowissenschaften, einschließlich der Hydrologie und der Atmosphärenwissenschaften, und gilt daher als ein „Hauptaspekt“ der integrierenden Erdsystemwissenschaften.

Im Speziellen beschreibt die Geologie die Struktur der Erde auf und unter der Oberfläche sowie die Prozesse, die zur Bildung dieser Struktur geführt haben. Geologische Methoden beinhalten Werkzeuge zur Bestimmung des relativen und absoluten Alters von Gesteinen an einem bestimmten Ort und zur Beschreibung der Geschichte dieser Gesteine. Durch die Kombination dieser Werkzeuge können Geologen die geologische Geschichte der Erde in einen zeitlichen Kontext bringen. Die Geologie liefert Hinweise auf Prozesse wie Plattentektonik, die Evolutionsgeschichte des Lebens sowie die Klimageschichte der Erde.

Beispiele für Methoden aus dieser Fachdisziplin sind: Auflicht- und Durchlichtmikroskopie, biostratigraphische Ansprache (Makro- und Mikrofossilien), Bohrkernaufnahme / -ansprache, Computertomographie (CT), geologische Kartierung, Oberflächenanalyse mittels Gasadsorptionsgerät, Porositäts- und Dichtebestimmung (Heliumpyknometer), Rasterelektronenmikroskopie, Röntgen-Strukturgoniometrie, Spülprobenanalyse und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM).

3.3.4 Geomechanik

Die Geomechanik ist ein Wissenszweig, bei dem das mechanische Verhalten von Böden und Festgestein gegenüber natürlicher (z. B. Tektonik) oder künstlicher bzw. technischer Beanspruchung (z. B. beim Tunnel- / Bergbau) untersucht wird (Murawski & Meyer 2010). Sie beinhaltet die Unterdisziplinen Bodenmechanik und Felsmechanik.

Viele Aspekte der Geomechanik überschneiden sich mit Teilen der Geotechnik, Ingenieurgeologie und Geologie. Es ist Aufgabe der Geomechanik, wichtige Gesteinsparameter wie z. B. In-situ-Gesteinsspannung, Elastizitätsmodul, und Poisson-Verhältnis vorherzusagen. Für die Erdölindustrie wichtige Reservoirparameter, wie Formationsporosität, Permeabilität und Bodenlochdruck, können aus einer geomechanischen Charakterisierung abgeleitet werden. Auch in der Tiefengeothermie spielt die Geomechanik an verschiedenen Stellen eine wichtige Rolle. Beispiele dafür sind die Standfestigkeit von Bohrungen und die Gebirgsreaktionen bei Stimulationsmaßnahmen.

Beispiele für Methoden aus dieser Fachdisziplin sind: Dilatanztests, Dilatometermessungen, Hydrofrac-Methode, triaxiale Festigkeitsversuche, triaxiale Kriechversuche, uniaxiale Festigkeitsversuche, uniaxiale Kriechversuche und Zugversuche.

3.3.5 Geophysik

Die Geophysik ist eine Fachdisziplin der Geowissenschaften und gleichzeitig ein Teilgebiet der Physik, dass sich mit den physikalischen Prozessen und physikalischen Eigenschaften des festen Erdkörpers sowie der Verwendung quantitativer Methoden für ihre Analyse befasst („Physik der festen Erde“). Die Geophysik gehört vom Forschungsobjekt her zu den Geowissenschaften, wie z. B. die Geologie und Mineralogie, von der Arbeitsmethodik gesehen jedoch zur Physik (Martin et al. 2002). Die Geophysik befasst sich z. B. mit der Schwerkraft, den seismischen, thermischen, magnetischen und elektrischen Erscheinungen der Erde und dem physikalischen Aufbau des Erdinnern (Murawski & Meyer 2010).

Beispiele für in der Datenbank erfasste Methoden aus dieser Fachdisziplin sind: Dichtemessungen, Gammastrahlung („Gamma Ray“), Neutronenporosität, spezifischer elektrischer Widerstand, Geoelektrik, Georadar, Gravimetrie, Magnetik, Magnetotellurik, Reflexionsseismik und Refraktionsseismik.

3.3.6 Hydrogeologie und Geohydraulik

Die Hydrogeologie ist ein Zweig der Geowissenschaften, der sich mit der Verteilung und Bewegung von Grundwassers durch Grundwasserleiter, poröse und geklüftete Medien und seinen Wechselwirkungen mit Gesteinen bzw. Böden befasst (Murawski & Meyer 2010). Zudem erfasst sie das Vorkommen, die Erscheinungsformen, die Beschaffenheit und die wesentlichen Eigenschaften des Wassers im Untergrund (Martin et al. 2002). Die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Grundwasserbewegung und Geologie kann komplex sein. Das Grundwasser folgt dem Druckgradienten (Fluss von hohem Druck zu niedrigem Druck), häufig durch Brüche und Störungen auf Umwegen. Die Hydrologie als angrenzender Forschungsbereich befasst sich hingegen schwerpunktmäßig mit dem oberflächennahen Wasserfluss.

Die Geohydraulik ist ein Teilgebiet der Hydrogeologie, dass sich konkret mit der Bewegung des Grundwassers im Untergrund beschäftigt. Häufig wird Geohydrologie auch als Synonym für die Bezeichnung Hydrogeologie verwendet. Je nachdem, ob der Schwerpunkt mehr auf hydrologischen oder auf geologischen Aspekten liegt, sollte die Bezeichnung Geohydrologie oder Hydrogeologie bevorzugt werden (Martin et al. 2002). Das Verständnis und die Modellierung der Prozesse, die Grundwasserströmungen im Gestein beeinflussen, ist eine wesentliche Grundlage dieser Teildisziplin.

Beispiele für in der Datenbank hinterlegte Methoden aus der Hydrogeologie sind: Altersdatierung von Grundwasser mittels verschiedener Methoden, Pumpversuche, hydraulische Tests, Tracerversuche, Wasserstoff- und Sauerstoffisotopenanalysen an Grundwasser.

Beispiele für in der Datenbank enthaltene Methoden der Geohydraulik sind: Gas-Tracertests, Gebirgs-Porendruckmessung, Packertests und Permeabilitätsversuche im Labor.

3.3.7 Mineralogie

Die Mineralogie ist eine geologische Fachdisziplin, die sich auf die wissenschaftliche Untersuchung der Chemie, der Kristallstruktur und der physikalischen (einschließlich optischen) Eigenschaften von Mineralien und mineralisierten Einschlüsse spezialisiert hat. Die historisch gewachsene Kristall- und Mineralkunde wird heute durch die benachbarten Wissenszweige Petrographie, Geochemie und Lagerstättenkunde ergänzt (Martin et al. 2002).

Im Mittelpunkt steht das Verständnis von Mineralbildungs- und Umformungsprozessen innerhalb der Erde im Zusammenhang mit geologischen Prozessen. Spezifische Studien innerhalb der Mineralogie umfassen die Prozesse der Mineralherkunft und -bildung, die Klassifizierung von Mineralien, ihre geografische Verteilung sowie ihre Verwendung. Zunehmende Bedeutung gewinnen zudem Umweltaspekte, z. B. in der Tonmineralogie (Bindung von Schadstoffen, Abdichtung von Deponien), der Festkörperchemie und der Festkörperphysik (Martin et al. 2002).

Beispiele für bearbeitete Methoden aus dieser Fachdisziplin sind: Differenz-Thermoanalyse mit Massenspektrometer, Korngrößenanalysen, Raman-Spektroskopie, Röntgendiffraktometrie (RDA) und Schwermineralanalyse.

3.4 Attribute der jeweiligen Methoden

Die Erkundungsmethoden werden innerhalb der Datenbank neben einer allgemeinen Beschreibung anhand von 16 definierten Attributen, die spezifische Eigenschaften der jeweiligen Messmethode, wie räumliche Auflösung, gemessener Materialparameter oder Eindringtiefe beleuchten, beschrieben, um vergleichende Datenbankabfragen zu ermöglichen. Es wurde eine vorgegebene Attributbeschreibung der Methoden aus den Arbeitspaketbeschreibungen umgesetzt und um einzelne Attribute bzw. notwendige Attributdetaillierungen ergänzt (Tab. 1). Aufgrund der Disziplinen-übergreifenden Methodensammlung werden die Attribute jedoch nicht allen Methoden aus den verschiedenen

Fachdisziplinen in gleicher Weise gerecht. Dennoch hat sich die Zugrundelegung einer gemeinsamen Attributliste bewährt. Entsprechende Einschränkungen wurden von den Methodenfachleuten in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Bemerkungsfeld zu dem jeweiligen Attribut erfasst.

Tab. 1: Übersicht zu den in der Methodendatenbank hinterlegten Attributen und deren Einheiten zu den jeweiligen Erkundungsmethoden. AP = Arbeitspaket.

Attribut aus AP-Beschreibungen GeoMePS & ZuBeMERk	In Methodendatenbank (GeM-DB) übernommene Attribute	Art der Attribut-Auswahl	Einheiten
-	Allgemeine Beschreibung der Messmethode	Freitext-Feld	-
Art der Messmethode (Oberfläche, Bohrloch, Luft)	Art der Messmethode	Dropdown-Menü; Bemerkungen als Freitext	Oberfläche, Luft, Bohrloch und Labor
Punktmessung, Profilmessung oder Flächenmessung	Art der Messung	Dropdown-Menü; Bemerkungen als Freitext	Punktmessung, Profilmessung, Flächenmessung und Volumenmessung
Gemessener (physikalischer) Materialparameter	Messgrößen und ermittelte Zielgrößen	Freitext-Felder	-
Eindringtiefe	Eindringtiefe	Spannbreite: „Eindringtiefe von“ und „Eindringtiefe bis“; Bemerkungen als Freitext	Längeneinheit: nm, µm, mm, cm, m
Laterale Auflösung	Laterale Auflösung	Spannbreite: „laterale Auflösung von“ und „laterale Auflösung bis“; Bemerkungen als Freitext	Längeneinheit: nm, µm, mm, cm, m
Vertikale Auflösung	Vertikale Auflösung	Spannbreite: „vertikale Auflösung von“ und „vertikale Auflösung bis“; Bemerkungen als Freitext	Längeneinheit: nm, µm, mm, cm, m
Messunsicherheit	Messunsicherheit	Dropdown-Menü, Bemerkungen als Freitext	gering, mittel und hoch
Kostenaufwand	Kostenaufwand	Spannbreite: „Kostenaufwand von“ und „Kostenaufwand bis“; Bemerkungen als Freitext	Währungseinheit: Euro und TEuro
Zeitaufwand	Zeitaufwand	Spannbreite: „Zeitaufwand von“ und „Zeitaufwand bis“; Bemerkungen als Freitext	Zeiteinheit: Minuten, Stunden, Tage, Wochen und Monate.

Attribut aus AP-Beschreibungen GeoMePS & ZuBeMERK	In Methodendatenbank (GeM-DB) übernommene Attribute	Art der Attribut-Auswahl	Einheiten
Messequipment	Messequipment	Freitext-Feld	-
Prozessingaufwand	Auswerteaufwand	Spannbreite: „Auswerteaufwand von“ und „Auswerteaufwand bis“; Bemerkungen als Freitext	Zeiteinheit: Minuten, Stunden, Tage, Wochen und Monate.
Bewertung der Marktverfügbarkeit inkl. potenzieller Dienstleister	Marktverfügbarkeit	Dropdown-Menü; Bemerkungen als Freitext	gering, mittel und hoch
Darstellung der Eignung für die verschiedenen Wirtsgesteine	Eignung im Wirtsgestein Steinsalz	Dropdown-Menü; Bemerkungen als Freitext	nicht geeignet (--), weniger gut geeignet (-), gut geeignet (+) und sehr gut geeignet (++)
"	Eignung im Wirtsgestein Tongestein	Dropdown-Menü; Bemerkungen als Freitext	nicht geeignet (--), weniger gut geeignet (-), gut geeignet (+) und sehr gut geeignet (++)
"	Eignung im Wirtsgestein Kristallingestein	Dropdown-Menü; Bemerkungen als Freitext	nicht geeignet (--), weniger gut geeignet (-), gut geeignet (+) und sehr gut geeignet (++)

Ein wesentlicher Aspekt der Integration der Methoden in die Datenbank ist eine jeweils kurze Methodenbeschreibung unter Zuhilfenahme von Literaturziten. Durch eine Zitatverwaltung innerhalb der Datenbank ist es möglich, die Methodenbeschreibungen in der Datenbank dauerhaft aktuell zu halten, indem neue wissenschaftliche oder technische Entwicklungen in den jeweiligen Methoden anhand aktualisierter Zitate nachgepflegt werden können. Damit wird die Datenbankpflege vereinfacht und eine langfristige Nutzbarkeit der Datenbank ermöglicht.

Der Gebrauch von Zitaten und Literaturverweisen zu den verschiedenen Aspekten einer Methode erlaubt es, die allgemeine Beschreibung der einzelnen Methode relativ knapp zu halten, und die Komplexität der Methoden trotzdem angemessen zu beschreiben. Weiterhin helfen die Attribute, wesentliche Eigenschaften der Methoden recherchierbar zu machen. Für eine möglicherweise später erwünschte Erweiterung der Methodenbeschreibung kann ergänzender Text in Form zusätzlicher Dateien den Methodenbeschreibungen schon jetzt beigefügt werden. Abbildungen und Fotos können ebenfalls für eine plakative Darstellung der Methoden ergänzt werden. Die Belastbarkeit von Angaben oder mögliche textliche Konkretisierungen, beispielsweise zu den Kosten oder zum Zeitaufwand, sind in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu dem jeweiligen Attribut hinterlegt.

Zu beachten ist, dass die längerfristige Nutzbarkeit der Informationen in einigen Attributfeldern nur mit einer entsprechenden Pflege der Datenbank gelingen kann. Betroffen hiervon sind insbesondere Kosten für Erkundungsmaßnahmen sowie die jeweilige Marktverfügbarkeit der Messmethode.

3.4.1 Allgemeine, kurze Beschreibung der Messmethode

Unter diesem Attribut ist eine kurze, einführende Beschreibung der wesentlichen Eigenschaften der jeweiligen Messmethode enthalten. Durch die Reduktion auf Kerninhalte an dieser Stelle soll gewährleistet sein, dass jede der für die Datenbank vorgesehenen Methoden zumindest fundamental erklärt wird. Es wird kurz die prinzipielle Funktionsweise und ggf. der theoretische Hintergrund erläutert. Zudem kann auch auf Vorteile und mögliche Einschränkungen der Messmethode eingegangen werden.

Vereinzelt kann auch auf einzelne Punkte detaillierter eingegangen werden, falls ein allgemeiner und relevanter Aspekt nicht durch die im folgenden dargestellte Attribut-Abfrage abgedeckt wird. Ansonsten werden die Bemerkungsfelder der jeweiligen Attribute genutzt. Sinnvolle Synergien mit anderen Untersuchungsmethoden könnten auch in der allgemeinen Beschreibung zur Methode erfasst werden. Die Abfrage der Eignung für spezifische Erkundungsziele und mögliche Methodenkombinationen erfolgt jedoch in der Abfrage der Verknüpfung von Methoden mit Erkundungszielen (siehe Kapitel 3.5).

Bei einigen Methoden wurde zusätzliches Informationsmaterial zur Messmethode und längere Beschreibungen im extra dafür vorgesehenen Upload-Bereich hinterlegt. Langfristig besteht in diesem Bereich die Möglichkeit, eine Methode ausführlicher zu beschreiben, und es kann in Zukunft jeweils aktuellen Entwicklungen auf dem Methodensektor Rechnung getragen werden.

Da bei einigen Methoden aufgrund ihrer Komplexität - zumindest im Rahmen der initialen Erstellung der Datenbank - nicht alle Aspekte der Methoden im gleichen Tiefgang und Detaillierungsgrad beschrieben werden können, soll insbesondere zielgerichtet auf Literatur verwiesen werden. Die entsprechende Literatur kann im Literaturverzeichnis der Datenbank mit der Methode verknüpft werden.

3.4.2 Art der Messmethode

Dieses Attribut beschreibt, wo die Messungen konkret durchgeführt werden können. Zur Auswahl stehen die vorgegebenen Einträge: Oberfläche, Luft, Bohrloch und Labor. Mehrfachnennungen sind zulässig. Dabei ist zu beachten, dass die daraus resultierenden unterschiedlichen Messgeometrien auch unterschiedliche Eigenschaften der Messungen in

Bezug auf die Attribute zeigen können. Vermischt man diese unterschiedlichen Geometrien durch Mehrfachauswahl, muss der Aussagewert der Informationen in den Attributen vom Nutzer überprüft werden. Ergänzend zur ursprünglichen Aufgabenstellung wurde die Art der Messmethode: „Labor“ hinzugefügt, um den Methodenkomplex der laborativen Messmethoden erfassen und abzugrenzen zu können. Bemerkungen der Methodenfachleute erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut.

3.4.3 Art der Messung

In diesem Attribut wird abgefragt, wie viele Dimensionen die Messung der entsprechenden Messmethode in Bezug auf das untersuchte Gesteinsvolumen hat. Zur Auswahl stehen die vorgegebenen Einträge Punktmessung, Profilmessung, Flächenmessung und Volumensmessung. Mehrfachnennungen sind zulässig. Ergänzend zur ursprünglichen Aufgabenstellung wurde noch die Art der Messung: „Volumensmessung“ hinzugefügt, um die entsprechenden Messmethoden erfassen und abzugrenzen zu können. Bemerkungen der Methodenfachleute erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut.

3.4.4 Messgrößen und ermittelte Zielgrößen

Unter diesem Attribut wird abgefragt, welche Messgrößen und ermittelte Zielgrößen bzw. Materialparameter von der Methode direkt oder möglicherweise indirekt erfasst werden können. Für seismische Messungen zum Beispiel ist eine Messgröße die Laufzeit der P- oder S-Welle; die ermittelte Zielgröße hingegen die Schichtmächtigkeit oder die seismische Geschwindigkeit. Bemerkungen der Methodenfachleute, z. B. zu weiteren Datenbearbeitungsschritten, die zur Ermittlung der Zielgrößen notwendig sind, erscheinen in einem dafür vorgesehenen Textfeld zu diesem Attribut.

3.4.5 Eindringtiefe

Unter diesem Attribut wird, falls für die Methode relevant und zutreffend, die Eindringtiefe der jeweiligen Messmethode ausgegeben. Dies kann z. B. die Eindringtiefe in den Untergrund bzw. in den zu analysierenden Probenkörper oder bei Bohrlochsonden die Eindringtiefe der Messmethode in das umgebende Gestein sein.

Es geht an dieser Stelle darum, die Spannbreite einer Methode in Bezug auf diesen Parameter darzustellen, auch um eine mögliche flexible Nutzung der Methode zu dokumentieren. In diesem Sinne wurde die Angabe „Eindringtiefe von“ und „Eindringtiefe bis“ als Zahlenwert abgefragt. Passende Längeneinheiten werden über eine Dropdown-Auswahl zur Verfügung gestellt: nm, μ m, mm, cm, m. Mit dieser, durch die Gestaltung des

Attributfeldes formalisierten, Vorgehensweise können mögliche Spannbreiten, auch im Sinne von zukünftigen Abfragen, ausgegeben werden. Bemerkungen der Methodenfachleute erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut.

3.4.6 Laterale und vertikale Auflösung

Unter diesem Attribut wird, falls für die Methode relevant und zutreffend, die laterale und vertikale Auflösung der jeweiligen Messmethode ausgegeben. Es zeigte sich, dass dies eher für die geophysikalischen Methoden von Bedeutung ist. Bei den Labormethoden kann z. B. die Probenkörpergröße oder bei entsprechenden Line-Scans der Messpunktstand genannt werden. Bei einigen mineralogischen oder geochemischen Verfahren, für die häufig Pulverproben benötigt werden, ist die laterale und vertikale Auflösung nicht von der eingesetzten Messmethode, sondern von der Art der Probenahme an dem zu untersuchenden Probekörper abhängig. Entsprechend erfolgte in solchen Fällen in der Datenbank der Eintrag „keine Angabe“.

Es geht bei diesem Attribut darum, die Spannweite einer Methode in Bezug auf diesen Parameter darzustellen, auch um einen möglichst breiten Anwendungsbereich der Methode zu dokumentieren. In diesem Sinne wurde die Angabe „laterale / vertikale Auflösung von“ und „laterale / vertikale Auflösung bis“ als Zahlenwert abgefragt. Passende Längeneinheiten werden über eine Dropdown-Auswahl zur Verfügung gestellt: nm, μm , mm, cm, m. Mit dieser, durch die Gestaltung des Attributfeldes formalisierten, Vorgehensweise können mögliche Spannbreiten, auch im Sinne von zukünftigen Abfragen, ausgegeben werden. Bemerkungen der Methodenfachleute erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut.

3.4.7 Messunsicherheit

Dieses Attribut liefert eine Abschätzung der Messunsicherheit bzw. eine Bewertung der Ungenauigkeit der jeweiligen Messmethode, und ggf. die Nennung von möglichen Fehlerquellen / Auflösungsgrenzen. Für Methoden kann hier eine Gesamtbewertung von Messung und Auswertung aufgrund von Erfahrungswerten stehen. Für viele Methoden ist dieses Attribut nicht eindeutig zu bedienen. In der Fachliteratur wird dieser Aspekt beispielsweise für die Auswertung von Reflexionsseismik in Jones (2010) als nicht-trivial diskutiert und damit die Abwesenheit von Fehlerbalken in Veröffentlichungen seismischer Daten begründet. Zudem machen beispielsweise Herwanger & Koutsabeloulis (2011) darauf aufmerksam, dass je nach Auswerteprodukt einer Methode noch unzureichend verstandene physikalische Zusammenhänge von Phänomenen eine Angabe einer Messunsicherheit nicht sinnvoll erscheinen lassen. Für Labormethoden erfolgte die Nennung der Nachweisgrenzen

oder von typischen Fehlerbereichen und / oder Schwankungsbreiten. Die formalisierte Abfrage erfolgte deshalb simplifizierend über die Wertungsgruppen gering, mittel und hoch.

Bemerkungen der Methodenfachleute zur Präzisierung der Messunsicherheit erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Messunsicherheit je nach Messziel / Messkonfiguration oder untersuchtem Gesteinstyp deutlichen Variationen unterliegen kann.

3.4.8 Kostenaufwand

Mit diesem Attribut (Dropdown–Auswahl) sollte der Kostenaufwand, sofern bekannt oder recherchierbar, für den Einsatz der Messmethode eingeschätzt und relevante Einflussfaktoren benannt werden. Diese Angabe soll in der Einheit Euro bzw. tausend Euro (TEuro) abgeschätzt werden.

Sofern Angaben zum Kostenaufwand enthalten sind, gelten diese zum Zeitpunkt der Berichtserstellung. Sie unterliegen starken markttypischen und erfahrungsgemäß auftrags-spezifischen Schwankungen, sind nur als grober Richtwert zu verstehen und im Zweifelsfall durch aktuelle Angebote / Vergaben abzugleichen.

Obwohl die Angaben „Kostenaufwand von“ und „Kostenaufwand bis“ als Zahlen eingetragen werden sollen, sind die Felder jeweils als Textfeld definiert, um auch den Eintrag „keine Angabe“ (k. A.) zuzulassen. Es geht bei diesem Attribut darum, eine Spannweite der möglichen Kosten darzustellen. Mit dieser, durch die Gestaltung des Attributfeldes formalisierten, Vorgehensweise können mögliche Spannweiten, auch im Sinne von zukünftigen Abfragen, ausgegeben werden.

Bemerkungen der Methodenfachleute erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut; falls nötig werden hier die Abhängigkeit bzw. relevante Einflussfaktoren der Kosten näher erläutert (z. B. pro Probe, pro Bohrmeter, pro Flächeneinheit) oder die Kosten weiter aufgeschlüsselt (für Personal, für Material, inkl. oder exklusive Mobilisierung, Demobilisierung, etc.).

3.4.9 Zeitaufwand

Mit diesem Attribut soll der Zeitaufwand für den Einsatz der Messmethode eingeschätzt werden. Dabei soll nicht nur die reine Messzeit (für manche Laboranwendungen sehr gering), sondern auch der Zeitbedarf für die Proben- und Messvorbereitung berücksichtigt werden. Auch an dieser Stelle wurden die Angaben „Zeitaufwand von“ und „Zeitaufwand bis“ als Zahlenwert abgefragt. Passende Zeiteinheiten werden über eine Dropdown-

Auswahl zur Verfügung gestellt: Minuten, Stunden, Tage, Wochen und Monate. Mit dieser, durch die Gestaltung des Attributfeldes formalisierten, Vorgehensweise können mögliche Spannbreiten, auch im Sinne von zukünftigen Abfragen, ausgegeben werden.

Bemerkungen der Methodenfachleute erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut. Über dieses Bemerkungsfeld besteht die Möglichkeit, die Abhängigkeit des Zeitaufwandes für die jeweilige Messmethode näher zu erfassen (z. B. Messzeit pro Probe, pro Bohrmeter, pro Fläche) oder den im Attribut genannten Zeitaufwand weiter aufzuschlüsseln (für die Probenvorbereitung, eigentliche Messzeit etc.).

3.4.10 Messequipment

Mit diesem Attribut wird das für eine erfolgreiche Erkundung nötige Messequipment (für Geophysik z. B.: Quellen, Empfänger, entsprechende Messkonfiguration) oder für Labormethoden die Messapparatur bzw. zusätzlich benötigte Geräte zur Probenvorbereitung ausgegeben. Durch die fachübergreifenden Messmethoden und Einsatzzwecke erfolgte diese Angabe nicht formalisiert, sondern über ein Freitextfeld.

Mögliche Erläuterungen zum benötigten Messequipment bzw. zur Messapparatur und ggf. zur Probenvorbereitung sind ebenfalls im Textfeld hinterlegt. Weiterführende, unterstützende Literatur zum Messequipment kann hier zitiert werden und findet sich im Literaturverzeichnis der jeweiligen Methode.

3.4.11 Auswerteaufwand

Mit diesem Attribut wird der Auswerteaufwand der jeweiligen Methode zur Gewinnung der relevanten Messparameter abgeschätzt. Bei einem Teil der geophysikalischen Methoden entspricht dies dem „Prozessingaufwand“. Bei Labormethoden wird hier der Aufwand für die Auswertung, ggf. notwendige Umrechnungen, Fehlerbetrachtungen und / oder Kalibrierung mit Standards ausgegeben. Der Interpretationsaufwand für eine finale, integrierende Interpretation sollte an dieser Stelle allerdings ausgespart werden, weil er zielabhängig ist und oft die Kombination mehrerer Messmethoden beinhaltet.

Auch an dieser Stelle werden die Angaben „Auswerteaufwand von“ und „Auswerteaufwand bis“ als Zahlenwert abgefragt. Passende Zeiteinheiten werden über eine Dropdown-Auswahl zur Verfügung gestellt: Minuten, Stunden, Tage, Wochen und Monate. Mit dieser, durch die Gestaltung des Attributfeldes formalisierten, Vorgehensweise können mögliche Spannbreiten, auch im Sinne von zukünftigen Abfragen, ausgegeben werden.

Bemerkungen der Methodenfachleute zur Präzisierung des Auswerteaufwandes erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut. Allgemein zu beachten ist, dass der Auswerteaufwand von der Auswertemethode, der Fragestellung und z. B. auch von der Erfahrung des Bearbeiters in der Untersuchung der vorliegenden Lithologie abhängig ist.

3.4.12 Marktverfügbarkeit

Mit diesem Attribut soll eine erste Abschätzung der Marktverfügbarkeit dieser Methode getroffen werden. Zur Auswahl stehen die Angaben „keine Angabe“, „gering“, „mittel“ und „hoch“. Grundsätzlich wird den abgebildeten Methoden eine generelle Marktverfügbarkeit unterstellt.

Eine geringe Marktverfügbarkeit würde einer Methode entsprechen, die nur vereinzelt bei kommerziellen Anbietern, Universitäten oder Forschungsinstituten zur Verfügung steht, eine hohe Marktverfügbarkeit wäre bei einer technisch etablierten „Standard“-Messmethode gegeben, die von zahlreichen kommerziellen Laboren und Firmen und weltweit angeboten wird.

Sofern Angaben zur Marktverfügbarkeit enthalten sind, beziehen sich diese auf den Zeitpunkt der Berichtserstellung. Sie unterliegen starken markttypischen Schwankungen, sind nur als grober Richtwert zu verstehen und im Zweifelsfall durch aktuelle Markterhebungen abzugleichen. Erläuternde Bemerkungen der Methodenfachleute zur Marktverfügbarkeit erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut.

3.4.13 Eignung für die drei Wirtsgesteinstypen

Ein wichtiger Aspekt der Datenbank ist die Abfrage der Erkundungsmethoden hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Einsatzeignung in den verschiedenen Wirtsgesteinen nach StandAG (Tongestein, Steinsalz und Kristallingestein). Mit drei Attributen (je eines pro Wirtsgestein) wird die allgemeine Eignung der Methode jeweils für eine Anwendung für diese drei Wirtsgesteinstypen in der Datenbank angezeigt. Dies erfolgt über die Wertungsgruppen „nicht geeignet“ (--), „weniger gut geeignet“ (-), „gut geeignet“ (+) und „sehr gut geeignet“ (++) . Konkretisierende Bemerkungen erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut.

Im Rahmen der Bearbeitung zeigte sich, dass die pauschale Aussage der Eignung einer Methode für die unterschiedlichen Wirtsgesteine eine zu einfache Betrachtung ist und im Kontext der Erkundungsziele bewertet werden muss. Deshalb wurde die Betrachtung der Wirtsgesteineignung einer Methode in die Abfrage der Eignung für

Erkundungsziele integriert (siehe folgendes Kapitel). Da einzelne Ziele sich nicht nur auf die drei Wirtsgesteinstypen, sondern auch auf das Deckgebirge beziehen, führte dies zu einer weiteren Kategorisierung. Soweit sich also Erkundungsziele nicht von vornherein auf bestimmte Wirtsgesteine oder das Deckgebirge beziehen, werden sie in der Datenbank aufgeschlüsselt nach Tongestein, Steinsalz, Kristallingestein oder diverses Gestein, was oft das Deckgebirge, aber auch das die Wirtsgesteinsformation unterlagernde Gebirge umfasst. Die Wirtsgesteine werden separat für eine Eignung mit Methoden verknüpft.

3.5 Verknüpfung von Methoden mit Erkundungszielen

Ein signifikanter Aspekt der Methodendatenbank ist die Verknüpfung der jeweiligen Methoden mit Erkundungszielen gemäß StandAG. Dazu steht eine tabellarische Übersicht aller Erkundungsziele zur Verfügung, die mehrere Filtermöglichkeiten zur optimierten Anzeige besitzt.

Die an den Zielen festgemachten Methodenkombinationen an sich stellen eine Generalisierung dar, die im Einzelfall oder an einzelnen Standorten aufgrund der dort vorherrschenden geologischen Verhältnisse zu überprüfen ist. Die Bemerkungen in den entsprechenden Methodenattributen sind zu berücksichtigen.

Die Erkundungsziele wurden in die Datenbankstruktur integriert, um darin einen differenzierten Bezug von Zielen und Erkundungsmethoden zu ermöglichen. Derzeit sind über 175 Erkundungsziele in der Datenbank enthalten. Für die Verknüpfung der Ziele mit geowissenschaftlichen Erkundungsmethoden wurde eine Auftrennung der Erkundungsziele nach Wirtsgesteinen vorgenommen, da die drei Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein im Auswahlprozess in Betracht kommen und Erkundungsmethoden aufgrund unterschiedlicher Wirtsgesteinseigenschaften entsprechend unterschiedlich gut für deren Erkundung geeignet sind. Zusätzlich enthält die Datenbank GeM-DB bezüglich der Erkundungsziele mögliche Methodenkombinationen, um die Planung wirtsgesteinsspezifischer Erkundungsprogramme zu unterstützen.

Zudem war es notwendig, die Erkundungsziele geringfügig anzupassen und kombinierte Ziele, die prinzipiell aus mehreren Einzelzielen bestanden, aufzutrennen. Als Beispiel sei hier das folgende Erkundungsziel laut Erkundungszielebericht genannt:

- Räumliche Variation der gebirgsmechanischen, chemischen und petrologischen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen.

Dieses wurde für die Methodendatenbank GeM-DB folgendermaßen aufbereitet:

- Räumliche Variation der gebirgsmechanischen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen,
- Räumliche Variation der chemischen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen,
- Räumliche Variation der petrologischen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen.

Zusätzlich zu der grundsätzlichen Einsatzzeichnung der jeweiligen Erkundungsmethoden in den verschiedenen Wirtsgesteinen nach StandAG (Kapitel 3.4.13) soll die spezifische Unterscheidung der Eignung nach Wirtsgesteinstyp an den Erkundungszielen festgemacht werden. Dazu dienen Felder zum Ausfüllen der Wirtsgesteinseignung, die für das jeweilige Ziel relevant sind; so sollen Fehleinträge von vorneherein ausgeschlossen werden. Folgende Abkürzungen finden in der Datenbank Verwendung:

- K = Kristallin,
- S = Steinsalz und
- T = Tongestein.

Einige Ziele beziehen sich nicht auf das Wirtsgestein, sondern z. B. nur auf das Deckgebirge. Als Beispiel sei an die aus dem Abwägungskriterium AwK-11 (Schutz des ewG durch Deckgebirge) abgeleiteten Ziele verwiesen. Zur Erfassung dieser Ziele wird zusätzlich zu K, S und T eine vierte Kategorie in der Datenbank als D = Diverses Gestein definiert, da die darunterfallenden Ziele sich nicht ausschließlich auf das Deckgebirge beziehen (in einigen Fällen auch auf das unterlagernde Gestein).

Neben der Eignung für die Wirtsgesteinstypen werden bei der Erfassung der Zieleignung auch Vorschläge für sinnvolle Methodenkombinationen konkreter dargestellt als in der allgemeinen Beschreibung der Methode. Hier könnte die Angabe erfolgen, dass ein bestimmtes Erkundungsziel nur mit einer spezifischen Methodenkombination erreichbar ist. Erläuternde Bemerkungen zu den Zieleverknüpfungen erscheinen in einem dafür vorgesehenen, zusätzlichen Textfeld zu diesem Attribut.

4 Genehmigungsvoraussetzungen

Geowissenschaftliche Untersuchungen zur Erforschung des Untergrundes unterliegen auch dem Bundesberggesetz (BBergG) und unterlagen bis 2020 dem Lagerstättengesetz (LagerstG). Das Lagerstättengesetz wurde 2020 vom Geologiedatengesetz (GeolDG) abgelöst. In den Gesetzen werden sowohl Genehmigungspflichten gegenüber Eigentümern und Behörden als auch Anzeige-, Mitteilungs- und Auskunftspflicht gegenüber zuständigen Staatlichen Geologischen Diensten geregelt. Zweifelsfälle in Bezug auf die Anwendung der Vorschriften sind durch Rücksprache mit dem zuständigen geologischen Dienst zu klären. Zusätzlich zum BBergG und GeolDG können im Einzelfall wasserrechtliche, umweltverträglichkeitsrechtliche, bodenschutzrechtliche, naturschutzrechtliche, immissionschutzrechtliche, strahlenschutzrechtliche, landwirtschaftsrechtliche, forstrechtliche, bodenschutzrechtliche und baurechtliche Bestimmungen für Erkundungsmaßnahmen relevant sein. Eine Zusammenstellung der inhaltlichen Verknüpfung dieser Vorschriften, Verordnungen und Gesetze aus dem Umwelt- und Energiesektor findet sich in WEKA (2020). Sofern die Erkundungsmaßnahme dem Bergrecht unterliegt, ist im Zweifel Rücksprache mit der jeweiligen bergrechtlichen Genehmigungsbehörde zu halten, der im Rahmen von Genehmigungsverfahren eine Bündelungsfunktion zugeordnet ist. Informationen zu erforderlichen Genehmigungen, Betriebsplänen und relevante Unterlagen zur entsprechenden Antragstellung finden sich z. B. auf der Online-Plattform „BergPass“ des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) des Landes Niedersachsen (z. B. Schweda 2017). In Anlehnung an entsprechende Vorschriften ist in Knödel et al. (2005) eine Checkliste für die Vorbereitung geophysikalischer Messungen abgedruckt, die auch heute als Grundlage für solche Vorhaben dienen kann. Zur Berücksichtigung aktueller rechtlicher Rahmenbedingungen sollte die spezielle Expertise von Auftragnehmern bezüglich Genehmigungsvoraussetzungen ihrer jeweiligen Erkundungsmethode eingeholt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeitspakete GeoMePS und ZuBeMERk wird, basierend auf einer Auswertung von Literatur und von Erfahrungen in Standorterkundungsprogrammen und bisherigen Endlagerprojekten, der aktuelle Stand der Technik zu den übertägig und in Bohrungen einsetzbaren geowissenschaftlichen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden erarbeitet und in Form einer relationalen Datenbank dokumentiert. In der Datenbank können geeignete Methoden zur übertägigen Erkundung recherchiert werden. Dabei werden oberflächen-, luft- und bohrloch-gestützte Methoden einbezogen und hinsichtlich einer möglichen Anwendung im Zuge der übertägigen Erkundung gemäß StandAG eingeordnet.

Ein Kernelement der im Rahmen der beiden Arbeitspakete entwickelten Methodendatenbank GeM-DB bildet die Auswahl und Verknüpfung der jeweiligen Methode mit für den Standortauswahlprozess definierten Erkundungszielen. Dementsprechend dienen als Grundlage der Methodenauswahl die aus dem Standortauswahlgesetz (StandAG) abgeleiteten Erkundungsziele (Kneucker et al. 2020). Die Methodendatenbank GeM-DB erlaubt eine einfache und schnelle Aktualisierung und Ergänzung der darin enthaltenen Informationen und ermöglicht schnelle Suchmöglichkeiten durch Abfragen bzw. Filterung nach Attributen. Inhalte können mit Hilfe von Exportfunktionen in Berichtsform ausgegeben werden. Die Datenbank ist so aufgebaut, dass sie z. B. an mögliche technische Entwicklungen auf dem Methodensektor kontinuierlich angepasst werden oder bei Bedarf auch um weitere Erkundungsmethoden erweitert werden kann. Weitere Details zur Datenbankstruktur, ihren Inhalten sowie die Funktionen der GeM-DB finden sich in einem separaten technischen Bericht (Beilecke et al. 2021).

Die in der Datenbank gespeicherten Informationen und Verknüpfungen sollen die Grundlage für ein zukünftig zu erstellendes, interdisziplinäres Erkundungsprogramm für Standortregionen, separiert nach den drei Wirtsgesteinstypen (Steinsalz, Ton- und Kristallingestein) bilden. Dieses soll hinsichtlich der einzelnen Erkundungsziele abgeleitet werden können und Experten unterstützen, gezielt Methoden in den unterschiedlichen Fachdisziplinen abzufragen, um kombinierte Erkundungsmaßnahmen zu planen. Zur umfassenden Charakterisierung eines Gebiets ist es notwendig, geowissenschaftliche Informationen aus einer Vielzahl von Messmethoden und Interpretations-Verfahrenen zu einer Standortregion ganzheitlich zu dokumentieren und interpretieren, um so zu einer konsistenten Darstellung, insbesondere der für die Sicherheit des Endlagers relevanten geowissenschaftlichen Gegebenheiten, zu kommen.

Aufbauend auf der datenbankbasierten Methodenzusammenstellung und auf der ergänzenden Auswertung von nationalen und internationalen Fallstudien werden in der weiteren Projektbearbeitung konkrete Empfehlungen für Erkundungsprogramme zur übertägigen Standorterkundung im Rahmen der Standortauswahl erarbeitet.

Literaturverzeichnis

- Beilecke, T., Kneuker, T., Semroch, R., Dlugosch, R., Pollok, L. & Schubarth-Engelschall, N. (2021): Zwischenbericht zur Nutzung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht, 31 S.; Hannover.
- BGE (2019): Bericht der BGE mbH über die Durchführung des Standortauswahlverfahrens, II. Quartal 2019. Geschäftszeichen: SG01101/2-4/3-2019#4. Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH, Bericht: 21 S.; Peine.
- BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG – Stand 28.09.2020. Geschäftszeichen: SG01101/16-1/2-2019#3 – Objekt-ID: 755925. Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH, Bericht: 444 S., Peine.
- Herwanger, J. & Koutsabeloulis, N. (2011): Seismic Geomechanics. How to Build and Calibrate Geomechanical Models using 3D and 4D Seismic Data. 2181 S.; Houten (EAGE Publ. bv).
- Jones, I.F. (2010): An Introduction to: Velocity Model Building. 295 S.; Houten (EAGE Publ. bv).
- Kneuker, T., Bartels, A., Bebiolka, A., Beilecke, T., Frithjof, B., 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. L. & Weber, J. R. (2020): Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung gemäß § 16 StandAG. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht; 78 S.; Hannover.
- Knödel, K., Krummel, H. & Lange, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten - Band 3: Geophysik. 1102 S.; Heidelberg (Springer-Verlag).
- Martin, C., Bischof, N. & Eiblmaier, M. (2002): Lexikon der Geowissenschaften in sechs Bänden. 2840 S.; Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).
- Murawski & Meyer (2010): Geologisches Wörterbuch - 12. Auflage. 220 S.; Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).

Schweda, N. (2017): BergPass - ein neues Antragssystem für Rohstoffprojekte. Erdöl, Erdgas, Kohle: Aufsuchung und Gewinnung, Verbreitung und Anwendung, Petrochemie, Kohleveredlung. Organ der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle, 133: S. 145-148.

StandAG (2017): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist (Standortauswahlgesetz - StandAG).

WEKA (2020): Gesetzeskompass Umweltschutz und Energie – Stand August 2020. Titelnummer 01944-2020; 2 S.; Kissing (WEKA MEDIA GmbH & Co. KG). ISBN 978-3-8111-0298-9.

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AES	Atomemissionsspektrometrie
AP	Arbeitspaket
Ar-Ar	Argon-Argon
AwK	Abwägungskriterium
BBergG	Bundesberggesetz
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CT	Computertomographie
EM	elektromagnetisch
EPMA	Elektronenstrahlmikrosonde
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
GeM-DB	Geowissenschaftliche Methoden – Datenbank
GeoIDG	Geologiedatengesetz
GeoMePS	Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung
GC	Gaschromatographie
GPS	Global Positioning System
i. d. R.	in der Regel
K-Ar	Kalium-Argon
LagerstG	Lagerstättengesetz
LBEG	Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LiDAR	Light Detection and Ranging
NMR	Nuclear magnetic resonance (Kernspinresonanz)
RDA	Röntgendiffraktometrie

RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SAR	Synthetic Aperture Radar
SNMR	Surface nuclear magnetic resonance (Oberflächen-Kernspinresonanz)
PDF	Portable Document Format
PHP	PHP: Hypertext Preprocessor
SQL	Structured Query Language
StandAG	Standortauswahlgesetz
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
ZuBeMERk	Zusammenstellung und Bewertung von geophysikalischen Methoden zur übertägigen Erkundung

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Übersicht zu den in der Methodendatenbank hinterlegten Attributen und deren Einheiten zu den jeweiligen Erkundungsmethoden. AP = Arbeitspaket.	21

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Schematische Darstellung vom Ablauf des Standortauswahlverfahrens (BGE 2019)	6
Abb. 2: Kernelemente der beiden Arbeitspakete GeoMePS und ZuBeMErk bei der Zusammenstellung und Bewertung von Methoden für die übertägige Standorterkundung, inkl. der „Rückkopplung“ mit Erkundungsprogrammen und Fallstudien.	9
Abb. 3: Grundlagen für die übertägige Erkundung	11
Abb. 4: Methodenauswahl in der Web-Oberfläche der Methodendatenbank GeM-DB, in der geophysikalische und andere geowissenschaftliche Untersuchungsmethoden zur übertägigen Standorterkundung zusammengestellt sind.	14
Abb. 5: Darstellung einer Methodenbeschreibung in einem Web-Browser nach Export in eine PDF-Datei; hier „Nuklearmagnetische Resonanz von der Oberfläche“ mit Zeitstempel.	40
Abb. 6: SNMR-Datenbeispiel und Vergleich mit Lithologie (Quelle: BGR)	41
Abb. 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus für die Oberflächen-NMR (Quelle: BGR)	43

Anhangverzeichnis	Seite
Anhang 1:	40
Methodenbeispiel „Nuklearmagnetische Resonanz von der Oberfläche“ als Auszug aus der Datenbank	

Anhang 1:

Methodenbeispiel „Nuklearmagnetische Resonanz von der Oberfläche“ als Auszug aus der Datenbank

Allgemeines zur Methode

Art der Messmethode	Oberfläche
Bemerkungen zur Art der Messmethode	<ul style="list-style-type: none"> - Ähnlich zum Verfahren der Transienten-Elektromagnetik werden kreisförmige oder quadratische Kabelspulen auf der Oberfläche ausgelegt (Durchmesser: 10 bis 150 m). - Die Kernspinnmagnetisierung der Protonen in den Wassermolekülen wird angeregt und gemessen.
Art der Messung	Profilmessung
Bemerkungen zur Art der Messung	<ul style="list-style-type: none"> - Das Ergebnis einer Einzelmessung ist die vertikale Verteilung von Wassergehalt und NMR-Relaxationszeit bis in eine Tiefe von maximal 100 m. - Mehrere Einzelmessungen können zu profil- oder flächenhafter Information zusammengefasst werden.
Messgrößen und ermittelte Zielgrößen	<p>Messgröße: Wassergehalt, NMR-Relaxationszeit</p> <p>Ermittelte Zielgröße: Wassergehalt, mittlere Porengröße, hydraulische Leitfähigkeit/Permeabilität</p>
Bemerkungen zu Messgrößen und ermittelte Zielgrößen	<ul style="list-style-type: none"> - Die Messgröße ist eine in der Messspule induzierte Spannung, welche direkt auf die erfasste Wassermenge zurückgeführt werden kann. - Diese Wassermenge wird mit Bezug auf den gesamten Erfassungsbereich des Spulensystems in eine Wassergehaltsschätzung (Vol%) umgerechnet.
Eindringtiefe	1 m - 100 m
Bemerkungen zur Eindringtiefe	<ul style="list-style-type: none"> - Die Eindringtiefe entspricht ca. dem Durchmesser der benutzten Transmitterspule an der Oberfläche. - Die Eindringtiefe sinkt aber auch mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit im Untergrund: z.B. reduziert sich die Eindringtiefe einer 100-m Spule auf wenige Meter, wenn Salzwasser im Untergrund vorherrscht.
Laterale Auflösung	keine Angabe bzw. nicht zutreffend
Bemerkungen zur lateralen Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> - Laterale Information wird mit dem SNMR-Verfahren nur erhoben, wenn mehrere Einzel-Messpunkte aneinandergereiht werden. - Laterales Auflösungsvermögen ist somit nur vom Abstand der Einzelmessungen abhängig.
Vertikale Auflösung	10 m
Bemerkungen zur vertikalen Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> - Die vertikale Auflösung ist extrem empfindlich gegenüber der Signalqualität, da eine Inversionsrechnung zu Grunde liegt. - Oberflächennah werden die besten Auflösungen erzielt (-/+ 0,5 m in einer Tiefe von nur wenigen Metern). - Mit zunehmender Tiefe nimmt die Auflösung naturgemäß stark ab.
Messunsicherheit	hoch

Abb. 5: Darstellung einer Methodenbeschreibung in einem Web-Browser nach Export in eine PDF-Datei; hier „Nuklearmagnetische Resonanz von der Oberfläche“ mit Zeitstempel.

Kurzbeschreibung der Methode

Das nichtinvasive Nuklearmagnetische Resonanzverfahren von der (Erd-)Oberfläche (SNMR) dient zum direkten Nachweis von fließfähigem Grundwasser in porösen Gesteinsformationen und wird somit üblicherweise zur Erkundung und Charakterisierung von Aquifersystemen bis in eine Tiefe von ca. 100 m eingesetzt (Behroozmand et al. 2014; Müller-Petke & Yaramanci 2015). Die Messmethode wird zu den Elektromagnetischen (EM) Verfahren gezählt und üblicherweise als Sondiermethode, also als eindimensionales (1D) Verfahren, eingesetzt. Analog zu anderen EM-Verfahren lassen sich jedoch mehrere SNMR-Messpunkte im Gelände zu profil- oder flächenhaften Aussagen zusammenfassen. Echte 2D oder 3D Anwendungen der SNMR hingegen sind sehr zeitaufwendig und im Vergleich zur 1D Variante ist das Eindringvermögen deutlich reduziert.

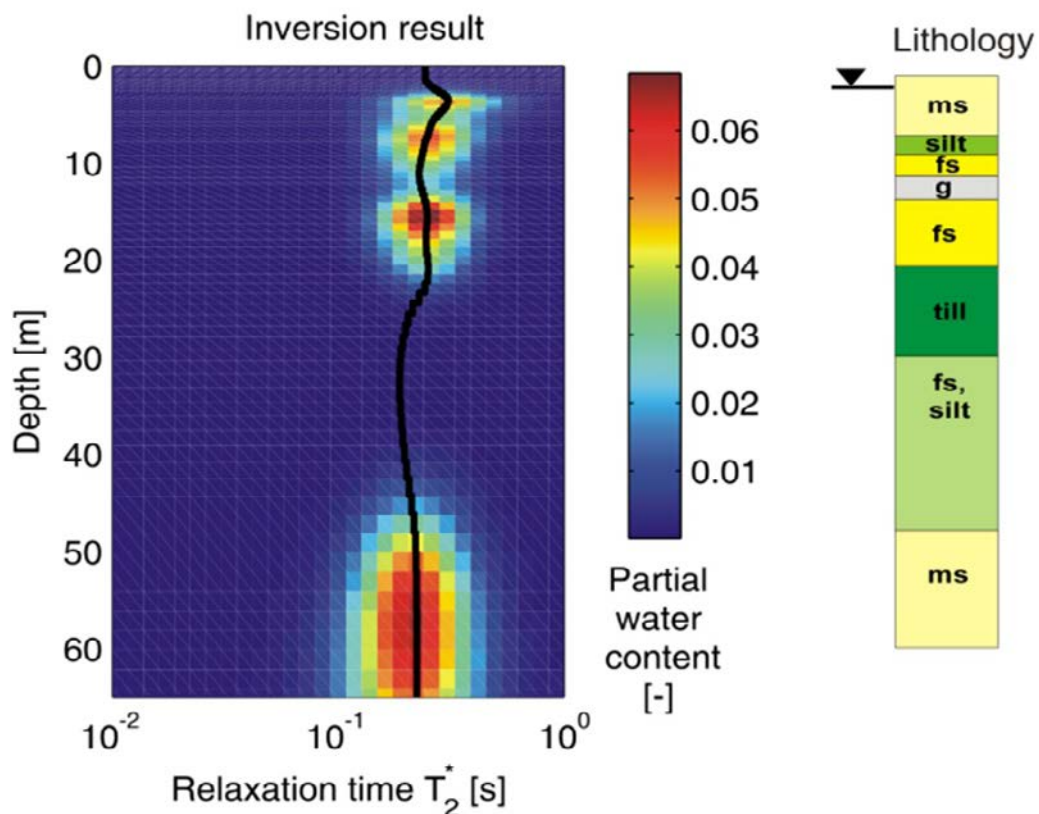


Abb. 6: SNMR-Datenbeispiel und Vergleich mit Lithologie (Quelle: BGR)

SNMR nutzt den quantenmechanischen Effekt des Nuklearmagnetismus von Protonen in den (Grund-)Wassermolekülen. Diese besitzen durch ihren Kernspin ein magnetisches Moment, welches im Erdmagnetfeld ausgerichtet ist. Durch die Überlagerung ganzer Spin-Ensembles entsteht die sogenannte Spin-Magnetisierung, die durch Einwirkung von geeigneten EM-Feldern gezielt manipuliert werden kann. Bei der üblichen Anwendung

- Anhang 1 -

der 1D SNMR, auch magnetische Resonanzsondierung bzw. MRS genannt, werden an der Oberfläche kreis- oder quadratförmige Kabelspulen als Transmitter- und Receiver-Antennen ausgelegt (Spulendurchmesser: 10 bis 150 m). Der Transmitter erzeugt ein pulsartiges EM-Wechselfeld, dessen Frequenz mit der Larmorfrequenz der Protonenspins im Untergrund übereinstimmt. Der Anregungspuls lenkt die Protonenspin-Magnetisierung im Erfassungsbereich des Spulensystems aus ihrer Gleichgewichtslage im Erdmagnetfeld aus. Wird der Puls abgeschaltet, kehren die Protonenspins in ihre Gleichgewichtslage zurück und induzieren dabei ihrerseits ein EM Feld und damit eine messbare Spannung in der Receiverspule (Abb. 7). Unterschiedliche Erkundungstiefen werden durch Variation der Stärke des Anregungspulses erreicht. Das Messsignal entspricht einer exponentiell abklingenden Relaxationskurve. Deren Amplitude ist proportional zur Anzahl der angeregten Protonen und damit zum Wassergehalt, während das Abklingverhalten, repräsentiert durch die Relaxationszeit, mit der mittleren Porengröße verknüpft ist. Je großräumiger der wassergefüllte Porenraum des untersuchten Gesteins ist, desto länger ist die Relaxationszeit. Sehr kleine Relaxationszeiten von wenigen Millisekunden können wegen der Gerätetotzeit zwischen Sende- und Empfangsmodus nicht erfasst werden. Daher wird in feinem Material stark gebundenes Porenwasser, z. B. tongebundenes Wasser, nicht gemessen und entsprechende Schichten tauchen im Endergebnis mit deutlich vermindertem oder verschwindendem Wassergehalt auf. Dieses Endergebnis wird durch eine Inversionsrechnung erzeugt, die mehrere Einzelmessungen mit unterschiedlichen Anregungsstärken, also unterschiedlichen Eindringtiefen, beinhalten muss, und liefert eine Abschätzung der vertikalen Verteilung des (mobilen) Wassergehaltes und der Relaxationszeit (Abb. 6). Um die Inversion der SNMR-Daten exakt durchzuführen, sind zusätzliche Messungen oder glaubwürdige Abschätzungen der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund notwendig. Da die Anregungsfrequenz (Larmorfrequenz) von der Stärke des Erdmagnetfeldes abhängig ist, begleiten auch geomagnetische Messungen jede SNMR-Kampagne. Darüber hinaus werden in der Praxis zusätzlich zu den oben genannten Messspulen weitere Receiversysteme aufgebaut, um das meist anthropogen erzeugte EM Hintergrundrauschen simultan zur Aufzeichnung des SNMR-Signals mitzumessen. Diese Zusatzinformation wird zur Erzeugung von adaptiven Filtern benötigt, durch die die sehr schwachen Signale der SNMR, nur wenige zehn bis einige hundert Nanovolt, meistens überhaupt erst quantifizierbar gemacht werden können.

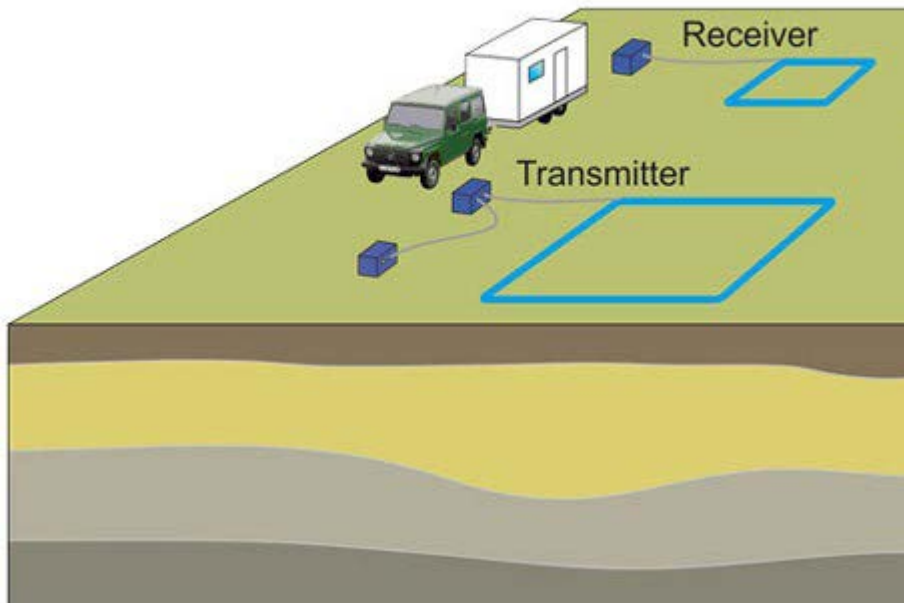


Abb. 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus für die Oberflächen-NMR (Quelle: BGR)

Art der Messmethode

- Oberfläche

Bemerkungen zur Art der Messmethode:

Ähnlich zum Verfahren der Transienten-Elektromagnetik werden kreisförmige oder quadratische Kabelspulen auf der Oberfläche ausgelegt (Durchmesser: 10 bis 150 m). Die Kernspinnmagnetisierung der Protonen in den Wassermolekülen wird angeregt und gemessen.

Art der Messung

- Profilmessung

Bemerkungen zur Art der Messung:

Das Ergebnis einer Einzelmessung ist die vertikale Verteilung von Wassergehalt und NMR-Relaxationszeit bis in eine Tiefe von maximal 100 m. Mehrere Einzelmessungen können zu profil- oder flächenhafter Information zusammengefasst werden.

- Anhang 1 -

Messgrößen und ermittelte Zielgrößen

- Messgröße: Wassergehalt, NMR-Relaxationszeit
- Ermittelte Zielgröße: Wassergehalt, mittlere Porengröße, hydraulische Leitfähigkeit/ Permeabilität

Bemerkungen zu Messgrößen und ermittelte Zielgröße:

Die Messgröße ist eine in der Messspule induzierte Spannung, welche direkt auf die erfasste Wassermenge zurückgeführt werden kann. Diese Wassermenge wird mit Bezug auf den gesamten Erfassungsbereich des Spulensystems in eine Wassergehaltsschätzung (Vol.-%) umgerechnet.

Eindringtiefe

- 1 m - 100 m

Bemerkungen zur Eindringtiefe:

Die Eindringtiefe entspricht ca. dem Durchmesser der benutzten Transmitterspule an der Oberfläche. Die Eindringtiefe sinkt aber auch mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit im Untergrund: z. B. reduziert sich die Eindringtiefe einer 100-m Spule auf wenige Meter, wenn Salzwasser im Untergrund vorherrscht.

Laterale Auflösung

- keine Angabe bzw. nicht zutreffend

Bemerkungen zur lateralen Auflösung:

Laterale Information wird mit dem SNMR-Verfahren nur erhoben, wenn mehrere Einzel-Messpunkte aneinandergereiht werden. Laterales Auflösungsvermögen ist somit nur vom Abstand der Einzelmessungen abhängig.

Vertikale Auflösung

- 10 m

Bemerkungen zur vertikalen Auflösung:

- Anhang 1 -

Die vertikale Auflösung ist extrem empfindlich gegenüber der Signalqualität, da eine Inversionsrechnung zu Grunde liegt. Oberflächennah werden die besten Auflösungen erzielt ($\pm 0,5$ m in einer Tiefe von nur wenigen Metern). Mit zunehmender Tiefe nimmt die Auflösung naturgemäß stark ab.

Messunsicherheit

- hoch

Bemerkungen zur Messunsicherheit:

Keine sinnvolle Angabe möglich, denn die exakte Quantifizierung des Wassergehaltes hängt von verschiedenen Faktoren ab, z. B. von der Regularisierung des Inversionsverfahrens und vom Signal-Rausch-Verhältnis. Andererseits, wird ein NMR-Signal nachgewiesen, ist mit großer Sicherheit davon auszugehen, dass fließfähiges Wasser im Messvolumen vorhanden sein muss.

Kostenaufwand

- keine Angabe bzw. nicht zutreffend

Bemerkungen zum Kostenaufwand:

Das SNMR-Verfahren wird in Europa nicht als Dienstleistung angeboten.

Zeitaufwand

- 1 Stunde - 6 Stunden

Bemerkungen zum Zeitaufwand:

Der Zeitaufwand für eine einzelne Sondierung ist von den elektromagnetischen Rauschbedingungen im Messgebiet abhängig und somit von der Anzahl an Wiederholungsmessungen, um die gewünschte Datenqualität zu erreichen.

Messequipment

- Komponenten des Messgerätes (in der Regel modularer Aufbau des Gerätes bei allen bekannten Herstellern): Zentraleinheit, Hochleistungs-Kondensatorbank, Transmittereinheit, diverse Receiverseinheiten, Steuer-Laptop.

- Anhang 1 -

- Messkabel für Transmitter- und Receiverspulen, insgesamt mehrere hundert Meter Länge.
- Kleingeräte für die Messlogistik: GPS, Winkelspiegel, Kompass, Entfernungsmessgeräte.
- Messequipment für Transiente Elektromagnetik oder vergleichbares elektr. Widerstandsverfahren (optional).
- Magnetometer zur Bestimmung und Monitoring der Larmorfrequenz (optional).

Auswerteaufwand

- 2 Stunden - 8 Stunden

Bemerkungen zum Auswerteaufwand:

Die Angaben gelten als „best guess“ für eine einzelne Sondierung, die mit einem handelsüblichen Rechner ausgewertet wird. Das Zeitreihen-Processing stellt einen oft unkalkulierbaren Faktor dar, denn dieses muss auf die standort-spezifische Rausch-Charakteristik abgestimmt werden. Die numerischen Filter- und Inversionsprozesse sind an die Rechnerleistung des verwendeten Computers gebunden und können durch Verwendung von Hochleistungsrechnern enorm beschleunigt werden.

Marktverfügbarkeit

- gering

Bemerkungen zur Marktverfügbarkeit:

SNMR wird als Dienstleistung in Europa nicht angeboten. Es existieren derzeit weltweit lediglich drei Hersteller für komplette SNMR-Geräte, welche diese teilweise vermieten.

Eignung für das Wirtsgestein Steinsalz

- -- nicht geeignet

Bemerkungen zur Eignung für das Wirtsgestein Steinsalz:

Wasservorkommen im Steinsalz, die an die Größenordnungen dessen herankommen, was mit der SNMR-Methode detektierbar wäre, hätten sich bereits im Vorfeld mit Auswirkungen auf die Stabilität bemerkbar gemacht.

- Anhang 1 -

Eignung für das Wirtsgestein Tongestein

- - weniger gut geeignet

Bemerkungen zur Eignung für das Wirtsgestein Tongestein:

Tongebundenes Wasser mit sehr kurzen NMR-Signalen ist auf Grund der langen Geräte-Totzeiten mit der SNMR-Methode generell nicht messbar. Fließfähiges Wasser in größeren und damit potenziell gefährlichen Auflockerungszonen ließe sich möglicherweise nachweisen. Die entsprechende Machbarkeit zu zeigen ist Gegenstand aktueller Forschung (z. B. Qin et al. 2019; Costabel 2019).

Eignung für das Wirtsgestein Kristallingestein

- - weniger gut geeignet

Bemerkungen zur Eignung für das Wirtsgestein Kristallingestein:

Der Nachweis für die prinzipielle Eignung der SNMR-Methode zur Detektion und Charakterisierung vom fließfähigem Wasser in Kluftgrundwasserleitern ist erbracht (z. B. Vouillamoz et al. 2005). Aufgrund der geringen volumetrischen Wassergehalte (gemittelt über das gesamte Erfassungsvolumen der SNMR-Messung) kann eine generelle Machbarkeit jedoch vorausgesetzt werden. Standortspezifisch sollten daher als Qualitätskontrolle numerische Simulationen und Hypothesentests durchgeführt werden, um die Messergebnisse zu verifizieren.

Eignung der Methode für Erkundungsziele

Gute Eignung (+) für das folgende Erkundungsziel:

- Hydraulische Wirksamkeit von Karststrukturen sowie glazialen Rinnen

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AwK-11.3; gesetzliche Grundlage: Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5 StandAG). Gestein: Diverse

Bemerkung: Die Eignung der Methode zur Identifikation von wassergefüllten Karststrukturen in Teufen < 100 m ist nachgewiesen (Legchenko et al. 2008).

Weniger gute Eignung (-) für die folgenden acht Erkundungsziele:

- Auffinden offener Risse/Klüfte

- Anhang 1 -

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AwK-6.2; gesetzliche Grundlage: Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4 StandAG). Gestein: Kristallingestein / Steinsalz / Tongestein

Bemerkung: Die Methode kann grundsätzlich nur Wasser nachweisen. Dementsprechend werden nur wassergefüllte Riss- und Kluftsysteme identifiziert, deren Gesamtvolumen, bezogen auf das komplette erfasste Messvolumen im Gebirge, mindestens 1 bis 5 % ausmacht. Der exakte Nachweisgrenze ist vom vorherrschenden Umgebungsrauschen abhängig und damit standortspezifisch.

– Durchflusswirksame Porosität im ewG

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AwK-1.1; gesetzliche Grundlage: Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3 StandAG). Gestein: Kristallingestein / Steinsalz / Tongestein

Bemerkung: Die Methode identifiziert Anteile des Porenwassers mit Relaxationszeiten länger als die Geräte-Totzeit und erfasst damit nahezu ausschließlich nur die durchflusswirksame Porosität. Limitierend ist aber zu erwähnen, dass das Verfahren von der Oberfläche aus nur bis in eine Teufe von 100 m erkunden kann. Die Eignung der Methode im Tunnel ist Gegenstand aktueller Forschung und ist, wenn überhaupt, nur mit stark reduzierter Eindringtiefe denkbar (< 30 m, siehe Qin et al. 2019).

– Durchlässigkeit des Hutgesteins (für Steinsalz)

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AwK-11.3; gesetzliche Grundlage: Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5 StandAG). Gestein: Steinsalz / Diverse

Bemerkung: Die Methode identifiziert Anteile des Porenwassers mit Relaxationszeiten länger als die Geräte-Totzeit und erfasst damit nahezu ausschließlich nur fließfähiges Wasser. Limitierend ist aber zu erwähnen, dass das Verfahren von der Oberfläche aus nur bis in eine Teufe von 100 m erkunden kann. Die Eignung der Methode im Tunnel ist Gegenstand aktueller Forschung und ist, wenn überhaupt, nur mit stark reduzierter Eindringtiefe denkbar (< 30 m, siehe Qin et al. 2019).

– Durchlässigkeitsbeiwert im ewG

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AwK-1.1; gesetzliche Grundlage: Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3 StandAG). Gestein: Kristallingestein / Steinsalz / Tongestein

Bemerkung: Aus der mittleren Relaxationszeit lässt sich eine Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes ermitteln, wenn geeignete Kalibrationsdaten aus hydraulischen Methoden vorhanden sind. Limitierend ist aber zu erwähnen, dass das Verfahren von

- Anhang 1 -

der Oberfläche aus nur bis in eine Teufe von 100 m erkunden kann. Die Eignung der Methode im Tunnel ist Gegenstand aktueller Forschung und ist, wenn überhaupt, nur mit stark reduzierter Eindringtiefe denkbar (< 30 m, siehe Qin et al. 2019).

Eine Kombination mit den Methoden Packertests, Permeabilitätsversuche im Labor und Pumpversuche ist sinnvoll.

– Effektive Porosität (für Tonstein)

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AwK-1.4a; gesetzliche Grundlage: Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3 StandAG). Gestein: Tongestein

Bemerkung: Die Methode identifiziert der Geräte-Totzeit wegen kein tongebundenes Wasser, somit entspricht ggf. durch surface-NMR nachgewiesenes Wasser im Tongestein der effektiven Porosität. Limitierend ist aber zu erwähnen, dass das Verfahren von der Oberfläche aus nur bis in eine Teufe von 100 m erkunden kann. Die Eignung der Methode im Tunnel ist Gegenstand aktueller Forschung und ist, wenn überhaupt, nur mit stark reduzierter Eindringtiefe denkbar (< 30 m, siehe Qin et al. 2019).

– Für Tonstein: Durchlässigkeitsbeiwert der an das Barrieregestein angrenzenden Gesteinskörper oder -typen

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AwK-2.4; gesetzliche Grundlage: Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3 StandAG). Gestein: Diverse

Bemerkung: Aus der mittleren Relaxationszeit lässt sich eine Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes ermitteln, wenn geeignete Kalibrationsdaten aus hydraulischen Methoden vorhanden sind. Limitierend ist aber zu erwähnen, dass das Verfahren von der Oberfläche aus nur bis in eine Teufe von 100 m erkunden kann. Die Eignung der Methode im Tunnel ist Gegenstand aktueller Forschung und ist, wenn überhaupt, nur mit stark reduzierter Eindringtiefe denkbar (< 30 m, siehe Qin et al. 2019).

Eine Kombination mit den Methoden Permeabilitätsversuche im Labor, Pumpversuche, Slug & Bail-Tests und Slug/Puls-Test ist sinnvoll.

– Gehalt an freiem Wasser im ewG

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AwK-7; gesetzliche Grundlage: Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5 StandAG). Gestein: Kristallingestein / Steinsalz / Tongestein

- Anhang 1 -

Bemerkung: Die Methode identifiziert Anteile des Porenwassers mit Relaxationszeiten länger als die Geräte-Totzeit und erfasst damit nahezu ausschließlich freies Wasser. Limitierend ist aber zu erwähnen, dass das Verfahren von der Oberfläche aus nur bis in eine Teufe von 100 m erkunden kann. Die Eignung der Methode im Tunnel ist Gegenstand aktueller Forschung und ist, wenn überhaupt, nur mit stark reduzierter Eindringtiefe denkbar (< 30 m siehe Qin et al. 2019).

– Identifikation von Bereichen bergbaulicher Tätigkeit inklusive Altbohrungen

Nr. im Erkundungsziele-Bericht der BGR: AK-3; gesetzliche Grundlage: § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG. Gestein: Kristallingestein / Steinsalz / Tongestein

Bemerkung: Die Methode identifiziert grundsätzlich nur Wasser, ggf. auch in Hohlräumen, wenn diese eine kritische Größe innerhalb des erfassten Messvolumens überschreiten. Limitierend ist aber zu erwähnen, dass das Verfahren von der Oberfläche aus nur bis in eine Teufe von 100 m erkunden kann. Die Eignung der Methode im Tunnel ist Gegenstand aktueller Forschung und ist, wenn überhaupt, nur mit stark reduzierter Eindringtiefe denkbar (< 30 m siehe Qin et al. 2019).

Literaturzitate zum Methodenbeispiel

- Behroozmand, A. A., Keating, K. & Auken, E. (2014): A Review of the principles and applications of the NMR technique for near-surface characterization. *Surveys in Geophysics* 36,1: 27-85; doi: 10.1007/s10712-014-9304-0.
- Costabel, S. (2019): Noise analysis and cancellation for the underground application of magnetic resonance using a multi-component reference antenna – case study from the rock laboratory of Mont Terri, Switzerland. *Journal of Applied Geophysics*, 169: 85 - 97. DOI:doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.06.019.
- Legchenko, A., Ezersky, M., Camerlynck, C., Al-Zoubi, A., Chalikakis, K. & Girard, J-F. (2008): Locating water-filled karst caverns and estimating their volume using magnetic resonance soundings. *GEOPHYSICS*, 73, 5: G51-G61. DOI:doi.org/10.1190/1.2958007.
- Müller-Petke, M. & Yaramanci, U. (2015): Tools and Techniques: Nuclear Magnetic Resonance. (In: Schubert, G. (editorin- chief): *Treatise on Geophysics*). 2nd edition, 11: 419 - 454; Oxford (Elsevier).
- Qin, S., Ma, Z., Jiang, C., Lin, J., Baid, M., Lin, T., Yi, X. & Shang, X. (2019): Application of magnetic resonance sounding to tunnels for advanced detection of water-related disasters: A case study in the Dadushan Tunnel, Guizhou, China. *Tunnelling and Underground Space Technology* 84: 364–372; doi.org/10.1016/j.tust.2018.11.032.
- Vouillamoz, J.M., Descloitres, M., Toe, G. & Legchenko, A. (2015): Characterization of crystalline basement aquifers with MRS: comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics*: 205-213; doi.org/10.3997/1873-0604.2005015.