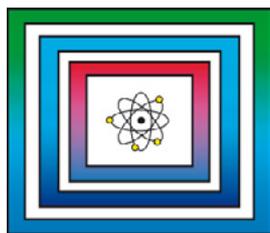


F+E Endlagerung

9Y2015020000

Darstellung des
Kenntnisstandes zur Geologie
der Kristallinvorkommen in
Deutschland
(CHRISTA Task 3.1)



Abschlussbericht

Hannover, Mai 2016

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

F+E Endlagerung

Machbarkeitsstudie zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallingesteinsformation in Deutschland (CHRISTA)

AP 3: Synthese Kristallinuntersuchungen

Task 3.1: Darstellung des Kenntnisstandes zur Geologie der Kristallinvorkommen in Deutschland

Abschlussbericht

Autor: Weitkamp, Axel

Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Geschäftszeichen: B3/B50112-50/2016-0003/001

Datum: 31.05.2016

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

Direktor und Professor Dr. V. Bräuer (Abteilungsleiter B3), Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	4
1 Veranlassung.....	5
2 Kenntnisstand Kristallinstudie.....	5
2.1 Voruntersuchungen.....	5
2.1.1 Teil 1: Das Bayerische Kristallin am Westrand der Böhmisches Masse (KOSINOWSKI & BANCHET 1983a).....	6
2.1.2 Teil 2: Die Schwarzwälder Granitmassive (KLEINE BORNHORST et al. 1984).....	7
2.1.3 Teil 3: Die Kristallinmassive des Odenwaldes, des Spessarts und des Westharzes (BRÄUER 1984a).....	7
2.1.4 Teil 4 (1. Bericht): Nichtsalinare Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer (BRÄUER et al. 1991).....	8
2.1.5 Teil 4 (2. Bericht): Nichtsalinare Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer (BRÄUER et al. 1993).....	9
2.2 Kristallinstudie: Untersuchung und Bewertung von Regionen in nicht- salinaren Formationen (BRÄUER et al. 1994).....	10
2.2.1 Vorauswahl.....	10
2.2.2 Detailbetrachtung und Bewertung.....	11
2.3 Digitale Aufbereitung der Daten.....	14
3 Erwartete Erkenntniszuwächse.....	15
3.1 Datenbanken, Fach- und Geoinformationssysteme.....	17
3.1.1 Bohrdatenbanken.....	18
3.1.2 Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS):.....	19
3.1.3 Geophysik.....	20
3.1.4 Geothermie.....	21
3.1.5 Speichergesteine.....	22
3.1.6 BGR - Geodatenmanagement.....	23
3.2 Geologische 3D-Modelle.....	23
3.3 Kristallinrelevante Forschungsprojekte unter Beteiligung der BGR.....	24
3.3.1 GEISHA-Studie.....	24
3.3.2 Tiefenlage der Kristallin - Oberfläche in Deutschland.....	26
3.3.3 Nordsee und Norddeutsches Becken.....	26
3.3.4 Hydrogeologie.....	27
3.3.5 Barrieregesteine (flach lagernde Salze, Ton und Tonstein).....	28
3.3.6 Seismizität.....	28
3.3.7 Stratigraphie.....	29
3.3.8 Kaltzeitliche Rinnensysteme.....	30

Seite

4	Zusammenfassung.....	31
	Literaturverzeichnis.....	32
	Anhangverzeichnis.....	38

Gesamtblattzahl: 39

Verkürzte Zusammenfassung

Autor:	Weitkamp, Axel
Titel:	Darstellung des Kenntnisstandes zur Geologie der Kristallinvorkommen in Deutschland (CHRISTA Task 3.1)
Schlagwörter:	Deutschland, Endlagerung, Geodaten, Kristallin, Machbarkeitsstudie

Der vorliegende Bericht liefert zunächst einen Überblick zu den im Rahmen der Kristallinstudie von der BGR durchgeführten Forschungsarbeiten und hierbei genutzten Datengrundlagen. Das schließt sowohl die Vorstudien zu einzelnen Kristallinregionen in den alten und neuen Bundesländern als auch die spätere digitale Aufbereitung der Daten in einem Fachinformationssystem ein. Der Fokus liegt dabei auf den verwendeten Auswahl- und Bewertungsverfahren. Zur Klärung von möglichen Erkenntniszuwächsen aus der stetig wachsenden Zahl geowissenschaftlicher Daten werden Datenbanken, Fach- und Geoinformationssysteme sowie 3D-Modellieransätze herangezogen und beschrieben. Außerdem werden über ein Dutzend relevante Projekte, an denen die BGR beteiligt war bzw. ist, aufgeführt und ihr thematischer Bezug skizziert.

1 Veranlassung

Das Projekt „CHRISTA“ wurde als Machbarkeitsstudie zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallingesteinsformation in Deutschland konzipiert.

Mit dem Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle (Standortauswahlgesetz bzw. StandAG) vom 23. Juli 2013 wurde eine Neuausrichtung der Suche nach einem Standort für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle initiiert. Dabei sind die Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Kristallin von entscheidender Bedeutung. Um einen objektiven Vergleich von Standorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen durchführen und letztendlich bewerten zu können, müssen entsprechende Grundlagen vorhanden sein.

Die BGR hat im Rahmen des Arbeitspaketes 3 die Zusammenfassung des Kenntnisstandes zu Kristallinvorkommen in Deutschland übernommen, um Fragen im Arbeitspaket 1 (Task 1.1) zur Anwendbarkeit der Bedingungen aus den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) klären zu können. Es sollte auch die Frage betrachtet werden, inwieweit bei den Geologischen Diensten der Länder etwaige Erkenntniszuwächse gegenüber dem in der Kristallinstudie (BRÄUER et al. 1994) dargestellten Sachstand zu erwarten sind. Es erfolgte keine Anwendung von Kriterien oder kriteriengestützte Ausweisung von untersuchungswürdigen Regionen.

2 Kenntnisstand Kristallinstudie

2.1 Voruntersuchungen

Anfang der 1980er Jahre begann die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, eine Beschreibung der Kristallinvorkommen in Deutschland auf Basis von publizierter Literatur und Archivmaterial zu erstellen. Zwischenberichte dokumentieren den Fortgang der Arbeiten (BRÄUER 1984b, KOSINOWSKI & BANCHET 1983b). Ziel war es, Alternativen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzgestein aufzuzeigen. Dazu wurde zunächst ein allgemeines Konzept mit Bewertungskriterien für die Zusammenstellung eines Kataloges zur Auswahl potenziell geeigneter Gesteinskörper erarbeitet.

Bewertungskriterien

- Geographie (Lage und Gesamtoberfläche)
- Wirtschaftliche Nutzung (Infrastruktur, Landnutzung [%], Natur- und Landschaftsschutzgebiete)
- Hydrologie (Gewässernetz, Vorfluter, Niederschlag, ggf. Quellen)
- Tektonik (Richtung Störungen und Klüfte, Lage bzgl. wichtiger tektonischer Elemente, seismische Aktivität)
- Regionale Kristallinkomplexe
- Morphologie (aufgeschlossene Fläche, Höhenlage)
- Geologie (strukturelle Ausbildung, Alter, ggf. Profilschnitte)
- Petrographie (Gesteinstyp, Struktur, Verwitterungsverhalten, angrenzende Gesteinstypen)

2.1.1 Teil 1: Das Bayerische Kristallin am Westrand der Böhmisches Masse (KOSINOWSKI & BANCHET 1983a)

Für die Einzelbeschreibungen der Kristallinvorkommen wurden Informationen zu den oben genannten Bewertungskriterien gesammelt und aufbereitet. Dabei zeigte sich, dass für den nördlichen Oberpfälzer Wald und z.T. auch für andere Granitvorkommen keine detaillierten geologischen Karten im Maßstab 1:25.000 zur Verfügung standen. Die Originaldaten stammten aus den Jahren 1927 - 1981 und waren insgesamt nicht für eine Detailbewertung geeignet. Aus hydrogeologischen Bohrungen zur Wassergewinnung konnten Erkenntnisse zum 50 - 60 m mächtigen Verwitterungshorizont oberhalb des Festgesteins gewonnen werden. Nur vereinzelt reichten Bohrungen auch bis ins anstehende Festgestein. Diese zeigten, dass die Zahl der Wasserwegsamkeiten zwar mit der Tiefe abnimmt, aber auch in Tiefen von 200 m unter Geländeoberkante noch offene Klüfte und Störungszonen existieren, die eine erhöhte Permeabilität aufweisen können.

Alle untersuchten Granite entstanden aus im Permokarbon posttektonisch intrudierten Schmelzen, weshalb sich während der Abkühlungsphase relativ homogene und kaum geschieferte Gesteine entwickeln konnten. Nur für einige größere Störungszonen, wie den Nordwest-Südost streichenden Pfahl im Bayerischen Wald, an dem auch seismische Aktivität registriert werden konnte, wurden Schieferungen beschrieben, die vermutlich in Phasen mit tektonischer Aktivität in Mylonitzonen entstanden sind. Während für die Granitmassive Nordostbayerns in der Tiefe eine Verbindung angenommen wurde, konnten

die Vorkommen im Bayerischen Wald als einzelne Plutone beschrieben werden. Es wurde festgestellt, dass für die Entstehung der Massive zumeist mehrere aufeinander folgende Intrusionsereignisse nötig waren, die sich häufig lithologisch voneinander unterscheiden. Die letzte Intrusionsphase war oft durch pegmatitische oder aplitische Ganggesteine gekennzeichnet, die in Schwächezonen des bereits erstarrten Granits und des Nebengesteins eindringen. Zonen mit einer hohen Dichte solcher Ganggesteine zeichneten sich oft auch durch eine starke Klüftung aus.

2.1.2 Teil 2: Die Schwarzwälder Granitmassive (KLEINE BORNHORST et al. 1984)

Hier wurden ebenfalls die Einzelbeschreibungen entsprechend den festgelegten Bewertungskriterien erstellt, wobei gemäß der landschaftlich-geographischen Gliederung in Nord-, Mittel und Südschwarzwald auch bei den Granitvorkommen eine Dreiteilung vorgenommen wurde. Auch hier lagen geologische Detailkarten im Maßstab 1:25.000 nicht flächendeckend vor, wobei die ältesten Kartenblätter aus dem 19. Jahrhundert stammten.

Das ermittelte Intrusionsalter der Granite schwankte zwischen Oberdevon bis Oberkarbon. Die beschriebenen, auch überregional auftretenden, tektonischen Richtungen wie z. B. herzynisches (NW/SE) oder erzgebirgisches (NE/SW) Streichen zeigten sich auch in der Anlage des Gewässernetzes. Als besonders markant wurde die Randstörung entlang der Schulter des Oberrheingrabens erkannt. Die Gneise, Granite und Granitporphyre des Grundgebirges haben ein ähnliches hydrogeologisches Verhalten, was sich in einer allgemein geringen Schüttung von aus dem Grundgebirge austretenden Quellen mit geringer Wasserhärte und hohen Gehalten an Sauerstoff und Kohlendioxid zeigt. Der Schwarzwald wurde in Abschnitten als deutlich erdbebengefährdet charakterisiert, wobei sich gegenüber dem Oberrheingraben größere Herdtiefen abzeichneten. Wie zu erwarten war, konnten die meisten stärkeren Erdbeben in Bruchzonen mit quartärer Tektonik lokalisiert werden.

2.1.3 Teil 3: Die Kristallinmassive des Odenwaldes, des Spessarts und des Westharzes (BRÄUER 1984a)

Als Grundlage für die Darstellung der Geologie der einzelnen Kristallingebiete dienten neben Übersichtskarten hauptsächlich geologische Karten im Maßstab von 1:25.000, die zwischen 1891 und 1981 publiziert wurden und mehrheitlich einer älteren Kartengeneration angehörten. Im Odenwald wurden überwiegend granitische bis granodioritische Gesteine beschrieben, während der Spessart hauptsächlich durch Gneise geprägt ist. Als Rahmengesteine der einzelnen Massive treten vielfach Quarzite und Schiefer in Erscheinung, was insgesamt sowie auch innerhalb der einzelnen Komplexe ein relativ inhomogenes Erscheinungsbild erzeugt. Dies trifft auch auf den Westharz zu, wo neben Graniten und Gabbros auch kontaktmetamorph überprägte Einheiten um die Intrusionen zu beobachten sind. Auch

innerhalb zusammenhängender Einheiten wie dem Brockenmassiv variiert die Ausprägung mitunter beträchtlich. Das Intrusionsalter der Granite wurde als variszisch angegeben, wobei die Granite des Westharzes etwas jünger zu sein schienen und tektonisch weniger beansprucht waren. Der lithologisch-petrographische Aufbau spiegelt sich auch im Verwitterungsverhalten der Gesteine wider. Gabbros und Gneise erwiesen sich gegenüber oft tiefgründig verwitterten Graniten insgesamt als resistenter.

Die Hauptrichtungen des Gewässernetzes spiegeln vielfach auch die großräumigen Störungsmuster im tieferen Untergrund wider. Als wichtiges tektonisches Element im Bereich des Westharzes wurde die Harznordrandstörung identifiziert, an der aber weder rezente Bewegungen noch tektonische Aktivität festgestellt werden konnten. Dies steht im Gegensatz zu aktiven Randstörungen mit rezenten Bewegungen und seismischer Aktivität, die im Bereich von Odenwald und Spessart zu beobachten waren. In diesem Zusammenhang wurde vor allem auf die Bedeutung der östlichen Schulter des Oberrheingrabens hingewiesen.

2.1.4 Teil 4 (1. Bericht): Nichtsalinare Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer (BRÄUER et al. 1991)

Nachdem für das Gebiet der alten Bundesländer die Arbeiten am Katalog der Kristallinvorkommen im Jahr 1984 abgeschlossen worden waren, wurde die BGR im Jahr 1991 damit beauftragt, die Untersuchungen auch auf das Gebiet der neuen Bundesländer auszuweiten, um einen möglichst einheitlichen Kenntnisstand für Gesamtdeutschland gewährleisten zu können. Dazu sollte in einer ersten Projektphase zunächst eine Übersicht zu Standortmöglichkeiten in Bereichen mit kristallinen Gesteinen erstellt werden, an denen detaillierte Untersuchungen sinnvoll wären. Dazu wurde zusätzlich auch der internationale Kenntnisstand bei der Endlagerung in kristallinen Formationen berücksichtigt. Aus Projekten in der Schweiz und Schweden wurden wichtige Randbedingungen für die Endlagerung im Kristallin abgeleitet, deren Bedeutung auch für deutsche Vorhaben erkannt wurde. Dazu zählten u. a. eine maximal zulässige natürliche Felstemperatur von ca. 55 - 60 °C in der Teufe eines Endlagers und die daraus resultierende maximale Einlagerungstiefe von 1200 m sowie hydrodynamische, hydrogeologische und tektonische Faktoren.

Für die alten Bundesländer wurde noch einmal auf die bereits in den Vorberichten beschriebenen variszischen Intrusionen hingewiesen, wobei zusätzlich auch die Möglichkeit erwogen wurde, dass sich weitere Komplexe in 500 bis 1000 m Tiefe unter mesozoischer Bedeckung im Bereich der Vindelizischen oder der Spessart-Rhön-Schwelle befinden könnten. Jüngeren postorogenen Intrusionen wurden wegen ihrer geringeren Klüftigkeit Vorteile gegenüber älteren frühvariszischen Komplexen eingeräumt.

Für das Gebiet der ehemaligen DDR lagen keine speziellen Voruntersuchungen zu nichtsalinaren Wirtsgesteinen vor. Die geowissenschaftliche Forschung war dort vor allem auf die Rohstoffgewinnung und Ingenieurgeologie fokussiert, so dass zwar umfassendes geologisches Material über den Südtel der ehemaligen DDR vorlag, diese Daten aber noch aufwendig gesichtet und aufbereitet werden mussten. Die Suche wurde aufgrund der mächtigen meso- und känozoischen Bedeckung im Norden vor allem auf den Süden konzentriert, wo Gesteine des Präzechstein relativ oberflächennah angetroffen wurden. Für die Kristallin-Bereiche der neuen Bundesländer wurde eine tabellarische Übersicht erstellt, die neben den wichtigsten Eigenschaften und Kenngrößen des jeweiligen Gesteinskomplexes bereits eine grobe Erstbewertung enthält. Zusätzlich wurde am Lausitzer Granodioritkomplex exemplarisch eine Detailbewertung vorgenommen.

Hinsichtlich der Fragestellung nach Bereichen mit Kristallin unter Überdeckung wurde mit Hilfe geophysikalischer Daten die vermutete Kristallinverbreitung in 2000 m Tiefe unter Geländeoberkante in einer Karte dargestellt und der dadurch zu erwartende Flächenzuwachs verdeutlicht (BRÄUER et al. 1991: Anlage 6).

2.1.5 Teil 4 (2. Bericht): Nichtsalinare Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer (BRÄUER et al. 1993)

Der 2. Bericht knüpft hinsichtlich der Gliederung der Kristallingebiete nach regionalgeologischen Einheiten an den 1. Bericht an, wobei zur besseren Übersichtlichkeit einige Vereinfachungen vorgenommen wurden, so dass letztendlich sieben Einheiten bearbeitet wurden. Dazu wurde auch das für die alten Bundesländer entwickelte Bewertungsschema leicht modifiziert und inhaltlich nach den Themenkomplexen Geographie, regionale Geologie, Tektonik, Hydrogeologie, Wirtsgesteinseigenschaften, Seismizität und Bergbau gegliedert. Um eine Vorauswahl und eine Empfehlung für die Weiterbearbeitung in einem abschließenden Bericht treffen zu können, wurden aus den beschriebenen Standortkriterien geogene, ökologische und geotechnisch-ingenieurgeologische Faktoren bestimmt, die als Ausschlusskriterien herangezogen werden konnten.

Aus ökologischer Sicht wurden Gebiete wie großflächige Nationalparke, Naturparke und Biosphärenreservate sowie die Nähe zu industriellen Ballungszentren berücksichtigt. Geogene Faktoren waren seismisch aktive Zonen und Bereiche mit hoher Störungsdichte. Als geotechnisch-ingenieurgeologische Faktoren kamen vor allem die Flächengröße und Flächenform sowie die Tiefenlage des Wirtsgesteins zum Tragen. Die erforderliche Fläche für ein Endlagerbergwerk wurde mit 1 - 2 km² angenommen wobei eine durchschnittliche Breite des Kristallinvorkommens von 3 km nicht unterschritten werden sollte und die Anlage des Einlagerungsbereiches in einer Tiefenlage von etwa 500 m möglich sein sollte. Dies führte dazu, dass kristalline Einzelkomplexe mit unbekannter Tiefenlage des

Kristallinvorkommens, die kleiner als 10 km² waren, nicht berücksichtigt werden konnten. Bei kleineren Vorkommen wirkten sich auch intensiver ober- und untertägiger Bergbau sowie stark variierende mechanische und physikalische Gesteinseigenschaften negativ aus.

Das Ergebnis wurde tabellarisch dargestellt und in abgewandelter Form auch für den Abschlussbericht (BRÄUER et al. 1994) verwendet. Damit wurde dieser Ansatz insgesamt zur Grundlage für die Vorauswahl aus allen in den Voruntersuchungen betrachteten Kristallinvorkommen (s. Kapitel 2.2.1).

2.2 *Kristallinstudie: Untersuchung und Bewertung von Regionen in nicht-salinaren Formationen (BRÄUER et al. 1994)*

2.2.1 Vorauswahl

Für die Vorauswahl von Kristallinvorkommen aus den Voruntersuchungen wurden zunächst allgemeine Standortkriterien wie z. B. die geographischen, tektonischen, hydrogeologischen Voraussetzungen beschrieben. Diese allgemeinen Kriterien wurden in drei wesentliche Gruppen unterteilt. Ausschließende Parameter waren Kriterien, die als unvereinbar mit der Anlage eines Endlagerstandortes angesehen wurden. Limitierende Parameter hatten negative Auswirkungen und schränken dadurch die Eignung eines Kristallinkomplexes ein. Demgegenüber beschrieben positive Parameter aus geowissenschaftlicher Sicht günstige Voraussetzungen für die Anlage eines Endlagerstandortes.

Aus allen in den Vorstudien beschriebenen Kristallinvorkommen wurden zunächst mit Hilfe der ausschließenden Parameter ungeeignete Vorkommen identifiziert, während positive und limitierende Parameter erst im nächsten Schritt, der Bewertung potentiell geeigneter Gesteinsvolumina, zur Anwendung kamen. Zu den ausschließenden Faktoren zählten zum einen ökologische Gesichtspunkte wie geschützte Naturareale, Ballungszentren, großflächige Stauhaltungen und ungünstige Grundwasserverhältnisse. Des Weiteren wurden geogen bedingte Faktoren wie tektonisch oder seismisch aktive Zonen, die Verwerfungsichte, rezenter oder zukünftig zu erwartender Magmatismus und Krustenbewegungen herangezogen. Unter den geotechnisch - ingenieurgeologischen Faktoren als dritter Kategorie wurden z. B. Ausdehnung und Tiefenlage, die Beeinträchtigung durch Bergbau und variierende Gesteinseigenschaften innerhalb eines Komplexes zusammengefasst. Das Ergebnis der Vorauswahl wurde in tabellarischer Form, getrennt nach alten und neuen Bundesländern, aufgelistet. Stichpunktartig wurden dort die für die Entscheidung zur Weiterbearbeitung maßgeblichen Anhaltspunkte unter einer der drei oben genannten Faktorengruppen aufgelistet. Auf diese Weise wurden mittels allgemeiner Standortkriterien und Ausschlusskriterien 28 von 117 betrachteten Vorkommen selektiert.

2.2.2 Detailbetrachtung und Bewertung

Nur die 28 ausgewählten Kristallinregionen waren Gegenstand der weiteren Bearbeitung mit Hilfe von Archivunterlagen und unter Berücksichtigung der Voruntersuchungen der BGR. Die Charakterisierung konzentrierte sich dabei, sofern keine Abhängigkeiten zu benachbarten Gebieten vorlagen, auf das jeweilige Einzelkristallin. Kartenübersichten ergänzen das Bild und wurden in Atlasform zusammengestellt. Die Darstellung erfolgte nach einem einheitlichen Schema, um eine bessere Vergleichbarkeit der maßgeblichen Faktoren zu erreichen. Dies geschah vor dem Hintergrund der Frage, ob günstige bzw. weniger günstige Voraussetzungen für die spätere Standortsuche gegeben waren. Die berücksichtigten einzelnen Faktoren wurden für die geowissenschaftliche Bewertung der Kristallinvorkommen in fünf gewichteten Gruppen von Merkmalskategorien zusammengefasst, die sich an den allgemeinen Standortkriterien orientierten:

- I. Tektonik, Gesteinshomogenität, Hydrogeologie
- II. Bergbau
- III. Hydrographie
- IV. Seismizität
- V. Zusätzliche Angaben (Alter, effektive Flächengröße etc.)

Hervorgehoben wurde insbesondere die Bedeutung von Gruppe I, da z. B. geologisch relativ instabile Regionen die Eignung eines Vorkommens stark einschränken. Die Raumanordnung und Häufigkeit bedeutender Bruchstrukturen wurden ebenfalls als wichtige Eignungskriterien gesehen. Aufgrund der Komplexität ihrer geochemischen Eigenschaften wurden petrographisch inhomogene Kristallinkomplexe als schwerer zu beurteilen eingestuft. Darüber hinaus wurde Wert auf eine möglichst flächendeckende Verteilung der verfügbaren geowissenschaftlichen Informationen in der betrachteten Region gelegt. Allerdings lassen sich gesicherte quantitative Aussagen nur mit speziellen Standortuntersuchungen treffen, die aber für die Kristallinstudie nicht durchgeführt wurden und deshalb durch Interpretation der zur Verfügung stehenden Daten mit Hilfe von Expertenwissen ausgeglichen werden mussten.

Für die Bewertung in Gruppe II war sowohl der übertägige als auch prioritär der untertägige Bergbau zu berücksichtigen. Im Extremfall können vorhandene Bereiche mit Altbergbau große Areale eines Kristallinvorkommens für die zukünftige Nutzung als Wirtsgestein ausschließen. Durch die beim Auffahren von Bergwerken entstehenden Hohlräume und Auflockerungszonen im umgebenden Gebirge besteht die Gefahr, dass entstehende Wasserwegsamkeiten die Standorteigenschaften negativ beeinflussen.

In Gruppe III wurden neben der Anzahl und Fläche von Stauhaltungen die Dichte der Vorfluter und ihre Hauptentwässerungsrichtungen, die sich ggf. an bedeutenden Bruchstrukturen orientieren, betrachtet.

Die in Gruppe IV bewertete Seismizität kam, wenn überhaupt, nur in Teilbereichen der Kristallingebiete zum Tragen, da dieses Kriterium bereits anhand der Erdbebenzonen nach DIN 4149 für die Vorauswahl angewandt wurde.

Weitere aus geowissenschaftlicher Sicht als nachrangig eingestufte Faktoren wie die „effektive“ Flächengröße, das Vorflutergefälle sowie die Beschaffenheit des Deckgebirges und das Gesteinsalter wurden in der Bewertungsgruppe V zusammengefasst. Das Vorflutergefälle kann im Hinblick auf Erosionsvorgänge für die Langzeitbetrachtung von Interesse sein. Der Einfluss des Deckgebirges wurde differenziert betrachtet, da es einerseits als ein zusätzlicher natürlicher Schutz fungieren, andererseits aber auch den Kenntnisstand über das liegende Kristallin negativ beeinflussen kann. Die Altersdatierung und Rekonstruktion der Platznahme der einzelnen Plutone innerhalb eines Komplexes konnte z. B. beim Lausitzer Granodioritkomplex mit Hilfe einer biostratigraphischen Datierung der Kontaktgesteine durchgeführt werden, die präzisere Daten als radiometrische Methoden lieferte. Die Hypothese, dass ein hohes Gesteinsalter automatisch mit verstärkter tektonischer Beanspruchung einhergeht, ließ sich nicht generell auf alle Fälle übertragen. Dies führte zu der Feststellung, dass eine zufriedenstellende Klärung nur in Verbindung mit detaillierten tektonischen und gefügeanalytischen Standortuntersuchungen erreicht werden kann. Als Faktor in Bewertungsgruppe V mit dem größten Einfluss auf die Standortwahl wurde die effektive Größe des jeweiligen Kristallins identifiziert. Unter effektiv wurde die Nettofläche verstanden, die nach Abzug aller konkurrierenden Nutzungen und Nutzungseinschränkungen verbleibt. Damit waren Nationalparke, Naturschutzgebiete, Siedlungsflächen, Untertage-Altbergbau und Talsperren gemeint. In diesem Zusammenhang kam neben der reinen Flächengröße zusätzlich auch die Geometrie der Flächen zum Tragen, da z. B. schmale langgestreckte Flächen Nachteile gegenüber kompakteren Formen aufweisen.

Die in den fünf Merkmalsgruppen zusammengefassten Faktoren und Kriterien bildeten die Grundlage für die komplexe Bewertung der 28 Vorkommen nach qualitativen und quantitativen Gesichtspunkten. Zur Einordnung untereinander (Relativwertung) wurden drei- bzw. sechsstufige Wertungsgruppen für jeden der 15 Einzelfaktoren entworfen. Beispielhaft ergibt eine Einordnung des dreistufig bewerteten Deformationsgrades aus Gruppe I in Stufe 2 (mittel/2 Punkte) unter Berücksichtigung des zur Gewichtung innerhalb der Gruppe festgelegten Multiplikators 3 ein Ergebnis von 6 Punkten. Die 5 Produkte zu den Faktoren in Gruppe I wurden aufsummiert und anschließend in einer dreistufigen Wertungsgruppe zugeordnet. Für die Zusammenstellung über die

Gruppen I - IV in einer sechsstufigen Wertungsgruppe wurde wiederum über einen Multiplikator gewichtet. Für die Gesamtbewertung wurde dann aus der kumulierten Wertung der Gruppen I - IV (1 - 6 Punkte) und der Wertung der Gruppe V (1 - 3 Punkte) die Summe gebildet und sechsstufig dargestellt.

Hierbei ist zu beachten, dass sowohl durch die Wahl der Stufen innerhalb einer Wertungsgruppe als auch durch den Einsatz eines Multiplikators die Gewichtung modifiziert wurde und die Schwerpunkte deshalb in den Gruppen I und II lagen. Abschließend wurden die für die Eignungseinschätzung in geowissenschaftlicher und ökologischer Hinsicht maßgeblichen Vor- und Nachteile der einzelnen Kristallinvorkommen kurz in tabellarischer Form zusammengetragen. Als wichtigstes Kriterium der Gruppe V wurde die sogenannte effektive Flächengröße des an der Oberfläche aufgeschlossenen Kristallins hervorgehoben, d.h. diejenige Fläche, mit der nach Abzug limitierender Nutzungspräferenzen noch tatsächlich zu rechnen ist. Das Verhältnis der Gesamtfläche der einzelnen Kristallinvorkommen zu ihrer effektiven Flächengröße wurde in Form eines Balkendiagramms dargestellt (Tab. 4, S. 133). Zu beachten ist hierbei, dass nicht alle entgegenstehenden Nutzungen wie untertägiger Bergbau und Wasserschutzgebiete vollständig berücksichtigt wurden bzw. werden konnten. Dies kann zur Folge haben, dass sich die zur Verfügung stehende Fläche in einigen Fällen noch weiter verringert.

Die Gesamteinschätzung zur Einzelbewertung und vergleichenden Gesamtbewertung nach geowissenschaftlichen und ökologischen Kriterien ergab, dass die großen Kristallinvorkommen im Allgemeinen die günstigsten Voraussetzungen aufwiesen.

Die zur weiteren Bearbeitung als besser geeignet erscheinenden Kristallinvorkommen wurden abschließend, wie folgt, aufgelistet:

Bayerisches Kristallin

- Teilbereich des Fichtelgebirges (Bayern/ca. 360 km²)
- Nördlicher Oberpfälzerwald (Bayern/ca. 385 km²)
- Saldenburg-Granit (Bayern/ca. 137 km²)

Erzgebirge/Vogtländisches Schiefergebirge

- Graugneiskomplex (Sachsen/ca. 1347 km²)

Granulitgebirge

- Granulitkomplex (Sachsen/ca. 530 km²)

Lausitzer Scholle

- Granodiorit von Radeberg-Löbau (Sachsen/ca. 1038 km²)
- Granodiorit von Pulsnitz (Sachsen/ca. 716 km²)
- Granodiorit von Zawidow (Sachsen/ca. 279 km²)

Halle-Wittenberger Scholle (verdecktes Vorkommen)

- Granodiorit von Pretzsch (Sachsen-Anhalt/ca. 164 km²)
- Granodiorit von Prettin (Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Sachsen/ca. 221 km²)

2.3 Digitale Aufbereitung der Daten

Fachinformationssystem Geowissenschaften und Entsorgung von Abfällen (FIS GEA) (MAURER-RURACK et al. 2008)

Im Rahmen von FIS GEA wurden zwar alle maßgeblichen Wirtsgesteine bearbeitet, aber nur für das Wirtsgestein Kristallin ein erster Ansatz für ein spezifisches Auswahl- und Bewertungsverfahren entwickelt. In der ersten Phase des Projektes FIS GEA (BALZER & MAURER 2003) wurden die Erkenntnisse aus der bereits vorliegenden Kristallinstudie verwendet. Anhand dieser Datengrundlage sollte die Methodik und Machbarkeit eines GIS-gestützten Auswahl- und Bewertungsverfahrens für die Ausweisung von alternativen Regionen und Gebieten aus den, nach der in BRÄUER et al. (1994) dokumentierten Vorauswahl, verbliebenen 28 Vorkommen getestet werden. Dazu wurden bei den 28 selektierten Vorkommen inkl. ihrer Rahmengesteine Unterschiede in den Erkundungsdaten betrachtet und eine mathematisch gestützte vergleichende Bewertung angewendet, die ein detailliertes Ranking lieferte. Die Rahmengesteine um die eigentlichen Kristallinkerne wurden als sogenannte Kristallin-Regionen betrachtet, die als elf eigenständige Untersuchungsgebiete bearbeitet wurden. Die Fläche dieser Regionen konnte dabei um ein Vielfaches größer als die der umschlossenen Kerne sein, wobei auch mehrere Kristallinkerne innerhalb einer Region vorkommen konnten.

Es wurde eine Vielzahl kristallinspezifischer Geofach- und Geobasisdaten entsprechend den Vorgaben zu Ausschluss- und Abwägungskriterien aus AkEnd (2002) und dem BGR Bericht von BRÄUER et al. (1994) für das Fachinformationssystem berücksichtigt. Wegen fehlender flächenhafter Informationen wurde keine Auswertung hinsichtlich Tiefenlage und Mächtigkeit der untersuchten Gesteine durchgeführt. Für die Aufstellung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen konnten die Ausführungen des AkEnd nur z. T. mitberücksichtigt

werden, da die Ergebnisse des AkEnd-Abschlussberichtes erst kurz vor Fertigstellung des FIS GEA - Vorberichtes zur Phase-1 (Kristallin) (BALZER & MAURER 2003) vorlagen. Stattdessen wurden vornehmlich die international anerkannten Grundanforderungen an ein Standortgebiet für ein geologisches Tiefenlager nach NAGRA (2002) implementiert. Hierbei standen die geologische Langzeitstabilität, günstige Wirtsgesteinseigenschaften, die Ausdehnung des Wirtsgesteinskörpers, Störeinflüsse sowie die Explorierbarkeit und Prognostizierbarkeit im Vordergrund. Eine Übersicht zu den verwendeten Datengrundlagen liefert eine tabellarische Zusammenstellung in Anhang des Abschlussberichtes.

Im ersten Schritt des beim FIS GEA angewendeten Auswahl- und Bewertungsverfahrens wurden zunächst sechs Ausschlusskriterien angewendet, um die geeigneten Flächen innerhalb eines Untersuchungsgebietes herauszufiltern. Neben Gebieten mit erhöhter seismischer Aktivität fielen Zonen mit rezenten vertikalen Krustenbewegungen und durch Vulkanismus gefährdete Zonen heraus. Außerdem wurde ein Mindestabstand zur Staatsgrenze, Restriktionsflächen wie Schutzgebiete und hydrographische Parameter wie Stauhaltung, Seen und Hauptvorfluter beachtet.

Im zweiten Schritt wurden zur vergleichenden Bewertung sieben Abwägungskriterien definiert und auf die aus Schritt 1 hervorgegangenen Flächen angewendet. Für jedes der sieben Kriterien wurden Abwägungswerte durch das Produkt einer Ranking - Punktzahl mit einem variabel einsetzbaren Wichtungsfaktor berechnet. Die Summe aller sieben gewichteten Abwägungswerte für ein Untersuchungsgebiet liefert den sogenannten Abwägungsindex. Die Spannweite der Abwägungsindizes wurde in drei Klassen mit Gebieten niedriger, mittlerer und hoher Eignung unterteilt und abschließend in einer Karte dargestellt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden drei verschiedene Varianten mit betont planungswissenschaftlicher, betont geowissenschaftlicher oder gleicher Wichtung betrachtet.

3 Erwartete Erkenntniszuwächse

Da das Medium Internet zur Zeit der Erstellung der Kristallinstudie zwischen 1983 und 1994 im gegenwärtigen Umfang noch nicht zur Verfügung stand, ist zu erwarten, dass sich die Zugänglichkeit und Auffindbarkeit der stetig anwachsenden Menge geologischer Daten stark verbessert hat und auch weiterhin verbessern wird. Literaturdatenbanken im Internet mit umfangreichen Recherchefunktionen erleichtern das Auffinden und Zusammenführen von wissenschaftlichen Informationen. Zusätzlich stehen umfangreiche Fachinformationssysteme der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) Deutschlands zur Verfügung.

Erkenntniszuwächse werden vor allem in den folgenden Bereichen erwartet:

- Geologische Kartenwerke (z. B. Geologische Karte 1:25.000 bzw. 1:50.000)
- Bohrdaten (Informationen z. B. zur Stratigraphie und Petrologie)
- Datierungsverfahren
- Geophysik: Seismik, Geoelektrik, Gravimetrie etc.
- Profilschnitte, 3D-Modelle
- Geothermiedaten
- Geochemiedaten

Dies ergibt sich insbesondere aus den wesentlichen Aufgaben, mit denen die SGD Deutschlands befasst sind:

- Geowissenschaftliche Landesaufnahme
- Landesbezogene geowissenschaftliche Forschungen und Untersuchungen
- Veröffentlichung geowissenschaftlicher Karten, Daten, Berichte und Aufsätze
- Anlage und Führung von geowissenschaftlichen Fachinformationssystemen (FIS)
- Geowissenschaftliche Beratung, Gutachten und Stellungnahmen (z. B. als Träger öffentlicher Belange)

Die Ausrichtung und das Aufgabenspektrum des einzelnen SGD können aufgrund unterschiedlicher Prioritäten und der speziellen geologischen Gegebenheiten des jeweiligen Bundeslandes variieren. Die SGD sammeln und erarbeiten Fachinformationen über die Beschaffenheit des Untergrundes. Die erhobenen Daten fließen in geowissenschaftliche Karten, Fachveröffentlichungen und Bohrarchive ein. Abrufbar sind diese Produkte und Informationen z. B. über die Internetseiten der SGD.

Dabei muss aber beachtet werden, dass die Eigentumsrechte an Geodaten in Deutschland stärker geschützt sind als in vielen Ländern im europäischen Umfeld. Somit müssen für die Nutzung verfügbarer Daten immer auch die rechtlichen Voraussetzungen erfüllt sein. Neue Rahmenbedingungen wurden mit der Umsetzung der Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE-Richtlinie) in nationales Recht geschaffen. Das Gesetz über den Zugang zu digitalen Geodaten (Geodatenzugangsgesetz) regelt den Zugang auf Bundesebene. Gemäß § 4 GeoZG sind auch geologische Daten betroffen. Für die Länder und Kommunen gelten eigene Landesgesetze.

Zur Datenlage wurde von der BGR im Jahr 2014 das Übersichtspapier „Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland - Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen“ (BGR 2014) erstellt. Die Ausarbeitung, die als Vorlage für die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ auch als K-MAT 11 vorliegt, enthält neben einer allgemeinen Betrachtung zu geowissenschaftlichen Daten über den tieferen Untergrund auch Hinweise zu regionalen und bundesweiten Informationsgrundlagen. Betont wird die Schlüsselstellung der Geologischen Dienste von Bund und Ländern hinsichtlich der Datenbasis und Bewertungskompetenz. Im Anhang der Unterlage K-MAT 11 befinden sich folgende Übersichtskarten, die Hinweise zur Datenlage liefern:

- Anhang A1: Geowissenschaftliche Karte der Bundesrepublik Deutschland (Geologie)
- Anhang A2: Schwerekarte der Bundesrepublik Deutschland (Bouger-Anomalien)
- Anhang A3: Anomalien des erdmagnetischen Totalfelder der Bundesrepublik Deutschland
- Anhang A4: Vorkommen von Salzformationen in Deutschland
- Anhang A5: Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
- Anhang A6: Übersichtskarte mit tiefen Sedimentbecken in Deutschland
- Anhang A7: Übersichtskarte mit Tiefbohrungen in Deutschland
- Anhang A8: Übersichtskarte mit seismischen Untersuchungen in Deutschland

3.1 Datenbanken, Fach- und Geoinformationssysteme

Um sich einen Überblick über die Datenlage zu verschaffen, ist es zunächst sinnvoll, frei verfügbare Datenbanken und Informationssysteme der SGD Deutschlands im Internet zu nutzen, da hier i. d. R. die wichtigsten aktuellen Informationen zu Produkten und Aktivitäten vorgehalten werden. Die SGD Deutschlands haben das gemeinsame Webportal InfoGEO entwickelt (SGD o. J.-b), das die Möglichkeit einer länderübergreifenden Recherche mit Suchfunktionen innerhalb der Veröffentlichungen der Dienste (Produktnachweise) und vorliegender Bohrungen (Bohrpunktnachweise) bietet. Zusätzlich können über den Kartenserver bundesweit vorhandene Kartenwerke interaktiv dargestellt und genutzt werden. Für die weiterführende Recherche sind die Internetseiten der SGD verlinkt.

3.1.1 Bohrdatenbanken

Ein wichtiges länderübergreifendes Produkt, das über das InfoGEO-Portal erreicht werden kann, ist die „Bohrpunktkarte Deutschland“ (SGD o. J.-a), die bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) gehostet wird.

Da jede abgeteufte Bohrung gemäß Lagerstättengesetz beim jeweiligen SGD anzeigepflichtig ist, haben in der Bundesrepublik Deutschland die SGD die hoheitliche Aufgabe, für die Speicherung, Verarbeitung und Weitergabe von Informationen über Bohrungen Sorge zu tragen. Das hierfür unter den SGD am weitesten verbreitete Datenerfassungssystem ist die Software GeODin® der Firma FUGRO Consult GmbH. Die gemeinsame Internet-Anwendung „Bohrpunktkarte Deutschland“ ist als zentrales Portal vorgesehen, um länderübergreifend einen möglichst aktuellen Überblick über die vorliegenden Bohrdatenbestände zu vermitteln, indem Daten aus den einzelnen Landesportalen zusammengefasst präsentiert werden. Die Anwendung erlaubt die deutschlandweite Recherche nach Bohrungen auf Basis der wichtigsten Stammdatenattribute. Anfragen zu Detailinformationen z. B. zu den vollständigen Schichtenverzeichnissen von Bohrungen sind i. d. R. an die jeweils zuständige Landesbehörde zu richten.

Im gemeinsamen Portal noch nicht verfügbar sind nach aktuellem Stand (März 2016) die Bohrdaten der SGD von Mecklenburg-Vorpommern, Rheinland-Pfalz, Hessen, Bayern und des Saarlandes. Der Bearbeitungsstand in diesen Bundesländern weist große Diskrepanzen auf. Bayern verfügt über einen umfangreichen „GeoFachdatenAtlas“ (Bodeninformationssystem Bayern), der im Internet zur Verfügung steht und u. a. ca. 150.000 Bohrungen mit Schichtenverzeichnis enthält (LfU 2015). Das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG) bietet neben dem Landesbohrdatenspeicher eine Reihe weiterer Fachinformationssysteme über die hauseigene Webseite an (LUNG o. J.). Für Hessen wird vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) ebenfalls ein internetbasiertes Fachinformationssystem Geologie (FISGE) aufgebaut (HLNUG 2012), in dessen Rahmen auch die Daten des geowissenschaftlichen Archivs in eine Bohrdatenbank überführt und homogenisiert werden, um damit die geologische Karte 1:25.000 zu ergänzen. Rheinland-Pfalz hat erst mit dem Haushaltsplan für das Haushaltsjahr 2016 einen Leistungsauftrag für eine „Integrierte geowissenschaftliche Landesaufnahme“ in Einzelplan 08 formuliert, der auch die Erstellung einer zentralen Bohrdatenbank und Schaffung von Informationsmöglichkeiten über eine Internetanwendung beinhaltet (Rheinland-Pfalz 2015). Das Saarland verfügt zwar über ein eigenes Geoportal mit Kartenviewer, hat dort aber keine Bohrdaten hinterlegt (GDI SL 2016).

3.1.2 Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS):

Das Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS) (LBEG o. J.) wird vom Niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) betreut. Es umfasst Daten der deutschen Erdöl- und Erdgasindustrie aus dem gesamten Bundesgebiet einschließlich der deutschen Bereiche der Nord- und Ostsee. Mit dieser großen räumlichen Ausdehnung und einer hohen Vollständigkeit ist das KW-FIS gerade in Bezug auf Tiefbohrungen, die auch für die Erkundung kristalliner Wirtsgesteine in Deutschland wichtig sind, eine ergiebige Informationsquelle.

Die Inhalte stammen aus Datenbanken von privaten Unternehmen, die ihre Daten nach Lagerstättengesetz (LagerStG), Bundesberggesetz (BBergG) und im Rahmen des „Erdölgeologischen Austausches“ bereitstellen, sowie aus staatlichen Archiven wie dem des LBEG. Generell wird zwischen frei zugänglichen Nachweisdaten (Stammdaten) und vertraulichen Fachdaten, wie z. B. Messdaten, Profilen und Untersuchungen unterschieden, die nur mit Zustimmung des Eigentümers einsehbar sind. Den SGD selbst ist es unter gewissen Auflagen erlaubt, die Daten aufzubereiten und im Rahmen ihrer hoheitlichen Aufgaben z. B. für die Erstellung von Karten oder 3D-Modellen einzusetzen.

Bohrungen: In der KW-Bohrungsdatenbank sind derzeit Stammdaten von über 30.000 Bohrlokalationen erfasst. Dies betrifft sowohl Explorations- und -Produktionsbohrungen als auch zu anderen Zwecken niedergebrachte Tiefbohrungen sowie Versenkbohrungen zur Entsorgung von Lagerstättenwasser. Zusätzlich zu den Stammdaten sind auch nach speziellen Sachgruppen geordnete Informationen z. B. zu geologischen Profilen, Kernstrecken und Speichergesteinen vorhanden. Da alle Bohrungen durchgängig mit zwölfstelligen Identifikationsnummern gekennzeichnet sind, die auch in den Datenbanken der Eigentümer verwendet werden, ist ein möglichst reibungsloser Datenaustausch gewährleistet.

Bohrloch-Abweichdaten: Um die genaue räumliche Lage der erfassten Bohrprofile bestimmen zu können, sind Bohrloch-Abweichmessungen unerlässlich. Die Gründe für eine vertikale Ablenkung können einerseits unbeabsichtigt, aber auch geplant sein. Mit der neuesten Bohrtechnik kann die Ablenkung von Bohrpfad sehr genau gesteuert werden, so dass auch horizontale Bohrstrecken möglich sind. Mit Hilfe der Messdaten kann eine genaue geometrische Bestimmung des Bohrpfades im Untergrund erfolgen, was einerseits für geologische Fragestellungen und andererseits auch für die optimale Erschließung von Lagerstätten nützlich ist.

Seismische Bohrlochmessungen: Diese Daten, die mit speziellen Verfahren wie Geophonversenkmessungen (GVM) oder dem sogenannten Vertical Seismic Profiling (VSP) ermittelt werden, sind unerlässlich bei der Tiefenwandlung seismischer Daten, die zunächst nur Informationen zur Laufzeit des Signals geben. Erst wenn die genauen seismischen Geschwindigkeiten in den einzelnen Schichtpaketen bekannt sind und daraus ein Geschwindigkeitsmodell erstellt wurde, können den Reflexionsereignissen Tiefen zugeordnet werden. Messdaten der seismischen Laufzeit in Abhängigkeit von der Bohrungstiefe (Zeit-Tiefen-Kurven) sind derzeit für ca. 2650 Bohrungen hinterlegt.

Reflexionsseismik (2D und 3D): Reflexionsseismische Profile (2D-Seismik) sind seit Jahrzehnten die wichtigste geophysikalische Messmethode zur Erkundung geologischer Strukturen des Untergrundes. Im Gegensatz zu den in der 2D-Seismik erzeugten einzelnen Profilen, wird mit flächenhaften reflexionsseismischen Messungen in der 3D-Seismik aus einem engen Netz seismischer Profile eine 3D-Darstellung errechnet. Daraus können z. B. auch horizontale Profile, sogenannte Time-Slices, erzeugt werden, also eine horizontale 2D-Darstellung von laufzeitgleichen Seismikdaten. Auch hier werden Stammdaten zur Lage sowie weitere Titeldaten zur näheren Beschreibung der Messdaten erfasst.

Gravimetriedaten: Gravimetrische Messungen werden zum Nachweis von Dichteunterschieden von Gesteinsformationen im Untergrund eingesetzt. Die Dichte-Anomalien von Gesteinen im Untergrund werden durch geologische Unregelmäßigkeiten, wie variierende Gesteinseigenschaften z. B. in Verbindung mit Erdöl- oder Erzlagerstätten bzw. durch die unterschiedlich große Mächtigkeit der Erdkruste verursacht. Deshalb werden Gravimetriedaten häufig bei der Exploration von Lagerstätten genutzt.

Öl- und Gasfelder: Auch die Lage der bekannten Öl- und Gasfelder in Deutschland sowie weitere beschreibende Daten wie z. B. zum Betreiber, Produktionsstatus oder zu den Förderhorizonten und deren Tiefenlage sind als Fachinformationen verfügbar.

3.1.3 Geophysik

Das Fachinformationssystem Geophysik (FIS-Geophysik) dient zur bundesweiten Aufnahme und Bereitstellung von Daten über geophysikalische Messungen und Auswertungen des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG) und seiner Partner (LIAG 2008). Die Architektur des Gesamtsystems sieht eine Untergliederung in einen allgemeingültigen Teil (Überbau) mit Metadaten aller Methoden und in mehrere Subsysteme für die Bereiche Bohrlochgeophysik, Gravimetrie, Magnetik, 1D/2D-Geoelektrik, Untergrundtemperaturen, Vertical Seismic Profiling (VSP), Seismik, Helikoptergeophysik und Petrophysik vor. Die gespeicherten Daten sind z. T. frei zugänglich. Geschützte Daten können in Absprache mit den Dateneigentümern freigegeben werden.

Die Internet/Intranet-Schnittstelle FIS GP/WEB des FIS Geophysik besteht aus zwei Komponenten. Mit FIS GP/FORMS steht eine Menü- und Formularoberfläche z. B. mit den Funktionen Suche, Navigation, Export/Download, Drucken, Visualisieren, Analysieren/Auswerten zur Verfügung. FIS GP/GEO ist vor allem für die geografische Recherche (WebGIS) zuständig.

Im Auftrag der fünf Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen pflegte die Firma Geophysik GGD in einem Datenspeicher zusätzlich geophysikalische Daten, die überwiegend aus Erkundungen bis zum Jahr 1990 des VEB Geophysik Leipzig stammen. Im Jahr 2006 wurde der Speicher aufgelöst und die Daten zur weiteren Verwendung an die zuständigen Landesämter übergeben. Diese integrieren sie, wie z. B. das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und das Landesamt für Geologie und Bergwesen (LAGB) Sachsen-Anhalt, in eigene Fachinformationssysteme oder beauftragen, wie die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLfG), andere Institutionen wie das LIAG mit der Durchführung weiterer Arbeiten.

3.1.4 Geothermie

Informationen zur erwarteten geothermischen Höffigkeit des Untergrundes sind auch bei der Eignungseinschätzung von Wirtsgesteinsformationen nützlich, da hier z. B. Daten zum geothermischen Gradienten, zur Hydrogeologie und Grundwasserbeschaffenheit eine entscheidende Rolle spielen.

Das Geothermische Informationssystem GeotIS (LIAG 2006) zeigt die Potentiale und Standorte der tiefen Geothermie in Deutschland. Es setzt sich aus zwei ehemals eigenständigen Modulen zusammen und bezieht auch Daten aus dem FIS-Geophysik mit ein.

Das Modul Geothermische Potentiale bietet eine Zusammenstellung von Daten und Informationen über tiefe Grundwasserleiter in Deutschland, die für eine geothermische Nutzung in Frage kommen. Für das Molassebecken in Süddeutschland, den östlichen Teil des Norddeutschen Beckens, Teile des westlichen Norddeutschen Beckens und Teile Hessens lassen sich Verbreitung, Tiefenlage und Temperatur von relevanten geologischen Formationen darstellen. Die Boden- und die Untergrundtemperatur ist - soweit es die Datenlage zulässt - für ganz Deutschland abrufbar. Darüber hinaus können weitere Fachdaten wie z. B. die Lage von Bohrungen und seismischen Profilen in der Kartenansicht ein- und ausgeblendet werden. Das Modul steht frei zur Verfügung, wobei die Eigentumsrechte an den Basisdaten in geeigneter Weise berücksichtigt werden müssen.

Mit dem Modul Geothermische Standorte ermöglicht das Geothermische Informationssystem einen Überblick über geothermische Anlagen, die sich derzeit in Deutschland in Betrieb oder Bau befinden. Zu jeder Anlage lassen sich Details wie zum Beispiel die installierte Leistung oder die durchschnittliche Stromproduktion abrufen. Seit 2011 werden die Energiedaten jährlich bei den Betreibern abgefragt und dargestellt.

Das Geothermische Informationssystem ist in erster Linie ein Werkzeug zur Qualitätsverbesserung bei der Projektierung geothermischer Anlagen und dient der Minimierung des Fündigkeitsrisikos. Grundsätzlich stellt es die digitale Variante eines Geothermie-Atlas dar, der weitgehend maßstabsunabhängig ist und ständig aktualisiert wird. Dies gilt sowohl für geowissenschaftliche Basisdaten als auch für neue Erkenntnisse und Ergebnisse, wie die Berücksichtigung von 3D-Modellen und Störungen. Trotz des hohen Datenvolumens kann das Geothermische Informationssystem zwar keine lokale Machbarkeitsstudie ersetzen, enthält aber eine Reihe geologischer und hydrogeologischer Daten, die Hinweise zur Beschaffenheit von Kristallinvorkommen und ggf. überlagernder Gesteinsformationen liefern können.

In diesem Zusammenhang ist ein Projekt zur Exploration von Festgestein mittels 3D-Seismik, das vom LIAG koordiniert wird, nennenswert, das sich mit der seismischen Erkundung kristalliner Gesteinskörper zum Zweck der geothermischen Nutzung befasst (LÜSCHEN et al. 2015). Hier werden neue Verfahren zur bisher kaum angewendeten und wenig erforschten seismischen Exploration von Festgesteinen und insbesondere von internen Zerrüttungszonen entwickelt, die mittelfristig auch für die Erkundung von Endlagerstandorten im Kristallin zum Einsatz kommen könnten. Denn diese Zonen müssten im Gegensatz zur Geothermie, wo sie aufgrund ihrer erhöhten Permeabilität vorteilhaft sind, bei der Suche eines potenziellen Endlagerstandortes im Kristallin gemieden werden.

3.1.5 Speichergesteine

Mit dem Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland (REINHOLD et al. 2011) wurde von den SGD unter Federführung der BGR die Grundlage zur Nutzung des tieferen Untergrundes für klimaschützende Speicherprojekte gelegt. Das auch als „Speicher-Kataster-Deutschland“ bezeichnete Projekt lieferte eine bundesweit abgestimmte Übersicht zu untersuchungswürdigen Speicher- und Barrieregesteinen des tieferen Untergrundes. Unter Festlegung einheitlicher Kriterien wurden bundesweit 18 stratigraphisch definierte Speicher- und Barrierekomplexe beschrieben und zugehörige Potenzialkarten für die festgelegten Einheiten aus dem oberen Paläozoikum und dem Mesozoikum erstellt. Zusätzlich zum Bericht wurde die GIS-basierte Kartenanwendung „Informationssystem Speicher-Kataster Deutschland“ verwirklicht, die neben den Potenzialkarten auch Informationen zur Datenlage (Bohrungen und Seismik) enthält.

3.1.6 BGR - Geodatenmanagement

Die BGR bietet über ihr hauseigenes Webportal zusätzlich zum Produktcenter eine große Auswahl stetig aktualisierter Geofachdaten als Webdienste und Downloads an. Zurzeit sind verschiedene Web Map Services (WMS) sowie ein Katalogdienst als Catalogue Service Web (CSW) realisiert.

Der Geoviewer ermöglicht, die von der BGR angebotenen Geodatendienste mit verschiedenen Kartengrundlagen aus mehreren Fachgebieten kombiniert zu betrachten. Die Geodaten zu den Karten stehen i. d. R. auch zum Download bereit (BGR o. J.).

Die globalen, deutschland- und europaweiten Übersichtskarten liegen in unterschiedlichen Maßstäben ab 1:200.000 vor, wobei der vorgegebene sichtbare Maßstabsbereich variieren kann. Außerdem sind einige Karten beim Aktivieren bestimmter Themen attributbasiert abfragbar.

3.2 Geologische 3D-Modelle

Mit der sich schnell weiterentwickelnden Hard- und Software in der Computertechnik ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, die oft komplexen geologischen Sachverhalte dreidimensional und damit verständlicher darzustellen. Dazu ist zum einen eine solide Datengrundlage zum anderen aber auch geologischer Sachverstand zur Interpretation und konsistenten Kombination der Daten notwendig. Aus modellierten Trennflächen können Volumenkörper erzeugt werden, die ihrerseits parametrisiert, d. h. mit den unterschiedlichsten Attributen versehen werden können.

Während sich industrielle Anwender meistens auf relativ kleinräumige Bereiche wie Lagerstätten konzentrieren, versuchen die SGD auch großräumigere Modelle, die möglichst ihren Zuständigkeitsbereich abdecken, zu entwickeln. Dies geschieht oft auch im Rahmen von großen Verbundprojekten, was die nationale und internationale Abstimmung über Zuständigkeitsgrenzen hinweg verbessert.

Den Zuständigkeitsbereich abdeckende geologische 3D-Modelle liegen im Internet z. B. für Niedersachsen (LBEG 2016), Baden-Württemberg (LGRB 2015) und Berlin (Berlin o. J.) vor, wobei für Berlin nur quartäre und tertiäre Horizonte enthalten sind. Nordrhein-Westfalen bietet, nachdem zunächst nur das Ruhrgebiet zur Kohlenvorratsberechnung bearbeitet wurde, auch ein interaktives flächendeckendes 3D-Modell zu den wichtigsten geologischen Horizonten an und ergänzt dieses laufend (GD-NRW o. J.). Brandenburg hatte ebenfalls ein frei verfügbares Modell zur Verfügung gestellt, musste es jedoch wegen juristischer Probleme bei der Datennutzung wieder zurückziehen (LBGR 2016).

Zum geothermischen Potential sowie zum Oberrheingraben liegen auch in Hessen diesbezügliche Modelle vor, die durch weitere, in Planung befindliche, Projekte ergänzt werden sollen (HLNUG o. J.). Für Hamburg wurden bisher ein geologisches Struktur- und ein darauf aufbauendes Temperaturmodell des tiefen Untergrundes sowie hydrogeologische Modelle erstellt (GLA o. J.). Das Thüringer Becken wurde im Rahmen des von der Friedrich-Schiller-Universität Jena koordinierten Forschungsvorhabens „Integrierte Fluidynamik in Sedimentbecken“ (INFLUINS) modelliert und steht ebenfalls über den NIBIS - Kartenserver des LBEG zur Verfügung (LBEG 2016). Primäres Ziel war es hier, ein möglichst hochauflösendes Strukturmodell des Deckgebirges (Zechstein bis Quartär) zu generieren, das die Informationen über Geopotentiale und Georisiken bündelt und dreidimensional darstellt. In Sachsen werden seit 2001 geologische 3D-Untergrundmodelle konstruiert. Für das landesweite 3D-Modell, das derzeit in Bearbeitung ist, wurden 13 Modelleinheiten definiert, die zusammen mit älteren Modellen in ein Gesamtprodukt einfließen sollen (LfULG o. J.). Im Rahmen einer Dissertation wurden auch Daten für den Festlandsbereich von Schleswig-Holstein aufbereitet und in ein Basis- sowie drei Detailmodelle überführt (Hese 2012). Das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) ist außerdem am Verbundprojekt „StörTief“ des LIAG beteiligt, das sich mit tiefreichenden Störungssystemen im Norddeutschen Becken befasst und auch zur Erweiterung des GeotIS (vgl. Kapitel 3.1.4) dienen soll.

3.3 Kristallinrelevante Forschungsprojekte unter Beteiligung der BGR

Da die BGR an einer Vielzahl von Projekten, die neue Erkenntnisse über kristalline Gesteine liefern, federführend beteiligt war und ist, wird im Folgenden nur auf eine Auswahl von Arbeiten verwiesen. Die Darstellung von speziell zur Standorterkundung und im Bereich der Endlagersicherheit durchgeführten Untersuchungen erfolgt separat und konzentriert sich auf internationale Forschungsvorhaben.

3.3.1 GEISHA-Studie

Eine Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Festgestein erfolgte im Rahmen der GEISHA-Studie (PAPP 1999). Diese orientierte sich maßgeblich am schwedischen KBS-3-Konzept, das die Einlagerung von Abfallbehältern in vertikalen Bohrlöchern im Festgestein vorsieht.

Die meisten für die Synthese zur Geologie der Kristallinvorkommen in Deutschland relevanten Informationen wurden in Kapitel 2.3 der GEISHA-Studie dokumentiert, das auf den Ausarbeitungen zum Arbeitspaket 6 der Studie (BRÄUER et al. 1995) beruht und sich mit wichtigen Fragestellungen zur Standorterkundung auseinandersetzt. Innerhalb dieses

Kapitels wurde auch auf Informationen zurückgegriffen, die im Rahmen des GEISHA-Arbeitspaketes 3 zu den Hartgesteinen in Deutschland zum Vergleich mit ausländischen Standortregionen zusammengetragen wurden (BRÄUER 1994).

Der durchgeführte internationale Vergleich zeigte, dass die hauptsächlich während der variszischen Orogenese entstandenen deutschen Kristallinvorkommen zwar in den meisten Fällen wesentlich jünger als die zum Baltischen und Kanadischen Schild zählenden sind, sich daraus aber keine geringere tektonische Beanspruchung ableiten lässt. Aufgrund eines unruhigeren geologischen Umfeldes mit stärkerer tektonischer Überprägung ist eher vom Gegenteil, also intensiverer Klüftung, auszugehen. Auch beim flächenmäßigen Größenvergleich zeigten sich deutliche Unterschiede, da deutsche Vorkommen i. d. R. wesentlich kleinräumiger ausgebildet sind. Die Petrographie der kanadischen Granite und damit verbundene weitere Gesteinseigenschaften wichen nur geringfügig von deutschen Vorkommen ab.

Zu beachten war allerdings, dass die geochemische Zusammensetzung der Tiefenwässer besonders in küstennahen Regionen oft nicht vergleichbar mit der von typischen deutschen Kristallinvorkommen ist, da in Meeresnähe auch schon in geringerer Tiefe höher mineralisierte Wässer zu erwarten sind. Hierzu wurde im Arbeitspaket 3 ein internationaler Vergleich der hydrochemischen Verhältnisse von Referenzgrundwässern in kristallinen Gesteinen durchgeführt und tabellarisch dokumentiert. Es zeigte sich, dass für die Abschätzung der Machbarkeit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle vor allem Süßwässer aus der Nordschweiz als Referenzgrundwässer für deutsche Kristallinvorkommen geeignet waren.

Es wurde erkannt, dass die Herausforderung bei der Erkundung kristalliner Gesteine vor allem darin besteht, ausreichend große Zonen mit geringer Klüftung und Durchlässigkeit auszuweisen. Als Vorteile granitischer Gesteine wurden die hohe Standfestigkeit, geringe Löslichkeit und ein im Vergleich zu Salzgestein günstigerer Wärmeausdehnungskoeffizient gesehen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von kristallinen Gesteinen ist geringer als der von Salzgesteinen und damit günstiger in Bezug auf thermisch induzierte Spannungen. Die im Vergleich mit Salzgesteinen geringere Wärmeleitfähigkeit wurde bei Granit als weniger temperaturabhängig beschrieben.

Bei der Auslegung eines Endlagers in Festgestein wurde aufgrund der thermischen Eigenschaften des Wirtsgesteins sowie der Grenztemperaturen am Übergang vom Endlagerbehälter zum Versatz mit einer größeren Behälterzahl und damit gesteigertem Hohlraumbedarf (ca. Faktor 3) kalkuliert. Hierbei spielen auch Überlegungen zur Gewährleistung der Kritikalitätssicherheit im Festgestein eine Rolle.

3.3.2 Tiefenlage der Kristallin - Oberfläche in Deutschland

Da die Bewertung von Kristallingesteinen vor allem auf die an der Oberfläche anstehenden bzw. unter geringer Bedeckung auftretenden Kristallinkomplexe mit magmatischen und hochmetamorphen Gesteinen konzentriert war, wurde mit der BGR-Studie „Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland“ (REINHOLD 2005) erstmals eine flächenhafte Darstellung der Tiefenlage einer geologischen Stockwerkssoberfläche, die in Teilen gleich der „Kristallin-Oberfläche“ ist, vorgenommen.

Nachdem zunächst der Begriff Kristallin definiert wurde, erfolgte die Darstellung der Tiefenlage des Grundgebirges mit Hilfe der vorliegenden Informationen. In Norddeutschland, mit seinen hohen Mächtigkeiten von Sedimentgesteinen, lagen nur wenige Informationen über das Grundgebirge vor, weshalb hier die sogenannte Präperm-Oberfläche als eine stratigraphische Grenzfläche zur Darstellung herangezogen wurde. Wegen fehlender direkter Informationen z. B. durch Bohrungen dienten hier Potenzialfeldmessungen zur indirekten Ableitung der Tiefenlage des Grundgebirges.

Das Grundgebirge wurde in fünf regionalgeologische Zonen unterteilt, innerhalb derer Magmatite und z. B. durch Regionalmetamorphose entstandene Metamorphite als potenzielle Wirtsgesteine angesprochen wurden. Die Bestimmung der Tiefenlage des Grundgebirges erfolgte vorwiegend anhand von Bohrungen unter Berücksichtigung von bedeutenden größeren Störungszonen und Strukturen. Es zeigte sich, dass die größten Areale mit Wirtsgesteinen unter einer Sedimentbedeckung von bis zu 1000 m im Bereich des Moldanubikums und der Mitteldeutschen Kristallinzone lokalisiert sind. Eine zusammenfassende Darstellung zur, nach damaligem Kenntnisstand abgeleiteten, Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland wurde in einer Übersichtskarte festgehalten. Die Anlage 1 der Studie „Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland“ befindet sich im Anhang dieses Berichtes.

3.3.3 Nordsee und Norddeutsches Becken

Der Geotektonische Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (BALDSCHUHN et al. 2001), der seit dem Jahr 2004 im Projekt „Geotektonischer Atlas Norddeutschland“ weiterentwickelt wird, bildet die Grundlage für den Großteil der Modellierungsansätze im Bereich des Norddeutschen Beckens. Dazu zählen abgeschlossene Projekte wie „Geopotenzial Deutsche Nordsee“ (GPDN) mit umfangreichen GIS- und 3D-Produkten zum Bereich des deutschen Nordseesektors. Zur Abschätzung der Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken ist das seit 2014 laufende Kooperationsprojekt „Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken“ (TUNB) angelegt.

Darin soll mit den Partnern des von der BGR koordinierten Projektes über einen Zeitraum von ca. sechs Jahren ein 3D-Modell des Norddeutschen Beckens als fachliche Grundlage für die weitere Analyse und Bewertung verschiedener Nutzungsoptionen und möglicher Nutzungskonkurrenzen erarbeitet werden. Mittel- bis langfristig soll mit Hilfe der Erstellung eines deutschlandweiten geologischen 3D-Modells des tieferen Untergrundes die Informationsgrundlage vereinheitlicht und erweitert werden.

Auch internationale Projekte unter Beteiligung der BGR wie die Erstellung des Southern Permian Basin Atlas (DOORNENBAL & STEVENSON 2010), der eine Kompilation von Geodaten des Mitteleuropäischen Beckens (BGR Projekt: GIS Südliches Permbecken), also des tieferen Untergrundes zwischen Großbritannien und Polen enthält, liefern eine gute Datengrundlage für weitergehende Vorhaben.

3.3.4 Hydrogeologie

Obwohl bereits einige Arbeiten zur Hydrogeologie von kristallinen Gesteinen durchgeführt und veröffentlicht wurden (z. B. STÖBER (1995), STÖBER & BUCHER (2000)), ist Forschungsbedarf nach wie vor gegeben. Geowissenschaftliche Großforschungsprojekte, wie das von 1987 bis 1995 realisierte Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland (KTB), liefern auch in hydrogeologischer Hinsicht wichtige Resultate. Für den tieferen Untergrund Deutschlands wird z. Z. im Rahmen der übertragenen Aufgaben nach Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) von der BGR ein Konzept für ein Fachinformationssystem zum Thema Formationswasser erstellt. In diesem sollen möglichst alle verfügbaren Daten zusammengeführt und soweit möglich der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Dazu zählen u. a. auch Daten, die Aussagen zum, bei der Endlagersuche in kristallinen Formationen wichtigen, Grundwasseralter gestatten.

Außerdem liefert die BGR für den Themenkomplex Grundwasser des Hydrogeologischen Atlas Deutschland (HAD) verschiedene thematische Karten zur Verdeutlichung der Grundwasserverhältnisse in Deutschland, die dazu geeignet sind, die Betrachtungen der Kristallinstudie zu diesem Thema zu ergänzen.

Da die hydraulische Durchlässigkeit von Klüften eine hohe Relevanz für die geotechnische Nutzung des tiefen Untergrundes in Deutschland hat, wurde von der BGR das Projekt FracReact initiiert. Um Wechselwirkungen zwischen Kluft-Hydraulik und reaktivem Transport aufzuzeigen, soll die zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung solcher Lösungs- und Fällungsprozesse in Relation zur hydraulischen Strömungssituation erforscht werden.

3.3.5 Barrieregesteine (flach lagernde Salze, Ton und Tonstein)

Da im Zusammenhang mit dem Wirtsgestein Kristallin auch die Option eines Wirtsgesteinskörpers unter Überdeckung durch ein Barrieregestein wie Salz oder Ton von Bedeutung sein kann, sind auch diesbezügliche Forschungsvorhaben von besonderem Interesse.

Die Salzkarte der BGR dient als Basis für eine Vielzahl folgender Arbeiten (REINHOLD et al. 2008). Mit den im Projekt BASAL zur Verbreitung und zu den Eigenschaften flach lagernder Salzschieben generierten Daten liefert die BGR grundlegende Informationen für die im Standortauswahlgesetz (StandAG 2013) geforderten Vorschläge der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ zu den Entscheidungsgrundlagen für alle in Deutschland vorkommenden potenziellen Endlagerwirtsgesteine. Dies trifft auch auf weitere aktuelle Projekte der BGR zu, die sich mit Salzstrukturen in flacher Lagerung sowie Doppel- und Mehrfachsalinaren beschäftigen. Bereits im Jahr 2003 erhielt die BGR den Auftrag, analog zu den bereits vorliegenden Studien zu Steinsalz und Kristallin die deutschlandweite Verbreitung von Tongesteinen als potenzielle Wirtsgesteine zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen, die international als High Level Waste (HLW) bezeichnet werden, wissenschaftlich zu untersuchen. Die Ergebnisse der Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsinformationen sind in der Studie von HOTH et al. (2007) dokumentiert. Zu Tongestein wird außerdem seit 2013 im Projekt BASTION der Einfluss geologischer Prozesse auf die Barriereigenschaften solcher Formationen untersucht. Zusätzlich wurde für den Bereich der Tonforschung bis zum Jahr 2007 das Fachinformationssystem „Barrierewirksame Eigenschaften von Ton und Tonstein“ (BETTON) aufgebaut, das für die zentrale Speicherung und schnelle Bereitstellung aller verfügbaren Datensätze konzipiert wurde. Im Projekt AnSichT wird seit dem Jahr 2012 die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW- (High Active Waste) Endlager in Tonstein erarbeitet und deren Anwendbarkeit mit Bezug zu zwei generischen Standortmodellen in Nord- und Süddeutschland getestet.

3.3.6 Seismizität

Erdbebengefährdung ist bei einigen Kristallinstandorten ein zu berücksichtigendes Kriterium. Die BGR hat die Aufgabe übernommen einen Erdbebenkatalog für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zu erarbeiten und zu aktualisieren. Der Erdbebenkatalog für Deutschland und angrenzende Gebiete für den Zeitraum vom Jahr 800 bis 2008 wurde von LEYDECKER (2011) veröffentlicht. Um die systematische Zusammenstellung paläoseismischer Befunde und ihre Bewertung für Deutschland und angrenzende Gebiete weiterzuentwickeln, erarbeitet die RWTH Aachen im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der BGR seit 2012 eine Grundlagenstudie zu dieser Thematik. Ein Produkt der Studie, die als Pilotstudie im Rahmen eines Programms der Internationalen Atomenergiebehörde

IAEA angelegt wurde, ist eine Datenbank mit paläoseismischen Befunden (PalSeisDB), der laufend aktuelle Erkenntnisse wie z. B. die von GRÜTZNER et al. (2016) zu holozänen Ereignissen in der Niederrheinischen Bucht hinzugefügt werden sollen.

In der Region Westböhmen/Vogtland arbeitet die BGR in einem Kooperationsvorhaben an Fragestellungen, die die räumliche und zeitliche Abbildung von Fluidaufstiegswegen in der Erdkruste des dortigen Schwarmbebengebietes betreffen. Auch hier handelt es sich, aufgrund der Nähe des Untersuchungsgebietes zu untersuchungswürdigen Kristallinstandorten, um ein nennenswertes Vorhaben.

3.3.7 Stratigraphie

In Zusammenarbeit von BGR, Deutscher Stratigraphischer Kommission (DSK), Geologischem Dienst Nordrhein-Westfalen (GD-NRW) und dem Staatlichen Museum für Naturkunde Stuttgart (SMNS) wurde das Lithostratigraphische Lexikon LithoLex entwickelt (BGR et al. o. J.). Ziel des Vorhabens ist, nach Möglichkeit Beschreibungen für alle lithostratigraphischen Einheiten in Deutschland in einer Access-Datenbank zu erfassen und über eine seit dem Jahr 2006 verfügbare Internetanwendung zugänglich zu machen.

Die Datenbank wird fachlich von der Deutschen Stratigraphischen Kommission (DSK) betreut. Die DSK und ihre Subkommissionen verfolgen das Ziel, die wissenschaftliche Arbeit auf dem Gebiet der Stratigraphie zu fördern und zu koordinieren. Die DSK sorgt einerseits für die Verbreitung nationaler und internationaler Empfehlungen und Vereinbarungen unter den inländischen Forschern und vertritt andererseits die von ihr erarbeiteten wissenschaftlichen Standpunkte auf dem Gebiet der Stratigraphie in der internationalen Diskussion (DSK 2013).

Dabei steht die Lithostratigraphie als wichtige Grundlage aller geologischen Arbeiten im Vordergrund. Mit ihrer Hilfe werden lokale und regionale lithologisch definierte Gesteinskörper voneinander unterschieden. Die Biostratigraphie kommt vor allem für die Korrelation der regionalen, lithostratigraphisch definierten Gesteinskörper mit den globalen geochronologischen Referenzeinheiten in Betracht. Zusätzlich kommen vermehrt auch Verfahren wie Magnetostratigraphie, Tephrochronologie, Sequenzstratigraphie, Zyклоstratigraphie, Chemostratigraphie und Isotopengeochronometrie zum Einsatz.

Zu vielen wie z. B. den ältesten in Deutschland nachgewiesenen stratigraphischen Einheiten aus dem Ordovizium, Kambrium und Neoproterozoikum liegen inzwischen Monographien vor (DSK 1997, 2001a, 2001b). Weitere Bände sind geplant bzw. in Arbeit.

3.3.8 Kaltzeitliche Rinnensysteme

Die Bedeutung kaltzeitlicher Rinnensysteme für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten wurde zunächst im Zusammenhang mit dem Wirtsgestein Salz erkannt (vgl. KLINGE et al. (2002)), kann aber auch bei kristallinen Standorten insbesondere unter Überdeckung mit einem Barrieregestein zum Tragen kommen. Vor allem in Norddeutschland sind tief eingeschnittene Rinnensysteme in überwiegend tertiären und quartären Lockersedimenten bekannt. Die tiefsten dieser überwiegend elsterzeitlichen Erosionsformen können das Deckgebirge oberhalb von Salzstrukturen ausräumen, wodurch u. U. die Möglichkeit besteht, dass das Wirtsgestein unmittelbar mit subglazialen Schmelzwässern in Kontakt kommt.

Die BGR hat in diesem Zusammenhang verschiedene Untersuchungen und Studien durchgeführt (KELLER 2009, 2010) und arbeitet aktuell im Projekt „Rinnen Süd“ im wissenschaftlichen Austausch mit nationalen und internationalen Diensten an der Darstellung und Verbesserung der Datenlage für Süddeutschland.

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht enthält im ersten Teil (siehe Kapitel 2) zunächst eine Synthese von Erkenntnissen aus den im Rahmen der Kristallinstudie erbrachten wissenschaftlichen Arbeiten der BGR unter Berücksichtigung der dabei verwendeten Datengrundlagen. Nach der Darstellung der wichtigsten Ergebnisse der Vorstudien zu verschiedenen Kristallinvorkommen in den alten und neuen Bundesländern wird primär das in der abschließenden Kristallinstudie angewandte Auswahl- und Bewertungsverfahren erläutert, das zur Selektion der zur weiteren Untersuchung als besser geeignet eingestuften Standortregionen geführt hat. Das umfangreiche Kartenmaterial, das ebenfalls mit Fertigstellung des Endberichtes vorlag, wurde danach von der BGR digital aufbereitet und in ein Fachinformationssystem überführt.

Beim zweiten Teil des Berichtes (siehe Kapitel 3) steht die Frage nach Erkenntniszuwächsen, die seit dem Erscheinen der Kristallinstudie im Jahr 1994 zu verzeichnen sind, im Fokus. Im Wesentlichen wird dabei Bezug auf die Arbeit der Geologischen Dienste der Bundesländer genommen, die mit der hoheitlichen Aufgabe betraut sind, möglichst umfassend die verfügbaren Geodaten in ihrem jeweiligen fachlichen und räumlichen Zuständigkeitsbereich zu archivieren und aufzubereiten. Viele dieser Daten wie Ergebnisse von Bohrungen und geophysikalischen Untersuchungen werden von den SGD und anderen Einrichtungen in Fachinformationssystemen und Datenbanken eingepflegt und vorgehalten, die dann z. B. bei der Erstellung von Geoinformationssystemen, geologischen Kartenwerken und 3D-Modellen zum Einsatz kommen. Einige Projekte unter Beteiligung der BGR wie z. B. die GEISHA-Studie sind ebenfalls für die Suche nach geeigneten kristallinen Wirtsgesteinen relevant und können zielführende Hinweise liefern.

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. – 260 S.; Berlin.
- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – 88 S.; Hannover (Schweizerbart).
- BALZER, D. & MAURER, U. (2003): Fachinformationssystem (FIS) Geowissenschaften und Entsorgung von Abfällen (GEA) - Ergebnisse des Auswahl und Bewertungsverfahrens. – 52 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- Berlin (o. J.): Geologisches Landesmodell für das Quartär und Tertiär. – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt. Verfügbar unter: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/wasser/geologie/de/landesmodell.shtml> (Zugriff: 26.02.2016).
- BGR (2014): Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland. Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- BGR (o. J.): BGR-Geoviewer. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Verfügbar unter: <https://geoviewer.bgr.de/> (Zugriff: 10.03.2016).
- BGR, DSK, GD-NRW & SMNS (o. J.): Lithostratigraphisches Lexikon Deutschland (LithoLex) – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Verfügbar unter: <http://litholex.bgr.de/index.php> (Zugriff: 08.03.2016).
- BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf (Zugriff: 16.03.2016).
- BRÄUER, V. (1984a): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland - 3. Teil: Die Kristallinmassive des Odenwaldes, des Spessarts und des Westharzes. – BGR; Hannover.
- BRÄUER, V. (1984b): Kurzbericht für das Jahr 1983. – 8 S., BGR; Hannover.

- BRÄUER, V. (1994): Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein „GEISHA“. Arbeitspaket 3: Randbedingungen Hartgestein in Deutschland. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- BRÄUER, V., EICKEMEIER, R. & WALLNER, M. (1995): Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Hartgestein „GEISHA“. Arbeitspaket 6: Standorterkundung. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P., SCHUSTER, P. & SPRADO, K.-H. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen –147 S., BGR; Hannover.
- BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P. & SPRADO, K.-H. (1991): Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer - 1. Bericht. – BGR; Hannover.
- BRÄUER, V., REH, P., MARASCHEK, U., SPRADO, K.-H., DUSCHEK, B., SCHULZ, P. & WOERSCHING, C. (1993): Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer - 2. Bericht. – BGR; Hannover.
- DOORNENBAL, J. C. & STEVENSON, A. G. (Hrsg.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – 342 S.; Houten (EAGE Publication b. v.).
- DSK (Hrsg.) (1997): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil I: Thüringen, Sachsen, Ostbayern. – 437 S.; Stuttgart (Schweizerbart). ISBN 3-929907-43-7.
- DSK (Hrsg.) (2001a): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil II: Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg. – 236 S.; Stuttgart (Schweizerbart). ISBN 3-510-61332-5.
- DSK (Hrsg.) (2001b): Stratigraphie von Deutschland II: Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum. Teil III: Nordthüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, deutscher Anteil Ostsee, Schleswig-Holstein, deutscher Anteil Nordsee. – 186 S.; Stuttgart (Schweizerbart). ISBN 3-510-61334-1.

- DSK (2013): Internetauftritt der Deutschen Stratigraphischen Kommission. – Deutsche Stratigraphische Kommission (DSK). Verfügbar unter: <http://www.stratigraphie.de/index.html> (Zugriff: 08.03.2016).
- GD-NRW (o. J.): 3D-Modelle des Untergrundes. – Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen. Verfügbar unter: http://www.gd.nrw.de/ge_eb_3D_modelle.htm (Zugriff: 26.02.2016).
- GDI-SL (2016): GeoPortal Saarland. – Geodateninfrastruktur Saarland. Verfügbar unter: <http://geoportal.saarland.de/portal/de/startseite/geowissenschaften/bergbau-und-geologie.html> (Zugriff: 23.02.2016).
- GLA (o. J.): Geologische 3D Modelle im GLA. – Geologisches Landesamt Hamburg. Verfügbar unter: <http://www.hamburg.de/3d-geo> (Zugriff: 26.02.2016).
- GRÜTZNER, C., FISCHER, P. & REICHERTER, K. (2016): Holocene surface ruptures of the Rurrand Fault, Germany—insights from palaeoseismology, remote sensing and shallow geophysics. – *Geophysical Journal International*, 204(3): 1662-1677. doi:10.1093/gji/ggv558.
- HESE, F. (2012): 3D Modellierungen und Visualisierung von Untergrundstrukturen für die Nutzung des unterirdischen Raumes in Schleswig-Holstein. – 156 S., Christian-Albrechts-Universität zu Kiel; Kiel.
- HLNUG (2012): Fachinformationssystem Geologie (FISGE), Bohrdatenportal Hessen. – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Verfügbar unter: <http://geologie.hessen.de/Main.html?role=bohrdaten> (Zugriff: 23.02.2016).
- HLNUG (o. J.): Geologische 3D-Modellierung in Hessen. – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Verfügbar unter: <http://www.hlnug.de/themen/geologie/geologische-landesaufnahme/geologische-3d-modellierung.html> (Zugriff: 26.02.2016).
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – 118 S., BGR; Hannover/Berlin.
- KELLER, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung fuer die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. – 24 S., BGR; Hannover.

- KELLER, S. (2010): Bedeutung von ausgewählten eiszeitlichen Prozessen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland. – In: Fluegge, J. & Ruebel, A.: Grundsatzfragen Hydrogeologie; Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE. – 264: 257; Braunschweig, Germany (Gesellschaft fuer Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)). ISBN/ISSN 9783939355397.
- KLEINE BORNHORST, A., BANCHET, D. S. v. & BRÄUER, V. (1984): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland. 2. Teil: Die Schwarzwälder Granitmasse. – 242 S., BGR; Hannover.
- KLINGE, H., KÖTHE, A., LUDWIG, R.-R. & ZWIRNER, R. (2002): Geologie und Hydrogeologie des Deckgebirges über dem Salzstock Gorleben. – Z. Angew. Geol., 48(2): 7-15.
- KOSINOWSKI, M. & BANCHET, D. S. v. (1983a): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland - 1. Teil: Das bayerische Kristallin am Westrand der Böhmisches Masse. – BGR; Hannover.
- KOSINOWSKI, M. & BANCHET, D. S. v. (1983b): Kurzbericht für das Jahr 1982. Das bayerische Kristallin am Ostrand der Böhmisches Masse. – 7 S., BGR; Hannover.
- LBEG (2016): NIBIS Kartenserver. – Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Verfügbar unter: <http://nibis.lbeg.de/cardomap3/> (Zugriff: 26.02.2016).
- LBEG (o. J.): Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem. – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Verfügbar unter: http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=652&article_id=670&_psmand=4 (Zugriff: 11.02.2016).
- LBGR (2016): LBGR Webservices. – Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (Brandenburg). Verfügbar unter: <http://www.lbgr.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.348647.de> (Zugriff: 26.02.2016).
- LEYDECKER, G. (2011): Geologisches Jahrbuch. Reihe E, Geophysik: Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008 Hannover. ISBN 978-3-510-95989-1.
- LfU (2015): GeoFachdatenAtlas des Bodeninformationssystems Bayern. – Bayerisches Landesamt für Umwelt. Verfügbar unter: <http://www.bis.bayern.de/bis/> (Zugriff: 23.02.2016).

- LfULG (o. J.): 3D-Modellierung in der Geologie. – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Verfügbar unter: <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/geologie/7648.htm> (Zugriff: 26.02.2016).
- LGRB (2015): LGRB Kartenviewer. – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg. Verfügbar unter: <http://maps.lgrb-bw.de/> (Zugriff: 26.02.2016).
- LIAG (2006): Geothermisches Informationssystem für Deutschland. – Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik. Verfügbar unter: <https://www.geotis.de> (Zugriff: 11.02.2016).
- LIAG (2008): Fachinformationssystem Geophysik. – Database, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik. Verfügbar unter: <http://www.fis-geophysik.de> (Zugriff: 11.02.2016).
- LUNG (o. J.): Geologie/Fachinformationssysteme (FIS) –Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Verfügbar unter: http://www.lung.mv-regierung.de/insite/cms/umwelt/geologie/fis_geo.htm (Zugriff: 23.02.2016).
- LÜSCHEN, E., GÖRNE, S., VON HARTMANN, H., THOMAS, R. & SCHULZ, R. (2015): 3D seismic survey for geothermal exploration in crystalline rocks in Saxony, Germany. – Geophysical Prospecting, 63(4): 975-989. ISSN 1365-2478. doi:10.1111/1365-2478.12249.
- MAURER-RURACK, U., BALZER, D., MARASCHEK, U., PRÜFER, S., SCHULZ, P., SELTENHEIM, J. & WÖRSCHING, C. (2008): Fachinformationssystem „Geowissenschaften und Entsorgung von Abfällen“ (FIS GEA). – BGR; Hannover.
- NAGRA (2002): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. – 659 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle; Wettlingen.
- PAPP, R. (1999): GEISHA : Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. – Forschungszentrum Karlsruhe GmbH; Karlsruhe.
- REINHOLD, K. (2005): Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland. – Abschlussbericht, BGR; Hannover/Berlin.
- REINHOLD, K., KRULL, P. & KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands - 1:500.000. – BGR; Hannover/Berlin.

REINHOLD, K., MÜLLER, C. & RIESENBERG, C. (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland - Synthese. – 134 S., BGR; Hannover/Berlin.

Rheinland-Pfalz (2015): Haushalt 2016. – Ministerium der Finanzen. Verfügbar unter: <https://fm.rlp.de/de/themen/finanzen/landeshaushalt/haushalt-2016/> (Zugriff: 23.02.2016).

SGD (o. J.-a): Bohrpunktkarte Deutschland. – Staatliche Geologische Dienste Deutschlands. Verfügbar unter: <http://www.bgr.de/app/boreholemap/main.php> (Zugriff: 11.02.2016).

SGD (o. J.-b): Infogeo. – Staatliche Geologische Dienste Deutschlands. Verfügbar unter: http://www.infogeo.de/home/index_html (Zugriff: 11.02.2016).

STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. – 191 S.; Stuttgart (Enke). ISBN 3-432-26771-1.

STOBER, I. & BUCHER, K. (Hrsg.) (2000): Hydrogeology of crystalline rocks. – VIII, 275 S.; Dordrecht [u.a.] (Kluwer). ISBN 0-7923-6082-6.

Anhangverzeichnis	Seite
-------------------	-------

Anhang 1:	39
-----------------	----

Karte „Tiefenlage des Grundgebirges“

(Autor: **REINHOLD, KLAUS** Tagebuch-Nr.: 10777/05 Datum: 31.05.2005 Auftragsnummer:
9Y3200020000)

Anhang 1:

Karte „Tiefenlage des Grundgebirges“

(Autor: REINHOLD, KLAUS Tagebuch-Nr.: 10777/05
 Datum: 31.05.2005 Auftragsnummer: 9Y3200020000)

