

Projekt VerSi

Endlagerung im Tonstein

Abschlussbericht zum
Vorhaben 3607R02538
„Untersuchung aktueller
planerischer Grundsatzfragen
zur Endlagerung radioaktiver
Abfälle in tiefen geologischen
Formationen“

Entwicklung eines
synthetischen
Tonsteinstandortes

Teil 1:
Randbedingungen und Anfor-
derungen an einen Tonstein-
standort

Projekt VerSi

Endlagerung im Tonstein

Abschlussbericht zum Vorhaben
3607R02538 „Untersuchung aktuel-
ler planerischer Grundsatzfragen
zur Endlagerung radioaktiver Abfälle
in tiefen geologischen Formationen“

Entwicklung eines synthetischen
Tonsteinstandortes

Teil 1:
Randbedingungen und
Anforderungen an einen
Tonsteinstandort

J. Larue
I. Kock
H. Seher

Dezember 2010

Auftrags-Nr.: 835650

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde lie-
gende FE-Vorhaben 3607R02538
wurde im Auftrag des Bundesmini-
steriums für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit durchgeführt.
Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt beim
Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und
Meinung des Auftragnehmers wie-
der und muss nicht mit der Meinung
des Auftraggebers übereinstimmen

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht beinhaltet den Teil 1 der Ergebnisse des Vorhabens 3607R02538 „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ in Bezug auf die Randbedingungen und Anforderungen an die Untersuchung eines alternativen Tonsteinstandortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle.

Im Bericht werden Anforderungen und Kriterien für Parameter formuliert, die für eine sicherheitsanalytische Modellierung notwendig sind. Es werden Methoden der übertägigen Erkundung beschrieben. Diese Methoden werden hinsichtlich ihrer Eignung überprüft und bewertet, Informationen und Datensätze der benötigten Parameter zu gewinnen.

Abstract

This report contains the results of work performed in project 3607R02538 in relation to boundary conditions and requirements for the investigation of an alternative repository for heat generating nuclear waste in a clay formation.

In this report requirements and criteria necessary for the modeling of safety analyses are posed. Surface bound exploration methods are described. These methods are then validated and assessed against their applicability on generating information and data sets of the required parameters.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Randbedingungen und Anforderungen an den Tonsteinstandort	3
2.1	Ableitung der Abmessungen und Begrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) auf Basis der Empfehlungen des AkEnd und der Sicherheitsanforderungen	4
2.2	Anforderungen an die Daten für die Charakterisierung und Bewertung von Tonsteinstandorten	6
2.3	Anforderungen an die Datenerfassung	11
2.3.1	Einschluss- und Barriereneigenschaften des Wirtgesteins	13
2.3.2	Langzeitstabilität (Erhaltung der Barrierewirkung)	21
2.3.2.1	Räumliche Trennung (Mächtigkeit des Wirtgesteins und Teufenlage)	21
2.3.2.2	Gebirgshebungen und –senkungen (Tektonik > Historie)	21
2.3.2.3	Äußere Einflüsse, Geomorphologie (Erosion, Eiszeit, Rinnenbildung)	22
2.3.2.4	Innere Einflüsse (geochemische Parameter, Mineralogie)	22
2.3.2.5	Gesteinsmechanische Parameter	22
2.3.3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	23
2.3.3.1	Prognostizierbarkeit der Entwicklung	23
2.3.3.2	Explorierbarkeit	24
2.3.4	Bautechnische Eignung (Verschlussmaßnahmen, Stabilität Grubengebäude)	24
2.3.4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	24
2.3.4.2	Untertägige Erschließung und Wasserhaltung	25
3	Möglichkeiten der Datenerfassung durch übertägige Erkundung und ihre Bewertung	26
3.1	Erkundungsmethoden	29
3.2	Seismik	30
3.2.1	2D Seismik	30
3.2.1.1	Unsicherheiten und Extrapolation	31
3.2.2	3D Seismik	32

3.2.2.1	Unsicherheiten und Extrapolation	33
3.2.2.2	Beurteilung	33
3.3	Bohrungen	34
3.3.1	Kernbohrungen mit in-situ Untersuchungen	34
3.3.1.1	Unsicherheiten und Extrapolation	36
3.3.1.2	Bewertung	37
3.3.2	Physikalische Laboruntersuchungen	38
3.3.2.1	Unsicherheiten und Extrapolation	40
3.3.2.2	Bewertung	41
3.3.3	Chemische Labor- und in-situ Untersuchungen	42
3.3.3.1	Unsicherheiten und Extrapolation	43
3.3.3.2	Bewertung	44
3.3.4	Geophysikalische Bohrlochmessungen	44
3.3.4.1	Unsicherheiten und Extrapolation	46
3.3.4.2	Bewertung	46
3.4	Synthese der übertägigen Untersuchungen	47
3.4.1	Erkundungsaufwand übertage	48
4	Zusammenfassung	54
5	Literatur/Unterlagen	55
	Abbildungsverzeichnis	62
	Tabellenverzeichnis	63
	Abkürzungsverzeichnis	64

1 Einleitung und Zielsetzung

Im Verbundprojekt VerSi wird eine Methodik zum Vergleich von Endlagerstandorten für wärmeentwickelnden radioaktiven Abfall entwickelt. Die Vorgehensweise baut für das Projekt VerSi auf der Arbeitsthese auf, dass die zu vergleichenden Endlagerstandorte für sich genommen unter Berücksichtigung aller Anforderungen genehmigungsfähig sind.

Als einer der zu vergleichenden Standorte wurde zunächst der Standort Gorleben gesetzt, da dieser dem politischen Willen nach mit alternativen Standorten zu vergleichen ist¹. Die Annahme, dass der Standort Gorleben genehmigungsfähig sei, ist eine für das Projekt VerSi verwendete Arbeitsthese wie sie auch für den alternativen Standort im Tonstein gilt.

Die Auswahl des alternativen Standorts engt sich aufgrund bergtechnischer Erfordernisse zur Errichtung und Betrieb eines Endlagers auf Tonstein ein. Entsprechende Tonstein-Formationen sind in Nord- wie auch in Süd-Deutschland bekannt /BGR 07/. Allerdings wurden die entsprechenden Standorte bisher nicht unter dem Aspekt der Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht. Insofern liegen für einen Tonsteinstandort keine bzw. kaum geologische und hydrogeologische Daten vor. Aufgrund der im Vergleich zum Standort Gorleben schlechteren Datengrundlage für Standorte im Tonstein, wird im Vorhaben 3607R02538 ein so genannter synthetischer Tonsteinstandort für den angestrebten Vergleich entwickelt (Teil 2: Standortcharakterisierung in /GRS 10b/).

Der AkEnd /AKE02/ hat in seinen geowissenschaftlichen Kriterien Anforderungen und Abwägungskriterien an einen geeigneten Endlagerstandort in Tonstein formuliert. Um einen Tonsteinstandort für das Verbundprojekt „VerSi“ sinnvoll zu charakterisieren, wurden von der GRS auf Basis dieser Anforderungen des AkEnd und eines GRS-Entwurfs von Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen /GRS 07/ (s. hierzu auch neue Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 09/) eine Liste der erforderlichen Parameter beschrieben, die für eine sicherheitsanalytische Modellierung notwendig sind.

¹ Ein Standortvergleich war zu Beginn des Projektes erklärtes Ziel des Umweltministeriums. Mit Beginn der 17. Legislaturperiode erfolgte ein Paradigmenwechsel, demzufolge zunächst die Erkundung des Standortes Gorleben abzuschließen ist.

Darüber hinaus formuliert die GRS im Nachfolgenden notwendige Informationen über den Standort (z. B. bezüglich Temperaturverträglichkeit, hydrochemische Verhältnisse), die bei der weiteren Differenzierung des Standortes zu berücksichtigen sind. Weiterhin werden Erkundungsmethoden beschrieben, die zu diesen Informationen und den Datensätzen der Parameter der sicherheitsanalytischen Modellierung führen. Übertägige Untersuchungen stellen dabei einen nötigen Schritt dar, um möglicherweise geeignete Endlagerstandorte in einem Vergleich detailliert zu untersuchen. Es werden Methoden der übertägigen Erkundung beschrieben und ihre Anwendbarkeit auf die aufgestellten Kriterien überprüft und bewertet. Dabei wird für die vergleichende Methodik des Projekts VerSi insbesondere der Vertrauensgrad zu den Daten, über die Messgenauigkeit der Erkundungsmethode als auch hinsichtlich des Upscaling der Messdaten in Raum und Zeit, eruiert und bewertet. Sie sind Grundlage einer Bewertungsmatrix zur Abwägung die im Vorhaben 3607R02589 (Evaluierung der Vorgehensweise) /GRS 10c/ entwickelt wird.

In Teil 2 „Standortcharakterisierung“ des Berichts „Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes“ /GRS 10b/ erfolgt in Zusammenarbeit mit dem BfS eine Charakterisierung eines Tonsteinstandortes über eine Zusammenstellung von Geodaten für einen Standort auf generischer Basis. Hierzu wurden, soweit wie möglich, reale Standortdaten aus bestehenden Datensätzen herangezogen. Basis der Arbeiten sind ein Entwurf zum synthetischen Tonsteinstandort und die vom BfS bereitgestellten Daten /BFS 07/. Sie wurden von der GRS auf Plausibilität des geologisch sinnvollen Zusammenhangs geprüft. Eine weitere Differenzierung der Daten und ein Auffüllen eventuell identifizierter Datenlücken wurde durch die GRS, soweit möglich, vorgenommen. Die Zusammenstellung der verfügbaren Daten und geologische Informationen dient der Erarbeitung einer geologischen Modellvorstellung für den generischen Tonsteinstandort, die in eine Standortcharakterisierung übertragen wurde. Sie findet u. a. Verwendung in der in /GRS 10a/ beschriebenen Szenarienermittlung. Für den generischen Tonsteinstandort wird darüber hinaus nachfolgend auf Basis nationaler und internationaler Erfahrungen eine hydrogeologische Modellvorstellung entwickelt, die als Grundlage der Arbeiten in den anderen Vorhaben im Projekt VerSi (u. a. im WS 2044) Verwendung findet.

Weiterhin wird aufbauend auf dem synthetischen Standort im Teil 3 „Endlagerkonzept im Tonstein“ des Berichts „Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes“ /GRS 10b/ ein Endlagerkonzept auf Basis des Konzepts der Schweiz /NAG 02a/ entwickelt, das für die Entwicklung der Vergleichsmethodik hinsichtlich der Beschreibung der Sicherheitsfunktionen eines Endlagers im Tonstein eine Grundlage für die weiteren Vorhaben 3607R02580 (Entwicklung von Szenarien), 3607R02589 (Evaluierung

der Vorgehensweise) und WS 2044 (Langzeitsicherheitsanalysen für den Vergleich von Endlagersystemen) darstellt.

2 Randbedingungen und Anforderungen an den Tonsteinstandort

Ein in einem Vergleich eingehender Endlagerstandort im Tonstein muss sowohl den Anforderungen und Kriterien der Gewichtungsguppen des Standortauswahlverfahrens nach AkEnd /AKE 02/ als auch den Sicherheitsanforderungen der Endlagerung /BMU 09/ genügen. Dabei ist zu beachten, dass die Empfehlungen des AkEnd ausgehend von einer weißen Deutschlandkarte einer iterativen Vorgehensweise zur Suche eines Standortes für ein Endlager radioaktiver Abfälle in Deutschland geschuldet sind. Der AkEnd hat in /AKE 02/ Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen formuliert, die von potentiellen Standorten erfüllt sein müssen. Für den weiteren Auswahlprozess sind Abwägungskriterien entwickelt worden, die es ermöglichen, die Zahl der potenziell geeigneten Standorte einzuengen. Diese Kriterien sind nicht so angelegt, dass zwei Standorte miteinander sicherheitstechnisch verglichen und bewertet werden können. Hierzu liegen bislang keine Arbeiten vor, vielmehr ist es Aufgabe des Projekts VerSi zu untersuchen, ob Kriterien entwickelt werden können, aufgrund derer ein solcher Vergleich möglich ist. Die Aufstellung entsprechender Evaluierungskriterien wird als Teil des VerSi-Projekts im Vorhaben 3607R02589 /GRS 10c/ beschrieben.

Im Abschnitt 2.1 des vorliegenden Berichtes werden die auf Basis des AkEnd /AKE 02/ und eines GRS-Entwurfs von Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen /GRS 07/ zu konkretisierenden Abmessungen und Begrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) abgeleitet.

Im Abschnitt 2.2 werden auf Basis der AkEnd-Kriterien /AKE 02/ sowie der Definition von globalen Sicherheitsfunktionen des Gesamtsystems und der Teilsysteme eines Endlagers der Entwurf von Anforderungen an die erforderlichen Parameter und Daten zu sicherheitsanalytischen Modellierungen dargestellt. Neben einer Erfordernis von harten Daten (Parameter) formuliert die GRS darüber hinaus Anforderungen an weitere Informationen über den Standort (z. B. bezüglich Temperaturverträglichkeit, hydrochemische Verhältnisse), die bei der weiteren Differenzierung des Standortes und bei der Szenarienentwicklung /GRS 10a/ zu berücksichtigen sind.

Im Abschnitt 2.3 werden allgemeine Anforderungen an Geodaten zur Standortbewertung herausgestellt und anschließend im Kapitel 3 die Möglichkeiten ihrer Akquisition von Überträge geprüft.

2.1 Ableitung der Abmessungen und Begrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) auf Basis der Empfehlungen des AkEnd und der Sicherheitsanforderungen

Auf Basis der Empfehlungen des AkEnd /AKE 02/ und der Sicherheitsanforderungen in /GRS 07/ gibt die GRS nachfolgend Empfehlungen zur ersten Abschätzung der Größe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) eines Tonsteinstandortes und darauf aufbauend zu sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Tonsteins im ewG.

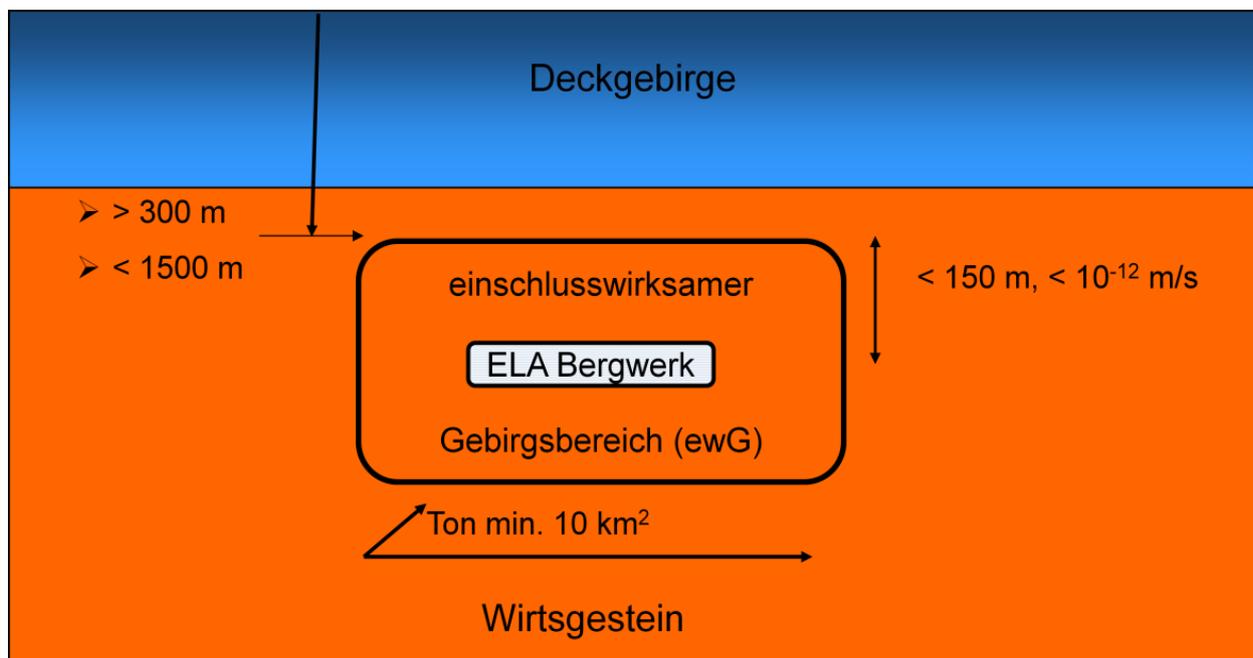


Abb. 2.1: Geosystem ewG im Tonstein

Für eine erste Auslegung der allseitigen Abstände der Umschließungsfläche des ewG vom Endlagerbergwerk aus wird die Distanz ermittelt, die ein idealer Tracer² vom Endlagerbergwerk aus startend im geologischen System des ewG im Nachweiszeitraum (hier 1 Million Jahre) zurücklegt.

Die allseitigen Abstände zwischen Endlagerbergwerk und Umschließungsfläche des ewG sollten, da der ewG der Anlage Endlager zugeordnet wird (s. /AKE 02/), begrenzt bleiben und 150 m nicht überschreiten. Hieraus folgen hohe Anforderungen an die charakteristischen Eigenschaften des Geosystems ewG.

Die Eigenschaften wie Permeabilität, Porosität und nuklidspezifische Diffusionskonstante des Gebirges des ewG müssen derart sein, dass ein idealer Tracer zur Migration der Distanz von 150 m mindestens 1 Million Jahre benötigt.

Hieraus folgt:

- Der advektive Transport muss extrem gering sein (Integraler Durchlässigkeitsbeiwert des Tonsteins kleiner 10^{-12} m/s). Die Abstandsgeschwindigkeit innerhalb des ewG darf dabei höchstens in der Größenordnung der Diffusionsgeschwindigkeit liegen.
- Die Porendiffusionskonstante im Wirtsgestein des ewG sollte kleiner oder höchstens gleich 10^{-11} m²/s sein.

Zur sicherheitsanalytischen Prüfung müssen Transportanalysen für die kritischen Radionuklide durchgeführt werden. Wird im Nachweiszeitraum eine Freisetzung von Radionukliden aus dem so festgelegten ewG errechnet, so muss das Ausmaß dieser Freisetzung der geringfügigkeitsbedingung (siehe auch Nachweisstrategie der Isolation /GRS 07/) genügen.

Der Schachtverschluss muss im Verbund mit den Verschlüssen der Einlagerungsbereiche die gleichen Anforderungen an die Isolation (Qualität der Transportverzögerung) gewährleisten wie das Geosystem des ewG. Hierbei können die einzelnen geotechnischen Maßnahmen zu unterschiedlichen Zeiten wirksam sein.

² Im Nachfolgenden wird der Begriff „idealer Tracer“ nicht in seiner ursprünglichen Definition verwendet, da es sich überwiegend bei den Transportprozessen um Diffusionsprozesse von Radionukliden handelt.

Weitere barrierewirksame Maßnahmen (technisch, geotechnisch) innerhalb des ewG und ihre Sicherheitsfunktionen werden als Sicherheitsreserven interpretiert. Dies gilt ggf. auch für die über den ewG hinausgehenden geologischen Bereiche, die als Schutzsystem des ewG anzusehen sind.

2.2 Anforderungen an die Daten für die Charakterisierung und Bewertung von Tonsteinstandorten

Der notwendige Daten- und Informationsbedarf orientiert sich am Umfang der Sicherheitsbewertungen. Dieser ergibt sich aus den zu betrachtenden Normalentwicklungen für die verschiedenen geologischen Referenzsituationen und der Szenarienentwicklung der zukünftigen Entwicklungen des Standortes. In der nachfolgenden Liste geht die GRS zur Vereinfachung der Begriffe davon aus, dass das Wirtsgestein mit dem Gestein (Tonstein) innerhalb des ewG gleichgesetzt wird und gleichzeitig Wirtsgesteinseigenschaften mit Gebirgseigenschaften (Tonsteininformation) innerhalb des ewG gleichzusetzen sind. Insgesamt erfolgt mit der Verwendung des Begriffs Tonstein keine Vorfestlegung auf eine bestimmte petrographische Ausbildung. Tonsteininformationen werden somit nicht ausschließlich durch Tonsteine charakterisiert.

Der Datenbedarf orientiert sich im Einzelnen nach folgenden Zielsetzungen:

1. Modellierung zur Bestimmung des ewG und der darin ablaufenden Prozesse
 - Darstellung der Barriereneigenschaft im Hinblick auf den langsamen diffusiven Transport.
2. Modellierung der geologischen Gesamtsituation
 - Darstellung der Barriereneigenschaft der geologischen Gesamtsituation.
 - einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)
 - Tonstein außerhalb des ewG (Tonsteinüberdeckung)
 - Deck- und Nebengebirge
 - Hydrosphäre
 - Darstellung der transportrelevanten Eigenschaften des Wirtsgesteins und der Gesteine der geologischen Gesamtsituation vom Einlagerungsort bis zum oberflächennahen Aquifer.

Die Modellierung basiert auf den folgenden anzustrebenden Randbedingungen zur Langzeitsicherheitsanalyse eines Standorts:

- Tonsteininformation des ewG (Darstellung der Schadstoffausbreitung nach einer überwiegend diffusiven Ausbreitung über die Tonsteininformation des ewG)
 - lokales räumliches Modell des Grubengebäudes mit den Abmessungen der Einlagerungstrecken, der sonstigen Gruben Hohlräume, der Auflockerungszonen, des Versatzes und der geologischen Situation des ewG
 - orientierende Porendiffusionsrechnung innerhalb der Tonsteininformation
 - orientierende Rechnungen zur Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Tonsteininformation
- Tonsteinüberdeckung und Deck- und Nebengebirge (Darstellung der Schadstoffausbreitung nach einer diffusiven Ausbreitung über die Tonsteininformation und einer advektiven Ausbreitung über andere Formationen)
 - regionales räumliches Modell der geologischen Situation
 - Berechnung der Grundwasserspiegelhöhen im Modellgebiet (Grundwasserdynamik)
 - Rechnungen zum Radionuklidtransport bis zur Biosphäre
 - Rechnungen zur Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Einlagerungs- und Tonsteininformation

Hieraus ergibt sich die nachfolgende notwendige Daten- und Informationslage zur Analyse auf Basis der Gewichtungsgruppen des AkEnd. Dabei ist zu beachten, dass sich die Datenanforderungen nicht nur auf harte Daten (z. B. Durchlässigkeitsbeiwerte, K_d -Werte) beziehen, sondern auch weiche Daten (z. B. Kenntnisse der Sedimentationsgeschichte) beinhalten um den Anforderungen einer Bewertung gerecht zu werden.

1. Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau

- Tonanteil (Petrographie, mineralogische Zusammensetzung)
- Gebirgsdurchlässigkeiten (Permeabilität der Tonsteininformation und deren Anisotropie im Poren-, Kluftraumsystem)
- repräsentative Porendiffusionskoeffizienten der Tonsteininformation (diffusionszugängliche Porosität der Tonsteininformation, Anisotropie der Diffusionseigenschaften des Tonsteins)

- Porenwasserdrücke und hydraulische Gradienten der Tonsteinformation (spezifischer hydraulischer Gradient, lateral und vertikal)

Da der ewG im Tonsteinkörper in ein hydrodynamisches System eingespannt ist, sind Kenntnisse zu den Potentialverhältnissen im Liegenden und Hangenden aber auch regional lateral erforderlich. (Wiederergänzungsgebiete und Abflussgebiete der Grundwasserleiter)

- Nuklidspezifische Sorptionskoeffizienten der Tonsteinformation

2. Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich

- Mächtigkeit der Tonsteinformation
- Teufenlage der Oberkante und Unterkante der Tonsteinformation
- flächenhafte Ausdehnung der Tonsteinformation
- Beschreibung der potentiellen Lage des ewG in der Tonsteinformation (Endlagerlokation)
- Identifizierung von Lagerstätten und geologischen Besonderheiten

3. Gute räumliche Charakterisierbarkeit

- Beschreibung der Tonsteinformation bezüglich „Homogenität“, „Einfacher geologischer Bau“, „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“
- Historie der Regionalgeologie und Ablagerungs- bzw. Versenkungsgeschichte am Standort

(Die o. g. Merkmale bedingen im Zusammenhang mit einer guten Charakterisierbarkeit die Kenntnis über Randbedingungen der Ablagerungsgeschichte, Diagenese und Tektonik (eine großräumige und über einen geraumen Zeitraum ruhige einheitliche homogene Sedimentation sind ebenso von Vorteil, wie ein großflächiges geologisch-tektonisches Umfeld).

4. Gute Prognostizierbarkeit

- Beschreibung der Tonsteinformation bezüglich „Teufenlage“, „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“, „Gebirgsdurchlässigkeit“, „Gebirgsmechanische Integrität“
- Historie der Geologie am Standort

Die o. g. Merkmale bedingen im Zusammenhang mit einer guten Prognostizierbarkeit (z. B. in einer Szenarianalyse) die Kenntnis über Historie der Ablagerungsgeschichte, Diagenese und Tektonik über mindestens 10 Millionen Jahre (eine großräumige und über einen geraumen Zeitraum einheitliche homogene Sedimentation ist von Vorteil).

- Prognose der Änderung von Gebirgsdurchlässigkeiten und Diffusionskoeffizienten der hangenden und liegenden Schichten

- Prognose der Änderung von Matrix- bzw. Kluftporositäten, bzw. Kluftabstände, Kluftdichte, Matrixeindringtiefe (Matrixdiffusion) der hangenden und liegenden Schichten

5. Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen

- Historie der Tektonik des Standorts (tektonische Überprägung der geol. Einheiten)
- Identifizierung von Verwerfungen durch Neotektonik (Abstand und Leitfähigkeit von Störzonen)
- Gebirgsmechanische Stabilität / Gebirgsdruckfestigkeit
- Teufenlage des Endlagerhorizonts
- Mineralogie der Gesteine des Endlagerhorizonts

Neben der Teufenlage und tektonischen Spannungsfeld spielt die Mineralogie eine Rolle für die Gebirgsstabilität. Tonsteine variieren hinsichtlich der Tonfraktion (Tonmineralien), der Kompaktion, Zementation und Konsolidierung. Die Art der Beimengungen z. B. karbonatische, kieselige und bituminöse sind maßgebend für die gebirgsmechanischen Eigenschaften. Ein zunehmender Karbonatgehalt in Tonsteinen führt mechanisch zu einer Verfestigung des Materials verbunden mit einer erhöhten Steifigkeit /DBE 07/.
- Lagerungsverhältnisse und Gebirgsspannungsfeld (Überlagerungsdruck, Gebirgsspannungen, Konvergenzraten)
- Diageneseegrad und Verfestigungsgrad über maximale Versenkungstiefe (wg. Überkonsolidierung) des Tonsteins
- Kriterien der bautechnischen Eignung:
 - Geomechanische Stoffgesetze und zugehörige Parameter des Wirtsgesteins
 - Versagenskriterien (Scherbrüche, Zugrisse) und zugehörige Parameter des Wirtsgesteins

6. Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten

- Beschreibung der plastischen oder viskoplastischen Eigenschaften des Gesteins und einer möglichen Fähigkeit zur hydraulischen Selbstheilung (self sealing und self healing)

7. Gute Gasverträglichkeit

- Angaben zu einer möglichen Kohlenwasserstoffbildung

Zur Charakterisierung der Qualität eines Muttergesteins im Hinblick auf sein Potential zur Kohlenwasserstoffbildung dient, neben dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, insbesondere der Wasserstoffindex (HI). Somit ist neben dem Anteil an organischem Kohlenstoff die Historie der Diagenese und p,T-Bedingungen

der Gesteine entscheidend für eine nicht gewünschte aber mögliche Kohlenwasserstoffbildung in den Gesteinen des ewG /DBE 07/.

- 2-Phasenfluss-Parameter der Gesteine des ewG: Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung (inkl. Hysterese) und Abhängigkeit der relativen Fluid- und Gaspermeabilitäten von der Sättigung. Gaseindringdrücke.
- Anisotropie der effektiven Permeabilität des Tonsteins (siehe 1.)
- Effektive Porosität (freies Porenwasser) und diffusionszugängliche Porosität des Tonsteins (siehe 1.)
- repräsentative Porendiffusionskoeffizienten oder effektive Diffusionskoeffizienten (speziesabhängig) des Tonsteins

8. Gute Temperaturverträglichkeit

- Teufenlage des Endlagers und geothermischer Tiefengradient am Standort
- Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Tonsteine
- Diageneseegrad und Tonmineralogie
Die Tonminerale des Wirtsgesteins sollten in ihrer Diagenese-geschichte die Temperaturen, die mit der Einlagerung der wärmeproduzierenden Abfälle auftreten können, bereits erfahren haben, so dass von keiner Mineralumbildung ausgegangen werden muss.
- Maximale Temperatur, die das Gestein seit seiner Entstehung erfahren hat
- Beschreibung des plastischen oder viskoplastischen Verhaltens und der Verheilungsfähigkeit der Tonsteine (Basis: Tonmineralogie – Diageneseegrad (s.o))

9. Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden

- Effektive Diffusionskoeffizienten für anionische Radionuklide (Anionenausschluss)
- Sorptionsparameter der Radionuklide in den einzelnen Gesteinsarten des Deck- und Nebengebirges
- Tonmineralogie und Mineralphasen der Tonsteine
- Kolloidanteil und Komplexbildner im Porenwasser der Gesteine
- Beschreibung der Filtrationsfähigkeit für Kolloide und Mikroben (Basis: Tonmineralogie – Porenraumgröße)

10. Günstige hydrochemische Voraussetzungen

- Gleichgewicht zwischen tiefen Grundwässern und den Geomatrices
- pH-Wert, Redoxpotential, Ionenstärke und Lösungsinhaltsstoffe (chemische Zusammensetzung des Porenwassers)
- Pyritgehalt und Karbonatgehalt der Tonsteine
Eine Versauerung des chemischen Milieus durch eine Pyritoxidation sollte während der Betriebs- und nahen Nachbetriebsphase ausgeschlossen werden.
- Gehalt an organischem Kohlenstoff (Kolloidbildung)
- Komplexbildner und andere (Spuren-)Komponenten im Porenwasser

2.3 Anforderungen an die Datenerfassung

In diesem Kapitel werden allgemeine Anforderungen an Geodaten zur Standortbewertung herausgestellt und anschließend im Kapitel 3 die Möglichkeiten ihrer Akquisition von Übertage geprüft. Die speziellen Anforderungen an die Daten und Parameter, die zum Vergleich zweier unterschiedlicher Standorte in Salz und Tonstein notwendig sind, ergeben sich aus den Vorhaben 3607R02589 (Evaluierung der Vorgehensweise), welches die maßgeblichen Sicherheitsfunktionen zum Vergleich der Standorte entwickelt und die Bewertungsmaßstäbe definiert. Die nachfolgenden Anforderungen beziehen sich auf bestehende Ergebnisse von Projekten und Forschungsarbeiten, wie das Standortauswahlverfahren des AkEnd /AKE 02/, das Projekt GENESIS /DBE 07/ und die Tonstudie der BGR /BGR 07/.

Aus den Anforderungen an die Standortauswahl (AkEnd), an das Endlagerkonzept bzw. das Sicherheitskonzept und die Geologie lassen sich bereits Gruppen von Kriterien ableiten, die beim Vergleich geeigneter Standorte zu beachten sind und für die Daten notwendig sind.

Die Kriterien für die Daten, die zum Vergleich von Standorten bereitgestellt werden müssen, lassen sich den folgenden Gruppen zuordnen:

- Einschluss- und Barriereigenschaften des Wirtsgesteins
- Langzeitstabilität (Erhaltung der Barrierenwirkung)
- Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
- Bautechnische Eignung (Verschlussmaßnahmen, Stabilität Grubengebäude).

Die Kriterien der ersten Gruppe umfassen die **Einschluss- und Barriereneigenschaften des Wirtsgesteins** bzw. seines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Dazu gehören primär geologische Eigenschaften (hydraulische Barrierenwirkung, geochemische Bedingungen, Freisetzungspfade) und raumbezogene Kriterien (räumliche Ausdehnung, d.h. Mächtigkeit und laterale Ausdehnung sowie die Teufenlage). Die hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches tragen durch ihre Barrierenwirkung wesentlich zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers bei.

Die Kriterien der zweiten Gruppe beziehen sich auf die **Langzeitstabilität**, insbesondere auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften einschließlich der Erosion. Hierin sind aber auch Einflüsse enthalten, die sich aus der Wechselwirkung zwischen Endlager (Abfallgebände und technische Barrieren) und der geologischen Barriere sowie aus Konflikten durch eine mögliche zukünftige Ressourcennutzung ergeben. Die Erfüllung der Kriterien dieser Gruppe gewährleistet, dass die Barrierenwirkung des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs innerhalb des zu betrachtenden Zeitraums im erforderlichen Maße erhalten bleibt.

Die dritte Kriteriengruppe betrifft die **Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen**, insbesondere die Charakterisierbarkeit der Gesteine, die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse und die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen. Der Begriff "Charakterisierbarkeit" bezieht sich auf die Erfassung der Eigenschaften des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und deren Zuverlässigkeit, während der Begriff "Explorierbarkeit" zusätzlich Aussagen zu den geometrischen Verhältnissen und den Zustandsparmetern sowie zur Zuverlässigkeit dieser Aussagen enthält. Die "Prognostizierbarkeit" beinhaltet darüber hinaus die Zuverlässigkeit der Aussagen über die zeitliche Entwicklung des Endlagers bzw. der relevanten geologischen Aspekte innerhalb des zu betrachtenden Zeitraums. Der Nachweis der Langzeitsicherheit hängt entscheidend von einer genügenden Zuverlässigkeit der dabei verwendeten geologischen Aussagen ab.

Die letzte Kriteriengruppe umfasst Kriterien der **bautechnischen Eignung**, insbesondere felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen sowie Anforderungen im Zusammenhang mit der untertägigen Erschließung der Lagerkammern und dem Betrieb des Endlagers. Auch diese Kriterien liefern indirekt einen wesentlichen Beitrag zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers, weil durch sie die zuverlässige Erstellung des Endlagers entsprechend den Anforderungen bezüglich Betriebs- und Langzeitsicherheit ermöglicht wird. Bautechnische Erkenntnisse werden nur insofern berücksichtigt, wenn notwendige Baumaßnahmen (z.B. Streckenausbau) eine sicherheitstechnische Rückwirkung auf das Langzeitverhalten des

Wirtsgesteins (u. a. Änderung des geochemischen Milieus, Gasbildung, Gebirgsauflockerung) haben.

Datenquellen zur Datenakquisition in dem Projekt VerSi sind für alle Kriteriengruppen neben den Standortdaten des Projektes Gorleben, die der GRS zur Verfügung gestellt wurden, eine möglichst große Zahl realer Standortdaten von Tonsteinstandorten aus bestehenden Datensätzen, die durch Literaturdaten aus anderen Gebieten ergänzt und übertragen werden. In den nachfolgenden Schritten werden, da für den Standort im Salz mit Gorleben eine vergleichbar gute Datenbasis vorliegt, insbesondere die notwendigen Daten zu den Eigenschaften eines Standorts im Tonstein beschrieben.

2.3.1 Einschluss- und Barriereigenschaften des Wirtsgesteins

Die Wasserführung eines Wirtsgesteins ist ein zentrales Merkmal für die Freisetzung von Radionukliden aus dem Nahfeld in die Geosphäre und für den Radionuklidtransport durch die Geosphäre in die Biosphäre. Weiterhin beeinflusst sie die Langzeitentwicklung bzw. das Langzeitverhalten der technischen Barrieren durch An- bzw. Abtransport reaktiver gelöster Stoffe. Für die Konzeption der Isolation der Abfälle im ewG werden deshalb Wirtsgesteine (wie Salz und Tonstein) mit geringer Wasserführung gesucht /NAG 08/.

Dieser Abschnitt beschreibt die Eigenschaften des Wirtsgesteins Tonstein bzw. seines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und die notwendige Datenakquisition an den möglichen Standorten. Dazu gehören primär die geologischen Daten, die eine Transportverzögerung bewirken und raumbezogene Daten des Tonsteins (räumliche Ausdehnung, d.h. Mächtigkeit und laterale Ausdehnung sowie die Teufenlage). Tonsteine bzw. der einschlusswirksame Gebirgsbereich im Tonstein tragen durch ihre Barrierenwirkung wesentlich zur Langzeitsicherheit des Endlagers bei.

Tonsteine gewährleisten durch ihre **hydraulischen Eigenschaften** maßgeblich das Isolationspotential des ewG (Isolation der Abfälle von der Biosphäre während des Betrachtungszeitraums), da sie Fluidtransporte behindern und aufgrund ihrer Retardationseigenschaften den Transport von Radionukliden verzögern. Geeignete Tonsteine weisen Eigenschaften derart auf, dass der advective Fluidtransport klein ist und der diffusive Transport das Transportgeschehen dominiert. Als Grundwasserstauer bezeichnet, begrenzen sie meist die tiefen, salinen, grundwasserführenden Schichten von den süßwasserführenden Schichten, die zur Trinkwassergewinnung herangezogen werden.

Eine weitgehende **Homogenität** in der Faziesausbildung des Tonsteins stellt eine wichtige Barriereeigenschaft im Gebirge des ewG dar. Mögliche Diskontinuitäten, wie offene Klüfte, Störungen oder Störzonen, die eine Kanalisierung des advektiven Transports von den Abfällen bis in möglicherweise vorhandene Aquifere bewirken können, sollten durch die Standortauswahl vermieden werden. Diese Klüftstrukturen treten meist in stark genetisch überprägten und verfestigten Tongesteinen auf und sind nach /BGR 07/ vor allem auf spezielle geologisch-tektonische Prozesse zurückzuführen, wie sie in der Nähe von Störungssystemen auftreten. Darüber hinaus können Entlastungsklüfte infolge starker tektonischer Hebung oder Erosion mit verbundenen Verwitterungsprozessen auftreten. Eine vorhandene Anisotropie wie Schiefrigkeit bzw. Klüftigkeit in konsolidierten Tonsteinen und ein vertikaler Materialwechsel, der in den meisten Tonsteinen parallel zur Schichtung eine höhere Durchlässigkeit als senkrecht bewirkt, sind hinsichtlich des advektiven Transports von untergeordneter Bedeutung. In der Regel besteht ein genereller Zusammenhang zwischen Tonanteil des Gebirges bzw. der Tonmineralanteil des Gesteins und des Durchlässigkeitsbeiwertes des Gebirges. Eine grobe Abschätzung des Tonanteils kann in der petrographischen Analyse der Schichtenfolge erfolgen.

Die guten **Sorptionseigenschaften** des Tonsteins tragen dazu bei, dass ein Großteil der Radionuklide retardiert und auf dem Transport durch den ewG zerfällt.

Die Sorption beschreibt einen Oberflächenprozess an der Festphasen-Flüssigkeitsgrenze, der die Anreicherung der betrachteten Oberfläche mit Atomen, Molekülen oder Ionen bewirkt. Der Sorptionsprozess ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Oberfläche. Die Sorption im Tonstein findet bedingt durch deren große Oberfläche vorzugsweise an den Tonmineralen statt und ist hauptsächlich von der Oberflächenladung der Tonminerale und dem Kompaktierungsgrad des Tonsteins abhängig. Weitere wichtige Faktoren für den Sorptionsmechanismus sind für Kationen aus der Gruppe der Alkali- und Erdalkalimetalle die Konzentration der Kationen, für die Übergangs-, Schwermetalle und Lantaniden der pH-Wert und für die Actiniden der pH- und Eh-Wert /NAG 02a/.

Die Tonminerale haben durch isomorphen Ersatz eine permanente negative Oberflächenladung. An den Kanten ist die Ladung der Silanol- und Aluminolgruppen pH-Wert abhängig. Für die Alkali- und Erdalkalimetalle findet die Sorption an quellfähigen 3-Schicht-Tonmineralen (z. B. Montmorillonit oder Vermiculit) über einfache Ionenaustauschprozesse mit Kationen aus der Zwischenschicht der Tonminerale statt. Der Ionenaustausch reicht aber nicht aus um die Sorption der Übergangs-, Schwermetalle sowie Lantaniden und Actiniden (Metallionen) zu beschreiben. Die Metallionen können über elektrostatische Kräfte (van-der-Waals,

Dipol-Dipol, Ion-Dipol oder Ionenpaarbildung) einen ‚Outer-Sphere‘-Komplex an der Tonmineraloberfläche bilden. Die Metallionen behalten dabei Ihre vollständige Hydrathülle. Ein ‚Inner-Sphere‘-Komplex wird gebildet, wenn das Metallion einen Teil seiner Hydrathülle verliert und dadurch zusätzliche kovalente Bindungen mit der Tonmineraloberfläche eingeht. Die Metallionen verlieren ihre gesamte Hydrathülle, wenn sie durch Mitfällungs- oder Umfällungsreaktionen vollständig in die Gitterstruktur der Tonminerale eingebaut werden. Ein Ionenaustausch kann bei den nichtquellfähigen 3-Schicht-Tonmineralen (z. B. Illite oder Glimmer) sowie an den neutralen Tonmineralen (z. B. Kaolinit) nicht mit Kationen aus der Zwischenschicht stattfinden. Hier finden die pH-Wert abhängigen Ionenaustauschprozesse an den endständigen OH-Gruppen der Tonmineralkante statt /STU 96/.

Das Transportverhalten der Radionuklide wird insbesondere durch nicht oder gering sorbierende anionische Nuklide (z. B. I-139, Se-79, Cl-38) bestimmt. Eine Rückhaltung bei geringen Iod-Konzentrationen nach /BAZ 06/ und /DES 08/, die möglicherweise durch Oxidation, Bindung an organische Bestandteile oder Sorption an andere Bestandteile des Tons erfolgt, führt zu einem K_d -Wert (bzw. R_d relativ zu Cl), der in der Langzeitsicherheitsanalyse berücksichtigt werden kann. Die Auswertung der Literatur nach einem Review von /ROU 05/ gibt den K_d -Wertebereich mit 0,04 – 120 l/kg an. Streng genommen ist das K_d -Konzept wegen der Flüchtigkeit von elementarem Iod aber nicht anwendbar /ROU 05/.

Aufgrund der Annahme von oxidierenden Bedingungen bei der Endlagerung kann das radioaktive Se-79 in Form von Selenit bzw. Selenat mit hohen Löslichkeiten erwartet werden. Die Konzentration von Selen im Endlager kann daher höher als unter natürlichen Bedingungen sein. Da die Sorption von Selen mit steigenden pH abnimmt, findet unter alkalischen Bedingungen bei Vorhandensein von Zementanteilen keine nennenswerte Rückhaltung statt. Eine Bildung von Mischkristallen ist nicht wahrscheinlich /CHE 99/. Echte Sorptionsprozesse sind nach wie vor als unbedeutend für Selenat und Selenit anzunehmen, wobei die Unterscheidung von „Sorption“ zu „Reduktion mit anschließender Ausfällung“ als elementares Selen bzw. Selenid nur schwer zu treffen ist. Da Fe(0 oder II) unter reduzierenden Bedingungen in den entsprechenden geologischen Schichten vorkommen kann, erscheint dort eine Reduktion von Selen mit anschließender Fällung plausibel.

Findet die Sorption der Radionuklide auf Kolloiden statt, können diese mit den Kolloiden transportiert werden /RYA 96/. Hierzu müssen die Kolloide unter den gegebenen geochemischen Bedingungen (geochemisches und hydrogeologisches Umfeld) vorhanden, mobil und stabil sein. Eine Sorption oder ein Einbau von Radionukliden auf oder in die Kolloide muss stattfinden und darf im beobachteten Zeitraum nicht reversibel sein /MIL 00/.

Mögliche Kolloide in Tonstein sind die vorhandenen Tonminerale, akzessorische Mineralphasen wie z. B. Quarz, Silica oder Eisenoxide sowie organische Bestandteile. Die Kolloidstabilität ist stark von der Geochemie der Porenwässer abhängig. Eine hohe Ionenstärke und neutrale bis basische pH-Werte führen zur Aggregation der Kolloide. Unter diesen pH-Wert Bedingungen sind z. B. die Kanten der Tonminerale positiv geladen. Durch die Anlagerung von organischen Molekülen an die Kante kann jedoch die Kolloidstabilität durch eine Ladungskompensation erhöht werden. Eine wirksame **Kolloidfiltration** unterstützt jedoch den Rückhalt der kolloidassoziierten Radionuklide. Tonstein besitzt eine geringe Porengröße (z. B. Opalinuston < 50 nm /NAG 02b/), die es nur den kleinsten Kolloiden erlauben transportiert zu werden. Unter diesen Umständen findet der Transport der Radionuklide hauptsächlich unter **Diffusion** statt, da die Kolloide durch die geringe Porengröße ausgefiltert werden.

Die **Diffusivität** ist wegen der sehr geringen Abstandsgeschwindigkeit ein wesentlicher Transportparameter der Ausbreitung der Radionuklide im ewG. Bei Durchlässigkeitsbeiwerten von kleiner 10^{-12} m/s ist die Diffusion der dominierende Radionuklidtransportprozess /BGR 07/.

Bei der Diffusion der Radionuklide muss zwischen Anionen und Kationen unterschieden werden. Durch die geringen Abstände der Tonmineralplättchen im Tonstein überlappen sich deren elektrische Doppelschichten. Durch elektrostatische Wechselwirkungen mit der negativ geladenen Oberfläche können die Anionen nicht durch die überlappenden Doppelschichten hindurch diffundieren. Der Porenraum der den Anionen zur Verfügung steht wird somit verringert. Steigt die Ionenstärke des Porenwassers an, wird die elektrische Doppelschicht kleiner und der **Anionenausschlusseffekt** hat eine geringere Wirkung. Ein Ausschlusseffekt wird für Kationen nicht beobachtet.

Das diffusionsgesteuerte Transportverhalten der Radionuklide wird wie schon beschrieben durch die nicht oder gering sorbierenden anionischen Nuklide J^{129} , Se^{79} , Cl^{36} bestimmt. Unsicherheitsbetrachtungen zu Werten der Diffusionskonstanten (und damit auch der Diffusionsporosität) von I-139, Se-79 und Cl-38 zeigen über einen Zeitraum von 1 Million Jahren eine hohe Variabilität (auch bei geringen Schwankungsbreiten der Werte) in den Transportlängen.

Bestimmt werden diese Koeffizienten im Labor an Gesteinsproben oder werden von natürlichen Konzentrationsprofilen im Tonstein abgeleitet. Effektive Diffusionskoeffizienten (D_e) und diffusionszugängliche Porositäten werden in der Regel mittels der Durchdiffusionstechnik ermittelt. Entsprechende Untersuchungen mittels radioaktiver Stoffe des PSI /PSI 04/ zeigen, dass der Überlagerungsdruck (Mont Terri Proben 1 - 5 MPa bzw. Benken 4 – 15 MPa) nur

einen kleinen Effekt auf die Werte der effektiven Diffusionskoeffizienten (ca. 30 %) hat. Die in der PSI-Studie ermittelten Diffusionskoeffizienten stimmen gut mit jenen überein, die im Rahmen von Laborvergleichsstudien zwischen anderen Laboratorien gemessen wurden. Die Werte der diffusionszugänglichen Porositäten wiesen jedoch größere Abweichungen aus, was in /NAG 04/ zur Aussage führt, dass Durchdiffusionsmessungen nicht die Methode der Wahl sind, um Porositäts-Parameter zu bestimmen. In den Versuchen zeigte sich, dass der effektive Koeffizient für die Diffusion parallel zur Gesteinsschichtung um Faktor 4-6 höher ist, als senkrecht zur Schichtung. Diffusionsmessungen mit tritiierten Wässern (HTO) an Opalinustonproben unterschiedlicher Teufen zeigten, dass die effektive Diffusion nur senkrecht zur Schichtung mit zunehmender Teufe abnimmt, parallel der Schichtung jedoch unabhängig von der Teufe ist, was nach /PSI 04/ für die Homogenität des Opalinustons hinsichtlich der Diffusionseigenschaften spricht. Weiterhin stellte man fest, dass die effektiven Diffusionskoeffizienten für HTO im Opalinuston gut mit Werten anderer Sedimentgesteine übereinstimmen.

Die geochemischen Verhältnisse des Porenwassers der Tonsteine werden hauptsächlich durch die Parameter pH, Eh, O₂, pCO₂ und Ionenstärke bestimmt /NAG 02a/. Sie spielen eine maßgebliche Rolle bei der Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen. Um die Radionuklidfreisetzung bei der Wechselwirkung des Abfalls mit dem Tonstein sowie mit dem Verfüll- und Versatzmaterial abzuschätzen ist es wichtig **stabile geochemische Verhältnisse** vorzufinden. Die geochemischen Verhältnisse können sich durch das Einbringen von zementhaltigen Materialien verändern. Der Zement wird im Endlagerkonzept als Verfüll- und Auskleidungsmaterial (u.a. Spritzbeton zur Konturstabilisierung) sowie zur Konditionierung der Abfälle (u. a. Betoncontainer des MAW) eingesetzt. Durch den Kontakt des Porenwassers des Tonsteins mit dem Zement kommt es zur Degradierung und damit verbundener Bildung von alkalischen Lösungen. Die alkalischen Lösungen bewirken zuerst eine Auflösung der Mineralphasen des Zements. Anschließend können Calcit und Illit als dominierende Mineralphase sowie Mg-Silicat-Hydroxide bzw. Mg-Aluminat-Hydroxide ausfallen /NAG 02c/. Treffen die alkalischen Lösungen auf den Tonstein, bildet sich eine hoch-alkalische Fahne aus. Die Ausbreitung der Fahne wird begleitet von Kationenaustauschreaktionen an den Tonmineralen. In einer zweiten Reaktionsfront können Mg-Silicat-Hydroxide oder Mg-Aluminat-Hydroxide ausfallen. Anschließend kommt es teilweise zur Auflösung von Kaolinit und Quarz und der Bildung von Illit. Direkt am Kontakt von Zement und Tonstein wird durch die Auflösung der Mineralphasen die Porosität erhöht. Die anschließende Präzipitation der Sekundärphasen lässt die Porosität wieder abnehmen /NAG 02c/. Durch eine große Volumenzunahme der Sekundärphasen kann das Porenvolumen ganz verschlossen werden /FER 06/. Eine **Unempfindlichkeit des Wirtsgesteinskörpers gegenüber alkalischen Lö-**

sungen ist somit insbesondere in den Endlagerbereichen mit Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (MAW) von Bedeutung da sonst die Barrierewirkung des Tonsteins nicht mehr vorhanden ist.

Im Hinblick auf die Wechselwirkung von alkalischen Lösungen und dem **Selbstverheilungsvermögen von Tonsteinen**, z. B. in der EDZ, sind weitergehende Untersuchungen notwendig /ZHA 08/. Das **Selbstverheilungsvermögen der Tonsteine** bewirkt den schnellen Verschluss von entstandenen Diskontinuitäten im Tonstein durch Aufquellen der Tonminerale mit Beginn der Wasseraufsättigung.

In der Langzeitphase eines Endlagers im Tonstein kommt es im zeitlichen Verlauf über Gasbildung zu einem Druckanstieg, wobei mutmaßlich durch Gasfrac-Ereignisse die Barriereintegrität gefährdet werden kann. Nach /IFG 07/ werden ausgehend von verschiedenen Zersetzungsprozessen (z. B. Korrosion, Biogradation und Radiolyse) in einem Endlager verschiedene Gase (H_2 , CO_2 , CH_4 , H_2S etc.) gebildet. Die Rate der Gasbildung wird u.a. durch die Temperatur, die Feuchte und das chemische Milieu bestimmt. Bei einer Langzeitbetrachtung wird die Gasbildung vorrangig durch eine Metallkorrosion (z. B. Eisen, Aluminium und Zink) bestimmt und hängt stark von den Umgebungsbedingungen wie Sauerstoffanteil, Wasseranteil und Temperatur ab und führt hauptsächlich zur Wasserstoffbildung. Bei Tonsteinen basiert der druckinduzierte Gasfluss aufgrund der höheren Matrixkompressibilität und einer vergleichsweise geringen Zugfestigkeit in der Schichtung vor allem auf die Mechanismen:

- klassischer 2-Phasenfluss durch Verdrängung der flüssigen Phase ggf. unter Aufweitung des vorhandenen Porenraumes
- Bildung von rissinduzierten Wegsamkeiten.

Für das Verhalten des Wirtsgesteins gegenüber Gas ist daher das **Gasspeichervermögen** des Tonsteins entscheidend, damit die erhöhte Gasbildung im Endlager vom Wirtsgestein aufgenommen werden kann, ohne dass es zu einem Integritätsverlust insbesondere in vertikaler Richtung kommt. Maßgeblich daran beteiligt ist der 2-Phasentransport von Gas in das Wirtsgestein und die Bildung von Sekundärporosität. Der Mechanismus der Fließwegdilatanz (pathway dilation), der die Öffnung und das Wachstum von Mikroporen umfasst, erhöht den Gasabstrom aus dem Endlager und kann auf diese Weise dafür sorgen, dass die Gasdrücke unterhalb der Schwellwerte für die Makrorissbildung bleiben.

In /NAV 09/ wurde der Gastransport im Fernfeld eines Endlagers im Tonstein gemäß den im VerSi-Projekt getroffenen Festlegungen durch numerische Analysen untersucht. Ziel der

Studie war es, ein grundlegendes Verständnis des Gastransports auf der Fernfeldskala zu gewinnen, die relevanten Einflussgrößen und sensitiver Parameter auf den Gastransport zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurde der von der GRS auf der Basis des Codes TOUGH2 entwickelte Code TOUGH2-PD (PD: „pathway dilaton“) verwendet, der den Prozess der Fließwegdilatanz berücksichtigt. Das Systemverhalten wurde anhand eines Referenzfalles untersucht, aus dem durch Variation von ein bis zwei Parametern alternative Rechenfälle abgeleitet wurden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Mechanismus der Fließwegdilatanz grundsätzlich in der Lage ist, den Druckanstieg im Endlager zu begrenzen und die Entstehung von Makrorissen zu verhindern. Relevant für die Druckentwicklung im Endlager und das Volumen der Dilatanzzone sind die Dilatanzschwellwerte, die Kapillardruckkurve, die Isotropie der druckabhängigen Gaspermeabilität und die primäre Porosität. Dagegen hat die spezifische Druckabhängigkeit der Gaspermeabilität und der sekundären Porosität oberhalb der Dilatanzschwellwerte keinen wesentlichen Einfluss auf die Gasmigrationsvorgänge. Die zugehörigen Parameter werden daher für den betrachteten Referenzfall als nicht sensitiv eingestuft. Dies ist in Hinblick auf die diesbezüglichen Parameterunsicherheiten als nachweistlich günstig einzuschätzen. Um ein horizontales Wachstum der Dilatanzzone entlang der Schichtflächen zu erreichen, ist eine starke Anisotropie der druckabhängigen Gaspermeabilität erforderlich. Ursächlich hierfür ist, dass die nach oben gerichtete Abnahme der Dilatanzschwellwerte ein vertikales Wachstum der Dilatanzzone begünstigt, da dieses Wachstum von den Dilatanzschwellwerten an der Dilatanzfront abhängig ist. Die kontinuierliche Abnahme der Dilatanzschwellwerte an der aufsteigenden Dilatanzfront bewirkt gleichzeitig, dass im Endlager geringere Drücke erforderlich sind, um einen Gasabstrom zu erzeugen. Ein vertikales Wachstum der Dilatanzzone ist daher sicherheitstechnisch günstiger als ein horizontales Wachstum. Die Kapillardruckkurve nach Van-Genuchten, die im Bereich hoher Fluidsättigung einen für Tonsteine eher langsamen Anstieg des Kapillardrucks im Zuge der Entsättigung zeigt, könnte daher die Speicherkapazität für die Gasphase überschätzen und somit die maximalen Gasdrücke im Endlager unterschätzen. Die Van-Genuchten-Kurve als Standardannahme für den Gastransport im Tonstein sollte daher stets kritisch überprüft werden. Die Ergebnisse der Studie beziehen sich auf den untersuchten Referenzfall und sind nicht grundsätzlich auf andere Endlagerkonzepte oder Standorte übertragbar, insbesondere, wenn Endlagerteufe, Gasgenerierungsraten, Zweiphasenfluss-Parameter und Dilatanzparameter signifikant vom untersuchten Referenzfall abweichen. Die von dieser Problemstellung ausgehenden Untersuchungen können sowohl über Labortests an Bohrproben als auch durch Felduntersuchungen, u.a. mit Langzeitgasinjektionstests in Bohrungen durchgeführt werden.

Die **Temperaturverträglichkeit des Tonsteins** ist von Bedeutung, da während einer längeren Zeitperiode an der Grenze Bentonit/Wirtsgestein vergleichsweise hohe Temperaturen auftreten. Forschungsergebnisse zeigen, dass Tonsteine oder auch Bentonit eine Temperatur von ca. 100°C für die Dauer von einigen Jahrhunderten unbeschadet /GRS 08a/, d. h. ohne Mineralumbildungen überstehen und ihre Sorptions-, sowie ihre Selbstheilungsfähigkeiten erhalten. Die Temperaturverträglichkeit steht im direkten Zusammenhang mit dem Diageneseegrad der Tonsteine. So können Tonsteine solche Temperaturen ohne Mineralumwandlungen vertragen, wie sie in der Historie ihrer Diagenese schon vorlagen. Nach /BGR 07/ existieren eine Reihe von Indikatoren die für die Abschätzung der möglichen temperaturbedingten Änderung, die Tone oder Tonsteine während der Versenkung bzw. ihrer geologischen Historie (Diagenese) erfahren haben. Zu den Indikatoren gehören u.a. der Inkohlungsgrad, die Vitrinitreflexion und die Umwandlung der Tonminerale (Illit-Montmorillonit-mixed layer zu Illit). Insbesondere die statistische Auswertung ermittelter durchschnittlicher Reflexionsgrade des Vitrinites an den in den Tonsteinen enthaltenen organischen Partikeln können zur Bestimmung des Inkohlungsgrad und somit den Reifegrad des Gesteins verwendet werden. Zur Einschätzung des Diagenesegrades der Tonsteine können darüber hinaus auch Dichte- und Akustiklogs herangezogen werden.

Nach /NAG 02c/ wurde in zahlreichen zitierten Analogstudien der Einfluss erhöhter Temperaturen auf natürliche Tongesteine untersucht. Es gibt Beispiele von tonreichen Formationen, die infolge Intrusion magmatischer Gänge oder Überlagerung durch vulkanische Gesteine einer lokalen Kontaktmetamorphose ausgesetzt waren, wobei ihre Duktilität und Quellfähigkeit erhalten blieb /PUS 98/. Nach thermischen Berechnungen der NAGRA /NAG 02c/ zur Endlagerauslegung im Opalinuston wird die maximale Temperatur an der Stollenwand nach rund tausend Jahren erreicht und ca. 95 °C betragen. Mineralogische Effekte einer solchen Temperaturerhöhung sind nach Ansicht der NAGRA vernachlässigbar, da der Opalinuston während seiner Versenkungsgeschichte schon ähnlich hohe Temperaturen (bis ca. 85°C) über viel längere Zeiträume erfahren hat. Die Temperaturerhöhung bewirkt neben thermischen Spannungen einen Porenwasser-Überdruck sowie eine Reduktion der mechanischen Festigkeit des Wirtsgesteins. Da zu diesem späten Zeitpunkt die Lagerstollen schon verfüllt sind, führt dies zu keiner signifikanten Vergrößerung der Auflockerungszone, sondern beschleunigt wahrscheinlich die Desintegration des Gesteins und die Homogenisierung des Porenraums in der Auflockerungszone und damit die Selbstabdichtung.

2.3.2 Langzeitstabilität (Erhaltung der Barrierewirkung)

2.3.2.1 Räumliche Trennung (Mächtigkeit des Wirtsgesteins und Teufenlage)

Die räumliche Trennung (Isolation) der Abfälle von der Biosphäre und den dort ablaufenden schnellen Vorgängen ist ein wesentliches Merkmal der Tieflagerung radioaktiver Abfälle. Die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften gegenüber Erosion und endlagerbedingte Einflüsse müssen gegeben sein. Die Teufenlage des Endlagers gewährleistet eine physikalisch-chemisch stabile Umgebung für die technischen Barrieren und stellt damit in Verbindung mit geologischen Prozessen den Schutz des Endlagers und des ewG sicher. Gleichzeitig nimmt mit der Zunahme der Teufe des Endlagers die Länge möglicher Transportwege von Radionukliden zu und transportrelevante Eigenschaften des Tonsteingebirges nehmen günstige Werte an (z. B. durch Schließen transmissiver Diskontinuitäten). Zusätzliche Reserven gegenüber Hebung und Erosion werden durch die Auswahl von Standorten in geologisch ruhigen Gebieten ohne tektonische Aktivität in den letzten 10 Millionen Jahren erreicht. Eine große Mächtigkeit des Wirtsgesteins erlaubt nicht nur alternative Endlagerkonzeptplanungen, sondern liefert zusätzliche Reserven gegenüber Transportverzögerung über den ewG hinaus.

2.3.2.2 Gebirgshebungen und -senkungen (Tektonik > Historie)

Zur Gewährleistung der Langlebigkeit des Barrierensystems wird eine stabile geologisch-tektonische Situation gesucht. Eine langfristig stabile tektonische Situation stellt sicher, dass das Barrierensystem des Endlagers vor ungünstigen Prozessen und Ereignissen geschützt ist und deshalb über den notwendigen Betrachtungszeitraum seine Funktion erfüllen kann.

Als regionale Störungszonen werden Störungen mit einer Längserstreckung im Kilometerbereich betrachtet, die aus Oberflächenkartierungen und/oder Interpretationen von Oberflächenseismik bekannt sind. Zu diesen als Linien kartierten Störungen muss ein Sicherheitsabstand eingehalten werden, um die Ausdehnung der Zone mit gestörtem Gesteinsverband und die Ungewissheiten im genauen Verlauf der Störungen sowie den Einflussbereich potenziell möglicher differenzieller Bewegungen zu berücksichtigen. Die Erfassung von Zonen mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung der Gesteine kann durch eine Oberflächenseismik und später durch eine untertägige Erkundung (Umfahrung des Einlagerungsbereiches) durchgeführt werden. Solche Zonen werden gemieden, da sie sich ungünstig auf die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (einschließlich der geomechani-

schen Bedingungen) und auf die räumlichen Verhältnisse bzw. auf die Flexibilität/Reserven für die Auslegung der Lagerkammern auswirken (vermehrtes Auftreten von auslegungsbestimmenden Störungszonen).

2.3.2.3 Äußere Einflüsse, Geomorphologie (Erosion, Eiszeit, Rinnenbildung)

Wie oben erwähnt wird zur Gewährung der Langlebigkeit des Barrierensystems eine stabile geologische Situation gesucht. Die geologische Situation eines Standortes wird durch Langzeit- und Kurzzeitereignisse beeinflusst. Fortschreitende Erosion und die damit einhergehende Änderung der Geomorphologie, welche durch Eiszeiten und/oder Rinnenbildung entsteht, ist im geologischen Zeitrahmen ein relativ kurzzeitiges Ereignis.

Eiszeiten sind dazu in der Lage große Gebiete morphologisch zu prägen. Dies geschieht zunächst durch den direkten Einfluss der Eisauflast. Die Bewegung der Gletscher formt das bedeckte Gebiet mit Hohl- (Tälern, Wannern, Rinnen) und Vollformen (Drumlins, Oser, Kames). Während des Abklingens der Eiszeit löst das Abtauen der Gletscher starke Schmelzwasserströme aus. Sowohl die Bewegung der Gletscher als auch die Schmelzwasserströme können zur tiefen Rinnenbildung führen. Aus diesem Grund ist Mächtigkeit des ewG bzw. des Deckgebirges über dem eigentlichen Endlager von großer Bedeutung. Details zur eiszeitlichen Rinnenbildung sind in Teil 2 („Standortcharakterisierung“) dieses Berichts zu finden.

2.3.2.4 Innere Einflüsse (geochemische Parameter, Mineralogie)

Schon während der Einlagerungsphase sowie in der Nachbetriebsphase kommt es zu Wechselwirkungen der eingelagerten Abfallgebände mit dem Umgebungsgestein. Diese Wechselwirkungen zu untersuchen und zu prognostizieren kann im Rahmen von Explorationsmethoden vor Beginn der Einlagerung nicht untersucht werden.

2.3.2.5 Gesteinsmechanische Parameter

Die rheologischen Eigenschaften und das Deformationsverhalten des Gesteins sind von großer Bedeutung für die Erhaltung der Barriernwirksamkeit. Beanspruchungen des Gesteins während des Ausbaus, also die Entstehung einer Auflockerungszone (EDZ) sind nicht zu verhindern. Wesentlich ist, dass der Ausbau im mechanisch beanspruchten Umgebungsgestein nicht zu einer Verschlechterung des Langzeitsicherheitsverhaltens führt. Dies gilt ins-

besondere für die Auflockerungszone um die zu errichtenden geotechnischen Barrieren herum.

Prozesse die in diesem Fall zu betrachten sind, sind sowohl das kurzzeitige / instantane Deformationsverhalten des Gesteins. Hier sind die gesteinsmechanischen Moduln, wie Kompressionsmodul, E-Modul, Schermodul, etc. ausschlaggebend. Sie können dazu genutzt werden die erst bei der Auffahrung entstehende Auflockerungszone im Vorfeld zu charakterisieren. Ebenso wichtig sind zeitabhängige Deformationsvorgänge, die unter Umständen erst in der Nachbetriebsphase oder innerhalb geologischer Zeiträume relevant werden. Vor allem für Schließung der Auflockerungszone spielen geomechanische Vorgänge wie das Selbstheilungsvermögen, Kriechen und das Quellverhalten des Gesteins eine wichtige Rolle. Ebenso wichtig, vor allem in Bezug auf das Auftreten von Gasen, ist das Dilatanzverhalten des Gesteins.

2.3.3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen

2.3.3.1 Prognostizierbarkeit der Entwicklung

Für die Prognostizierbarkeit ist es entscheidend, dass die Entwicklung der wesentlichen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs charakterisierbar ist und über den geforderten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre eingeschätzt werden kann. Die wesentlichen Eigenschaften zur langfristigen Barrierenwirkung der Tonsteine sind die Mächtigkeit, die geringe Permeabilität und die Abwesenheit höherer transmissiver Diskontinuitäten.

Die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen ist für einen Tonsteinstandort günstig, wenn sich die derzeitigen Gesteinseigenschaften und die ruhige Gebirgstektonik über lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Im norddeutschen Becken kann sie als günstig bezeichnet werden, weil sich die entsprechenden Eigenschaften rückblickend in dem ehemaligen ruhigen Sedimentationsbecken der Kreide seit mehr als 10 Millionen Jahren nicht wesentlich verändert haben. Für eine wirkliche Prognose der zukünftigen Entwicklung ist vor allem das Verhältnis aus Erosionsrate und Überdeckung ausschlaggebend, weil die Überdeckung aufgrund des Gebirgsdrucks die niedrige Permeabilität und das Selbstabdichtungsvermögen des Wirtsgesteins aufrechterhält. Letztlich hängt die Prognostizierbarkeit also vor allem davon ab, wie gut eventuelle Hebungs- und Erosionsraten und eiszeitliche Vergletscherungen langfristig abgeschätzt werden können.

2.3.3.2 Explorierbarkeit

Für den Nachweis der Homogenität des Wirtsgesteins ist eine gute Explorierbarkeit des Standortes und des Gebirges eine wichtige Voraussetzung. Die Homogenität des Wirtsgesteins bezieht sich wie schon beschrieben, nicht nur auf die petrografische Ausbildung der Gesteine (Fazies), sondern auch auf das petrografische Erscheinungsbild des Gebirges mit seinen möglichen Diskontinuitäten.

2.3.4 Bautechnische Eignung (Verschlussmaßnahmen, Stabilität Grubengebäude)

2.3.4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen

Die Teufenlage des Endlagers beeinflusst die bautechnische Machbarkeit, da mit zunehmender Teufenlage bzw. Überlagerung die in-situ Gebirgsspannungen zunehmen, was die Standfestigkeit und das Deformationsverhalten der ausgebrochenen Hohlräume beeinflusst. Neben dieser Teufenlage haben die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen im Wirtsgestein einen maßgeblichen Einfluss auf die bautechnischen Bedingungen während des Baus, Betriebs, der Überwachung und des Verschlusses des Endlagers. Die geotechnischen Eigenschaften des Gebirges bestimmen die Art der Ausbruchsicherung und die bautechnischen Maßnahmen (Ausbruchquerschnitt, Wahl der Baumethode etc.), um die Lagerkammern – unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Anforderungen – zuverlässig und sicher erstellen, betreiben, verfüllen und versiegeln zu können.

Tongesteinsformationen erscheinen grundsätzlich für die Endlagerung wärmeerzeugender und langlebiger radioaktiver Abfälle geeignet /TUC 05/. Erfahrungen mit dem Tragverhalten von Tonsteinen in ihrer Reaktion auf einen endlagerbezogenen Eingriff liegen vornehmlich in der Schweiz (NAGRA, Mont Terri) und Frankreich (ANDRA Bure, IRSN Tournemiere) vor. Das Konzept der Endlagerung in Tonstein setzt daher generell eine ausreichende Festigkeit für die Erstellung und Offenhaltung der untertägigen Auffahrungen voraus. Die Teufenlage des Endlagers besitzt dabei einen erheblichen Einfluss auf die gebirgsmechanische Stabilität der Einlagerungsstrecken, auf die weiteren bergmännischen Auffahrungen und auf die bautechnische Eignung des Tonsteingebirges. Bei der Festlegung der Teufenlage des Endlagers ist neben gebirgsmechanischen und bergbautechnischen Aspekten auch die Temperatur im Einlagerungsbereich der Abfälle zu berücksichtigen. Nach /BGR 07/ sollte eine maximale Gesteinstemperatur von 50° C nicht überschritten werden, da Tonsteine eine deutlich schlechtere Wärmeleitfähigkeit als Salz aufweisen. Die Beschreibung der bautechnischen

und gebirgsmechanischen Eignung des Wirtsgesteins im ewG des Tonsteinstandortes ist nicht Teil des VerSi-Vorhabens. Für das Vorhaben wurde definiert, dass der Integrationsnachweis des ewG geführt werden kann. Die sich daraus ableitenden ingenieurtechnischen Anforderungen, z. B. entsprechende Endlagerteufen, Standsicherheit der Grubenbaue, sind für Betriebs- und Nachbetriebssicherheit von Bedeutung. Je nach Teufenlage des Endlagers und den Eigenschaften des Tongesteins in dieser Teufe kann es erforderlich werden, einen Ausbau der Strecken vorzunehmen. Nach /GRS 10/ ist in den Einlagerungsstrecken für wärmeentwickelnde Abfälle ein Ausbau unter Verwendung von Zement nicht angedacht. Der Grund hierfür liefern langzeitsicherheitliche Aspekte. Beispielsweise stellt ein aufgebracht Spritzbeton an den Wänden der Strecke aufgrund der relativ hohen Permeabilität des Betons einen bevorzugten Fließweg für Fluide dar. Weiterhin kommt es zur Wechselwirkung des alkalischen Zements mit zutretenden Tiefenwässern wodurch der pH-Wert der Lösung erhöht wird. Dieser kann sich sowohl auf den Bentonit als auch auf das umgebende Wirtsgestein nachteilig auswirken. Das Endlagerdesign der NAGRA für den Opalinuston sieht u. a. vor, die Einlagerungsstrecken für die wärmeentwickelnden Abfälle parallel zur maximalen Hauptspannung der Tonsteinformation auszurichten und auf einen Ausbau zu verzichten.

2.3.4.2 Untertägige Erschließung und Wasserhaltung

Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt zeigen Beispiele aus anderen Ländern (Mont Terri, Schweiz und Tournemiere, Frankreich) dass die untertägige Erschließung eines Endlagerbergwerks im Tonstein durchführbar ist. Die Details der technischen Maßnahmen, die zur Erschließung eines Endlagerbergwerks im Tonstein notwendig sind, sind in den jeweiligen Berichten beschrieben (zum Beispiel /NAG 02d/).

Wesentliches Ziel der Erschließung und der damit verbundenen Wasserhaltung muss es sein, während der Erschließungs- und Betriebsphase das Eindringen von Wasser in den Endlagerbereich zu verhindern. Dies ist sowohl unter langzeitsicherheitlichen als auch baulichen Aspekten (Aufquellen des Tons während der Betriebsphase) sinnvoll. Die untertägige Erschließung des Endlagers und die damit zusammenhängende Problematik der Wasserhaltung werden im Wesentlichen durch 2 Faktoren beeinflusst. Zum einen sind die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse des Deckgebirges und des ewG maßgeblich, zum anderen sind die Erschließungstechnik und die Art des Bergwerks bedeutend, da Wasserzutritt im Tonstein nur über den Schacht oder die Rampe des Bergwerks erfolgen kann. Beiden Faktoren muss während der Erschließung durch technische und ingenieurmäßige Maßnahmen Rechnung getragen werden.

3 Möglichkeiten der Datenerfassung durch übertägige Erkundung und ihre Bewertung

Der AkEnd /AKE02/ hat in seinen geowissenschaftlichen Kriterien Anforderungen und Abwägungskriterien an einen geeigneten Endlagerstandort in Tonstein formuliert. In Kapitel 2.2 sind Anforderungen an Daten und an die Datenerfassung gestellt, die für die Charakterisierung und Bewertung von Tonsteinstandorten notwendig sind.

Um die notwendigen Daten und Informationen zu erfassen, ist in der Vorgehensweise des AkEnd die übertägige Erkundung vorgesehen. Sie stellt einen nötigen Schritt dar, um möglicherweise geeignete Endlagerstandorte detailliert zu untersuchen. In diesem Kapitel wird davon ausgegangen, dass bereits bekannte Daten wie Kartenmaterial, vorhandene Seismik und Bohrungen bereits in das Standortauswahlverfahren eingegangen sind.

In diesem Kapitel werden Methoden der übertägigen Erkundung kurz beschrieben und ihre Anwendbarkeit (Eignung, Unsicherheit, Skalierbarkeit) auf die obengenannten Anforderungen an die Daten und an die Datenerfassung überprüft und bewertet. Die Bewertung gilt generell für einen Tonsteinstandort in dem durch AkEnd vorgegebenen Teufenbereich, allerdings nicht speziell für einen bestimmten Standort, der erst in Teil 2 („Standortcharakterisierung“) näher definiert wird. Für den Tonsteinstandort greift das Vorhabens 3607R02589 (Evaluierung der Vorgehensweise) hierbei auf die Ergebnisse zur Aussagekraft übertägiger Untersuchungsmethoden im vorliegenden Bericht zurück. Die Ergebnisse sind dabei Grundlage einer Bewertungsmatrix zur Abwägung die im Verfahrensschritt 4: „Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der die Sicherheitsfunktionen charakterisierenden materiellen Eigenschaften (Parameter)“ des Vorhabens 3607R02589 entwickelt wird.

Die Bewertung für die Anforderungen an die Daten ist ausschließlich auf die Methodik und die Messung des Parameters bezogen (Beispiel: Gebirgsdurchlässigkeit). Das Ziel der Bewertung ist die Beurteilung einer Methode (bezogen auf obiges Beispiel: in-situ) zur Bestimmung der Anforderung. Durch die Komplexität des zu untersuchenden Gesteinskörpers können Wahrscheinlichkeitsanalysen, Voraussagen der Messgenauigkeit oder die Güte der Messung nicht explizit berechnet werden. Daraus leitet sich die Bewertungsskala ab (5: sehr gut geeignet, 4: gut geeignet, 3: Messung/Abschätzung möglich, 2: schlecht geeignet, 1: nicht geeignet).

Die Beurteilung der Eignung einer Messmethode für die Anforderungen an die Datenerfassung orientiert sich im Unterschied zu oben nicht an Einzelmessungen. Hier wird vielmehr insgesamt beurteilt, ob eine Messmethode (bezogen auf obiges Beispiel: in-situ) zur Bestimmung der Anforderung (bezogen auf obiges Beispiel: hydraulische Eigenschaften) geeignet ist. Es wird die gleiche Bewertungsskala wie oben verwendet (5: sehr gut geeignet, 4: gut geeignet, 3: Messung/Abschätzung möglich, 2: schlecht geeignet, 1: nicht geeignet).

In diesem Fall werden separat Unsicherheiten der Datenerfassung (zum Beispiel Auflösungsvermögen, Probenintervalle, etc.), Unsicherheiten der räumlichen und zeitlichen Extrapolation und auch der Skalierbarkeit der Messergebnisse auf die Gesamtformation („up-scaling“) ebenfalls bewertet.

Die Abschätzung der Unsicherheit oder Messgenauigkeit stellt die größte Herausforderung an die Bewertung dar. In der Regel lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen darüber treffen wie fehlerhaft eine Messung ist. Beispielsweise hängt das Auflösungsvermögen einer 3D Seismik von einer Reihe von Faktoren ab, die vor der eigentlichen Messung nicht oder nur unzureichend bekannt sind. In vielen Fällen kann deshalb nur eine grobe Abschätzung der Unsicherheit erfolgen, die anhand Expertenwissens erfolgen muss. Insofern wird hier im Folgenden kein statistisches Maß (etwa Konfidenz) für die Unsicherheit herangezogen. Die Bewertungsskala reicht ebenfalls von 1 bis 5:

5: sehr sicher, kaum Unsicherheit, aber jede Messung ist mit kleinen Messfehlern behaftet.

4: sicher,

3: unsicher,

2: sehr unsicher, Schätzwert aufgrund von Erfahrungen,

1: keine gesicherten Werte.

Idealerweise sollten, um möglichst hohe Skalierbarkeit zu erreichen, Informationen über die Homogenität/Heterogenität der einzelnen Formationen aus historischen Befunden (Genese der Ablagerung) vorhanden sein. Vorhandene Informationen aus einer 2D oder 3D Seismik können für diesen Schritt hilfreich sein. Bei nachgewiesener Homogenität des ewG, zum Beispiel durch eine vollständig analysierte und interpretierte 3D Seismik in Kombination mit der Kalibration der seismischen Daten durch mehrere Bohrungen und durch die nachgewiesene tektonische und sedimentologische Fazieskontinuität des Tonsteins, ist keine Skalierung notwendig. Dies stellt den wünschenswerten Idealfall dar. Im ungünstigen Fall liegen

die Messwerte nur von einer Probe pro Formation/Fazies vor (bei einer Bohrung). Dies ist ein statistisches Problem und kann durch möglichst günstige Probenentnahme minimiert werden. Im Idealfall geben die den Kernen entnommenen Proben insgesamt die Lithologie wieder. Das schließt sowohl repräsentative (Mehrfach-)Proben aus Homogenbereichen (Formation/Fazies) und Bereichen mit besonderen Strukturen (Scherzonen, Klüften, Störungen) ein. Ein möglicher Ansatz um die Probennahme zu optimieren sind geostatistische Methoden die mit probabilistischen Unsicherheitsmodellen gekoppelt sein können /GRS 05/. So können Abschätzungen zu „best case / worst case“ Szenarien getroffen werden.

Bei der Bewertung der Skalierbarkeit einer einzelnen Mess-/Untersuchungsmethode wird davon ausgegangen, dass die Homogenität des ewG erst einmal **nicht** nachgewiesen ist.

Daraus ergibt sich folgendes Bewertungsschema:

5: keine Skalierung notwendig,

4: Einfache Skalierung notwendig (bekannte Formationseigenschaft bei mehreren Bohrungen -> Skalierung auf Feld),

3: Komplexe Skalierung notwendig (bekannte Formationseigenschaft bei einer Bohrung -> Skalierung auf Feld),

2: Mehrfache und einfache Skalierung notwendig (Mehrere Kernuntersuchungen -> Skalierung auf Formationseigenschaft bei mehreren Bohrungen -> Skalierung auf Feld)

1: Mehrfache und komplexe Skalierung notwendig (Eine Kernuntersuchung -> Skalierung auf Formationseigenschaft bei einer Bohrung -> Skalierung auf Feld)

Im Anschluss an die Bewertung der Einzelmethoden erfolgt eine Gesamtbewertung der Charakterisierbarkeit der Anforderung. Die Aussagesicherheit wird hier hinsichtlich der Kombination der einzelnen Messmethoden in ihrer sinnvollen Reihenfolge unter Berücksichtigung aller Untersuchungsmethoden bewertet. Das heißt konkret, dass beispielsweise die 3D Seismik genutzt wird, um die Homogenität zu beweisen und folgerichtig die Skalierbarkeit einer Einzelmessung – selbst im Labor - sehr hoch ist (Skalierbarkeit „5“). Das erste Ziel der übertägigen Untersuchungen muss somit der Nachweis der Homogenität des ewG und des Endlagerhorizontes sein.

Nachdem der Nachweis der Homogenität erbracht ist, sind Eignung und Unsicherheit der Messmethode der Faktor, der die Charakterisierbarkeit beeinflusst. Die hier durchgeführte

Gesamtbewertung wird mittels des einfachen Durchschnitts aus (Einzel-) Eignung, Unsicherheit und Skalierbarkeit gebildet. Dabei wird für Eignung und Unsicherheit jeweils die beste mögliche Untersuchungsmethode ausgewählt (Tabelle 3.2).

In manchen Fällen ist die Möglichkeit der Datenerfassung durch Explorationsmethoden nicht gegeben. Dies betrifft vor allem die oben genannten „Äußeren Einflüsse“, „Inneren Einflüsse“, „Prognostizierbarkeit“. Diese Kriterien sind ausschließlich dem zeitlichen Einfluss unterworfen. Sie lassen eine Abschätzung in gewissem Rahmen zu, der durch wissenschaftliche Erkenntnisse - beispielsweise zum Klimawandel - begründet ist. Die Kriterien sind jedoch nicht durch Messmethoden am Tonsteinstandort explorierbar. Aus diesem Grund sind diese Kriterien in der Tabelle 3.2 außer Acht gelassen. Ebenfalls außer Acht gelassen ist das Kriterium der „Explorierbarkeit“, da sich dieses Kriterium per Definition erst nach eingehender Exploration beurteilen lässt, obwohl Informationen aus den vorherigen Stufen des Standortauswahlverfahrens bereits eingegangen sind.

3.1 Erkundungsmethoden

Die übertägige Erkundung eines möglichen Wirtsgesteinskörpers lässt sich mit unterschiedlichen Methoden durchführen. Dabei kann man unterscheiden zwischen Untersuchungsmethoden, die keinerlei Auswirkungen auf den ewG haben und Methoden, die auf den ewG - möglicherweise auch minimal - einwirken. Rein geophysikalische Methoden haben keinerlei Auswirkungen auf den ewG und sind zudem in der Lage großflächige oder großräumige Körper im Gebirge zu beschreiben. Zu diesen Methoden gehören /GAD 09/:

- Reflexions- und Refraktionsseismik
- Gravimetrie
- Magnetik
- Elektrische Messungen
- Elektromagnetische Messungen

Für die übertägige Erkundung tiefer geologischer Strukturen sind die beiden letzteren Methoden nicht geeignet. Allenfalls die oberflächliche Erkundung des Deckgebirges, beispielsweise eine hydrogeologische Kartierung mit elektrischen Widerstandsmessungen, ist möglich. Weiterhin sind Gravimetrie und Magnetik zwar dazu in der Lage, tief liegende geologische Körper zu erfassen, lassen aber eine detaillierte Erkundung (Fazies, Bruch- und Falten tektonik) nicht zu /GAD 09/. Dies gilt im Besonderen für flach liegende Tonsteinformationen. Im Gegensatz dazu bieten seismische Methoden die Möglichkeit großräumige Querschnitte

(2D Seismik) oder Volumen (3D Seismik) mit einer hohen Genauigkeit ohne einen Eingriff in den ewG zu untersuchen. Dabei sind dem heutigen Stand der Technik entsprechende Analysemethoden insbesondere bei der 3D Seismik dazu in der Lage, eine Vielzahl von Gebirgseigenschaften zu bestimmen.

Im Gegensatz dazu stehen Methoden, die einen Eingriff oder mehrere Eingriffe in den ewG nötig machen:

- Laboruntersuchungen
- Bohrungen mit und ohne Kerngewinn
- Geophysikalische Bohrlochmessungen

Allen drei Methoden ist gemeinsam, dass mindestens ein Bohrloch in den ewG abgeteuft werden muss, um die Messungen vorzunehmen. Laboruntersuchungen an Gesteinsproben sind auf Bohrungen mit Kerngewinn angewiesen, während geophysikalische Bohrlochmessungen heute nach dem Stand der Technik während des („Logging while drilling“) oder nach („wireline logging“) dem Bohrvorgang durchgeführt werden können. Bei der LWD Technik kann allerdings kein Kernmaterial für Laboruntersuchungen gewonnen werden.

Im folgenden Teil erfolgt eine Beschreibung der Messmethoden bezüglich ihrer Relevanz auf die vom AkEnd festgelegten Anforderungen und Abwägungskriterien sowie auf die in Kapitel 2.2 definierten Anforderungen an die Daten für die Charakterisierung und Bewertung von Tonsteinstandorten.

3.2 Seismik

3.2.1 2D Seismik

Mit herkömmlicher hochauflösender 2D Seismik können Strukturen des Untergrunds erfasst und in ihrer prinzipiellen Ausdehnung kartiert werden. Die Untersuchungsmethode ermöglicht die Analyse eines oder mehrerer Querschnitte („Profile“) des Körpers, die zu einem groben Gesamtbild zusammengesetzt werden können.

Man kann zwischen zwei Techniken unterscheiden, Refraktions- und Reflexionsseismik. Für geophysikalische Erkundungen von geologischen Strukturen von bis zu hunderten Kilometern Ausmaß ist Refraktionsseismik geeignet. Für kleinere Strukturen wird in den meisten

Fällen Reflexionsseismik eingesetzt, da sie insbesondere für flach liegende Sedimentschichten eine sehr hohe Detailauflösung erreicht /GAD 09/.

Eine 2D Seismik mit entsprechend sinnvoll liegenden Profilen eignet sich gut, um einen ersten groben Gesamtüberblick eines tiefen geologischen Körpers zu erhalten. Sie liefert Informationen über:

- laterale Ausdehnung entlang eines Querschnitts,
- vertikale Ausdehnung,
- Identifikation und ungefähre Lage von großen Störungen,
- Identifikation und ungefähre Lage von Fazies (Seismofazies) und die
- ungefähre Gesamtgeometrie des geologischen Körpers.

3.2.1.1 Unsicherheiten und Extrapolation

Die vertikale Auflösung seismischer Messungen liegt bei Vorliegen entsprechender Reflektoren ungefähr zwischen einem Viertel und einem Achtel der Wellenlänge des seismischen Signals, welche wiederum von der Frequenz und den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten im Gestein abhängt /KEA 95/. Die Größenordnung bei geringen Teufen liegt bei mehreren Metern Auflösung, die möglicherweise durch geeignetes Prozessieren der Daten verbessert werden kann. Die horizontale Auflösung ist durch die sog. Fresnel-Zone begrenzt, welche ebenfalls von der Wellenlänge des Signals und der Teufe abhängt. Vertikale und horizontale Auflösungen einer seismischen Messung nehmen mit zunehmender Teufe ab. Die Ursache liegt in der stärkeren Dämpfung hochfrequenter Signale mit zunehmender Teufe, so dass aus größeren Teufen nur Reflektionen niederfrequenter Signale mit geringerer Auflösung gemessen werden können.

Für einen Endlagerhorizont in 450 m Teufe bedeutet dies, dass theoretisch Strukturen im 10er m Bereich detektiert werden können. Für eine 2D Seismik wird dieses Auflösungsvermögen praktisch jedoch dadurch eingeschränkt, dass nur unterhalb der Profillinie Strukturen erkannt werden. Das heißt, dass Strukturen die kleiner als der minimale Abstand der Profillinien sind (im BfS Konzept 1500 m) nicht detektiert werden /NAG 94/. Im ungünstigen Fall bedeutet dies, dass beispielsweise steil stehende Störungen bis zu 1500 m in den ewG hineinreichen können, ohne dass sie von einer 2D Seismik erfasst werden können. Aus diesem Grund wurde zum Beispiel von den NAGRA beschlossen, zusätzlich zu vorhandenen 2D Daten noch eine 3D Seismik durchzuführen, in deren Folge Strukturen identifiziert wurden, die lateral eine Ausdehnung von wenigen 10er bis zu mehreren 100 m aufweisen /NAG 01a/.

Infolgedessen ist für eine 2D Seismik eine Extrapolation der Daten nötig, wenn man ein räumliches Abbild des geologischen Körpers erhalten will. Gängige Praxis ist es deshalb, mehrere parallel liegende Profile mit dazu senkrecht liegenden Querprofilen zu verbinden. So lassen sich einzelne Horizonte zwischen mehreren Profilen verfolgen und korrelieren. Allerdings entsteht so kein wirkliches dreidimensionales Abbild des Untergrundes und Störungen und/oder Fazieswechsel können vielfach nicht detektiert werden. Es ist notwendig, dass Bohrungen zur Kalibration der seismischen Daten genutzt werden. Besonders VSP (Vertical Seismic Profiling) oder Crosshole Seismik-Messungen in einem Bohrloch (siehe Kap. 3.3.4), aber auch petrophysikalische Labortests der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten verbessern die Qualität der seismischen Daten erheblich.

3.2.2 3D Seismik

Eine fortschrittlichere Methode, die in der Kohlenwasserstoffindustrie Stand der Technik ist, ist die 3D (Reflexions-) Seismik. Im Vergleich zur 2D Seismik erhöhen sich die Möglichkeiten der Erkundung stark. Deshalb wurde zum Beispiel in der Schweiz ergänzend zu den vorhandenen 2D Daten eine 3D Untersuchungskampagne durchgeführt /NAG 01a/. Eine 3D Seismik liefert folgende Informationen eines geologischen Körpers:

- laterale Ausdehnung unterhalb einer Fläche,
- vertikale Ausdehnung,
- verbesserte Identifikation und genaue Lage von Störungen,
- verbesserte Identifikation und genaue Lage von Fazies (Seismofazies),
- lückenlose Gesamtgeometrie des geologischen Körpers /NAG 01a/.

Abgesehen von der größeren Genauigkeit zum Beispiel bei der Störungsgeometrie werden hier auch Störungen entdeckt, die bei einer 2D Seismik unbeobachtet bleiben, weil sie zwischen 2 Profilen liegen können /NAG 01a/. Dies gilt ebenso für laterale Faziesänderungen.

Zusätzlich bietet eine genaue flächen- und volumenhafte Analyse des seismischen Signals (Attributanalyse) die Möglichkeit nicht nur genauere, sondern mehr Informationen zu erhalten. Zum Beispiel können

- kleinräumige Änderungen der Fazies erkannt werden,
- zwischen Sand und Ton gut unterschieden werden,
- in erster Näherung elastische Parameter teufenabhängig dargestellt werden,
- sog. „Zeitscheiben“ die Interpretation der geologischen Historie ermöglichen.

3.2.2.1 Unsicherheiten und Extrapolation

Für die Auflösung einer 3D Seismik gelten prinzipiell die gleichen Einschränkungen wie für die oben genannte 2D Seismik: Das Auflösungsvermögen nimmt generell mit zunehmender Tiefe ab. Obwohl die sog. „fold“ (ein Maß wie oft ein Punkt eines Körpers reflektiert wird) bei einer 2D Seismik höher ist, ist eine 3D Seismik in der Regel genauer. Dies liegt vor allem daran, dass im 2D Fall Reflexionen, die außerhalb des Profils entstehen, ebenfalls detektiert werden und die Messung verfälschen können.

Großer Vorteil der 3D Seismik ist, dass nicht zwischen einzelnen Profilen extrapoliert werden muss, da an jedem Punkt unterhalb der zu untersuchenden Fläche Daten vorhanden sind.

3.2.2.2 Beurteilung

Die in Kapitel 2.2 genannten Anforderungen an die Daten können durch eine 2D Seismik nur unvollständig bestimmt werden. Eine 3D Seismik kann die Anforderungen an die Daten besser erfüllen, allerdings bleiben auch hier Lücken. Die detaillierte Eignung von 2D und 3D Seismik sind in Tabelle 3.1 beschrieben. Zusammenfassend kann sehr gut beurteilt werden, ob eine günstige Konfiguration von Wirtsgestein und ewG vorliegt. Dies gilt ebenso für die räumliche Charakterisierbarkeit. Befriedigende Aussagen lassen sich bezüglich der günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen treffen. Alle anderen benannten Anforderungen lassen sich nicht mit einer 3D Seismik beurteilen.

Aufgrund der besseren Eignung von 3D Seismik gegenüber 2D Seismik wird für die weitere Bewertung davon ausgegangen, dass eine 3D Seismik vorliegt.

Obwohl die Anforderungen an die Datenerfassung größtenteils nicht erfüllt werden können (Tabelle 3.2), lässt sich eine wichtige Voraussetzung der Einschluss- und Barriereigenschaften (Kap. 2.3.1) des Wirtsgesteins, die Homogenität der Fazies, sehr gut beurteilen. Ebenso verbessert ist die Beurteilung der Langzeitstabilität (Kap. 2.3.2), da Teufenlage und Mächtigkeiten des Wirtsgesteins, des ewG und des Deckgebirges im Ganzen in Frage kommenden Gebiet vollständig bekannt sind.

Die Genauigkeit der Datenerfassung variiert. Einerseits ist das Auflösungsvermögen einer 3D Seismik gut, so dass für die Erfassung der Homogenität und der räumlichen Trennung von einer geringen Ungenauigkeit ausgegangen wird (Bewertung: „4“). Andererseits entsprechen die durch eine Attributanalyse ermittelten gesteinsmechanischen Parameter (z. B. dy-

namische Moduln) nicht genau den im Labor ermittelten Werten (Bewertung „2“). Eine Kalibration mit Bohrungen bzw. Bohrlochmessungen verbessert deshalb die Qualität der seismischen Daten erheblich. Da keine Skalierung der Messergebnisse erfolgen muss, kann das Upscaling mit „5“ bewertet werden.

3.3 Bohrungen

Für alle übertägigen Untersuchungen, die direkt die Eigenschaften des Gesteins bestimmen, sind Bohrungen notwendig. Diese Untersuchungen umfassen Laboruntersuchungen und geophysikalische Messungen an Gesteinsproben und geophysikalische Messungen im Bohrloch („Logging“). Dabei wird für Messungen an Proben bzw. im Bereich des ewG und des zukünftigen Endlagerbergwerks notwendigerweise der ewG durch die Bohrung beschädigt, so dass eine nachträgliche Verschließung nötig werden kann.

Prinzipiell sind zwei verschiedene Möglichkeiten der Bohrlocherkundung denkbar, die auch kombiniert werden können:

- Geradlinige Bohrungen, die an mehreren Stellen abgeteuft werden.
- Gelenkte Bohrungen, die an einer Stelle abgeteuft werden und ab einer bestimmten Tiefe (z. B. nach Eintritt in den ewG) verzweigen.

Bei der ersten Methode liegt der Vorteil darin, dass pro Bohrung insgesamt mehr Informationen zum Beispiel über das Deckgebirge gewonnen werden können, während der Nachteil in der mehrfachen Durchteufung des ewG liegt, falls bis in diese Tiefe gebohrt wird. Gelenkte Bohrungen haben den Vorteil, dass der ewG nur an wenigen Stellen geschädigt wird. Nach heutigem Stand der Technik ist eine Ablenkung bis in die Horizontale möglich und die Genauigkeit mit der der Zielhorizont erreicht werden kann liegt im Dezimeterbereich.

Aus diesen Gründen stellt sich die Frage, wie viele und an welchen Lokationen Bohrungen abgeteuft werden sollen. Beispielsweise wurde in der Schweiz nur eine tiefe Bohrung durchgeführt, die bis in den Endlagerhorizont reichte /NAG 01b/.

3.3.1 Kernbohrungen mit in-situ Untersuchungen

Im Gegensatz zu Flächen oder volumenbezogenen großräumigen Seismikmessungen können Kernbohrungen nur punktuelle Informationen über die zu untersuchende Formation ge-

ben. Allerdings sind diese Informationen oft präzise und mit weniger Unsicherheiten behaftet. In diesem Kapitel werden in-situ Untersuchungen im Bohrloch und Kernuntersuchungen betrachtet, die während der Bohrung oder noch im Feldlabor durchgeführt werden. Nicht berücksichtigt sind geophysikalische Bohrlochmessungen, die in einem eigenen Kapitel behandelt werden.

Schon während der Bohrung können eine Vielzahl von Messungen durchgeführt werden. Standardmäßig wird das Bohrklein („Cuttings“) geologisch beschrieben, das während des Bohrvorgangs ohne Kerngewinn zu Tage gefördert wird. Dadurch entsteht ein grobes Bild der Lithologie. Während einer Kernbohrung wird die wieder zu Tage tretende Spülflüssigkeit chemisch (pH-Wert, Redox-Potential) und lithologisch (Korngröße, etc.) analysiert („mud logging“).

Während der Bohrung oder zwischen einzelnen Bohrphasen werden außerdem schon hydrogeologische/hydraulische Tests im Bohrloch in-situ durchgeführt. Hierzu zählen im Wesentlichen sog. Packertests für die Transmissivität und die hydraulische Durchlässigkeit (siehe Abb. 3.1). Die Messbereiche der unterschiedlichen Methoden zeigen, dass mit Ausnahme der Pulse-Tests die hydraulische Anforderung an den Tonstein des ewG mit 10^{-12} m/s mit den Verfahren quantitativ exakt nicht oder nur mit hohen (z. B. aufgrund notwendiger anomaler Überdrücke) Unsicherheiten bestimmt werden kann. Für liegende oder hangende Grundwasserleiter oder -hemmer ist ihre Eignung gegeben.

Methoden	R [m]	EV [m ³]	Messbereiche [m/s]	Aussagen, Parameter
1. Hydraulische Methoden				
1.1 Aquifertests				
Langzeitpumpversuch	10 - >300		$k_f 10^{-2} - 10^{-7}$	Aquifermodell, Aquiferränder, Anisotropie, D, S
Injektionstest	10 - >100		$k_f > 10^{-10}$	D (S abschätzbar)
1.2 Packertests				
Abpressversuch (WD-Test)	10		$k_f 10^{-4} - 10^{-8}$	D
Slug- und Bail-Test	1 - 10		$k_f 10^{-2} - 10^{-9}, > 10^{-10}$	D (S unsicher)
Pulse-Test	1		$k_f < 10^{-7}, 10^{-8} - 10^{-14}$	D (für sehr geringe D geeignet, S unsicher)
Drill-Stem-Test	1 - 10		$k_f 10^{-5} - 10^{-8}, > 10^{-10}$	D
Pumptest	10 - >100		$k_f 10^{-6} - 10^{-8}, (> 10^{-9})$	D (S abschätzbar)
Squeeze-Test	1		$k_f < 10^{-7}$	D (S unsicher)

Abb. 3.1 Zusammenstellung hydrogeologischer Untersuchungsverfahren (nach /APP 01/) (aus /GRS 08b/)

Robuste lithologische Informationen und ihrer hydraulischen Eigenschaften können erst durch die Analyse der Bohrkerns gewonnen werden. Während der Bohrung erfolgt eine detaillierte (qualitative und semi-quantitative) Aufnahme der Lithologie (Tongehalt, Korngröße), Stratigraphie (Mächtigkeit, Sedimentstruktur) und Strukturgeologie (Störungen, Klüfte, Adern, Stylolithen). Stand der Technik ist ebenfalls das optische Scannen der Kerne /NAG 01b/. Die hier gewonnenen Informationen dienen als Basis für alle weiteren Messungen.

3.3.1.1 Unsicherheiten und Extrapolation

Die Unsicherheit der einzelnen Messungen variiert stark. Bei den hydrogeologischen Untersuchungsverfahren sind oft die Randbedingungen (Druck, Temperatur) nicht bekannt, was große Unsicherheit bei dem zu erwartenden Messwert bedeutet. Messungen an der Spülflüssigkeit und an den Cuttings weisen oft bezüglich der Teufenzuordnung Unsicherheiten auf. Teilweise spielen auch nicht quantifizierbare Parameter eine Rolle, wie zum Beispiel die Erfahrung des mit der Bohrkernaufnahme beauftragten Geologen.

Eine Extrapolation der Messwerte ist in allen Fällen nötig. Falls mehrere Bohrungen vorhanden sind, muss bei in-situ Versuchen mindestens zwischen diesen Bohrungen interpoliert werden. Je weniger Bohrungen vorhanden sind, desto schlechter sind die Messergebnisse der Versuche auf die gesamte zu untersuchende Fläche zu übertragen.

3.3.1.2 Bewertung

Eine Kernbohrung mit in-situ Tests kann die meisten Anforderungen an die Daten erfüllen. Ohne Nachweis der Homogenität müssen die Ergebnisse skaliert werden, so dass die räumliche Charakterisierbarkeit ausschließlich mit Labormessungen nicht möglich ist. Das gleiche gilt für die Anforderungen der günstigen Konfiguration von einschlusswirksamen Gebirgsbereich und der guten Prognostizierbarkeit. Für die verbleibenden Anforderungen sind Labormessungen gut oder sogar sehr gut geeignet (s. Tab. 3.1).

In /NEA 05/ werden an Hand von Durchlässigkeitsbeiwertmessungen aus in-situ Verfahren in verschiedenen nationalen Endlagerstandortuntersuchungen im Tonstein die Variationsbreite der Werte und ihre Vertrauensgrade untersucht (s. Abb. 3.2).

Da die Genauigkeit und der Vertrauensgrad einzelner Messwerte sehr stark von den einzelnen Messungen abhängig sind, kann für die in-situ Tests keine einheitliche Bewertung der Unsicherheit erfolgen. Bewertung siehe Tabelle 3.2.

Jedoch kann hinsichtlich des Durchlässigkeitsbeiwertes im ewG des Tonsteins und seines in den Anforderungen abgeleiteten Wertes von 10^{-12} m/s abgeleitet werden, dass diese Anforderung nach /NAG 02c/ in entsprechender Teufe (hier > 400 m. u. GOK) erfüllt werden kann (s. auch Abb. 3.3).

An den Einschränkungen wird deutlich, dass eine Korrelation der in-situ Messungen mit der Seismik nötig ist, um den Anforderungskatalog auch lateral anwenden bzw. erfüllen zu können. Die Skalierbarkeit kann daher mit „3-4“ bewertet werden, anhängig davon, ob eine oder mehrere Bohrungen vorhanden sind.

Figure 13: *In situ* hydraulic conductivities

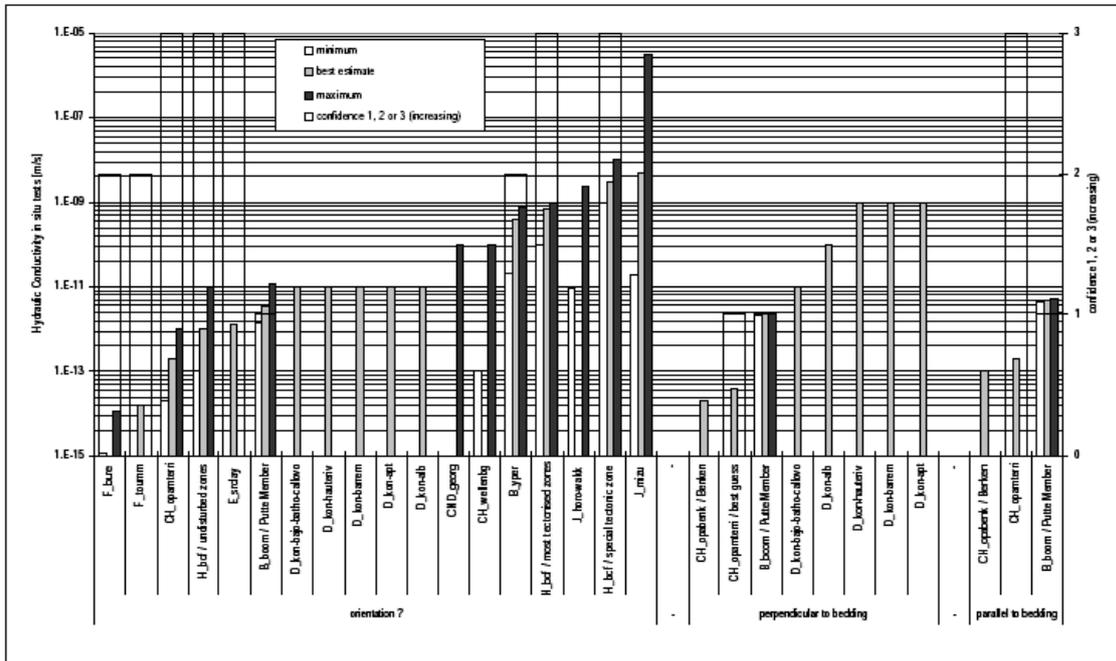


Abb. 3.2 Werte von Durchlässigkeitsbeiwertmessungen aus in situ Verfahren und ihre Vertrauensgrade aus verschiedenen nationalen Endlagerstandortuntersuchungen im Tonstein (aus /NEA 05/)

3.3.2 Physikalische Laboruntersuchungen

Größte Bedeutung kommt der Analyse der Bohrkern im Labor zu. Hier kann die weitaus größte Anzahl der für die Erfüllung der Mindestanforderungen und Kriterien nötigen Untersuchungen vorgenommen werden. Die Gesteinsart und die Eigenschaften des Gesteins können nicht nur qualitativ, sondern quantitativ bestimmt werden. Einen Überblick über einige Messmethoden, die im Labor durchgeführt werden können, gibt Abbildung 3.3.

Parameter		Labor									
		Durchströmungs- Methode	Diffusion nach Fick	Pykno- / Geometrie Vermessung / Wägung	Ultraschallmessungen	Temperaturmessung	Widerstandsverfahren	Ofentrocknung	Quelldruck-Messzellen	Dünnschliff / Mikroskopie, CT, NMR	
Hydraulische Eigenschaften	Hydraulische Leitfähigkeit / Permeabilität										
	Zweiphasenfluss										
	Diffusion										
Porenraum- Eigenschaften	Gesamtdichte										
	Korndichte										
	Porosität										
Porenraum- Struktur	Porenverteilung										
	Porengröße										
Rheologische Eigenschaften	Dynamischer Elastizitätsmodul										
	Dynamische Quer- dehnungszahl										
Sonstige Eigenschaften	Seismische Geschwindigkeit										
	Temperatur-/ Wärmeleitfähigkeit										
	Elektrische Leitfähigkeit										
	Wassergehalt										
	Quelldruck										

Abb. 3.3 Übersicht über Messmethoden im Labor (aus /GRS 08a/)

Neben den petrophysikalischen und hydraulischen Parametern können Analysen von Fluideinschlüssen, die Bestimmung der Vitrinitreflexion, Untersuchungen der Isotopenverhältnisse sowie die C14-Methode Informationen über (Paläo-)salinität, -chemismus und Temperaturgeschichte sowie über Mineralphasenentwicklung und Diagenese liefern. Zusätzlich geben Laborexperimente weiteren Aufschluss über die geochemischen und hydraulischen (z. B. Diffusivität, Porositäten) Eigenschaften des Gesteins. Zusammen mit dem FMI-Log aus Bohrlochgeophysikalischen Messungen /NAG 01b/ können die gewonnenen Kerne orientiert werden, so dass richtungsabhängige Aussagen über Gesteinsparameter (Anisotropie) und über das Störungs- und Kluftsystem möglich werden.

Große Bedeutung kommt ebenfalls felsmechanischen Untersuchungen zu (Scherversuche, Biaxial- und Triaxialtests, Kriechversuche). Mit diesen können wichtige elastische Moduln

(Schermodul, Kompressionsmodul, Poissonzahl) und die besonders für das geomechanische Langzeitverhalten wichtigen Kriechparameter bestimmt werden.

3.3.2.1 Unsicherheiten und Extrapolation

Bei vielen Labormessungen enthält die eigentliche Messung Unsicherheiten, die als gering eingestuft werden, vor allem wenn die Probenahme und Versuchsdurchführung nach standardisierten Verfahren erfolgen, für die verschiedene DIN bzw. EN existieren (DIN EN 1997-1 bis 1997-3) /SMO 01/. In diesen Fällen ist die zu erwartende Streuung, bzw. nötige Zahl von Wiederholungsmessungen angegeben. Die Durchführung von Labormessungen nach standardisierten Verfahren ist ebenfalls nötig um Variabilität zu minimieren, die durch die Anwendung von unterschiedlichen Messmethoden entsteht. Zum Beispiel hat die Messmethodik Auswirkungen bei Porositätsmessungen an Tonen (Abb. 3.4).

Größte Unsicherheit bezüglich der Messung besteht in der Regel in der Angabe eines charakteristischen Wertes, welcher häufig nur nach empirischen Beziehungen und/oder statistischen Methoden aus dem Labor- oder Feldversuch ermittelt werden kann. Trotz dieser Unsicherheit liefern Kernmessungen direkt am Gestein gemessene Daten. Allerdings hat das Gestein durch den Bohrvorgang, das Kernens und die Probenahme eine nicht unwesentliche Veränderung erfahren, so dass das Ergebnis gegenüber den ungestörten Verhältnissen abweicht. Weiterhin stellt sich für jede Messung die Frage, ob das Ergebnis überhaupt für verschiedene Skalen anwendbar ist. So ist zum Beispiel bekannt, dass die gemessene Scherfestigkeit eines Gesteins von der Größe der Probe (bzw. von der Größe der Messapparatur) abhängt (siehe zum Beispiel /BRA 93/).

Figure 11: Porosities measured with different methods

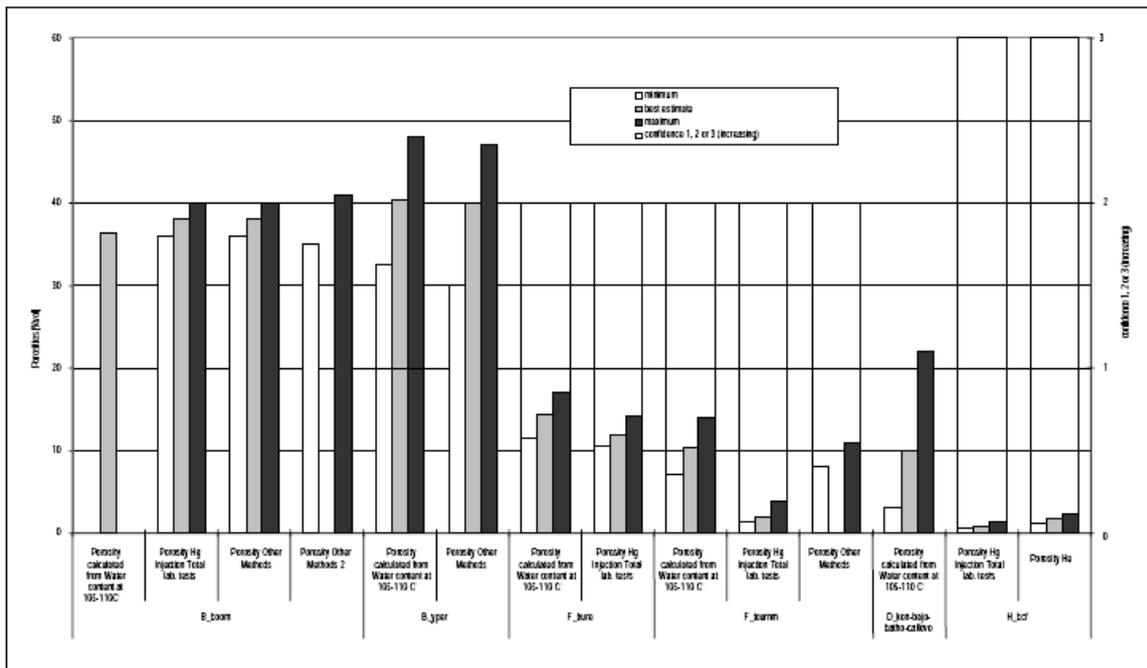


Abb. 3.4 Porositätsmessungen und ihre Ergebnisse mit unterschiedlichen Methoden (aus /NEA 05/)

3.3.2.2 Bewertung

Eine Kernbohrung mit Laboruntersuchungen kann die meisten Anforderungen an die Daten erfüllen. Die größten Unsicherheiten verbleiben bei der Extrapolation der Einzelmessungen auf die Formation und zwischen den Bohrungen bzw. auf das Untersuchungsfeld, so dass die räumliche Charakterisierbarkeit ausschließlich mit Labormessungen nicht möglich ist. Das gleiche gilt für die Anforderungen der günstigen Konfiguration vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich und der guten Prognostizierbarkeit. Für die verbleibenden Anforderungen sind Labormessungen gut oder sogar sehr gut geeignet (Tab. 3.1).

Hinsichtlich der Parameter Porosität Durchlässigkeitsbeiwert zeigt Kompilation von Porositäts- und Permeabilitätsdaten von Tongesteinen verschiedener Kompaktionsgrade aus einer Zusammenstellung von Labordaten nach /NAG 02c/, dass die Anforderungen an den ewG im Tonstein bei entsprechender Teufe erfüllt werden kann (s. Abb. 3.5).

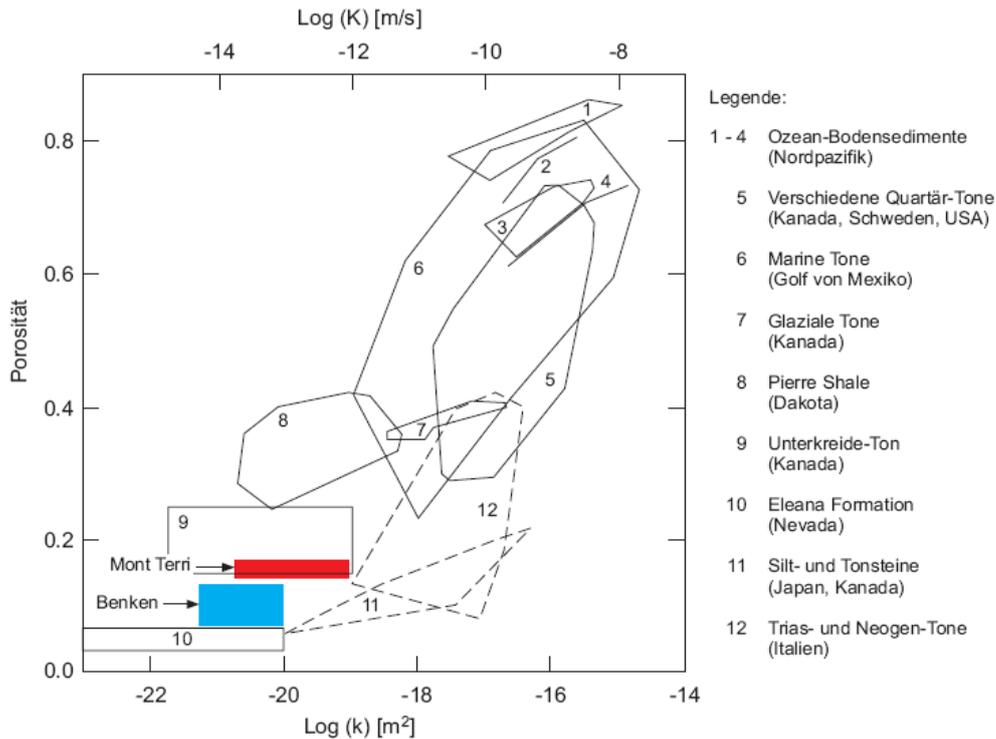


Abb. 3.5 Kompilation von Porositäts- und Permeabilitätsdaten von Tongesteinen verschiedener Kompaktionsgrade. Zusammenstellung von Labordaten nach Neuzil (1994a). Vergleich mit den Ergebnissen aus Benken und Mont Terri. (aus /NAG 02c/)

Für die Anforderungen an die Datenerfassung sind Labortests in der Regel ebenfalls gut oder sehr gut geeignet.

Für die Extrapolation der Ergebnisse auf die gesamte zu untersuchende Fläche gelten dieselben Einschränkungen wie für in-situ Versuche.

3.3.3 Chemische Labor- und in-situ Untersuchungen

Zusätzlich zu den in Abb. 3.3 gegebenen physikalischen Parametern können aus dem Material der Kernbohrungen auch geochemische Informationen gewonnen werden. Hierzu gehören vor allem Sorptions- und Diffusionsuntersuchungen am Bohrkernmaterial. Des Weiteren wird die Bestimmung der geochemischen in-situ Bedingungen durch Wasserextraktion und anschließender geochemischer Modellierung vorgenommen.

Die Sorption kann in Batch-Experimenten an zerkleinertem Probenmaterial untersucht werden. Der dabei bestimmte K_d -Wert ist abhängig vom Feststoffgehalt und der Konzentration der eingesetzten Radionuklide. Weiterhin kann der K_d -Wert mit Hilfe von Diffusionsexperimenten bestimmt werden. Die Diffusion im Tonstein ist abhängig von der Richtung: sie findet parallel der Schichtung schneller statt als im rechten Winkel dazu, da sich durch die Auflast weiterer Sedimente die Tonminerale parallel der Schichtung ausgerichtet haben /PSI 04/. Laboruntersuchungen bieten hier die Möglichkeit die unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeiten zu messen. In-situ Experimente haben dagegen den Vorteil, dass sie unter den exakten in-situ Bedingungen durchgeführt werden und somit eine Grundlage für den Vergleich zwischen den Ergebnissen der Batch-Experimente und der Labor-Diffusionsuntersuchungen bieten /PSI 04/.

Die geochemische Zusammensetzung des Porenwassers im Tonstein kann nicht direkt bestimmt werden, sondern muss erst extrahiert werden. Dies kann durch Zentrifugation, Auspressen, Vakuumieren oder durch Austausch von Ionen gehen /SAC 01/. Je nach Extraktionsmethode verändern sich physikalische Parameter wie z. B. der CO_2 -Partialdruck, die Temperatur oder der Redoxzustand im Tonstein, was zur chemischen Veränderung des Porenwassers z. B. durch Auflösen oder Ausfällen von Mineralphasen führt. Um die Zusammensetzung des Porenwassers korrekt modellieren zu können, wird daher eine mehrstufige Extraktion bei verschiedenen Feststoff/Lösungsmittel-Verhältnissen und mit unterschiedlichen Lösungsmitteln bevorzugt /SAC 01/.

3.3.3.1 Unsicherheiten und Extrapolation

Die große Unsicherheit in den Labor Untersuchungen sind die geochemischen Bedingungen im Tonstein. Die Parameter pH, Eh, O_2 , pCO_2 , Ionenstärke sind für das Porenwasser in-situ schwer zu messen und werden daher in den meisten Fällen über Modellrechnungen bestimmt /NAG 02a, SAC 01/. Die gemessenen K_d -Werte aus den Batch- und Diffusionsexperimenten sind nur vergleichbar, wenn sie unter den gleichen geochemischen Bedingungen durchgeführt werden /NAG 02a/. In-situ Messungen umgehen das Problem der korrekten Einstellung der geochemischen Bedingungen. In den in-situ Experimenten muss darauf geachtet werden, dass es nicht zu konvektivem Transport innerhalb des Packersystems kommt. Dies ist insbesondere in tiefen Bohrlöchern ein großes technisches Problem.

Ein einmal gemessener K_d -Wert oder Diffusionskoeffizient ist unter den gegebenen geochemischen Bedingungen des durchgeführten Experiments gültig. Wird von einem homogenen Tonsteinstandort ausgegangen, so sind die bestimmten Werte für den gesamten Standort

gültig. Ändern sich jedoch die geochemischen Bedingungen, muss auch ein anderer K_d -Wert und Diffusionskoeffizient bestimmt werden. Daher sollten die geochemischen Bedingungen in Batch-Experimenten auch geändert werden um mögliche zukünftige Veränderungen im Tonstein ebenfalls Modellieren zu können.

Bei der Bildung des Tonsteins kann es zu lokalen Unterschieden in der Mineralzusammensetzung kommen. Durch z. B. einen höheren Karbonatgehalt kann sich dadurch auch das geochemische Milieu verändern. Das extrahierte Porenwasser muss somit nicht für den gesamten Tonstein gültig sein. Eine weitere Unsicherheit ist die Modellierung nach der Extraktion des Porenwassers. Das betrachtete System mit Tonmineraloberfläche, daran gebundene Ionen und Wassermoleküle und das „freie“ Wasser sind ein sehr komplexes System, das nicht leicht zu verstehen ist /NAG 02a, SAC 01/.

3.3.3.2 Bewertung

Die Messung der geochemischen in-situ Bedingungen ist durch die Extraktion des Porenwassers und anschließender Modellierung anspruchsvoll. Die Durchführung von Sorptions- und Diffusionsexperimenten ist technisch nicht besonders aufwendig und somit im Labor einfach zu bewerkstelligen. Eine in-situ Messung erfordert dagegen einen höheren technischen Aufwand.

Für die Skalierung der gewonnenen Messdaten auf den Tonsteinstandort sind die in-situ Experimente wichtig, da sie unter den geochemischen in-situ Bedingungen durchgeführt wurden. Die gewonnenen Labordaten lassen sich nur Vergleichen, wenn diese unter den gleichen Bedingungen gemessen wurden. Die gemessenen Werte sind in einem homogenen Tonsteinstandort für den gesamten Standort gültig.

3.3.4 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Der große Vorteil von geophysikalischen Bohrlochmessungen („Logs“) gegenüber Laboruntersuchungen an Kernen liegt in der Kontinuität der Datengrundlage. Der Aufwand einen Bohrkern, der zudem nicht unbedingt vollständig vorhanden ist, komplett zu beproben und an diesen Proben die umfangreichen Messungen durchzuführen, ist groß. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Daten „in-situ“, also im Gestein selbst, erhoben werden. Dabei ist die Orientierung der Sonden bekannt, so dass unmittelbar Richtungsabhängigkeiten der Eigenschaften (Anisotropie) festgestellt werden können. Zusätzlich können die gewonnenen Kerne mit Hilfe

dieser Messungen orientiert werden. Das Gestein hat zwar durch den Bohrvorgang eine Änderung erfahren, die aber gegenüber dem Kernvorgang und des Transports nach über Tage geringer ausfällt. Beispielsweise zerfällt ein Bohrkern oft in kleinere Einzelteile oder kann nicht vollständig geholt werden, so dass eine weitere Untersuchung im Labor erschwert oder unmöglich wird. Darüber hinaus liefert die Messung bei vielen Untersuchungsmethoden nicht nur Informationen der Bohrlochwand, sondern ebenso aus umgebendem Gestein, da einige Messungen eine Eindringtiefe von mehreren Dezimetern haben.

Es existiert eine Vielzahl von Methoden, die ein Gestein detailliert bemessen können. Sie lassen sich aufteilen in /BOU 93/:

- Seismische (akustische) Messungen (z. B.: VSP)
- Elektrische/Elektromagnetische Messungen (z. B.: Widerstand, Radar, NMR)
- Kernphysikalische Messungen (z. B.: Gamma, Neutronen)
- Andere Messungen (z. B.: Durchmesser, Temperatur)

Die gewonnenen Daten dienen als Ganzes zur Charakterisierung einer geologischen Formation. Mit geeigneten Auswertemethoden, die vorwiegend statistischer Natur sind, lassen sich für jede Formation folgende Eigenschaften gut bestimmen /BOU 93/:

- Lithologie (Tongehalt, Dichte, Korngröße),
- Stratigraphie (Mächtigkeit, Sedimentstruktur),
- Strukturgeologie (Störungen, Klüfte),
- Hydrogeologie (Porosität, Sättigung, Wassergehalt, Sekundärpermeabilität durch Klüftung),
- Dynamische elastische Parameter (Moduln, Poisson-Zahl).

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, einzelne Gesteins- und/oder Fluidproben aus der Bohrlochwand zu entnehmen und im Labor zu untersuchen. Es können formationsunabhängige Daten erhoben werden, die von der Lokation des Bohrstandorts abhängen, wie Gebirgsspannung und Temperatur. Mit FMI/FMS/UBI Messungen können Störungen und Klüfte kartiert werden, so dass eine nachträgliche Orientierung der Kerne möglich wird /NAG 01b/.

„Vertical Seismic Profiling“ (VSP) und „Crosshole“ – Seismik werden durchgeführt, um detaillierte Informationen über Formationsgeschwindigkeiten zu gewinnen und so die Seismikmessungen zu kalibrieren und die Genauigkeit zu verbessern.

3.3.4.1 Unsicherheiten und Extrapolation

Unsicherheiten während geophysikalischer Bohrlochmessungen entstehen primär oft dadurch dass die Sensoren einer Bohrlochsonde keinen oder nur unvollständigen Kontakt zur Bohrlochwand haben. Kontrollierbar ist dieser Effekt besonders durch die Messung des Bohrlochdurchmessers (Kaliber, „Caliper“), der sogenannte Bohrlochausbrüche in mechanisch instabilen Formationen detektieren kann.

Jede der technisch meist sehr aufwändigen Bohrlochmessmethoden ist mit Messungenauigkeiten behaftet, die in der Regel bei wenigen Prozent liegen. Beispielsweise liegt die Fehlerquote bei NGR-Messungen (Natürliche Gamma Strahlung) unabhängig vom Hersteller der Sonden bei ca. 5 % /SER 08/. Die weitaus größte Unsicherheit entsteht aus mehreren Gründen bei der Interpretation der Messung. Zunächst kann das gemessene Signal, zum Beispiel wiederum die natürliche Gamma-Strahlung einer Formation, nur einem Elementgehalt (Kalium, Uran, Thorium) zugeordnet werden. Dieser Elementgehalt kann bestimmten Mineralen und damit einem bestimmten Gesteinstyp zugeordnet werden. Viele Messungen liefern zudem nur indirekte Gesteinseigenschaften. So wird zum Beispiel die Porosität einer Formation über den Wasserstoffgehalt bestimmt, der aber aus Wasser, Kohlenwasserstoffen oder aus mineralgebundenem Wasser stammen kann. In der Regel ist die Bestimmung des Gesteinstyps aufgrund nur einer Messung nicht ohne weiteres möglich. Deshalb wird mit statistischen Methoden (zum Beispiel Diskriminanz- oder Clusteranalyse /KOC 03/) die Gesamtheit der Messergebnisse einer Formation zugeordnet.

Ein Vorteil gegenüber Labormessungen ist, dass keine Skalierung der Messung stattfinden muss, da die Messung in-situ durchgeführt wird. Eine Kalibration der Bohrlochmessungen mit der Kernlithologie und den im Labor gemessenen Kerndaten ist aber oft notwendig und führt zu großen Verbesserungen der Interpretation. Wie bei anderen in-situ Messungen (Kap. 3.3.1.1) ist eine Interpolation zwischen einzelnen Bohrungen nötig, hier werden ebenfalls statistische Methoden zur Bohrlochkorrelation und die Ergebnisse der 3D-Seismik genutzt.

3.3.4.2 Bewertung

Geophysikalische Bohrlochmessungen können viele der Anforderungen an die Daten erfüllen. Im Vergleich zu Kernmessungen sind sie weniger genau und erfordern größeren Interpretationsaufwand. Allerdings bieten Bohrlochmessungen für einige Anforderungen große Vorteile. So sind sie die einzige Möglichkeit den Temperaturgradienten im Bohrloch kontinuierlich zu erfassen. Weiterhin kann nur mit dieser Methode ein kleinräumiges Kluft- oder Stö-

runssystem, für welches seismische Methoden zu grobauflösend sind, über die gesamte Teufe erkannt und kartiert werden. Größtenteils geeignet sind Bohrlochmessungen um die Anforderungen an die günstige Konfiguration von Wirtsgestein und ewG sowie an die günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen zu erfüllen. Um die Anforderungen an keinen oder langsamen Transport durch das Grundwasser im Endlagerniveau zu überprüfen sind Bohrlochmessungen nur teilweise geeignet.

Die Anforderungen an die Datenerfassung können Bohrlochmessungen nur teilweise erfüllen. Insbesondere im Vergleich zu Kernmessungen ist die Qualität der Daten geringer, bietet aber dagegen den Vorteil der kontinuierlichen Datenerfassung.

3.4 Synthese der übertägigen Untersuchungen

Die vorangegangenen Kapitel machen deutlich, dass nur eine sinnvolle Kombination aus mehreren Untersuchungsmethoden geeignet ist, um einen möglichen Endlagerstandort übertägig zu untersuchen. Diese Kombination ist auch außerhalb der Endlagerproblematik Stand von Wissenschaft und Technik, sowohl in der Industrie (KW- und Erzexploration) als auch in internationalen Großforschungsvorhaben (IODP, ICDP). Die Auslegung der Untersuchungen muss allerdings endlagerspezifisch erfolgen.

Im Wesentlichen bedingen zwei Sachverhalte die notwendige Kombination der Untersuchungen:

1. In vielen Fällen kann nur eine einzige Methode die erforderlichen Informationen/Daten erbringen. Dies ist beispielsweise bei der Untersuchung der räumlichen Charakterisierbarkeit der Fall, mit der die Homogenität des ewG möglichst weitreichend nachgewiesen werden soll.
2. Keine der Messmethoden kann den „wahren“ Wert bestimmen. Mehrfachmessungen mit verschiedenen Methoden können zur Kalibration und zur Überprüfung dienen. Falls zum Beispiel geophysikalische Bohrlochmessungen und Labormessungen eines Parameters große Unterschiede aufweisen, lassen sich Rückschlüsse darüber ziehen inwieweit die Kern- und Probennahme zu einer Veränderung des Gesteins geführt haben.

Eine abschließende Bewertung, inwieweit die Anforderungen an die Datenerfassung mit einer Kombination der verschiedenen Messmethoden erfüllt werden können zeigt Tabelle 3.2. Größtenteils können sehr gute bis gute Ergebnisse erzielt werden. Besonders geeignet ist

die Kombination einer 3D Seismik mit Kernuntersuchungen im Labor bzw. in-situ Messungen im Bohrloch. Beide Methoden ergänzen sich hervorragend. Anforderungen an die Datenerfassung, die die Messung von direkten Gesteinseigenschaften erfordern sind am besten abgedeckt durch eine Kombination aus Labor/in-situ Messungen mit geophysikalischen Bohrlochmessungen.

3.4.1 Erkundungsaufwand übertage

Der übertägige Erkundungsaufwand zum Vergleich zweier Standorte wurde wissenschaftlich in der Studie /GOL 09/, die Rahmen eines Forschungsauftrages des BfS „Anforderungen an Methoden und Umfang der über- und untertägigen Erkundung eines Salzstockes für ein Endlager unter Einbeziehung eines internationalen Vergleichs“ durchgeführt wurde, und technisch bzw. kostenseitig in einer BfS-Studie /BFS 03/ hinterfragt.

In diesem Kapitel wird zusammengefasst, in welchem Maße das BfS den übertägigen Erkundungsaufwand für einen möglichen Endlagerstandort abschätzt /BFS 09/. Es wird versucht anhand der oben geführten Bewertung eine kurze Einschätzung über den Erkundungsnutzen des vorgeschlagenen Konzeptes zu geben.

Der BfS-Vorschlag geht von einer 2D Seismik aus, die etwa 150 km² abdeckt, mit einem Profilabstand von ca. 1500 m. Das ideale Raster der Profillinienverteilung ergibt somit eine Profillänge von 245 km (im BFS Vorschlag sind 200 km angegeben). Die Lücken, die sich im Raster ergeben sind ca. 2,25 km² groß. Die Zuordnung der abzurückenden Kriterien sind Barrieremächtigkeit, Grad der Umschließung des Wirtsgesteins durch den ewG, Teufe der oberen Begrenzung der erforderlichen ewG, flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit. Diese Kriterien decken sich weitestgehend mit den hier angewandten Kriterien der Homogenität und der räumlichen Trennung. Eine 2D Seismik wurde als gut geeignet beurteilt, ist allerdings mit der Einschränkung der erforderlichen Skalierung behaftet. Generell wird aus diesem Grund eine 3D Seismik als besser geeignet bewertet.

Weiterhin soll im BfS Vorschlag eine 3D Seismik durchgeführt werden, die - soweit es beurteilt werden kann – in etwa der Auslegung der NAGRA Messkampagne entspricht /NAG 01a/. Das abzurückende Kriterium soll hier das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit sein. Da die Messdaten einer 3D Seismik also vorliegen, liegt die Anwendung der 3D Seismik auf die im vorigen Absatz abzurückenden Kriterien für eine 2D Seismik nahe. Für die durch eine 2D Seismik abzurückenden Kriterien würde dies einen er-

heblichen Mehrwert an Information bedeuten. Gleichzeitig fände dadurch eine Überprüfung der 2D Seismik Daten statt.

Es ist vorgesehen, insgesamt 5 Bohrungen abzuteufen, etwa in Anordnung einer „5“ auf einem Würfel (VerSi Arbeitstreffen 12.11.09). In diesen Bohrungen wird eine Reihe von in-situ Tests vorgesehen. Durchgeführt werden sollen 2 hydraulische Packertests pro Bohrung in der Endlagerformation, 4 Tests zur Bestimmung des hydraulischen Potentials im WG und Endlagerhorizonts, 5 Hydro-Frac Tests zur Bestimmung Gebirgsdruckfestigkeit, 3 hydraulische Tests für repräsentative Gebirgsdurchlässigkeiten und 4 hydraulische Tests im Deckgebirge für Permeabilität und Porosität. Die abzuprüfenden Kriterien sind zu umfangreich um sie nochmals einzeln aufzuzählen, Hauptaugenmerk liegt auf den Kriterien des A – Bereichs im Kriterienkatalog des BfS.

Die nötige Anzahl von Bohrungen zur Charakterisierung der geologischen Einheiten a-priori zu bestimmen ist nicht möglich. Die Positionierung von 5 Bohrungen, mit einer Bohrung in der Mitte und 4 weiteren an den Seiten bzw. „Ecken“ der begrenzenden Untersuchungsfläche stellt möglicherweise ein Mindestmaß dar. Inklusiv der Korrelation mit den geophysikalischen Bohrlochmessungen und der Kalibration mit der Seismik kann ausschließlich auf diesem Weg eine Kontinuität/Homogenität der Fazies bewiesen werden. Ebenfalls sehr gering erscheint die Anzahl in-situ Tests. Möglicherweise ist dies eine Folge des „Referenzfalls Tonsteinstandort“. Da in diesem Modell nur 2 Einheiten implementiert sind (Deckgebirge und ewG) die jeweils eine Fazieseinheit bilden, reicht rein rechnerisch die vorgeschlagene Anzahl der in-situ Tests aus, um eine Einheit zu charakterisieren. Da vermutlich in dem zu realisierenden Endlager auch innerhalb einer geologischen Stufe mehrere, leicht unterschiedliche Fazies anzutreffen sein werden /DBE 07/, ist vor diesem Hintergrund damit zu rechnen, dass die prognostizierte Anzahl der in-situ Tests nicht ausreichen wird um eine Einheit im Detail vollständig zu charakterisieren.

Geophysikalische Bohrlochmessungen mit VSP (Vertical Seismic Profiling) in jeder Bohrung sollen genutzt werden, um den Grad der Umschließung des Wirtsgesteins durch den ewG zu überprüfen. In der Tabelle „Erkundungsaufwand“ sind Untersuchungen zum Trennflächengefüge, insbesondere im Zusammenhang mit der Entnahme von orientierten Kernen nicht explizit erwähnt (im Text des BFS ist dies der Fall). Eine Möglichkeit, die zum Beispiel von der NAGRA angewandt wurde /NAG 01b/ ist die Erfassung des Trennflächengefüges mit geophysikalischen Bohrlochmessungen (z. B. FMI/FMS) und die anschließende Korrelation mit den gescannten Kernen. Bohrlochmessungen können somit wesentlich zu den abzuprüfenden Kriterien A6, der Anforderung „Geringe Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkei-

ten“, beitragen. Dies ist vor allem bedeutsam, da nachgewiesen werden soll, dass Transport im Tonstein ausschließlich diffusionsgesteuert ist. Eine Ausweitung der geophysikalischen Messungen erscheint vor diesem Hintergrund sinnvoll.

Im Labor sollen 2 Permeabilitätstests an Bohrkernen der Endlagerformation pro Bohrung durchgeführt werden. Zusätzlich werden 9 Laboruntersuchungen an Bohrkernen zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten pro Bohrung durchgeführt. Die Formulierung „auch aus dem Endlagerhorizont“ legt nahe, dass diese 9 Untersuchungen sich als Ganzes auf das Deckgebirge, den ewG und das Endlagerhorizont beziehen. Für die gesteinsmechanischen Untersuchungen sind 50 Tests geplant, laut Kostenabschätzung /BFS 03/ für 3 Bohrungen. Weiterhin kommen eine nicht näher spezifizierte Anzahl von Laboruntersuchungen zur Petrologie, Tonmineralogie, Strukturgeologie der Kerne sowie hydrochemische Untersuchungen des Porenwassers hinzu. Die Anzahl der geplanten Labortests erscheint gering. Dies mag ebenfalls dem generischen Standortmodell geschuldet sein, so dass bezogen auf die Modellvorstellung die Anzahl der Tests ausreicht. Die gesteinsmechanischen Untersuchungen sind meist mit der Zerstörung des Prüfkörpers verbunden, weiterhin benötigt man für die Bestimmung einer Eigenschaft (z. B. Moduln) oft mehrere Tests mit möglichst ähnlichen Prüfkörpern. Ob dies bereits in der Anzahl der geplanten Untersuchungen berücksichtigt ist, ist unbekannt. Falls 50 Tests die Gesamtzahl der gesteinsmechanischen Labortests sind, erscheint diese Anzahl ebenfalls gering.

Insgesamt stellt die vom BfS durchgeführte Abschätzung „Aufwand für die übertägige Erkundung eines Tonsteinstandortes“ den mindestens notwendigen Erkundungsaufwand für einen idealen Standort, den des Referenzfalls Tonstein, dar. Um den tatsächlichen Standortvergleich an zwei realen Standorten durchführen zu können muss vermutlich mit einem – teilweise erheblichen – Mehraufwand gerechnet werden.

Tab. 3.1 Anforderungen an die Daten. Die Bewertung bezieht sich darauf, wie gut/schlecht eine Anforderung gemessen werden kann: (5 sehr gut, 4 gut, 3 mittel/Abschätzung, 2 schlecht 1 nicht).

		2D Seismik	3D Seismik	In-situ Tests	Logging	Labortests
1. Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerneiveau	Tonanteil	2	2	4	4	5
	Gebirgsdurchlässigkeiten (Permeabilität der Tonsteinformation und deren Anisotropie im Poren- u. Klufttraumsystem)	1	1	5	3	5
	repräsentative Porendruckdiffusionskoeffizienten	1	1	5	1	5
	Porenwasserdrücke und hydraulische Gradienten	1	1	5	1	5
	Nuklidspezifische Sorptionskoeffizienten	1	1	1	1	5
2. Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und ewG	Mächtigkeit	4	5	5	5	1
	Teufenlage	4	5	5	5	1
	flächenhafte Ausdehnung	4	5	1	1	1
	Lage des ewG	3	5	5	1	1
	Identifizierung von Lagerstätten und Besonderheiten	3	5	1	1	1
3. Gute räumliche Charakterisierbarkeit	Beschreibung bzgl. "Homogenität", Einfacher geologischer Bau, Mächtigkeit, Ausdehnung	3	5	2	2	2
	Historie der Regionalgeologie und Ablagerungs- bzw. Versenkungsgeschichte	3	5	2	2	2
4. Gute Prognostizierbarkeit	Beschreibung bzgl. Teufenlage, Mächtigkeit, Ausdehnung, Gebirgsdurchlässigkeit, Gebirgsmechanische Integrität	3	5	4	3	4
	Historie der Geologie am Standort	3	4	4	4	4
	Prognose der Änderung von Gebirgsdurchlässigkeiten und Diffusionskoeffizienten	1	1	3	1	5
	Prognose der Änderung von Matrix- bzw. Kluftporositäten, bzw. Kluftabstände, Kluftdichte, Matrixeindringtiefe (Matrixdiffusion) der hangenden und liegenden Schichten	1	1	5	1	5
5. Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen	Historie der Tektonik des Standortes	3	5	1	1	1
	Identifizierung von Verwerfungen durch Neotektonik	3	5	1	1	1
	Gebirgsmechanische Stabilität / Gebirgsdruckfestigkeit	1	1	5	3	5
	Teufenlage des Endlagerhorizonts	3	5	5	4	1
	Mineralogie der Gesteine des Endlagerhorizonts	1	1	3	4	5
	Lagerungsverhältnisse und Gebirgsspannungsfeld	2	4	5	5	4
	Diagenesegrad und Verfestigungsgrad	2	2	5	4	5
Kriterien der bautechnischen Eignung	1	1	3	2	5	

Fortsetzung von Tab. 3.1

6. Geringe Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten	Beschreibung der plastischen und viskoplastischen Eigenschaften, hydraulische Selbstheilung	1	1	2	1	5
7. Gute Gasverträglichkeit	Mögliche Kohlenwasserstoffbildung	1	5	3	4	5
	2-Phasenflussparameter	1	1	1	1	5
	Anisotropie der Permeabilität	1	1	3	1	5
	Porosität	1	1	3	5	5
	Porendiffusionskoeffizienten	1	1	3	1	5
8. Gute Temperaturverträglichkeit	Teufenlage und geotherm. Gradient	3	4	5	5	1
	Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität	1	1	1	4	5
	Diageneseegrad und Tonmineralogie	1	1	3	4	5
	Maximale erfahrene Temperatur	1	1	1	1	5
	Beschreibung der plastischen und viskoplastischen Eigenschaften, hydraulische Selbstheilung	1	1	2	1	5
9. Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden	Diffusionskoeffizienten	1	1	4	1	5
	Sorptionsparameter	1	1	1	1	5
	Tonmineralogie und Mineralphasen	1	1	1	1	5
	Kolloidanteil und Komplexbildner	1	1	1	1	5
	Filtrationsfähigkeit	1	1	1	1	5
10. Günstige hydrochemische Voraussetzungen	Gleichgewicht	1	1	4	1	5
	ph-Wert, Redoxpotential, etc.	1	1	4	1	5
	Pyritgehalt, Karbonatgehalt	1	1	1	1	5
	Gehalt an Corg	1	1	1	1	5
	Komplexbildner	1	1	1	1	5

Tab. 3.2 Anforderungen an die Datenerfassung: Die Bewertung bezieht sich darauf, wie gut eine Anforderung mit den Messungen aus Tabelle 1 erfüllt werden kann. Die Bewertungsskala ist identisch mit Tabelle 3.1.

		Seismik			Bohrungen						Labor			Gesamt			
					Logging			In-situ Tests									
		E	U	S	E	U	S	E	U	S	E	U	S	Beste		S	G
														E	U		
1. Einschluss- und Barriereigenschaften des Wirtsgesteins	Hydraulische Eigenschaften	1	1	1	4	3	3-4	5	3	3-4	5	3	1-2	5	3	5	4
	Homogenität	5	4	5	4	4	3-4	2	3	3-4	1	1	1	5	4	5	5
	Diffusivität	1	1	1	1	1	1	5	3	3-4	5	3	1-2	5	3	5	4
	Sorptionseigenschaften	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	1-2	5	3	5	4
	Stabile geochemische Verhältnisse	1	1	1	2	4	3-4	4	3	3-4	5	3	1-2	5	3	5	4
	Unempfindlichkeit des Wirtsgesteins gegenüber alkalischen Lösungen	1	1	1	1	1	1	4	3	3-4	5	3	1-2	5	3	5	4
	Selbstheilungsvermögen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	1-2	5	3	5	4
	Gasspeichvermögen	1	1	1	2	4	3-4	4	3	3-4	5	3	1-2	5	3	5	4
	Temperaturverträglichkeit	1	1	1	4	4	3-4	5	3	3-4	5	4	1-2	5	4	5	5
2. Langzeitstabilität	Räumliche Trennung	5	4	5	5	5	3-4	5	3	3-4	1	1	1	5	5	5	5
	Gebirgshebungen und -senkungen	4	4	5	1	1	1	4	3	3-4	1	1	1	4	4	5	4
	Äußere Einflüsse																
	Innere Einflüsse																
	Gesteinsmechanische Parameter	3	2	5	4	4	3-4	4	4	3-4	5	4	1-2	5	4	5	5
3. Zuverlässigkeit geol. Aussagen	Prognostizierbarkeit																
	Explorierbarkeit																
4. Bautechnische Eignung	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	2	2	5	4	4	3-4	4	4	3-4	5	5	1-2	5	5	5	5
	Wasserhaltung und Instandsetzung	1	1	1	1	1	1	3	3	3-4	3	3	1-2	3	3	5	4

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Berichts hat die GRS Anforderungen für notwendige Informationen über einen Endlagerstandort (z. B. bezüglich Temperaturverträglichkeit, hydrochemische Verhältnisse) formuliert, um einen Tonsteinstandort für das Verbundprojekt „VerSi“ sinnvoll zu charakterisieren bzw. die bei der weiteren Differenzierung des Standortes zu berücksichtigen sind. In diesem Teil des Berichts werden Erkundungsmethoden beschrieben, die zu diesen Informationen und den Datensätzen der Parameter der sicherheitsanalytischen Modellierung führen. Übertägige Untersuchungen stellen dabei einen nötigen Schritt dar, um möglicherweise geeignete Endlagerstandorte in einem Vergleich detailliert zu untersuchen. Es werden Methoden der übertägigen Erkundung beschrieben und ihre Anwendbarkeit auf die aufgestellten Kriterien überprüft und bewertet. Dabei wird für die vergleichende Methodik des Projekt VerSi insbesondere der Vertrauensgrad zu den Daten, über die Messgenauigkeit der Erkundungsmethode als auch hinsichtlich des Upscaling der Messdaten in Raum und Zeit, eruiert und bewertet. Sie sind Grundlage einer Bewertungsmatrix zur Abwägung die im Verfahrensschritt 4: „Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der die SF charakterisierenden materiellen Eigenschaften (Parameter)“ des Vorhabens 3607R02589 (Evaluierung der Vorgehensweise) entwickelt wird. Für den Tonsteinstandort greift das Vorhabens 3607R02589 hierbei auf die Ergebnisse zur Aussagekraft übertägiger Untersuchungsmethoden im vorliegenden Bericht zurück.

5 Literatur/Unterlagen

- /AKE 02/ Arbeitskreis Endlagerung (AkEnd)
Auswahlverfahren für Endlagerstandorte
Empfehlungen des AkEnd, Dezember 2002
- /APP 01/ Appel, D.; Habler, W.:
Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung.
Bericht an den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS), 2001.
- /BAZ 06/ Bazer-Bachi F., Tevissen E., Descostes M., Grenut B, Meier P, Simonnot M.-O., Sardin M.; Characterization of iodide retention on Callovo-Oxfordian argillites and its influence on iodide migration; Physics and Chemistry of the Earth; 31; 517-522; 2006.
- /BFS 03/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Kostenschätzung für geowissenschaftliche Erkundungsmaßnahmen im Auswahlverfahren bis zur Entscheidung für einen Endlagerstandort, Abschlussbericht, August 2003
- /BFS 07/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes
Salzgitter, November 2007
- /BFS 09/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Aufwand zur beispielhaften Untersuchungstiefe für den Tonsteinstandort – BfS-Memo, Salzgitter, Oktober 2009
- /BGR 07/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe:
Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover, April 2007

- /BOU 93/ Boulding, J.R.:
Subsurface Characterization and Monitoring Techniques: A Desk Reference Guide, United States Environmental Protection Agency, EPA/625/R-93/003a, 1993
- /BMU 09/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Berlin, Juli 2009
- /BRA 93/ Brady E.H.G.; Brown, E.H.:
Rock mechanics for underground mining, 2. Aufl., ISBN 0-412-47550-2, 628 Seiten, Kluwer, Dordrecht, 1993
- /CHE 99/ Chen F., Burns P.C., Ewing R.C.: „79Se: geochemical and crystallochemical retardation mechanisms“, Journal of Nuclear Materials, 276, S. 81-94, (1999).
- /DBE 07/ DBE Technologie GmbH (DBEtec):
Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – GENESIS– Anlagenband; GENESIS - Geologie der Referenzregionen im Tonstein, Peine, März 2007.
- /DES 08/ Descostes M., Blin V., Bazer-Bachi F., Meier P., Grenut B., Radwan J., Schlegel M.L., Buschaert S., Coelho D., Tevissen E.; Diffusion of anionic species in Callovo-Oxfordian argillites and Oxfordian limestones (Meuse/Haute-Marne, France); Applied Geochemistry; 23; 655-677; 2008.
- /FER 06/ Fernández, R.; Cuevas, J.; Sánchez, L.; Vigil de la Villa, R.; Leguey, S.:
Reactivity of the cement-bentonite interface with alkaline solutions using transport cells; Applied Geochemistry; 21; 977-992; 2006
- /GAD 09/ Gadallah, M.R.; Fisher, R.:
Exploration Geophysics, 262 Seiten, ISBN: 978-3-540-85159-2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

- /GOL 09/ Goldsworthy, M.; Seidel, K., Popp, T.:
Anforderungen an Methoden und Umfang der über- und untertägigen Erkundung eines Salzstockes für ein Endlager unter Einbeziehung eines internationalen Vergleichs. BfS-Ressortforschungsbericht zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz, BfS-RESFOR-15/09, Salzgitter, August 2009
- /GRS 05/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Arbeiten zum Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager radioaktiver Abfälle, Abschlussbericht zum Vorhaben SR 2451, GRS-A 3275, Juni 2005
- /GRS 07/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, GRS-A-3358, Januar 2007
- /GRS 08a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Öko-Institut:
Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland (Handbuch der Endlager), Anhang Parameter, Endlagerspezifische Parameter - Messmethoden und Bedeutung, GRS September 2008
- /GRS 08b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Öko-Institut :
Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland (Handbuch der Endlager), Anhang Standorterkundung, Das geologische Endlagersystem: Gebirgsverhalten und Erkundungsmethoden, GRS September 2008
- /GRS 10a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Beuth, T.; Bracke, G.
Darstellung der Arbeiten zur Ableitung von Szenarien - Abschlussbericht Vorhaben VerSi- 3607R02580 „Szenarienentwicklung“, Köln, Februar 2010

- /GRS 10b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Larue, P. J.; Kock, I.; Seher, H.; Peiffer, F.
Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes, - Teil 1: Randbedingungen und Anforderungen an einem Tonsteinstandort, Teil 2: Standortcharakterisierung, Teil 3: Endlagerkonzept im Tonstein, Teil 4: Modellkonzept für ein Endlager im Salz - Abschlussberichte zum Vorhaben 3607R02538 „planerische Grundsatzfragen“, GRS-A-3535, Köln, Dezember 2010
- /GRS 10c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Fischer-Appelt, K.; Baltes, B.
Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, GRS-A-3536, Köln, Dezember 2010
- /GRS 10d/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Rübel, A.; Mönig, J.
Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein Endlager im Salz, WS2044, GRS-A-3521, Braunschweig, Oktober 2010
- /IFG 07/ Institut für Gebirgsmechanik GmbH:
Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlagerkonzept, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SR 2470, Leibzig, September 2007
- /KEA 95/ Keary, Ph.; Brooks, M.:
An introduction to Geophysical Exploration, 1995, 2. Aufl., 254 Seiten, ISBN 0-632-02923-4, Blackwell, London
- /KOC 03/ Kock, I.:
Auswertung und Interpretation von Bohrloch- und Kernmessungen der ODP-Bohrung 197, Site 1203A, zur petrophysikalischen Charakterisierung von vulkanischen Gesteinen des Detroit Seamounts (Hawaiian-Emperor Seamount Chain), Diplomarbeit, Applied Geophysics and Geothermal Energy E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen.

- /MIL 00/ W. Miller, W. R. Alexander, N. Chapman, I. McKinley, J. Smellie:
Geological Disposal of Radioactive Wastes and Natural Analogues, Vol. 2
of Waste Management Series, Pergamon Press, Amsterdam, 2000.
- /NAG 94/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägeren – Zürcher
Weinland, Technischer Bericht 94-14, 1995
- /NAG 01a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten
im Zürcher Weinland, Technischer Bericht 00-03, 2001
- /NAG 01b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht, Technischer Bericht 00-
01, 2001
- /NAG 02a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
TECHNICAL,REPORT 02-17,
A Comparison of Apparent Diffusion Coefficients Measured in Compacted
Kunigel V1 Bentonite with those Calculated from Batch sorption Measure-
ments and D_e (HTO) Data: A case Study for Cs(I), Ni(II), Sm(III), Am(III),
Zr(IV) and Np(V), December 2002
- /NAG 02b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
TECHNICAL,REPORT 02-14,
Stability and Mobility of Colloids in Opalinus Clay, December 2002
- /NAG 02c/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Project Opalinus, TECHNICAL,REPORT 02-03,
Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Entsor-
gungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive so-
wie langlebige mittelaktive Abfälle, Dezember 2002

- /NAG 02d/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Technischer Bericht 02-02, Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage
und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für
abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittel-
aktive Abfälle, Dezember 2002
- /NAG 04/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
TECHNICAL REPORT 04-07
Matrix Diffusion for Performance Assessment – Experimental Evidence,
Modelling Assumptions and Open Issues, Juli 2004
- /NAG 08/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA):
Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager,
Technischer Bericht 08-05, Oktober 2008.
- /NAV 09/ Navarro, M.:
Gasmigration aus einem Endlager in Tonstein unter Berücksichtigung dila-
tanter Gasmigrationswege, Studie im Rahmen des Vorhabens 3607R02538
- Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung
radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Köln, August 2009
- /NEA 05/ Nuclear Energy Agency:
Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks, Radioactive
Waste Management, , NEA No. 4436, ,OECD –NEA,Paris 2005
ISBN 92-64-01067-X
- /PUS 98/ Pusch et al.:
Chemical processes causing cementation in heataffected smectite –
The Kinnekulle bentonite. SKB Tech. Rep. TR 98-25, SKB, Stockholm,
Sweden.
- /PSI 04/ Paul Scherrer Institut (PSI):
PSI Bericht Nr. 04-03, Diffusion of HTO, $^{36}\text{Cl}^-$, $^{125}\text{I}^-$ and $^{22}\text{Na}^+$ in Opalinus
clay: Effect of Confining Pressure, Sample Orientation, Sample Depth and
Temperature, February 2004.

- /ROU 05/ Roussel-Debet S., Colle C.; Comportement de radionucléides (CS, I, SR, Se, Tec) dans le sol : proposition de valeurs de Kd par défaut; Radioprotection, 40, 2, 203-229, 2005.
- /RYA 96/ J. N. Ryan, M. Elimelech:
Colloid mobilization and transport in groundwater, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 107 (1996) 1–56.
- /SAC 01/ Sacchi, E.; Michelot, J-L.; Pitsch, H.; Lalieux, P.; Aranyossy, J-F.:
Extraction of water and solutes from argillaceous rocks for geochemical characterisation: Methods, processes and current understanding, Hydrogeology Journal 9 (201) 17-33.
- /SER 08/ Serra, O.:
The Well Logging Handbook, ISBN 978-2-7108-0912-8, Editions Technip, Paris, 2008.
- /SMO 01/ Smolczyk, U.:
Grundbau Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 6. Aufl., 783 Seiten, ISBN 3-433-01445-0, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2001
- /STU 96/ W. Stumm, J. J. Morgan:
Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, 3rd Edition, Environmental Science and Technology, ISBN 0-471-51184-6, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- /TUC 05/ TU Clausthal:
Endlagerstandorte, Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Abschlussbericht zum PSP-Element WS -0029, Clausthal, Januar 2005
- /ZHA 08/ Zhang, C., Rothfuchs, T., Dittrich, J., Müller. J.:
Investigations on Self-Sealing of Indurated Clay, Part of the NF-PRO Projects, Final Report, March 2008, GRS – 230, ISBN 978-3-939355-04-5

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Geosystem ewG im Tonstein.....	4
Abb. 3.1	Zusammenstellung hydrogeologischer Untersuchungsverfahren (nach /APP 01/) (aus /GRS 08b/).....	36
Abb.3.2	Werte von Durchlässigkeitsbeiwertmessungen aus in situ Verfahren und ihre Vertrauensgrade aus verschiedenen nationalen Endlagerstandortun- tersuchungen im Tonstein (aus /NEA 05/)	38
Abb. 3.3	Übersicht über Messmethoden im Labor (aus /GRS 08a/)	39
Abb. 3.4	Porositätsmessungen und ihre Ergebnisse mit unterschiedlichen Methoden (aus /NEA 05/)	41
Abb. 3.5	Kompilation von Porositäts- und Permeabilitätsdaten von Tongesteinen verschiedener Kompaktionsgrade. Zusammenstellung von Labordaten nach Neuzil (1994a). Vergleich mit den Ergebnissen aus Benken und Mont Terri. (aus /NAG 02c/).....	42

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Anforderungen an die Daten. Die Bewertung bezieht sich darauf, wie gut/schlecht eine Anforderung gemessen werden kann: (5 sehr gut, 4 gut, 3 mittel/Abschätzung, 2 schlecht 1 nicht).....	51
Tab. 3.2	Anforderungen an die Datenerfassung: Die Bewertung bezieht sich darauf, wie gut eine Anforderung mit den Messungen aus Tabelle 1 erfüllt werden kann. Die Bewertungsskala ist identisch mit Tabelle 3.1.....	53

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandort
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
EDZ	Excavation Damaged Zone
EWG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FMI	Formation Micro Imager
FMS	Formation Micro Scanner
GENESIS	Repository Evaluation performed by GRS and IRSN through a Modelling Exercise
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
HTO	Tritiierte Wässer
ICDP	International Continental Scientific Drilling Program
IODP	Integrated Ocean Drilling Program
K_d	Sorptionskoeffizient
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NMR	Kernspinresonanz
VerSi	Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien
VSP	Vertical Seismic Profiling
WG	Wirtsgestein

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de